

Evaluation of the seismic behavior of underground structures under different components of far and near-fault earthquakes

Ehsan Eslami¹, Hadi Dashti^{2*}, Seyed Alireza Kazerounian², Mahmoud Seraji²

1- Ph.D. Candidate. Department of Civil engineering, Bushehr branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

2- Assistant professor. Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

ABSTRACT

Underground structures such as subways are important during earthquakes because they are built under densely populated and sensitive areas, such as commercial buildings. The failure of these structures can lead to significant loss of life and financial costs. In this paper, the seismic behavior of a subway station at different depths is investigated by modeling the geometrical and structural information in the Opensees software. The model is based on information from the Daikai subway station in Japan, which was seriously damaged in the Kobe earthquake of 1995. The model includes both soil and structure components. Validation results show that the software model is valid for investigating seismic effects of underground structures under near and far-fault earthquakes in both horizontal and vertical components. The study examines the effects of changes in depth and field records of near and far-fault parameters on axial force, shear effects, acceleration, and relative displacement on the structure using time history analysis. The results indicate that increasing depth leads to a decrease in relative displacement of the middle column in far and near-fault earthquake, while also increasing axial force in the middle column in both far and near-fault and it shows that investigating the effect of the vertical component is very important for calculating the axial force of underground structures. Investigation of the displacement contour at the lowest depth under the horizontal component in the far-fault shows that the largest amount of displacement belongs to the upper slab of the structure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 April 2024

Revise Date: 01 June 2024

Accept Date: 04 July 2024

Keywords:

Underground structure
Far and near-fault earthquakes
Depth effects
horizontal and vertical
components
Seismic response

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.450547.3381](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450547.3381)

*Corresponding author: Hadi Dashti
Email address: hdashti1356@yahoo.com

ارزیابی رفتار لرزه ای سازه های زیرزمینی تحت مولفه های افقی و قائم زلزله های دور و نزدیک به گسل

احسان اسلامی¹، هادی دشتی^{2*}، سید علیرضا کازرونیان²، محمود سراجی²
۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

چکیده

سازه های زیرزمینی همانند مترو به دلیل اینکه در بیشتر موارد زیر مکان های پر جمعیت و حساسی مانند ساختمان های تجاری ساخته می شوند، از اهمیت بسیار زیادی در هنگام زلزله برخوردار بوده که در صورت خرابی منجر به هزینه های جانی و مالی فراوانی می شود. در این پژوهش با هدف بررسی رفتار لرزه ای سازه زیرزمینی ایستگاه مترو در عمق های مختلف، اطلاعات هندسی و سازه ای یک ایستگاه مترو در نرم افزار اینسیس مدل شده است. برای این منظور ابتدا اطلاعات مربوط به ایستگاه متروی دایکای واقع شده در کشور ژاپن که در زلزله کوبه سال 1995 دچار آسیب جدی شده، استخراج شده و مدل متشکل از خاک و سازه پیاده سازی شده است. نتایج صحت سنجی مدل ساخته شده با داده های موجود نشان می دهد که مدل نرم افزاری معتبر بوده و قابل استفاده برای بررسی اثرات لرزه ای سازه های زیرزمینی تحت زلزله های نزدیک و دور از گسل در دو مولفه افقی و قائم می باشد. بدین منظور با روش تحلیل تاریخچه زمانی اثر تغییرات پارامترهای عمق و رکوردهای حوزه دور و نزدیک به گسل بر نیروی محوری، اثرات برش، شتاب و جابجایی نسبی روی سازه بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که جابجایی نسبی ستون میانی در زلزله حوزه دور و نزدیک به گسل با توجه به افزایش عمق کاهش یافته و همچنین نیروی محوری ایجاد شده در هر دو حوزه دور و نزدیک در ستون میانی با افزایش عمق سازه، افزایش پیدا کرده است و نشان می دهد بررسی اثر مولفه قائم برای محاسبه نیروی محوری سازه های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می باشد. بررسی کانتور جابجایی در پایین ترین عمق تحت مولفه افقی در حوزه دور نشان می دهد که بیشترین میزان جابجایی مربوط به دال بالایی سازه می باشد.

کلمات کلیدی: سازه زیرزمینی، زلزله دور و نزدیک، اثرات عمق، مولفه افقی و قائم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.450547.3381	1403/12/30	1403/12/30	1403/04/14	1403/03/12	1403/01/18
			هادی دشتی hdashti1356@yahoo.com		*نویسنده مسئول: بست الکترونیکی:

1- مقدمه

همزمان با پیشرفت روزافزون فناوری و تکنولوژی، محدودیت‌های فضاهای سطح زمین برای اجرای پروژه‌های عمرانی و دستیابی به تکنولوژی‌های پیشرفته برای حفاری و ساخت و ساز در زیرزمین، توجه مهندسی در بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه را به احداث سازه‌های زیرزمینی معطوف کرده است. از جمله این سازه‌ها می‌توان به راه‌ها و بزرگراه‌های زیرزمینی، انواع تونل‌ها، شبکه‌های مترو، مخازن زیرزمینی، پناهگاه‌ها و انبارها اشاره کرد. به دلیل هزینه فراوانی که برای ساخت این قبیل سازه‌ها می‌شود و همچنین اهمیت آن‌ها در حمل و نقل بین شهری و داخل شهری و همچنین خطری که در صورت بروز آسیب در آن‌ها برای مردم و سازه‌های حساس مجاور آن‌ها در روی سطح زمین ایجاد می‌شود، لازم است که پایداری آن‌ها در برابر خطرات ناشی از زمین لرزه مورد بررسی دقیق قرار گیرد [1].

مطالعات بسیاری در گذشته تاکنون نشان داده‌اند، که رکوردهای مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند، به دلیل عواملی چون محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله، انعکاس و تفرق امواج، فاصله گرفتن از مرکز انتشار و همچنین تفاوت در نوع خاک در آن محل، با هم متفاوت بوده و ممکن است شتاب‌های مربوط به یک زلزله که در دو محل مختلف ثبت شده اند، با یکدیگر تفاوت‌هایی را داشته باشند. این تفاوت حتی در شتاب نگاشت‌های ثبت شده در فواصل نزدیک به هم نیز مشاهده شده است که این امر لزوم بکارگیری مفهوم تغییرات مکانی حرکت زمین در زمان زلزله را برای بکارگیری در آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها را ایجاب می‌کند [2]. عوارض توپوگرافی همچون دره‌ها و همچنین سازه‌هایی همانند تونل‌ها، متروها که در زیر زمین ساخته می‌شوند نیز، موجب پدیدار شدن اختلالاتی در انتشار امواج و همچنین انکسار و تفرق امواجی که از یک منبع زلزله می‌آیند، می‌گردد. عمده تحقیقات انجام شده روی این پدیده را می‌توان بعد از نصب اولین آرایه شتاب‌سنج‌های SMART-1 در اوایل دهه 80 دانست، زمانی که دسترسی به داده‌های حاصل از این شتاب‌سنج‌ها میسر شد، اطلاعات زیادی از این داده‌ها در مورد تغییرات مکانی زمین لرزه و عوامل موثر روی آن حاصل شد [3].

سازه‌های بزرگ و طولیل مانند پل‌ها، سدها و تونل‌ها که دارای گستردگی تماسی زیادی با سطح زمین هستند ممکن است تغییرات عمده در دامنه و فاز تحریک در تکیه گاه‌های مختلف تجربه کنند. تفرق امواج لرزه‌ای و تشدید آن‌ها توسط نامنظمی‌های موجود در ساختگاه نقش مهمی در تشدید جایجایی‌ها دار [4]، [5]. استفاده از تحریک یکنواخت برای چنین سازه‌هایی همانند سدها، پل‌ها، تونل‌ها چندان منطقی نیست. یکی از سازه‌های حساس زیرزمینی، مترو می‌باشد. این سازه‌ها به دلیل اینکه معمولاً در شهرهای پرجمعیت و در زیر مراکز تجاری و اقتصادی ساخته می‌شود از اهمیت و حساسیت فراوانی برخوردار می‌باشند [11]، [6]. یکی از نکاتی که در این قبیل سازه‌ها باید در نظر گرفته شود این است که به دلیل اینکه در اعماق زیاد ساخته نمی‌شوند، بر روی سازه‌های رو زمینی تاثیرگذار خواهند بود [7]. این پدیده تحت عنوان بزرگنمایی¹ ناشی از تفرق امواج لرزه‌ای در اثر برخورد با این سازه‌ها شناخته می‌شود. این پدیده تاکنون توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله آن‌ها می‌توان به بازیار و همکاران [8]، [9] اشاره کرد. ایشان در مطالعات خود با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و آزمایش روی نمونه‌های ساخته شده با وجود تونل و بدون تونل، بزرگنمایی ناشی از اثرات وجود سازه روی سطح زمین تحت شتاب‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود سازه زیرزمینی موجب تقویت تحریک ورودی با پریودهای بلند و تضعیف تحریک ورودی با پریود کوتاه می‌شوند.

عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی مستطیل به طور سیستماتیک با روش‌های نظری [10]، تجربی و رویکردهای عددی مورد بررسی قرار گرفت [11]، [12]. تاکنون محققین بسیاری رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی را با استفاده از روش‌های عددی و همچنین نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده اند. علی الهی و همکاران [13]، [14] نیز با استفاده از روش عددی المان مرزی توسعه داده شده در حوزه زمان به مطالعه پارامتری اثرات حفره‌های زیرزمینی روی بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین پرداختند. ایشان در مطالعه خود نشان دادند که حضور این سازه‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بزرگنمایی ایجاد شده ناشی از حفره‌ها در سطح زمین دارند. پنچی و همکاران [15]، [16] نیز با استفاده از روش المان مرزی، به بررسی اثرات سازه‌های زیرزمینی بر سطح زمین با وجود عارضه

¹ Amplification

توپوگرافی به شکل دره پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان دهنده اثرات متقابل این عوارض بر یکدیگر نسبت به حالت منفرد هر کدام از این سازه‌ها می‌باشد.

