

Investigation of the Vertical Acceleration Alterations in the Strong Near-Field Earthquakes

Majid Koolivand¹, Reza Rasti Ardakani*², Abbas Mahdavian³, and Hamid Saffari⁴

1- PhD Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

In this paper, alterations of vertical acceleration of the near-field earthquakes have been studied using 41 strong ground motions from 20 earthquakes with $3.9 \leq M \leq 7.3$, which have been extracted from KiK-net seismograph network (In Japan country). In this respect, the study of the vertical has been conducted in two cases. In the first case, by considering several strong earthquakes, the effect of the vertical acceleration of the near-field earthquakes was investigated to have an insight about the location effects. In the second case, the stations and earthquakes were considered constant and subsequently, the effect of the soil was evaluated. Accordingly, the transfer functions for the acceleration and velocity frequency amplification factors as well as spectral amplification factors were extracted for the velocity and acceleration spectra. In order to calculate the transfer functions, the ratio of the frequency contents of Time History recorded at the surface and depth was used, and for the spectral amplification coefficients, the ratio of the response spectrum of the surface to the depth with 5% attenuation was used. The most important finding is that soil layers amplify the seismic waves and vertical acceleration. Soil performance depends on factors such as source and direction of release. On the other hand, the presence of one or two layers of soil with completely limited thicknesses on the surface causes a completely different behavior of the construction. In general, the functions of frequency amplification and spectral amplification are similar in a wide range of frequencies. The magnitude of the earthquake could not cause drastic changes in the vertical acceleration transfer function. But soil magnification with the transfer function obtained under different input frequencies could have completely different performance. Major amplification of frequencies in the near field is observed in the range of 3 to 18 Hz.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 June 2023

Revise Date: 12 November 2023

Accept Date: 19 February 2024

Keywords:

Vertical Acceleration Borehole
Seismic Data Near-Field
Ground Motion Transfer
Function
Spectral Amplification

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.400292.3135>

*Corresponding author: Reza Rasti Ardakani

Email address: r_rasti@sbu.ac.ir

با استفاده از شبکه لرزه بررسی تغییرات شتاب قائم در زلزله‌های قوی حوزه نزدیک نگاری درون چاهی

مجید کولیوند^۱، رضا راستی اردکانی^{۲*}، عباس مهدویان^۳، حمید صفاری^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله با استفاده از ۴۱ رکورد قوی درون چاهی ناشی از ۲۰ زلزله با $M_{JMA} \geq 3.9$ و $V \geq 7.3$ از شبکه لرزه نگاری *KiK-net* متعلق به کشور ژاپن به بررسی تغییرات شتاب قائم در حوزه نزدیک پرداخته شده است. شتاب قائم از نظر انتخاب زلزله و ساختگاه در دو حالت مورد بررسی گرفت. در حالت اول با در نظر گرفتن چند زلزله قوی اثر آن در ایستگاه‌های متفاوت حوزه نزدیک بررسی شد تا اثرات مسیر و موقعیت مکانی ملموس گردد و در حالت دوم با ثابت گرفتن ایستگاه‌ها و انتخاب زلزله‌های متفاوت در حوزه نزدیک به بررسی اثرات خاک ساختگاه پرداخته شد. بر این اساس توابع انتقال برای ضرایب تقویت فرکانسی سرعت، شتاب و همچنین ضرایب تقویت طیفی برای طیف سرعت و شتاب استخراج شد. جهت محاسبه توابع انتقال از نسبت محتویات فرکانسی رکوردهای ثبت شده در سطح و عمق، و برای ضرایب تقویت طیفی، از نسبت طیف پاسخ سطح به عمق با میرایی ۵٪ استفاده شد. از جمله نتایج گرفته شده می‌توان به اثر مهم لایه‌های خاک در تقویت امواج زلزله و شتاب قائم اشاره کرد. عملکرد خاک تابع عواملی مانند منبع و مسیر انتشار است. از طرفی وجود یک یا دو لایه خاک با ضخامت‌های کاملاً محدود در سطح، سبب رفتار کاملاً متفاوت ساختگاه می‌شود. در مجموع توابع تقویت فرکانسی و تقویت طیفی در بخش وسیعی از فرکانس‌ها مشابه هم هستند. میزان بزرگای زلزله به تنهایی نمی‌تواند تغییرات شدیدی در تابع انتقال شتاب قائم ایجاد نماید. اما بزرگنمایی خاک با تابع انتقال بدست آمده تحت فرکانس‌های ورودی متفاوت می‌تواند عملکرد کاملاً متفاوتی داشته باشد. عمده تقویت فرکانس‌ها در حوزه نزدیک در بازه ۳ تا ۱۸ هرتز مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: شتاب قائم - رکورد درون چاهی - حوزه نزدیک - تابع انتقال - تقویت طیفی