یکی از متروهای شناخته شده که توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته، ایستگاه مترو دایکای در ژاپن می‌باشد که در سال 1962 با استفاده از روش کند و پوش ساخته شده بود. این سازه در طی زلزله ویرانگر 1995 کوبه آسیب جدی دید. همین مساله موجب شد تا رفتار لرزه‌ای آن مورد توجه محققین قرار گیرد [17]. در سال 2019 ژو و همکاران [18]، [19] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، به مطالعه پارامتری رفتار لرزه‌ای این سازه پرداختند. ایشان پارامترهای مختلفی از جمله، جنس مصالح خاک اطراف سازه، چگالی بتن سازه، اعمال همزمان مولفه‌های افقی و قائم رکوردهای زلزله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که تغییر چگالی سازه تاثیر چندانی در تغییر مکان جانبی سازه ندارد و این رفتار متأثر از جنس مصالح خاک اطراف سازه نیز می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد ثبت حرکات زمین در زلزله‌های نزدیک به گسل این است که در ابتدا سازه در معرض انرژی ورودی بالایی قرار می‌گیرد و زلزله پتانسیل ایجاد صدمات قابل توجهی به سازه را دارد. این نکته باعث شده تا پاسخ به حرکات زمین در حوزه نزدیک به گسل در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کند. برای نمونه، اثرات حرکات زمین نزدیک به گسل بر بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند ساختمان و پل‌ها، در [20]، [21] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آکوس و سیمسیک [22] نیز پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی گرانشی را در معرض حرکات زمین در حوزه نزدیک و دور به گسل مورد مطالعه قرار داده‌اند. به بیان دیگر، حرکات زمین هنگام زلزله بر سد، آب، رسوب و سنگ در یک سد بتنی گرانشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های پلاستیکی سد در معرض حرکات زمین در حوزه نزدیک به گسل، بزرگتر از حوزه دور می‌باشد. هالدر و ریس سالازار [22] به بررسی اثر مولفه قائم زلزله و مقایسه آن‌ها در دو آیین نامه مختلف زلزله پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که در هر دو آیین نامه نیروی محوری ستون‌ها به طور قابل توجهی پایین تخمین زده شده است و این تخمین دست پایین برای ستون‌های خارجی کمتر از ستون‌های داخلی می‌باشد و در صورتی که نسبت بیشینه شتاب مولفه قائم به بیشینه شتاب مولفه افقی زلزله بیشتر از حد نرمال باشد، با افزایش این نسبت تخمین دست پایین زیاد می‌گردد و نیز دریافته‌اند که دست پایین بودن برآورد با ارتفاع قاب بی ارتباط می‌باشد.

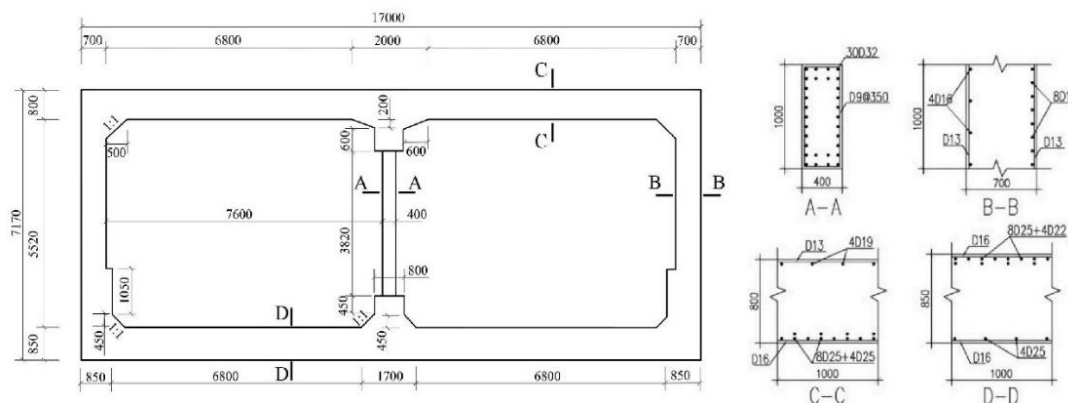
مرور ادبیات گذشته نشان می‌دهد که در مورد بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی و آسیب لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی مطالعات کمی انجام شده است. از آنجا که در حوزه بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی در عمق‌های مختلف با تغییر محتوای فرکانسی و اثر زلزله‌های قائم و افقی تحقیقات کمی انجام شده، در این پژوهش سعی شده رفتار لرزه‌ای این گونه سازه‌ها تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به گسل با در نظر گرفتن تغییر عمق تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله، مطالعاتی انجام شود. بدین منظور، با توجه به پیشینه تحقیق گفته شده مشخصات هندسی تونل مستطیل شکل ایستگاه متروی دایکای ژاپن به همراه اطلاعات موجود لایه‌های خاک اطراف آن که اطلاعات آن موجود است، انتخاب شده است. سپس سازه مورد نظر تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به گسل در سه عمق مختلف در نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی شده و به بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله جابجایی نسبی سازه، تغییر شکل‌های قائم آن، نیروی محوری ستون میانی، نیروی برشی تمام ستون‌ها، نحوه توزیع تنش در کانتور جابجایی و باقیمانده جابجایی در عمق‌های مختلف پرداخته شده است. این بررسی‌ها می‌تواند در نشان دادن قسمت‌های بحرانی سازه‌های زیرزمینی تحت بارگذاری لرزه‌ای به مهندسی کمک شایانی در طراحی این گونه سازه‌ها کند، که این موارد در بخش نتایج به طور مفصل توضیح داده شده است.

2- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی سازه و خاک باید تمام جزئیات مربوط به هر یک و همچنین شرایط مرزی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این بخش به معرفی خصوصیات هندسی سازه و ویژگی‌های لایه‌های خاک و همچنین نحوه مدل‌سازی و شرایط مرزی در نرم‌افزار اپنسیس پرداخته می‌شود، که در ادامه فرضیات هر قسمت به صورت جداگانه توضیح داده می‌شود.

1-2- خصوصیات هندسی ایستگاه مترو مورد مطالعه

همانطور که در مقدمه گفته شد، سازه زیرزمینی مورد مطالعه در این پژوهش ایستگاه متروی دایکای ساخته شده در سال 1964 در کشور ژاپن می باشد که تحت زلزله کوبه در سال 1995 آسیب جدی دید. در شکل 1 ابعاد هندسی و خصوصیات ایستگاه متروی دایکای ارائه شده است. چنانچه در این شکل نشان داده شده، عرض این ایستگاه 17 متر و ارتفاع آن 7/7 متر می باشد. ارتفاع ستون میانی 3/82 متر و عمق تونل از سطح زمین، 4/8 متر می باشد. به طور کلی تونل به 4 بخش ستون میانی (A-A)، ستون های کناری (B-B) دال بتنی بالایی (C-C) و پایینی (D-D) تقسیم شده است [23]. بنابراین سازه با ابعاد ذکر شده در نرم افزار قابل مدلسازی است.



شکل 1: خصوصیات هندسی ایستگاه مترو دایکای [23]

2-2- لایه های خاک

بدون شک ویژگی لایه های خاکی که سازه در آن قرار گرفته بر پاسخ نهایی سازه تاثیر دارد، که در این بخش به جزئیات آن پرداخته شده است. همانطور که در شکل 2 قابل مشاهده می باشد، خاک اطراف تونل از 5 لایه مختلف تشکیل شده که تونل در لایه سوم و بخشی از لایه چهارم قرار گرفته است. این نکته در مش بندی خاک برای مدلسازی حائز اهمیت می باشد که در شکل 3 ابعاد کلی مدل و همچنین مش بندی انجام شده رسم شده است. جزئیات بیشتر مش بندی در بخش 2-3-3 توضیح داده شده است. در جدول 1 نیز خصوصیات فیزیکی لایه های خاک ارائه شده است [25].

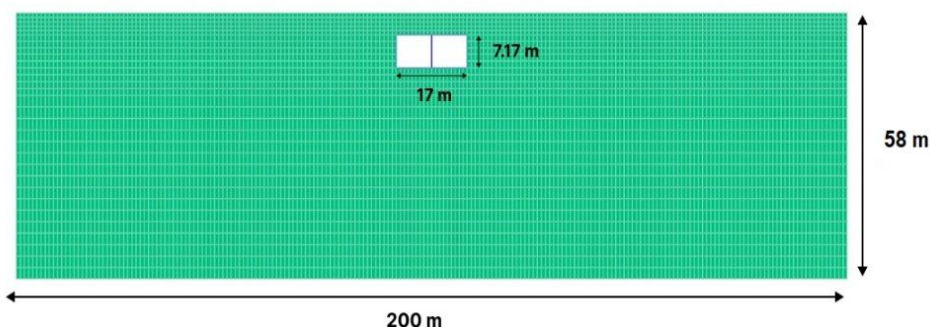
Thickness (m)	ρ (t/m^3)	V_c (m/s)
Layer 1 Backfilled 2	1.86	140
Layer 2 Holocene sand 2.8	1.86	170
Layer 3 Pleistocene sand 4.2	1.86	190
Layer 4 Pleistocene clay 9	1.86	240
Layer 5 Pleistocene gravel 40	1.96	330

² Slab

شکل 2: لایه‌های خاک ایستگاه مترو دایکای [24]

جدول 1: خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک [25]

نوع خاک	عمق (m)	وزن (kN/m^3)	v_s (m/s)	E(MPa)	μ	G(MPa)	K(MPa)	C(KPa)
خاک	0-2	18/60	140	103/72	0/411	36/46	192/68	20
ماسه هولوسن ³	4/8-2	18/60	170	145/14	0/493	53/75	3821/37	0/1
شن و ماسه پلیستوسن ⁴	9-4/8	18/60	190	181/29	0/494	67/15	5573/45	0/1
خاک رس پلیستوسن ⁵	18-9	18/60	240	289/27	0/490	107/14	5321/29	70
سنگریزه پلیستوسن ⁶	58-18	18/60	330	576/30	0/487	213/44	8138/08	0/1



شکل 3: مش بندی و ابعاد مدل تهیه شده از ایستگاه دایکای

2-3- مدلسازی عددی

2-3-2- مدلسازی تونل بتنی

در این بخش به مدلسازی سازه در نرم‌افزار اپنسیس پرداخته می‌شود. یکی از روش‌های معروف برای مدلسازی ستون متشکل از بتن و فولاد، روش فایبر است، که در ادامه به جزئیات عملیات ریاضی آن در نرم‌افزار پراخته می‌شود. در این روش، ابتدا یک المان فایبر و سپس یک مقطع دارای آرماتور مدل می‌شود. از طرفی، دو جنس مختلف فولادی (دارای رفتار متقارن در کشش و فشار) و بتنی (که نیروی فشاری را تحمل می‌کند و در جهت کشش نیرویی را تحمل نمی‌کند) تعریف می‌شود، که جزئیات آن در جدول 2 آمده است. در این جدول خصوصیات "بتن 01" و "فولاد 01" به عنوان مصالح بتنی و میلگرد استفاده شده در مدل سازه ایستگاه دایکای آورده شده است. "بتن 01" همان مدل کنت-اسکات-پارک تک‌محوری⁷ بدون کشش است که در آن سختی کاهش یافته خطی است. "فولاد 01" یک مدل مصالح تک‌محوری با منحنی اسکلتون دوخطی⁸ و قانون سخت شدن سینماتیکی⁹ است [25]. قابل ذکر است نسبت کرنش سخت شدن میلگرد همان نسبت سختی مماس پس از تسلیم به سختی مماس الاستیک اولیه آن است. نسبت‌های تقویتی دال‌های بالایی و پایینی، دیوارهای جانبی و ستون میانی به ترتیب 1٪، 0.8٪ و 6٪ در نظر گرفته شده است [3].