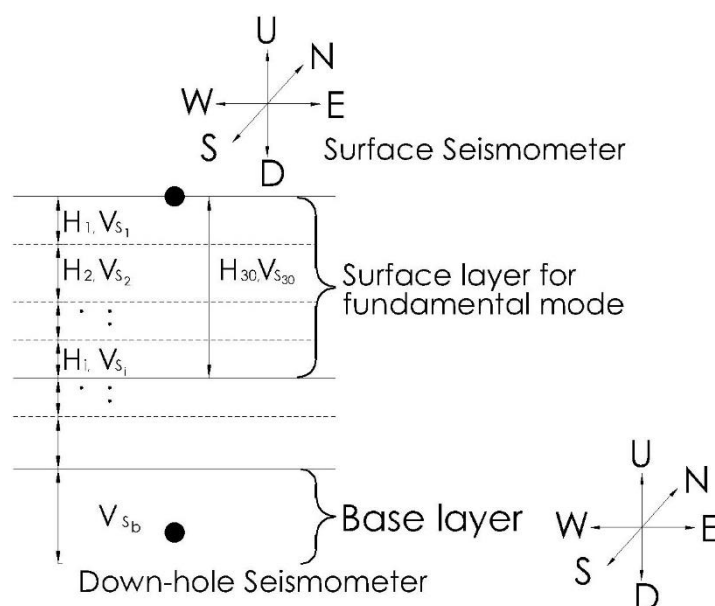
doi:	سابقه مقاله:				شناسه دیجیتال:
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.400292.3135	۱۴۰۲/۰۳/۲۸	۱۴۰۲/۰۸/۲۱	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	۱۴۰۲/۰۸/۳۰
10.22065/jsce.2024.400292.3135					
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: r_rasti@sbu.ac.ir					رضا راستی اردکانی

۱- مقدمه

سیستم‌های ارتعاشی در زمان وقوع زلزله تحت تاثیر شش مولفه زلزله ارتعاش می‌کنند. از این شش مولفه سه مولفه دورانی بوده و سه مولفه دیگر بصورت انتقالی است [۱]. مولفه دورانی در مقایسه با مولفه انتقالی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است و عمدتاً به دلیل کوچک بودن دامنه نوسان، دستگاه‌های لرزه‌نگار قادر به ثبت آن‌ها نیستند. از سه مولفه شتاب انتقالی دو مولفه مربوط به شتاب افقی و یک مولفه مربوط به شتاب قائم است [۲]. لازم به ذکر است که شرایط خاک محلی نقش اساسی در طبیعت و خصوصیات ارتعاشی ساختمان‌ها و در نتیجه رکوردهای ثبت شده دارد. اثرات ساختمان‌ها عموماً با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی عددی یا برداشت‌های میدانی از رکوردهای زلزله انجام می‌گیرد.

شبکه لرزه‌نگاری درون چاهی KiK-net ساخته شده از ۶۹۷ ایستگاه ثبت لرزه‌نگاری می‌باشد که از سال ۱۹۹۹ در ژاپن شروع به فعالیت کرده است [۳]. شبکه درون چاهی KiK-net که دارای ۳ مولفه ثبت شده در عمق (از طریق قرار دادن دستگاه در انتهای چاه) و ۳ مولفه ثبتی دیگر در سطح زمین می‌باشد. جزئیات مولفه قائم KiK-net به عنوان یک زوج از شتاب‌نگاشت ۳ جهته در سطح و عمق لایه خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. شبکه لرزه‌نگاری KiK-net در تمام ایستگاه‌های ثبت شتاب دارای لوگ خاک شامل سرعت موج برشی و موج طولی است که از آن در محاسبات عددی و مدل‌سازی‌های اجزا محدود استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که یکی از مهمترین مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای ارزیابی پاسخ زمین تحت ارتعاشات است.

بطور کلی حرکت زلزله متاثر از فاکتورهای الف) بزرگای زلزله ب) فاصله تا منبع آزاد سازی انرژی پ) شرایط خاک ساختمان ت) تغییرات زمین شناسی و سرعت انتشار در امتداد مسیر حرکت ث) وضعیت منبع زلزله و مکانیسم آن (نوع گسل، نرخ لغزش، وضعیت تنش، افت تنش و...) [۲].



شکل ۱- مولفه عمودی KiK-net متشکل از یک جفت سه بعدی لرزه‌نگاری در سطح زمین و لایه زیرین [۴]

در رابطه با اثر فاصله، محرز [۵] با استفاده از داده‌های زمین لرزه لوماپریتا^۱ که در ۱۹۸۹ رخ داد تاریخچه زمانی‌های زلزله را به سه گروه تقسیم کرد:

حوزه نزدیک: فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر تا گسل

¹ Loma Prieta

حوزه متوسط^۳: فاصله بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر از گسل

حوزه دور^۴: فاصله بیش تر از ۵۰ کیلومتر تا گسل

حرکات ثبت شده از زلزله‌های حوزه نزدیک در ایستگاه‌های درون چاهی ابزار مناسبی برای طبقه بندی حرکات زلزله می‌باشد. حذف لایه‌های سطحی خاک سبب افزایش دقت و کاهش پراکندگی اطلاعات موجود می‌باشد. وجود لایه‌های سطحی با تنوع و رفتارهای متفاوت و همچنین کمبود زلزله‌های قوی در ایستگاه‌های ثبت شده در سطح زمین در حوزه نزدیک بر دشواری بررسی رفتار زلزله می‌افزاید. از زلزله‌های (۱۹۶۶ پارکفیلد، کالیفرنیا^۵)، (۱۹۷۱ پاکویما، سن فرناندو^۶)، (۱۹۹۲ لندرز، کالیفرنیا^۷)، (۱۹۹۴ نورتریج^۸)، (۱۹۹۵ کوبه، ژاپن^۹)، (۲۰۰۳ بم) و (۱۹۹۹ چی-چی، تایوان^{۱۰}) می‌توان به عنوان مهم ترین زلزله‌های حوزه نزدیک نام برد. ویژگی رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک شکل ضربه‌ای و پالس‌های بزرگ و بلند مدت تغییر مکان و سرعت در تاریخچه زمانی می‌باشد [۶]. در حوزه نزدیک اثرات جهت پذیری پیشرونده^{۱۱} باعث ایجاد ارتعاشات افقی زمین در جهت عمود بر امتداد گسل به صورت ضربه افقی بزرگی می‌شود که به صورت قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از مولفه افقی موازی با گسل است. محدوده حوزه نزدیک به مکانیسم شکست، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه و تغییر مکان‌های دائمی ناشی از لغزش گسل وابسته است. از اثرات دیگر حرکات ثبت شده در حوزه نزدیک گسل، حرکت و شتاب قائم نیرومند زمین می‌باشد. مولفه شتاب قائم یک زلزله به لحاظ دامنه و محتویات فرکانسی با شتاب افقی متفاوت است و با بیشتر شدن فاصله ساختگاه از گسل مسبب، کاهش شدید مولفه قائم ارتعاش زمین مشاهده می‌شود [۱]. از دیگر بررسی‌های انجام گرفته در حوزه نزدیک نسبت طیف پاسخ قائم به افقی (V/H) است که توسط بزرگ نیا و همکاران مطرح گردید. در این رابطه آن‌ها نتایج کلی ارائه دادند و بعد از این افراد زیادی در این زمینه فعالیت کرده‌اند. بطور کلی، نتایج مطالعه محققینی همچون بزرگ نیا و نیازی [۷] بزرگ نیا و کمپبل^{۱۲} [۸] و بزرگ نیا و همکاران [۹] نشان داده است که نسبت طیفی بیان شده به پیروید و فاصله از گسل بسیار حساس می‌باشد و این نسبت یک پیک در پیرودهای کوتاه دارد که از مقدار ۰/۶۷ در نواحی نزدیک گسل تجاوز میکند. آنها همچنین نشان دادند که این نسبت یک مقدار بیشینه در محدوده پیرودی ۰/۰۵ تا ۰/۱ ثانیه را دارد و مقادیر کمینه آن در محدوده ۰/۴ تا ۰/۸ ثانیه می‌باشد و در پیرودهای بالاتر این نسبت طیفی با شیب بسیار کمی روندی افزایشی دارد.

در رابطه با پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه نزدیک می‌توان به هوی چو هوانگ و هونگ چی چو^{۱۳} اشاره کرد [۱۰]. آن‌ها برمبنای رکورد درون چاهی با چهار شتابنگاشت نصب شده در گمانه با ترازهای ۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ متری به بررسی تشدید شتاب افقی پرداختند. کیکشو و ستو^{۱۴} با استفاده از رکوردهای ثبت شده در KiK-net و روابط تحلیلی به ارزیابی تشدید شتاب قائم در سطح نسبت به عمق در زلزله‌های قوی پرداختند [۴]. نوگیچی و ستو^{۱۵} براساس شبکه لرزه نگاری K-Net و Kik-net به خصوصیات پاسخ غیرخطی ساختگاه در زلزله‌های قوی شرق ژاپن پرداختند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند که خصوصیات غیرخطی ساختگاه را می‌توان بر اساس تشدید خطی ساختگاه طبقه بندی کرد. بعبارت دیگر اگر خصوصیات پاسخ خطی شبیه هم باشد پاسخ غیرخطی نیز مشابه است. زیفنگ یانگ^{۱۶} و همکاران بر اساس مشاهدات میدانی لرزه‌ای Kik net به کاهش انحنای مدول برشی در شن و خاک‌های رسی بر اساس نسبت کاهش مدول برشی در ۱۸ ساختگاه تحت ۱۶۵ زلزله قوی پرداختند [۱۲]. آنها مدل اصلاح شده‌ای برای تعیین روابط ساختاری مواد برای تجزیه و تحلیل