³ Holocene sand

⁴ Pleistocene sand

⁵ Pleistoceneclay

⁶ Pleistocene gravel

⁷ Uniaxial Kent-Scott-Park model

⁸ Bilinear skeleton

⁹ Kinematic hardening rule

جدول 2: خصوصیات مکانیکی بتن و فولاد در مقطع فایبر [24]

میلگرد فولادی (فولادی 01)		بتن 01 (هسته - پوسته)	
240	مقاومت تسلیم (MPa)	0/001 - 0/002	کرنش بیشینه
200000	مدول الاستیک (MPa)	33/1 - 39/6	مقاومت بیشینه (MPa)
0/15	ضریب کرنش سخت شونده	0/0014 - 0/0033	کرنش نهایی
		0 - 10	مقاومت نهایی (MPa)

تعداد نقاط انتگرال گیر نیز از جمله متغیرهایی است که در روش فایبر باید مشخص شود، که در این پژوهش سه نقطه در نظر گرفته شده است. این سه نقطه به مقطع المان اختصاص داده می شود و محاسبات هر کدام از این سه نقطه مستقل از دیگری انجام می گیرد. این نکته باعث بهینه شدن کد و بالا رفتن سرعت محاسبات می شود. در ادامه مش بندی مقاطع انجام می پذیرد، به طوری که قسمت محصور شده در پوشش بتن به 7 قسمت طولی و 7 قسمت عرضی، و بخش محصور نشده به 7 قسمت طولی و 2 قسمت عرضی تقسیم می گردد. نرم افزار به مرکز هر کدام از این مش ها، یک رفتار تنش-کرنش بتنی، و برای هر کدام از آرما تورها، یک رفتار تنش-کرنش فولادی اختصاص می دهد. بنابراین در تمام مش ها تنش و کرنش محاسبه می شود. در نهایت، از مجموع تمام تنش-کرنش های مش ها، انتگرال گیری روی کل مقطع به منظور محاسبه رفتار لنگر (M) و نیروی محوری (P) انجام می پذیرد. از طرف دیگر، انحنا (ϕ) و کرنش (ϵ) در کل مقطع محاسبه می شود. بنابراین، در روش فایبر از رفتار تنش و کرنش یک نقطه، لنگر و نیروی محوری کل مقطع محاسبه می شود. ستون میانی را نیز به چهار قسمت تقسیم شده است. در این مرحله، که در هر کدام از نقاط انتگرال گیری شده، رفتار لنگر و نیروی محوری محاسبه شده، یک بار دیگر از نقاط مشخص شده در مقطع فایبر (در اینجا سه نقطه)، انتگرال گیری می شود، و لنگر، نیروی محوری و نیروی برشی در دو انتهای المان بدست می آید. به عبارت دیگر با خصوصیات مختلف مصالح لحاظ شده، روش فایبر رفتار کلی المان را محاسبه می نماید.

در هنگام وقوع زلزله امواج لرزه ای ساطع شده از کانون زلزله با شدت های مختلفی به سازه می رسد. حال اگر طول مسیر سازه زیاد باشد و همچنین با توجه به نوع بستر، تکیه گاه های ایجاد شده با امواج مختلفی تحریک شده و باعث خرابی سازه می شود. بنابراین برای بررسی پارامترهای لرزه ای سازه در این پژوهش نیاز است که اثر امواج گذاری زلزله در نظر گرفته شود. برای این منظور، در مدلسازی از روش تحریک چندگانه تکیه گاهی¹⁰ استفاده شده است. در این روش تاریخچه جابجایی از بستر سنگی از قسمت گره های ثابت اعمال می شود و اثرات خاک روی موج ورودی تاثیر می گذارد تا به سازه اصلی تونل برسد. بدین گونه اثر امواج زلزله بر سازه زیرزمینی در نظر گرفته شده است [25].

2-3-3 - مدلسازی خاک به روش مستقیم

برای مدلسازی خاک در اپنسیس از روش مستقیم¹¹ استفاده شده است. محیط خاک با استفاده از المان های چهار گره ای¹² با رفتار کرنش-مسطح¹³ مدل شده است [19], [24], [26]. مدل رفتاری خاک با استفاده از مصالح تسلیم چندگانه مستقل از فشار¹⁴ شبیه سازی شده است. این مصالح، یک ماده الاستوپلاستیک است که قابلیت شبیه سازی رفتارهای چرخه ای خاک مانند اتساع¹⁵، انقباض¹⁶ و روانگرایی را دارد. این نوع مصالح برای مدلسازی صفحات تسلیم از مدل دراگر-پراگر¹⁷ پیروی می کند [21], [25]. در مدلسازی خاک، گره های اول و آخر ابتدا به هم متصل و در نهایت به هم مقید می شوند. بنابراین تغییر مکان های افقی و قائم آن ها یکسان می باشد. قابل ذکر

¹⁰ Multiple-support excitation

¹¹ Direct

¹² Quad

¹³ Plane strain

¹⁴ Pressure Depend Multi Yield

¹⁵ Dilatancy

¹⁶ Contraction

¹⁷ Drucker-Prager

است زاویه اصطکاک¹⁸ (ϕ) در تمام لایه‌های خاک 33 درجه می‌باشد [2]، [24]. مشخصات لایه‌های مختلف خاک که در تعریف این مصالح مورد نیاز است، در جدول 1 و شکل 3 ارائه شده است.

برای تعریف تنش‌های ناشی از وزن خاک از روش بارگذاری گرانشی در حالت دینامیکی استفاده شده است، در این روش گام زمانی تحلیل بسیار بزرگ در نظر گرفته می‌شود تا شرایط تحلیل استاتیکی حاکم باشد. برای افزایش میزان دقت نتایج تحلیل عددی در مدل‌های ساخته شده، و کمتر کردن اثرات مرزها روی پاسخ‌های به دست آمده، مدل‌های مختلفی با ابعاد متفاوت تهیه و ارزیابی شدند. در این مدل فاصله میان مرزهای آزاد به اندازه کافی از ناحیه مورد توجه دور قرار داده شده تا پاسخ‌های شتاب دریافتی در سطح زمین برابر تاریخچه شتاب حرکت میدان آزاد باشد. فرکانس موج ورودی و مشخصات سرعت برشی مصالح، دقت عددی انتقال موج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. جهت تعریف دقیق انتقال موج از میان یک مدل، اندازه المان باید کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بیشترین فرکانس موج ورودی λ_s باشد [27]، [28]، که رابطه آن به شرح زیر است:

$$\lambda_s = \frac{v_s}{f_{\max}} \quad (1)$$

در این رابطه v_s سرعت موج برشی و f_{\max} متناظر با بیشینه فرکانس موج ورودی در تحلیل لرزه‌ای می‌باشد. حداقل سرعت موج برشی در این ایستگاه برابر 140 متر بر ثانیه و f_{\max} نیز 15 هرتز در بین کلیه رکوردهای مورد نظر گرفته شده، که اندازه مش‌ها را بین 0/5 تا 2 متر با توجه به لایه‌های مختلف خاک تعیین می‌نماید.

2-3-4- شرایط مرزی

در مدل استفاده شده در این پژوهش گره‌های پایین خاک که بیانگر بستر صلب هستند، در هر دو جهت افقی و قائم مقید شده‌اند [19]، [24]. گره‌های موجود در مرزهای سمت چپ و راست خاک آزاد هستند. با این وجود گره‌های انتهایی در سمت چپ و راست مدل خاک در راستای افقی به یکدیگر مقید شده‌اند. به عبارت دیگر هر گره در مرز سمت راست خاک، به گره هم‌تراز با آن در مرز سمت چپ در جهت افقی مقید شده است، که این کار با استفاده از دستور *equalDOF* در نرم‌افزار انجام شده است. این کار با هدف ایجاد الگوی تغییر شکل برشی ساده و انتشار صحیح امواج در خاک مورد استفاده قرار گرفته است [26]. از طرف دیگر، فرض شده که اتصال خاک و سازه به صورت اتصال کامل است و از اثرات اصطکاک بین خاک و سازه صرف نظر شده، که فرض دور از ذهنی نیست [19]، [24]. لازم به ذکر است به دلیل استفاده از المان کرنش مسطح در خاک، گره‌های خاک دارای دو درجه آزادی هستند؛ در حالی که گره‌های المان‌های تونل به دلیل وجود خمش دارای سه درجه آزادی هستند. در نتیجه برای اتصال سازه و خاک به یکدیگر، در محل گره‌های خاک، گره‌های متناظری با سه درجه آزادی برای سازه ایجاد شده و به یکدیگر مقید شده‌اند. قابل ذکر است ابعاد خاک در جهت افقی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا شرایط میدان آزاد¹⁹ در مرزهای طرفین برقرار باشد. مدل نهایی در شکل 3 نشان داده شده است.

2-3-5- میرایی

مدلسازی میرایی در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای سازه نقش بسزایی دارد؛ زیرا باعث کاهش دامنه نوسان سازه بعد از وقوع زلزله می‌گردد. در این پژوهش میرایی رایلی با نسبت میرایی 2٪ به مدل اعمال شده است. ضرایب میرایی رایلی با استفاده از فرکانس مود اول و 5 برابر فرکانس مود اول مورد محاسبه شده اند تا اثرات وابستگی به فرکانس 20 در مدل کاهش یابد [28]–[31].

¹⁸ Friction angle

¹⁹ Free field

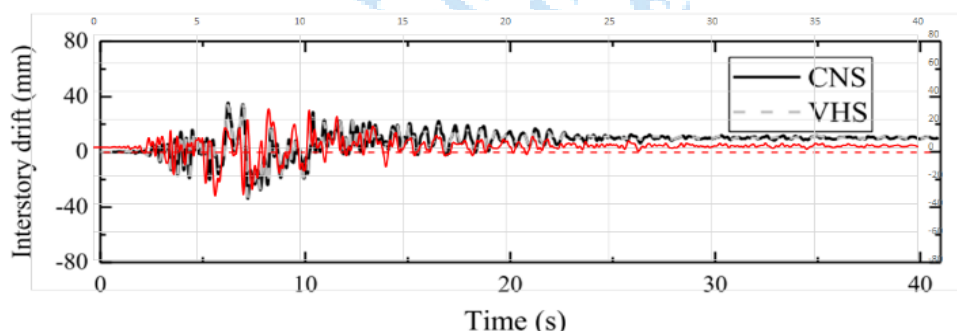
²⁰ Frequency-dependent

مدلسازی زلزله به شکل غیرخطی در میرایی رایلی باید بسیار با دقت استفاده شود؛ به این دلیل می‌تواند باعث پاسخ‌هایی شود که از نظر فیزیکی معقول نیست. در هنگام محاسبه بخش جرم و سختی، اگر از ماتریس سختی اولیه استفاده شود، میرایی تا انتهای تحلیل تغییری نمی‌کند. از طرفی، این امر زمانی که رفتار سازه وارد ناحیه غیرخطی شود، منجر می‌شود که میرایی بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شود؛ زیرا که ماتریس سختی تا انتهای تحلیل ثابت است، در صورتی که ماتریس سختی ما در حال کاهش می‌باشد. قابل ذکر است در مراجع [25]، [32]، [33] گفته شده است که اگر از سختی المان کامیتد²¹ استفاده شود، این امر بهترین پاسخ و در نتیجه، مناسبترین تحلیل بدست می‌آید. منظور از سختی کامیتد، ماتریس سختی سازه در آخرین گام همگرا شده تحلیل می‌باشد. ضریب میرایی نیز حین تحلیل تغییر می‌کند و با ورود به ناحیه غیرخطی این ضریب با کاهش سختی سازه منجر به کاهش ماتریس میرایی می‌گردد. با توجه به موارد گفته شده، در پژوهش حاضر نیز از سختی المان کامیتد استفاده گردیده است.

3- صحت‌سنجی

با توجه به فرضیات انجام شده در بخش 2، مدلسازی خاک و تونل زیرزمینی در نرم‌افزار اپنسیس قابل پیاده‌سازی است. برای اطمینان از صحت مدل ساخته شده، رفتار لرزه‌ای سازه از قبیل ابعاد هندسی، جنس خاک، نوع مصالح تونل و ... را با نتایج بدست آمده از مدل مشابه که تحت زلزله کوبه ارائه شده توسط هایتو و همکاران [24] مقایسه شده است. این مقاله به ارائه روشی نوین به نام روش شبیه‌سازی ترکیبی مجازی²² (VHS) پرداخته که نتایج خود را با روش شبیه‌سازی عددی کامل²³ (CNS) صحت‌سنجی کرده است. اساس استفاده از روش ترکیبی مجازی آن است که با هر دو زیرساخت عددی و فیزیکی محاسبات شبیه‌سازی انجام می‌شوند. این رویکرد معمولاً به عنوان یک شبیه‌سازی مقدماتی قبل از اجرای یک آزمایش ترکیبی واقعی برای اطمینان از اعتبار مدل محاسباتی، تنظیمات آزمایشگاهی و ارتباطات این دو شبکه انجام می‌شود [24].

صحت‌سنجی انجام شده در این پژوهش با دو مدل رفتاری VHS و CNS ارائه شده در مقاله هایتو و همکاران، مقایسه گردیده و نتایج آن در شکل 4 ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد صحت‌سنجی مدل پژوهش حاضر و دو مدل دیگر از نظر رفتاری مشابه هستند و نتایج کاملاً یکسانی دارند. هم‌پوشانی‌های این سه نمودار، نشان بر معتبر بودن مدل این مقاله می‌باشد. از آنجا که روش شبیه‌سازی ترکیبی مجازی از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌های عددی به طور همزمان استفاده می‌کند، با انطباق شبیه‌سازی‌های این پژوهش بر مدل ذکر شده می‌توان این اطمینان را داشت که مدل ارائه شده در این تحقیق بر داده‌های واقعی نیز منطبق است. برای مقایسه دقیق‌تر این دو مدل، بیشینه جابجایی بالا و پایین ستون میانی آن‌ها نیز مقایسه شده‌اند. در مدل هایتو این مقدار 35 میلیمتر، و مدل ارائه شده در پژوهش حاضر 34 میلیمتر بدست آمده است.



شکل 4: مقایسه نمودار صحت‌سنجی مدل مقاله (نمودار قرمز) و [24] (نمودار مشکی)

²¹ Committed

²² Virtual hybrid simulation

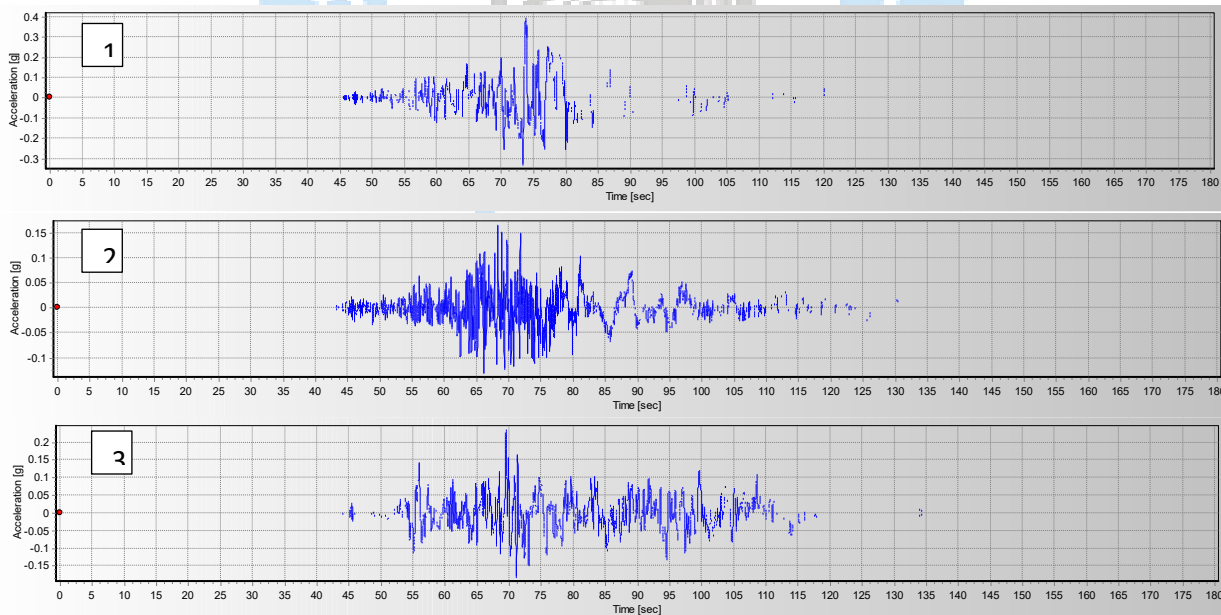
²³ Complete numerical simulation

3-1- انتخاب شتابنگاشت

بعد از اطمینان از اعتبار مدل، می‌توان رکوردهای مختلف را برای بررسی پاسخ لرزه‌ای مدل خاک و سازه انتخاب کرد. از آنجا که در این مقاله هدف مقایسه تاثیر شتابنگاشت‌های حوزه دور و نزدیک در عمق‌های مختلف می‌باشد، می‌توان رکوردهای مربوطه را از سایت پیر²⁴ استخراج کرد. با توجه به بررسی زلزله چی چی در دو ایستگاه مختلف در این پژوهش که تفاوت آن‌ها در فاصله از گسل است، جمعا چهار رکورد در دو ایستگاه وجود دارد: رکورد شماره 1 و 3 مربوط به مولفه افقی زلزله به ترتیب در حوزه دور و نزدیک، و رکورد 2 و 4 ترکیب مولفه افقی و قائم زلزله به ترتیب در حوزه دور و نزدیک. سپس مقادیر PGA، PGV و PGD اطلاعات مربوط به این چهار رکورد با استفاده از نرم‌افزار ساینمو سیگنال²⁵ در جدول 3 ارائه و نمودار آن‌ها در شکل 5 رسم شده‌اند. بر اساس آیین نامه FEMA P695 [34]، معیارهایی برای محاسبه فاصله از گسل استفاده شده تا حوزه دور و نزدیک بودن رکورد مشخص شود. به طوری که اگر از 10 کیلومتر کمتر بود، رکورد حوزه نزدیک، و اگر بزرگتر از 10 کیلومتر بود، رکورد حوزه دور در نظر گرفته می‌شود. بزرگای زلزله نیز باید از 6/5 بزرگتر باشد. قابل ذکر است بیشینه مسافتی که برای حوزه دور این پژوهش استفاده شده، 26/4 کیلومتر می‌باشد.

جدول 3. رکورد زلزله حوزه دور (2،1) و حوزه نزدیک (4،3)

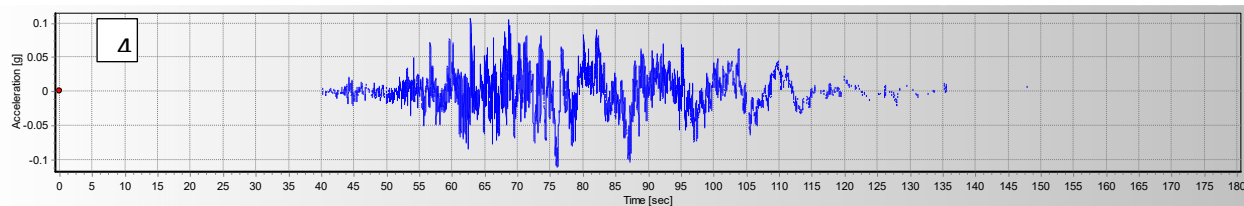
شماره رکورد	محل رخداد زلزله	مکان	سال	ایستگاه	فاصله از گسل	اندازه ²⁶	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1-2	چی چی	تایوان	1999	TCU051	26/4	7/62	0/398	109/211	74/053
3-4	چی چی	تایوان	1999	چی 101	6/7	7/62	0/235	41/753	53/905



²⁴ <https://ngawest2.berkeley.edu/>

²⁵ Seismosignal

²⁶ Magnitude

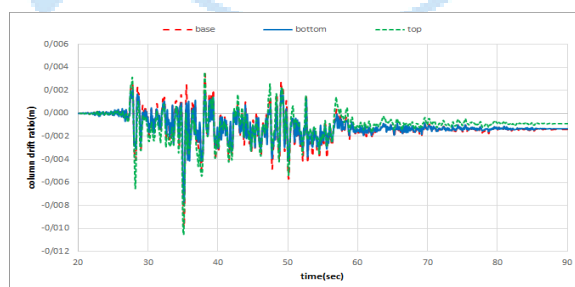


شکل 5: 1، مولفه افقی حوزه دور؛ 2، ترکیب مولفه افقی و قائم حوزه دور؛ 3، مولفه افقی حوزه نزدیک؛ 4، ترکیب مولفه افقی و قائم حوزه نزدیک