² Near Field

³ Mid Field

⁴ Far Field

51966 Parkfield, California

6 1971 Pacoima, San Fernando

71992 Landers, California

8 1994 Northridge

9 1995 Kobe, Japan

10 1999 Chi-Chi, Taiwan

11 Forward directivity

12 Campbell

13 Huey-chu Huang and Hung Chie Chiu

14 Kokusho and Sato

15 Noguchi and Sato

16 Zefeng Yang

عددی سازه‌های ژئوتکنیکی تحت بارهای لرزه‌ای پیشنهاد دادند. بوهان^{۱۷} و همکاران بر اساس مانیتورینگ مولفه‌های شتاب KiK-net به بررسی عددی چند جهته پاسخ ساختگاه با استفاده از تحلیل اجزا محدود دینامیکی کوپل شده هیدرومکانیکی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از مدل عددی مناسب می‌توان نتایج خوبی در شبیه‌سازی چند جهته در مقایسه با پاسخ شتاب رکوردهای ثبت شده در تمام جهات بطور همزمان بدست آورد [۱۳]. مارکو پلز^{۱۸} و همکاران با استفاده از رکوردهای درون چاهی KiK-net به بررسی پاسخ دینامیکی یکی بعدی و مقایسه آن با اثرات دو و سه بعدی پرداختند [۱۴]. کیومرثی و همکاران در بررسی تحلیل یک بعدی پاسخ زمین به شتاب قائم در ساختگاه‌های کالیفرنیا دریافتند که درصد بالایی از سایت‌های کالیفرنیا، در مقایسه با سایت‌های KiK-net ژاپن، تطابق مناسبی در تابع انتقال چه از لحاظ روابط تجربی و نظری وجود دارد همچنین به این نتیجه رسیدند که از تحلیل یک بعدی نمی‌توان به نتایج دقیق دست یافت [۱۵]. کاکلمانوس و همکاران^{۱۹} با استفاده از داده‌های درون چاهی KiK-net به پیش‌بینی پاسخ زمین با استفاده از تحلیل یک بعدی پرداختند و دریافتند که مدل‌های پاسخ ساختگاه عدم قطعیت‌های زیادی را نشان می‌دهد اما گاهی اوقات می‌توانند حرکات مشاهده شده زمین را به خوبی تکرار کنند [۱۶].

عموماً در تحلیل ساختگاه و اثرات تقویت کننده لایه‌های خاک از روابط تحلیلی یا مدل‌های یک بعدی در نرم افزارهایی همانند EERA, NERA یا Deep Soil استفاده می‌شود. مبنای روابط تحلیلی بر اساس تیر برشی بوده و در مدل‌های عددی یک بعدی از روابط معادل استفاده می‌شود. با توجه به وجود شتاب ثقل در راستای قائم و عملکرد متفاوت و چند جهته خاک، اعمال شتاب قائم و بررسی آن از طریق مدل‌های دو بعدی که برای راستای افقی صحت سنجی شده‌اند صحیح نمی‌باشد. لذا هدف از این مقاله، بررسی نحوه تقویت شتاب قائم بر اساس رکوردهای درون چاهی در حوزه نزدیک است. همچنین از نتایج این مقاله می‌توان در جهت اصلاح روش H/V استفاده کرد.

۲. بررسی شتاب قائم از دید آیین نامه‌ای

۲-۱. آیین نامه ASCE7

عموماً طبقه بندی خاک بر اساس عبور سرعت موج برشی از آن صورت می‌گیرد. همچنین از آزمایش تست SPT نیز برای این امر استفاده می‌شود. در آیین نامه ASCE7 خاک‌ها بر اساس سرعت موج برشی مطابق جدول (۱ الف) طبقه بندی می‌شود [۱۷]. عموماً خاک‌ها تک لایه نبوده و دارای لایه‌های متفاوتی می‌باشند. به همین خاطر از یک سرعت متوسط موج برشی برای n لایه خاک استفاده می‌شود. متوسط سرعت موج برشی \bar{V}_s از رابطه (۱) بدست می‌آید. در این رابطه V_{si} سرعت موج برشی و d_i ضخامت لایه خاک از ۰ تا ۳۰ متر می‌باشد.

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}} \right)} \quad (1)$$

¹⁷ Bohan

¹⁸ Marco Pilz

¹⁹ Kaklamanos

جدول ۱ الف: طبقه بندی نوع زمین بر اساس [۱۷]

Site class	Description	$\bar{V}_S (V_{S30}, m/s)$
A	Hard rock	>5,000 fps (1500 m/s)
B	Rock	>2,500 to 5,000 fps (760–1500 m/s)
C	Very dense soil and soft rock	>1,200 to 2,500 fps (360–760 m/s)
D	Stiff soil	600 to 1,200 fps (180–360 m/s)
E	soil	<600 fps (<180 m/s)
F	Soils requiring site-specific evaluations (liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, and collapsible weakly cemented soils)	

جدول ۱ ب: ضریب اصلاح نوع زمین F_a [۱۷]

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE_R) Spectral Response Acceleration parameter at Short Period					
	$S_S \leq 0.25 g$	$S_S = 0.50 g$	$S_S = 0.75 g$	$S_S = 1.0 g$	$S_S = 1.25 g$	$S_S \geq 1.5 g$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	*	*	*
F	*	*	*	*	*	*

* برای تعیین مقادیر مناسب باید مطالعات ژئوتکنیکی میدانی و تحلیل پاسخ دینامیکی انجام شود.

جدول ۱ پ: مقادیر ضریب C_v برای شتاب قائم [۱۷]

Mapped MCE_R Spectral Response Parameter at Short Periods**	Site Class A, B	Site Class C	Site Class D, E, F
	$S_S \geq 2.0$	0.9	1.3
$S_S = 1.0$	0.9	1.1	1.3
$S_S = 0.6$	0.9	1.0	1.1
$S_S = 0.3$	0.8	0.8	0.9
$S_S \leq 0.2$	0.7	0.7	0.7

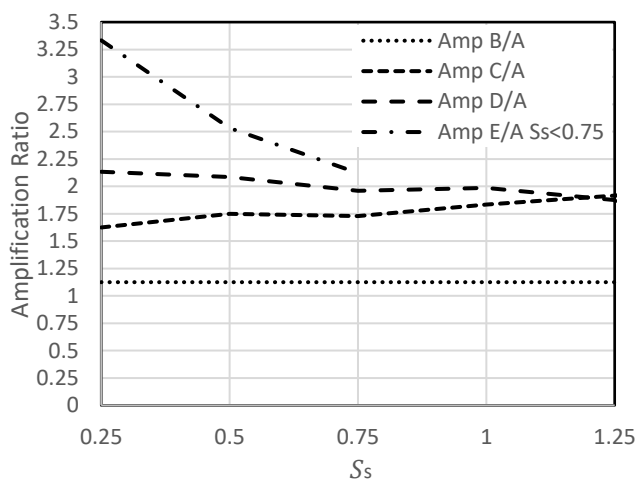
** برای مقادیر بینابین می توان از درون یابی خطی استفاده نمود.

در ASCE7، S_S شتاب طیفی زمان کوتاه برای زلزله طرح MCE می باشد که با توجه به موقعیت پروژه تعیین می گردد. با توجه به طبقه بندی نوع خاک و S_S ، مقادیر ضریب اصلاح F_a مطابق با جدول (۱) مشخص می شود. از ضرب مقادیر S_S در ضریب اصلاح F_a پارامتر S_{MS} بدست می آید.

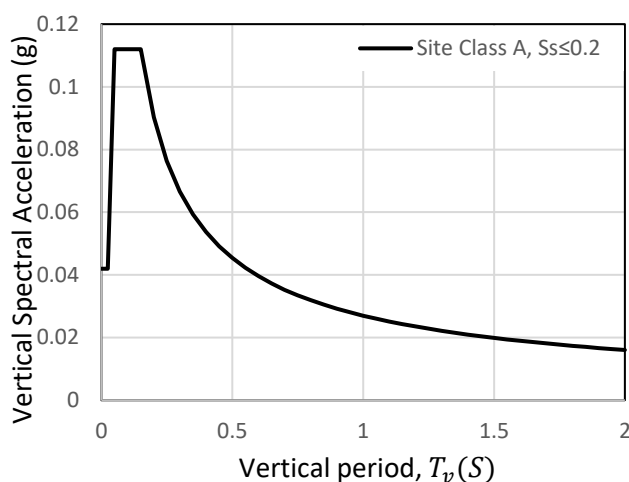
$$S_{MS} = F_a S_S \quad (2)$$

طیف پاسخ الاستیک شتاب قائم براساس رابطه (۲) و جداول (۱ الف) تا (۱ پ) مطابق رابطه ۳ تعیین می گردد. مقادیر پارامتر C_v در جدول (1C) آورده شده است. در رابطه (۳) پارامتر T_V زمان تناوب قائم می باشد. در شکل (۲) به عنوان نمونه طیف پاسخ شتاب قائم برای خاک تیپ A و $S_S \leq 0.2$ ترسیم شده است. در شکل (۲ ب) نسبت طیف پاسخ شتاب قائم برای خاک های B, C, D, E نسبت به خاک A برای مقادیر متفاوت S_S ترسیم شده است.

$$S_{aMv} = \begin{cases} 0.3C_v S_{MS} & T_v \leq 0.025 \\ 20C_v S_{MS} (T_v - 0.025) + 0.3C_v S_{MS} & 0.025 < T_v \leq 0.05 \\ 0.80.3C_v S_{MS} & 0.05 < T_v \leq 0.15 \\ 0.80.3C_v S_{MS} \left(\frac{0.15}{T_v}\right)^{0.75} & 0.15 < T_v \leq 2 \end{cases} \quad (۳)$$



ب



الف

شکل ۲: طیف پاسخ شتاب قائم الف) طیف پاسخ شتاب قائم برای خاک تیپ A ب) نسبت طیف پاسخ شتاب قائم برای خاک های متفاوت

همانطور که در شکل (۲ب) مشاهده می شود، عموماً در خاک های نرم با افزایش شتاب افقی، ضریب تقویت^{۲۰} یا ثابت بوده یا کاهشی هست. در واقع با افزایش میزان شتاب افقی در خاک های نرم نوعی رفتار غیر خطی یا میرایی هیستریزس برای خاک در نظر گرفته شده که با افزایش شتاب از میزان ضریب تشدید کاسته می شود. برای خاک های نوع A, B تمامی مقادیر شتاب قائم رابطه مستقیمی با شتاب افقی در سطح خاک دارد.