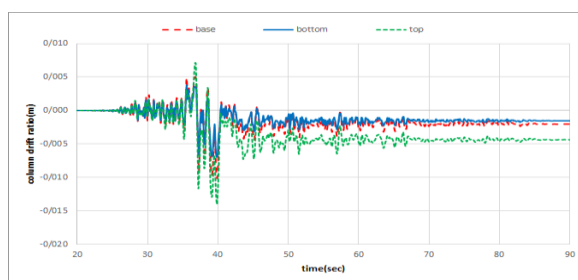
4- مقایسه نتایج بدست آمده برای جابجایی نسبی روی سازه زیرزمینی در عمق‌های مختلف تحت اثر مولفه‌های مختلف زلزله

بعد از اطمینان از اعتبار پیاده‌سازی مدل در بخش صحت‌سنجی، می‌توان اثر تغییر پارامترهای مختلف، از جمله عمق را بر رفتار لرزه‌ای سازه زیرزمینی مورد مطالعه قرار داد. در این بخش اثر رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک به گسل تحت مولفه‌های افقی و قائم ارائه شده در جدول 3، بر جابجایی‌های نسبی ستون میانی و دیوارهای چپ و راست سازه در سه مدل مختلف با عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری از سطح زمین قرار دارند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

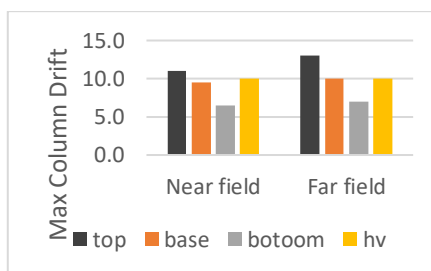
شکل 6 و 7 مقایسه جابجایی نسبی ستون میانی مترو در سه عمق مختلف تحت زلزله به ترتیب حوزه نزدیک و دور با اثر مولفه افقی را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، در شکل 8 نیز خلاصه‌ای از این دو شکل به صورت نمودار میله‌ای رسم شده است. چنانچه در شکل‌های 6 و 8 قابل مشاهده است، مدلی که در عمق 1 متری از سطح زمین ساخته شده است، بیشترین جابجایی نسبی به مقدار 11 میلیمتر را تجربه کرده است. این در حالی است که مدل اصلی که در عمق 4/8 متری قرار دارد، جابجایی در حدود 9/5 میلیمتر و مدل در عمق بیشتر جابجایی نسبی 6/5 میلیمتر را ثبت کرده است. این مقایسه نشان می‌دهد که با افزایش عمق، میزان بیشترین جابجایی نسبی ستون میانی در زلزله حوزه نزدیک کاهش یافته است. در شکل 7 و 8 که مقدار بیشینه جابجایی نسبی ستون‌ها تحت زلزله حوزه دور از گسل چی‌چی را نشان می‌دهد، میزان بیشترین جابجایی نسبی ستون میانی نیز با افزایش عمق کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، این میزان بیشینه جابجایی برای سازه در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری به ترتیب 13/5، 10 و 7 میلیمتر بدست آمده است.



شکل 6: مقایسه نسبت جابجایی ستون‌ها در حوزه نزدیک به گسل تحت زلزله چی‌چی در سه مدل اصلی، بالا، پایین.



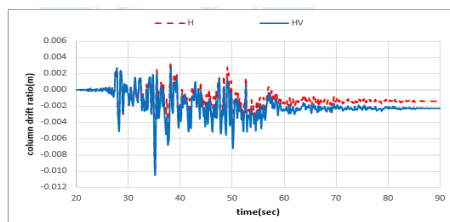
شکل 7: مقایسه نسبت جابجایی ستون‌ها در حوزه دور با زلزله چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین



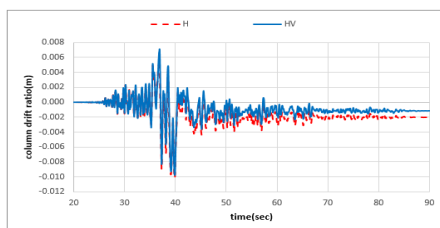
شکل 8: نسبت جابجایی ستون‌ها در حوزه دور و نزدیک با زلزله چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین و اثر مولفه قائم در مدل اصلی

حال به بررسی اثر پارامتر عمق بر بیشینه جابجایی نسبی ستون میانی بین رکوردهای حوزه دور و نزدیک با اثر مولفه افقی زلزله پرداخته می‌شود. با توجه به رکوردهای انتخاب شده در جدول 3، اگر مدل اصلی در عمق 4/8 متری مینا در نظر گرفته شود، با کاهش عمق دفن سازه به 1 متر، میزان بیشینه جابجایی در حوزه دور 35٪ افزایش یافته، در حالی که در حوزه نزدیک تنها 16٪ افزایش داشته است. حال اگر عمق دفن سازه به 23 متر افزایش یابد، میزان کاهش بیشینه جابجایی ستون میانی در هر دو حدود 30٪ می‌باشد. به عنوان آخرین نکته برای مقایسه بین زلزله حوزه دور و نزدیک، چنانچه در شکل 8 قابل مشاهده است، در زلزله حوزه دور مقدار جابجایی ستون در مدلی که در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری قرار دارد، به ترتیب مقادیر 18، 5 و 7 درصد نسبت به حوزه نزدیک مقدار بزرگتری را نشان می‌دهد. قابل ذکر است مقدار PGA رکوردهای انتخاب شده، در مقدار عددی افزایش و یا کاهش بیشینه جابجایی تاثیر دارد و درصدهای گزارش شده صرفاً برای رکوردهای انتخاب شده در جدول 3 می‌باشد.

در این مرحله به بررسی جابجایی نسبی ستون میانی مترو در زلزله چی چی مربوط به حوزه نزدیک و دور از گسل با اثر مولفه قائم پرداخته می‌شود. به منظور مقایسه، نمودار بیشینه جابجایی ستون‌ها با اثر مولفه افقی در مدل اصلی که در عمق 4/8 متری قرار دارد، با نمودارهای مربوط به مولفه قائم همزمان رسم شده‌اند، که نمودار مربوط به حوزه نزدیک و دور به ترتیب در شکل‌های 9 و 10 مشخص شده است. این دو نمودار نشان می‌دهند که مقدار بیشینه نسبی جابجایی ستون‌ها حدود 10 میلی‌متر می‌باشد که بیانگر اثر یکسان مولفه‌های افقی و قائم در نسبت جابجایی ستون‌ها است.



شکل 9: مقایسه نسبت جابجایی ستون‌ها در حوزه نزدیک با زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV

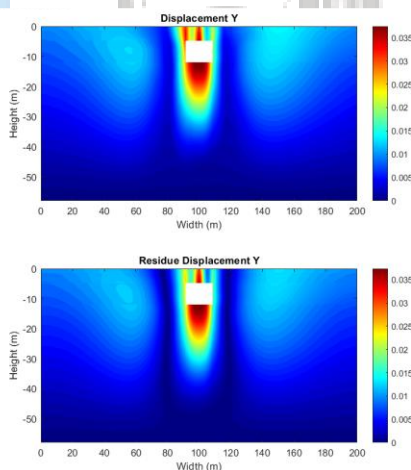


شکل 10: مقایسه نسبت جابجایی ستون‌ها در حوزه دور با زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV

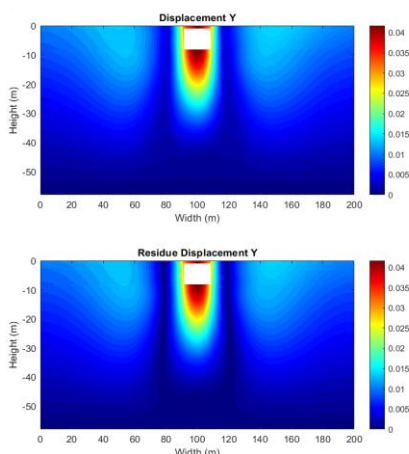
4-1- مقایسه بین کانتورهای بدست آمده بر روی یک سازه زیرزمینی در عمق‌های مختلف

در این بخش کانتورهای بدست آمده بر روی سازه مترو تحت مولفه افقی زلزله چی چی در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چنانکه در شکل 11 قابل مشاهده است، تمرکز جابجایی‌ها در راستای قائم در زیر سازه مقدار بیشتری را نسبت به سایر نقاط ثبت کرده است، بطوری که قسمت میانی دال پایینی بیشترین مقدار جابجایی را نشان می‌دهد. نکته دیگر آن است که دیوارهای سمت چپ و راست تونل مقدار یکسانی از جابجایی را تجربه کردند. شکل 12 کانتور جابجایی تحت مولفه افقی زلزله چی چی در حوزه دور، برای مدل در عمق 1 متری رسم شده است. چنانکه در این شکل قابل مشاهده است، همانند مدل اصلی (در عمق 4/8 متری) بیشترین تمرکز جابجایی در قسمت میانی دال پایینی و بالایی می‌باشد.

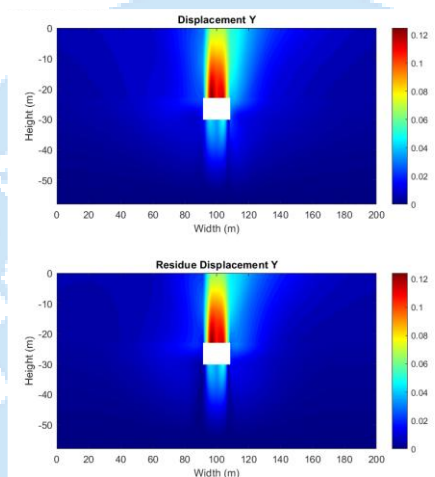
در شکل 13 به بررسی کانتور جابجایی برای مدل در پایینترین عمق (در عمق 23 متری) تحت مولفه افقی زلزله چی چی در حوزه دور پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از این شکل نشان می‌دهد، برخلاف شکل‌های 11 و 12 مربوط به سازه مدفون در عمق‌های کمتر، بیشترین میزان جابجایی در دال بالایی تجربه شده است. این امر نشان دهنده اثرات عمق بر رفتار لرزه‌ای سازه زیرزمینی می‌باشد و تاکید بر این نکته دارد که عمق سازه مدفون باید متناسب با نقاط بحرانی سازه انتخاب شود.