۲-۲. آیین نامه یورو کد ۸

در یورو کد ۸ [۱۸] مولفه شتاب قائم در منطقه فعال لرزه ای با طیف پاسخ الاستیک براساس روابط (۴) تا (۷) مشخص می شود.

$$0 \leq T \leq T_B : S_{Ve}(T) = a_{vg} \left[1 + \frac{T}{T_B} (3\eta - 1) \right] \quad (۴)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{Ve}(T) = 3a_{vg} \eta \quad (۵)$$

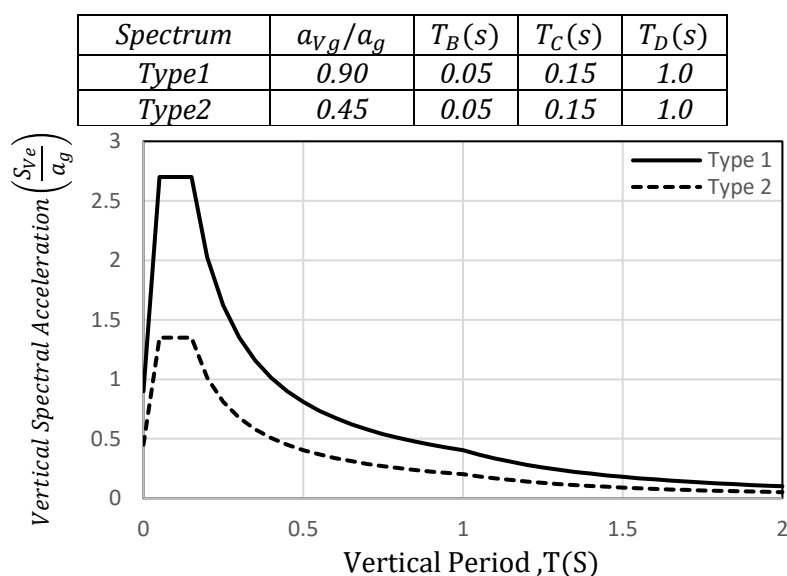
$$T_C \leq T \leq T_D : S_{Ve}(T) = 3a_{vg} \eta \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (۶)$$

²⁰ Amplification Ratio

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{Ve}(T) = 3a_{vg}\eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (7)$$

مقادیر T_B, T_C, T_D و a_{vg} برای هر ۵ نوع خاک (A,B,C,D,E) در جدول (۲) آورده شده است. طیف پیشنهادی برای ساختگاه در دو تیپ تعریف می‌شود. تیپ ۲ برای مناطقی که M_S آن‌ها از ۵.۵ بیشتر نگردد توصیه می‌شود. پارامتر η مربوط به میرایی بوده که عموماً ۰.۵٪ لحاظ می‌شود. در شکل (۳) طیف پاسخ الاستیک بی بعد شده شتاب قائم برای هر دو تیپ منطقه ترسیم شده است. شایان ذکر است که نسبت دو طیف تیپ ۱ به تیپ ۲ برابر با مقدار ثابت ۲ است.

جدول ۲: مقادیر پیشنهادی برای طیف پاسخ الاستیک قائم [۱۸]



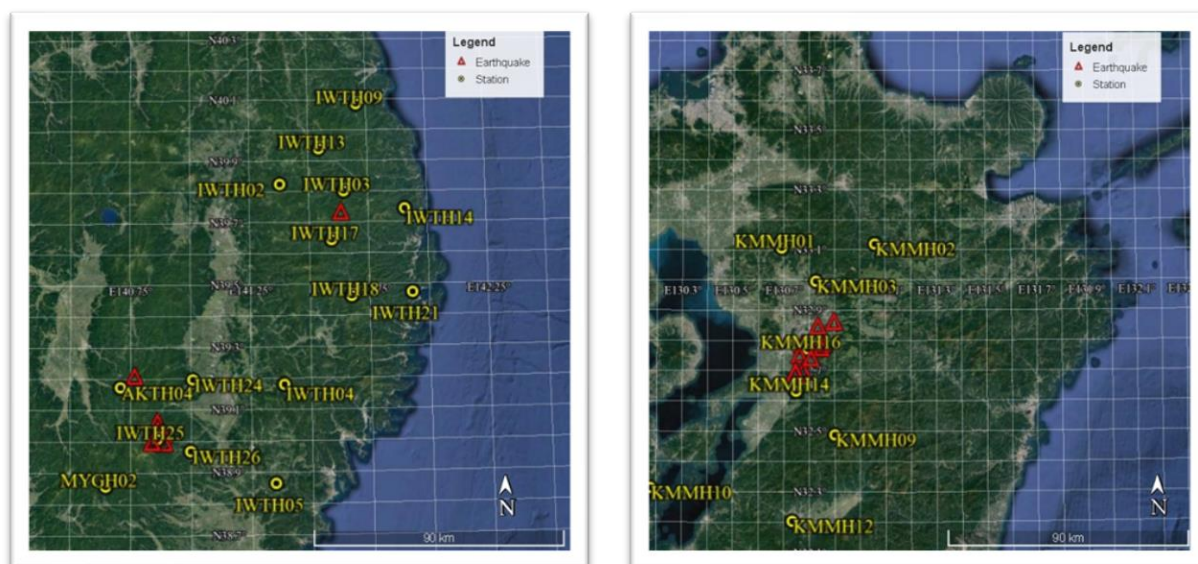
شکل ۳: طیف پاسخ الاستیک شتاب قائم مطابق با یورو کد ۸

همانطور که مشخص است شکل طیف پاسخ الاستیک در یورو کد ۸ تا حدودی مشابه ASCE7 بوده و هر دو آیین‌نامه برای زمان تناوب‌های بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ مقدار ثابتی برای شتاب در نظر گرفته‌اند با این تفاوت که اثرات جنس لایه سطحی خاک در یورو کد ۸ بی‌تأثیر است.

۳. انتخاب زلزله‌ها و ایستگاه‌ها

جهت انتخاب رکوردهای زلزله، از زلزله‌های قوی ثبت شده در حوزه نزدیک استفاده شد. داشتن زلزله‌های قوی که در آن ایستگاه درون چاهی در حوزه نزدیک موجود باشد با محدودیت فراوانی روبرو است. براین اساس ابتدا به انتخاب زلزله‌های قوی ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری KiK-net پرداخته شد و زلزله‌هایی که دارای چند رکورد ثبت شده درون چاهی در حوزه نزدیک بود انتخاب گردید. در تمامی زلزله‌هایی که انتخاب شده حداقل یک ایستگاه درون چاهی به فاصله ۱۳ کیلومتر و کمتر جهت ثبت رکورد موجود می‌باشد. در جداول ۳ تا ۸ زلزله‌های انتخاب شده بر اساس زمان وقوع نشان داده شده است. جداول ۵، ۴، ۳ به ترتیب مربوط به سه ایستگاه Iwth25, KMMH16, KMMH14 می‌باشد که تحت زلزله‌های مختلفی قرار گرفته‌اند. جداول ۸، ۷، ۶ به ترتیب مربوط به سه زلزله 2008/07/24-00:26, 2008/06/14-08:43, 2016/04/16-01:25 می‌باشد که در ایستگاه‌های مختلفی بررسی شده است. در ستون اول شماره ردیف، ستون دوم

زمان وقوع، ستون سوم نام ایستگاه، ستون چهارم عمق کانونی، ستون پنجم بزرگ براساس مقیاس JMA ^{۲۱}، ستون ششم شدت براساس مقیاس شیندو^{۲۲}، ستون هفتم فاصله رو مرکز تا ایستگاه، ستون هشتم حداکثر شتاب قائم ثبت شده در کف، ستون نهم بالاترین ضریب تقویت که از قدر مطلق شتاب قائم سطح به قدر مطلق شتاب قائم کف بدست آمده و ستون دهم حداکثر برآیند شتاب افقی و قائم در سطح می باشد. در شکل های (۴ الف) و (۴ ب) به ترتیب موقعیت قرار گیری ایستگاه نسبت به رو مرکز زلزله نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵) اطلاعات لوگ خاک مربوط به ایستگاه MYGH02 به تفصیل آورده شده، برای سایر ایستگاه های استفاده شده صرفا به درج اطلاعات در جدول ۹ اکتفا گردید.



(ب) مربوط به جدول ۷ و ۸

(الف) مربوط به جدول ۳ و ۶

شکل ۴- موقعیت رومرکز زلزله و ایستگاه های ثبت که به ترتیب مربوط به جداول ۳ تا ۸ می باشد. موقعیت رومرکز با علامت Δ نشان داده شده است.

جدول ۳- زلزله های انتخاب شده در ایستگاه KMMH16 [۱۹]

ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M_{JMA}	Intensity JMA	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2016/04/14-21:26	KMMH16	11	6.5	6.4	6	126.95	13.53	1579.7
2	2016/04/14-22:07	KMMH16	8	5.8	5.7	4	83.55	6.31	709.7
3	2016/04/14-23:28	KMMH16	13	4.4	4.8	3	-27.67	7.04	303.0
4	2016/04/14-23:29	KMMH16	13	4.6	4.8	3	28.33	6.40	263.9
5	2016/04/15-00:03	KMMH16	7	6.4	5.7	11	26.01	8.75	606.3
6	2016/04/15-00:34	KMMH16	13	4.5	4.2	13	4.91	14.07	205.2
7	2016/04/16-01:25	KMMH16	12	7.3	6.5	7	-195.53	6.98	1362.1
8	2016/04/16-01:46	KMMH16	11	5.9	5.6	10	-65.31	6.53	420.6
9	2016/04/16-07:23	KMMH16	12	4.8	4.7	5	17.29	8.71	245.1
10	2016/04/16-09:48	KMMH16	16	5.4	4.6	6	37.11	7.13	244.8

^{۲۱} آژانس هواشناسی ژاپن (JMA) با بهره گیری از امواج با پریود بلند یک مقیاس بزرگای محلی، M_{JMA} را برای زلزله های ژاپن تعریف نموده است [۱].

^{۲۲} شدت زلزله در مقیاس شیندو (JMA) با اعداد صفر تا ۷ نمایش داده می شود که عدد هفت نمایانگر شدیدترین لرزش است [۱].