شکل 11: نمودار کانتور جابجایی و باقیمانده جابجایی برای مولفه افقی زلزله چی چی تحت حوزه دور برای مدل پایه



شکل 12: نمودار کانتور جابجایی و باقیمانده جابجایی برای مولفه افقی زلزله چی چی تحت حوزه دور برای مدل بالا

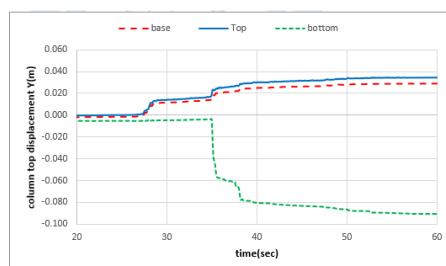


شکل 13: نمودار کانتور جابجایی و باقیمانده جابجایی برای مولفه افقی زلزله چی چی تحت حوزه دور برای مدل پایین

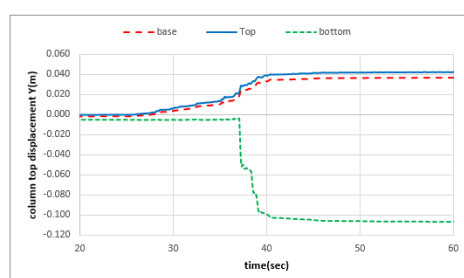
4-2- مقایسه بین تغییر شکل‌های قائم بر روی یک سازه زیرزمینی در عمق‌های مختلف

در این بخش مقایسه بین تغییر شکل‌های قائم بر روی سازه زیرزمینی با زلزله چی چی در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که نمودار مربوط به حوزه نزدیک و دور به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 نشان داده شده است. چنانکه در شکل 14 قابل مشاهده می‌باشد، جابجایی قائم بالای ستون سه مدل در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری (به ترتیب بالا، اصلی و پایین) تحت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک چی چی ارائه شده است. نتایج بدست آمده در این شکل نشان می‌دهد که تا ثانیه 28 رکورد، هر سه مدل جابجایی قائم صفر را دارند. با گذشت زمان دو مدل بالا و اصلی، شروع به جابجایی در راستای قائم می‌کنند، ولی همچنان مدل پایین جابجایی قائم صفر را نشان می‌دهد. از ثانیه 36 به بعد، هر سه مدل شروع به جابجایی در راستای قائم را تجربه می‌کنند. چنانکه از این شکل نمایان است مدلی که در پایین‌ترین عمق قرار دارد، جابجایی بیشتری را ثبت کرده است. قابل ذکر است زمانی که رکورد زلزله بصورت افقی به مدل وارد می‌شود، در نمودار جابجایی در راستای قائم رفتار نوسانی مشاهده نشده است. نکته دیگر در رابطه با شکل 14 آن است که تغییر مکان قائم بالای ستون تحت زلزله حوزه نزدیک مربوط به دو مدل اصلی و مدل در عمق 1 متری (بالا) تقریباً یکسان و حدود 3 سانتی‌متر می‌باشد. اما تغییر مکان قائم مربوط به مدل در عمق 23 متری (پایین) حدود 9 سانتی‌متر می‌باشد، که 200 درصد رشد را نسبت به دو مدل دیگر نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 15، که مربوط به تغییر مکان قائم بالای ستون تحت زلزله حوزه دور می‌باشد، دو مدل اصلی و بالا جابجایی تقریباً یکسان و حدود 4 سانتی‌متر را تجربه می‌کنند. اما تغییر مکان قائم مربوط به مدل در عمق 23 متری، حدود 11 سانتی‌متر می‌باشد، که حدود 175 درصد رشد را نسبت به دو مدل دیگر نشان می‌دهد.



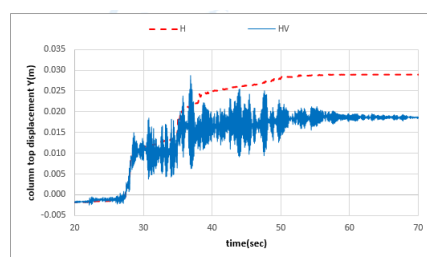
شکل 14: مقایسه جابجایی قائم بالای ستون در حوزه نزدیک با زلزله افقی چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین



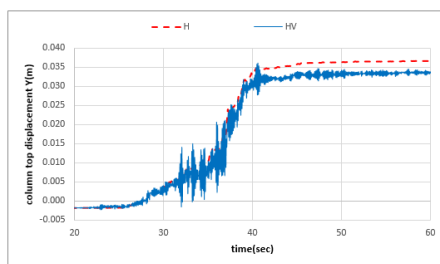
شکل 15: مقایسه جابجایی قائم بالای ستون در حوزه دور با زلزله افقی چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین

شکل‌های 16 و 17 به مقایسه جابجایی قائم بالای ستون در مدل اصلی در عمق 4/8 متری مربوط به زلزله چی چی با مولفه افقی و مولفه قائم به ترتیب در دو حوزه نزدیک و دور پرداخته شده است. همانطور که در این دو نمودار قابل مشاهده می‌باشد، زمانی که مولفه قائم زلزله به مدل وارد می‌شود، الگوی جابجایی دچار نوسان شده و مقدار بیشینه تغییر مکان قائم برای هر دو مولفه افقی و قائم تحت حوزه نزدیک تقریباً برابر و مقدار 3 سانتیمتر را تجربه کرده است. این مقدار برای زلزله حوزه دور (شکل 17) 3/6 سانتیمتر می‌باشد.

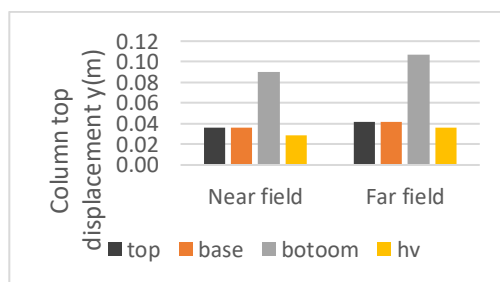
در زلزله حوزه دور با اثر مولفه افقی زلزله مقدار جابجایی قائم بالای ستون در مدل در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری، به ترتیب مقدار 33، 33 و 22 درصد نسبت به حوزه نزدیک بیشتر است (شکل 18). نکته دیگر آن است که در مدل اصلی با اثر مولفه قائم زلزله تحت زلزله حوزه دور، جابجایی قائم بالای ستون مقدار 20٪ نسبت به زلزله حوزه نزدیک به گسل مقدار بیشتری را تجربه کرده است.



شکل 16: مقایسه جابجایی قائم بالای ستون در حوزه نزدیک با زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV



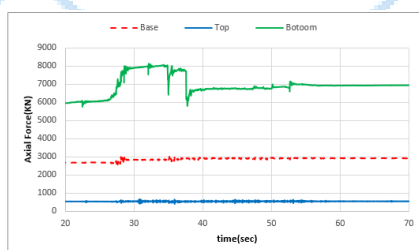
شکل 17: مقایسه جابجایی قائم بالای ستون در حوزه دور با زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV



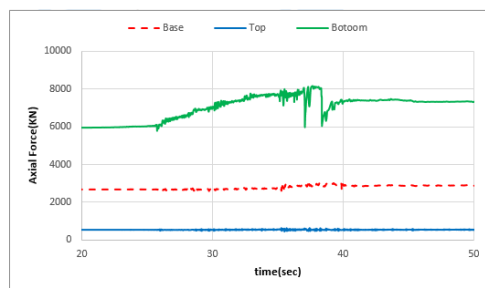
شکل 18: جابجایی قائم بالای ستون در حوزه دور و نزدیک با زلزله چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین و اثر مولفه قائم در مدل اصلی

4-3- مقایسه نیروی محوری بر روی یک سازه زیرزمینی در عمق‌های مختلف

در این بخش، نیروی محوری سازه مدفون مربوط به سه مدل در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری (به ترتیب بالا، اصلی و پایین) تحت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک و دور، به ترتیب در شکل‌های 19 و 20، بررسی شده است. چنانکه که در این دو نمودار مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه نیروی محوری ستون تحت زلزله حوزه نزدیک چی چی برای مدل‌های بالا، اصلی و پایین به ترتیب 679، 3099 و 8127 کیلونیوتن بدست آمده است. این مقادیر برای زلزله حوزه دور برای مدل‌های بالا به ترتیب 638، 3145 و 8149 کیلونیوتن است.



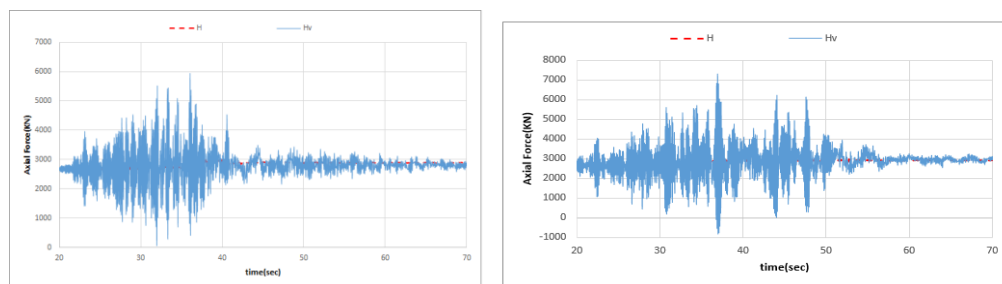
شکل 19: مقایسه نیروی محوری ستون میانی تحت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین



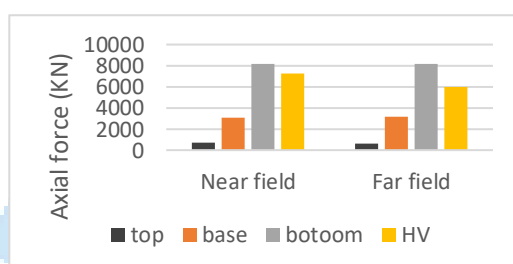
شکل 20: مقایسه نیروی محوری ستون میانی تحت مولفه افقی زلزله حوزه دور چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین

نیروی محوری ستون در مدل اصلی با مقایسه بین زلزله مولفه افقی و مولفه قائم در حوزه دور و نزدیک به گسل در شکل 21 قابل مشاهده می‌باشد. مقدار بیشینه نیروی محوری ستون تحت زلزله حوزه نزدیک و دور برای زلزله مولفه قائم در مدل اصلی به ترتیب مقدار 7290 و 5940 کیلو نیوتن می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که نیروی محوری برای رکورد حوزه نزدیک به گسل تقریباً 18 درصد بیشتر نسبت به حوزه دور می‌باشد. این مقدار برای زلزله مولفه افقی برای حوزه نزدیک و دور در مدل اصلی به ترتیب 3099 و 3145 کیلو نیوتن محاسبه شده است، که نیروی محوری برای رکورد حوزه دور از گسل تقریباً 2 درصد بیشتر نسبت به حوزه نزدیک می‌باشد. این امر نشان می‌دهد بررسی مولفه قائم خصوصاً در حوزه نزدیک، برای محاسبه نیروی محوری سازه‌های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشد و نمودار مربوط به نیروی محوری تحت مولفه قائم نوسان بیشتری را تجربه کرده است.

نمودار میله‌ای شکل 22، که در آن خلاصه‌ای از نیروی محوری حوزه دور و نزدیک در عمق‌های مختلف رسم شده، نشان می‌دهد هرچه قدر عمق قرارگیری سازه از سطح زمین افزایش یابد، نیروی محوری ایجاد شده در ستون نیز افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد حجم خاک سرپاره روی نیروی محوری ستون تاثیر بسازایی دارد. نکته دیگر در رابطه با این نمودار این است که نیروی محوری ستون میانی در زلزله حوزه دور برای مدل در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری به ترتیب مقدار 6-، 1/5 و 0/5 درصد نسبت به زلزله حوزه نزدیک تغییر ایجاد کرده است. برای زمانی که تحت مولفه قائم زلزله قرار می‌گیرد زلزله حوزه نزدیک مقدار 23 درصد اثر بیشتری را نسبت به حوزه دور نشان داده است. "بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت نیروی محوری در مدل اصلی تحت اثر رکورد مولفه قائم در حوزه نزدیک بسیار تاثیر گذار می‌باشد.



شکل 21: مقایسه نیروی محوری ستون در حوزه الف (نزدیک ب) دور با زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV

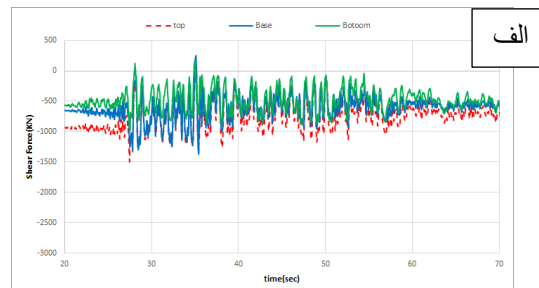
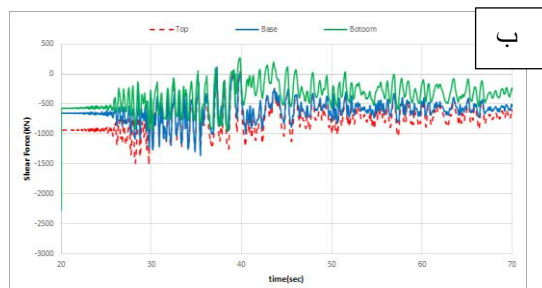


شکل 22: نیروی محوری ستون میانی تحت مولفه افقی زلزله حوزه دور و نزدیک چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین و اثر مولفه قائم بر مدل اصلی

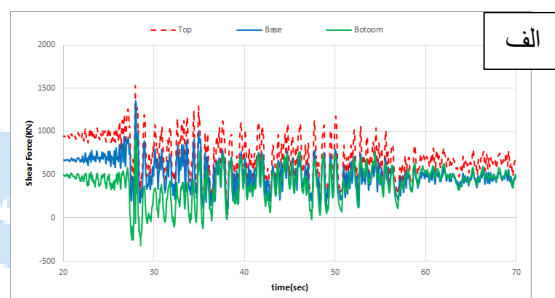
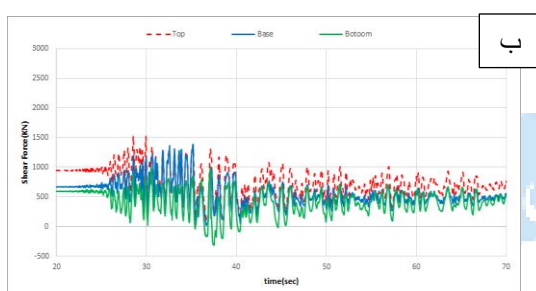
4-4- مقایسه نیروی برشی بر روی یک سازه زیرزمینی در عمق‌های مختلف

در این بخش به مقایسه نیروی برشی در دیوار چپ، راست و ستون میانی سازه مدفون مربوط به سه مدل در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری (به ترتیب بالا، اصلی و پایین) تحت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک و دور، که به ترتیب در شکل‌های 23، 24 و 25 رسم شده‌اند، پرداخته شده است. چنانکه که در نمودار 23 و 24 مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه نیروی برشی زلزله حوزه نزدیک چی چی برای مدل‌های بالا، اصلی و پایین به ترتیب عمق، برای دیوار سمت چپ 1500، 1370 و 984 کیلونیوتن و برای دیوار سمت راست 1530، 1358 و 919 کیلونیوتن بدست آمده است. این مقادیر برای زلزله حوزه دور به ترتیب 1517، 1362 و 955 کیلونیوتن برای دیوار سمت چپ و 1523، 1388 و 1010 کیلونیوتن برای دیوار سمت راست بدست آمده است. مشاهده می‌شود که الگوی بدست آمده برای نیروی برشی روی دیوار سمت چپ و راست تقریباً مقادیر قرینه یکدیگر را تجربه کرده‌اند. چنانکه می‌توان دریافت اثرات تغییر عمق در وضعیت‌های مورد بررسی چندان محسوس نیست. همچنین می‌توان گفت تحت رکوردهای دور و نزدیک تفاوت جزئی روی الگوهای نیروی برشی بر روی دیوارهای سمت چپ و راست مشاهده شده است.

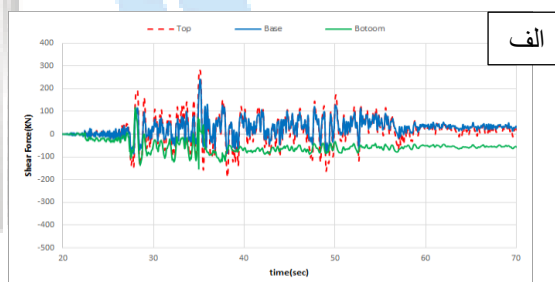
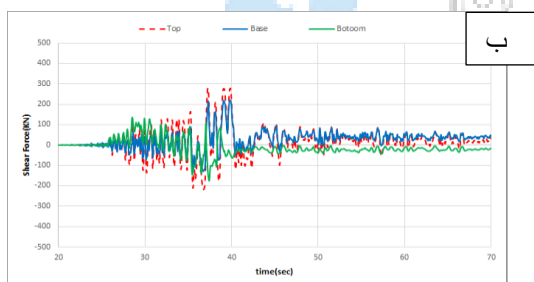
چنانکه در شکل‌های 25 مشاهده می‌شود، نیروی برشی روی ستون میانی نسبت به دیوارهای سمت چپ و راست تقارن بهتری را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که با افزایش عمق سازه زیرزمینی، ستون میانی نیروی برشی کمتری را تجربه کرده است. مقدار بیشینه نیروی برشی زلزله چی چی برای مدل‌های بالا، اصلی و پایین به ترتیب عمق، برای ستون میانی تحت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک 281، 269 و 117 کیلونیوتن، و برای زلزله حوزه دور 278، 234 و 136 کیلونیوتن بدست آمده است. با توجه به نتایج ذکر شده می‌توان دریافت که نیروی برشی ایجاد شده در دیوارهای سمت چپ و راست بطور قابل توجهی از نیروی برشی ستون میانی بیشتر می‌باشد. موارد ذکر شده در نمودار میله‌ای شکل 27 نیز قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 23: مقایسه نیروی برشی دیوار سمت چپ الف) تحت زلزله حوزه نزدیک ب) تحت زلزله حوزه دور چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین

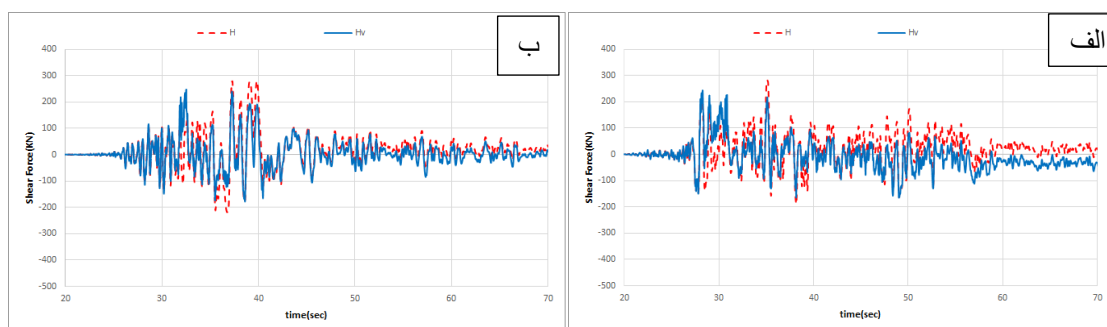


شکل 24: مقایسه نیروی برشی دیوار سمت راست الف) تحت زلزله حوزه نزدیک ب) تحت زلزله حوزه دور چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین

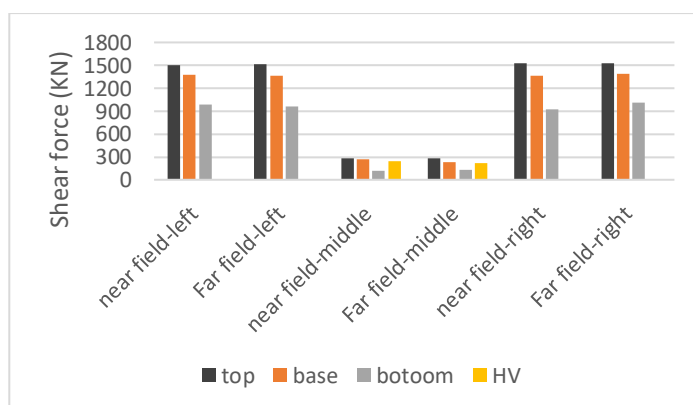


شکل 25: مقایسه نیروی برشی دیوار ستون میانی الف) تحت زلزله حوزه نزدیک ب) تحت زلزله حوزه دور چی چی مربوط به سه مدل اصلی، بالا، پایین

در شکل‌های 26 و 27 به بررسی نیروی برشی در ستون میانی سازه مدفون مربوط به مدل اصلی در عمق 4/8 متری تحت مولفه قائم زلزله و مقایسه آن با مولفه افقی تحت زلزله حوزه نزدیک و دور پرداخته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل‌های 26 قابل مشاهده است که مقدار بیشینه نیروی برشی در ستون میانی در مدل اصلی 269 کیلو نیوتن با در نظر گرفتن مولفه افقی، و 242 کیلو نیوتن برای مولفه قائم در حوزه نزدیک می‌باشد. مقادیر این نیرو برای مولفه افقی و قائم به ترتیب 234 و 219 کیلو نیوتن در حوزه دور بدست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار نیروی برشی ستون میانی در مدل اصلی در زلزله حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور مقدار 15٪ با اثر مولفه افقی، و تحت اثر مولفه قائم 11٪ افزایش داشته است. با این تفاسیر مقدار تاثیرگذار در نیروی برشی ستون میانی همان مولفه افقی می‌باشد و مؤلفه قائم تاثیر بسزایی در این مورد ندارد. به عبارت دیگر، میزان اثر گذاری مولفه قائم کمتر از مولفه افقی می‌باشد.



شکل 26: مقایسه نیروی برشی دیوار ستون میانی الف) تحت زلزله حوزه نزدیک ب) تحت زلزله حوزه دور زلزله چی چی مربوط به زلزله مولفه افقی H و قائم HV



شکل 27: مقایسه نیروی برشی دیوار ستون میانی، چپ و راست، تحت زلزله حوزه نزدیک و دور زلزله چی چی مربوط به مدل بالا، اصلی، پایین و اثر مولفه قائم

5- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه زیرزمینی متروی دایکای ژاپن در عمق‌های مختلف تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله چی چی در حوزه دور و نزدیک به گسل پرداخته شده است. برای این منظور، بعد مدلسازی سازه و خاک، و صحت‌سنجی آن با پژوهش‌های معتبر قبلی، نمودارهای مربوط به نیروی برشی، نیروی محوری و جابجایی نسبی روی دیوارهای سمت چپ و راست و ستون میانی با استفاده از نرم‌افزار اپنسیس بدست آمد. در ادامه مهم‌ترین نتایجی که از این تحقیق بدست آمده ارائه می‌شود:

1- نتایج بدست آمده نشان داد که در بررسی اثر پارامتر عمق بر بیشینه جابجایی نسبی ستون میانی بین رکوردهای حوزه دور و نزدیک با اثر مولفه افقی زلزله با توجه به رکوردهای انتخاب شده، اگر مدل اصلی در عمق 4/8 متری مبنا در نظر گرفته شود، با کاهش عمق دفن سازه به 1 متر، میزان بیشینه جابجایی در حوزه دور 35٪ افزایش یافته، در حالی که در حوزه نزدیک تنها 16٪ افزایش داشته است. اگر عمق دفن سازه به 23 متر افزایش یابد، میزان کاهش بیشینه جابجایی ستون میانی در هر دو حدود 30٪ می‌باشد. برای مقایسه بین زلزله حوزه دور و نزدیک، در زلزله حوزه دور مقدار جابجایی ستون در مدلی که در عمق‌های 1، 4/8 و 23 متری قرار دارد، به ترتیب مقادیر 18، 5 و 7 درصد نسبت به حوزه نزدیک مقدار بزرگتری را نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که هرچه عمق قرارگیری سازه از سطح زمین افزایش پیدا کند، جابجایی نسبی ستون نیز کاهش می‌یابد.

2- بررسی نتایج بدست آمده از بررسی کانتور جابجایی بر مدل در پایین‌ترین عمق تحت مولفه افقی زلزله در حوزه دور نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابجایی در دال بالایی تجربه شده است. این نکته بر این موضوع تاکید می‌کند که عمق دفن سازه بر رفتار لرزه‌ای آن بسیار تاثیرگذار است و باید در طراحی این گونه سازه‌ها، مقاوم‌سازی‌های لازم را انجام داد.

3- تغییر مکان قائم بالای ستون برای مدل بالا و مدل اصلی تقریباً یکسان بوده، و تحت زلزله حوزه نزدیک و دور به ترتیب حدود 3 و 4 سانتیمتر بدست آمده است. اما تغییر مکان قائم مربوط به مدل در پایین ترین عمق، حدود 9 سانتی متر برای حوزه نزدیک با 200% رشد، و حدود 11 سانتی متر با 175% رشد برای حوزه دور را نسبت به مدل اصلی نشان می دهد. نکته دیگر آن است که در مدل اصلی با اثر مولفه قائم زلزله تحت زلزله حوزه دور، جابجایی قائم بالای ستون مقدار 20% نسبت به زلزله حوزه نزدیک به گسل مقدار بیشتری را تجربه کرده است. همچنین می توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق تغییر مکان قائم بالای ستون افزایش یافته است.

4- مقدار بیشینه نیروی محوری ستون تحت زلزله حوزه نزدیک و دور برای زلزله مولفه قائم در مدل اصلی به ترتیب مقدار 7290 و 5940 کیلونیوتن می باشد. این امر نشان می دهد که نیروی محوری برای رکورد حوزه نزدیک به گسل تقریباً 18 درصد بیشتر نسبت به حوزه دور می باشد. این مقدار برای زلزله مولفه افقی برای حوزه نزدیک و دور در مدل اصلی به ترتیب 3099 و 3145 کیلونیوتن محاسبه شده است، که نیروی محوری برای رکورد حوزه دور از گسل تقریباً 2 درصد بیشتر نسبت به حوزه نزدیک می باشد. این امر نشان می دهد بررسی مولفه قائم خصوصاً در حوزه نزدیک، برای محاسبه نیروی محوری سازه های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت هرچقدر عمق قرارگیری سازه از سطح زمین افزایش پیدا کند، نیروی محوری ایجاد شده در ستون نیز افزایش می یابد و نمودار مربوط به نیروی محوری تحت مولفه قائم نوسان بیشتری را تجربه کرده است.

5- نتایج نشان می دهد که مقدار نیروی برشی ستون میانی در مدل اصلی در زلزله حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور مقدار 15% با اثر مولفه افقی، و تحت اثر مولفه قائم 11% افزایش داشته است. در نتیجه میزان اثر گذاری مولفه قائم کمتر از مولفه افقی می باشد. نکته دیگر آن است که هرچقدر عمق قرارگیری سازه از سطح زمین افزایش پیدا کند، نیروی برشی ایجاد شده در ستون نیز کاهش می یابد.

به طور کلی در این مقاله این نتیجه حاصل شده که محتوای فرکانسی زلزله به نحوی بوده که زلزله حوزه دور اثر مخرب تری بر سازه مترو داشته است، ولی این موضوع می بایست در تحقیقات بعدی برای زلزله های بیشتر و سازه های دیگری مورد بررسی قرار گیرد و مشخص بشود که آیا این مسئله کلیت داشته است یا برای رکوردهای انتخابی این مقاله به این شکل می باشد. نکته دیگر آن است که می توان برای سازه های زیرزمینی کنونی تحلیل های مشابه لرزه ای در حوزه دور و نزدیک انجام داد تا ضعیف ترین مکان ها با توجه به عمق دفن آن هنگام وقوع زلزله شناسایی شوند تا اقدامات لازم برای مقاوم سازی آن ها صورت گیرد. همچنین برای سازه های در حال طراحی نیز می توان مطالعه لرزه ای سازه را انجام داد تا مکان هایی از سازه که در هنگام زلزله بیشتر در معرض شکست هستند، با دقت بیشتری طراحی شوند.

مراجع:

- [1] Dowding, C. H., & Rozan, A. (1978). Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(2), 175-191.
- [2] Isari, M., Tarinejad, R., & Razavi, S. K. (2019). The effects of underground structure on the free field displacement under uniform and non-uniform excitation. *Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 61-75.
- [3] Tarinejad, R., Isari, M., & Taghavi Ghalesari, A. (2019). A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18, 267-284.
- [4] Tarinejad, R., Isari, M., & Sohrabi-Bidar, A. (2020). A new solution to estimate the time delay on the topographic site using time domain 3D boundary element method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19, 611-623.
- [5] Wu, Y., Gao, Y., Zhang, N., & Li, D. (2016). Simulation of spatially varying ground motions in V-shaped symmetric canyons. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(6), 992-1010.
- [6] Jing-Ming, W., & Litehiser Jr, J. J. (1985). The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake. *Earthquake Spectra*, 1(4), 741-757.

- [7] Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). Underground opening damage from earthquakes. *Engineering geology*, 30(3-4), 263-276.
- [8] Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2014). Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 10-22.
- [9] Baziar, M. H., Ghalandarzadeh, A., & Rabeti Moghadam, M. (2015). Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 2(3), 15-36.
- [10] An, X., Shawky, A. A., & Maekawa, K. (1997). The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin earthquake. *Cement and concrete composites*, 19(3), 241-257.
- [11] Liang, S., & Chen, Z. (2019). SPH-FEM coupled simulation of SSI for conducting seismic analysis on a rectangular underground structure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 159-180.
- [12] Ma, C., Lu, D. C., Du, X. L., Qi, C. Z., & Zhang, X. Y. (2019). Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 265-280.
- [13] Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2015). Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 63-79.
- [14] Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, 14, 233-251.
- [15] Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J. A., & Jafari, M. K. (2013). Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*, 194(3), 1849-1865.
- [16] Panji, M., Kamalian, M., Asgari, M. J., & Jafari, M. K. (2014). Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BE. *International Journal of Civil Engineering*, 160-173.
- [17] Jiang, L., Chen, J., & Li, J. (2010). Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 9(4), 555-567.
- [18] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., Bi, K., & Jiang, J. (2019). Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 242-252.
- [19] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Jiang, J., & Han, R. (2019). Simplified equivalent static methods for seismic analysis of shallow buried rectangular underground structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 1-11.
- [20] Adanur, S., Altunışık, A. C., Bayraktar, A., & Akköse, M. (2012). Comparison of near-fault and far-fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges. *Natural hazards*, 64, 593-614.
- [21] Trifunac, M. D. (2009). The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 382-393.
- [22] Akköse, M., & Şimşek, E. (2010). Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. *Applied Mathematical Modelling*, 34(11), 3685-3700.
- [23] Sayed, M. A., Kwon, O. S., Park, D., & Van Nguyen, Q. (2019). Multi-platform soil-structure interaction simulation of Daikai subway tunnel during the 1995 Kobe earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105643.
- [24] Yu, H., Li, Y., Shao, X., & Cai, X. (2021). Virtual hybrid simulation method for underground structures subjected to seismic loadings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 110, 103831.
- [25] Mercado, J. A., Mackie, K. R., & Arboleda-Monsalve, L. G. (2021). Modeling nonlinear-inelastic seismic response of tall buildings with soil-structure interaction. *Journal of Structural Engineering*, 147(7), 04021091.

- [26] Bao, X., Xia, Z., Ye, G., Fu, Y., & Su, D. (2017). Numerical analysis on the seismic behavior of a large metro subway tunnel in liquefiable ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 66, 91-106.
- [27] Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421-427.
- [28] Sun, Q., Dias, D., Guo, X., & Li, P. (2019). Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion. *Computers and Geotechnics*, 111, 243-254.
- [29] Cheng, X., & Sun, Z. (2018). Effects of burial depth on the seismic response of subway station structure embedded in saturated soft soil. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- [30] Sun, Q., & Dias, D. (2018). Significance of Rayleigh damping in nonlinear numerical seismic analysis of tunnels. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 115, 489-494.
- [31] Liang, J., & Zhu, J. (2019). A FE-IBE method for linearized nonlinear soil-tunnel interaction in water-saturated, poroelastic half-space: I. Methodology and numerical examples. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 454-467.
- [32] Chopra, A. K., & McKenna, F. (2016). Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), 193-211.
- [33] Charney, F. A. (2008). Unintended consequences of modeling damping in structures. *Journal of structural engineering*, 134(4), 581-592.
- [34] Applied Technology Council. (2009). Quantification of building seismic performance factors. US Department of Homeland Security, FEMA.