جدول ۴- زلزله‌های انتخاب شده در ایستگاه IWTH25 [۱۹]

ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M _{JMA}	Intensity _{JMA}	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2008/06/14-08:43	IWTH25	8	7.2	6.3	3	-680.76	6.03	4022.1
2	2008/06/14-09:06	IWTH25	11	3.9	4.8	3	-44.70	7.80	1004.0
3	2008/06/14-11:35	IWTH25	10	4.3	5.2	2	-34.92	6.76	823.7
4	2008/06/14-23:42	IWTH25	10	4.8	3.9	3	-67.08	6.20	429.2
5	2008/06/16-23:14	IWTH25	11	5.3	4.3	6	-134.74	7.39	410.6
6	2008/06/18-16:55	IWTH25	12	4.5	4.3	3	29.35	6.95	403.5
7	2008/07/29-16:35	IWTH25	10	4.6	3.9	1	-35.97	7.07	351.0

جدول ۵- زلزله‌های انتخاب شده در ایستگاه KMMH14 [۱۹]

ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M _{JMA}	Intensity _{JMA}	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2016/04/14-21:26	KMMH14	11	6.5	5.4	13	49.97	4.93	357.4
2	2016/04/15-00:03	KMMH14	7	6.4	5.7	8	72.75	7.76	559.7
3	2016/04/16-01:25	KMMH14	12	7.3	5.7	13	127.26	4.81	612.3
4	2016/04/16-14:27	KMMH14	8	4.6	4.2	2	-16.87	7.59	194.5
5	2016/04/16-16:02	KMMH14	12	5.4	4.5	8	20.18	9.98	191.1

جدول ۶- ایستگاه‌های انتخاب شده برای زلزله 2016/04/16-01:25 [۱۹]

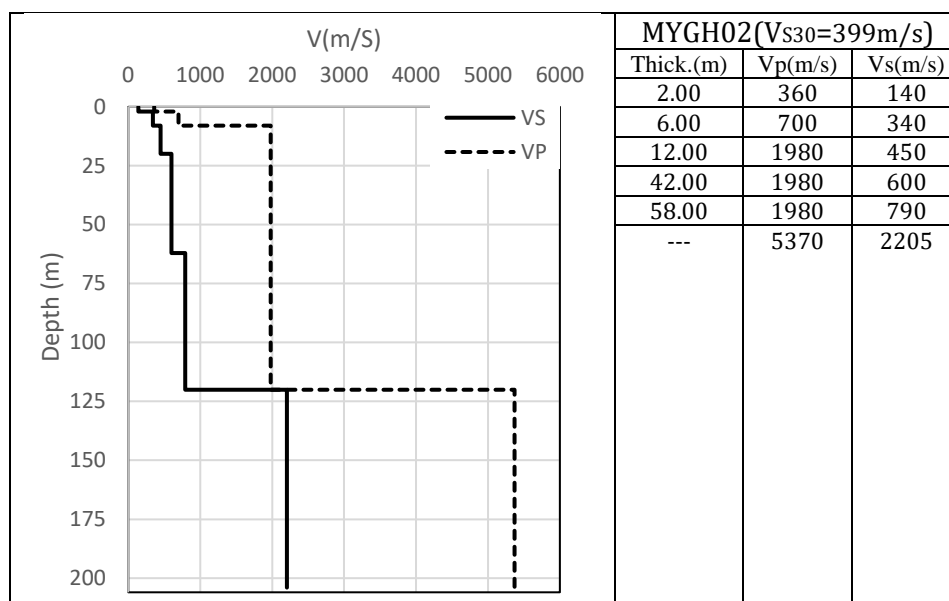
ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M _{JMA}	Intensity _{JMA}	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2016/04/16-01:25	KMMH01	12	7.3	4.5	40	31.03	3.00	251.5
2	2016/04/16-01:25	KMMH02	12	7.3	5.5	50	-71.92	5.36	687.0
3	2016/04/16-01:25	KMMH03	12	7.3	6.1	28	47.87	9.52	800.5
4	2016/04/16-01:25	KMMH09	12	7.3	5.0	32	29.03	4.11	245.5
5	2016/04/16-01:25	KMMH10	12	7.3	4.5	73	-14.88	4.22	194.9
6	2016/04/16-01:25	KMMH12	12	7.3	4.6	61	-29.25	3.05	217.8
7	2016/04/16-01:25	KMMH14	12	7.3	5.7	13	127.26	4.81	612.3
8*	2016/04/16-01:25	KMMH16	12	7.3	6.5	7	-195.53	6.98	1362.1

جدول ۷- ایستگاه‌های انتخاب شده برای زلزله 2008/06/14-08:43 [۱۹]

ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M _{JMA}	Intensity _{JMA}	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2008/06/14-08:43	AKTH04	8	7.2	6.4	22	138.42	9.48	2599.9
2**	2008/06/14-08:43	IWTH25	8	7.2	6.3	3	-680.76	6.03	4022.1
3	2008/06/14-08:43	IWTH24	8	7.2	5.5	22	-120.87	2.94	538.5
4	2008/06/14-08:43	IWTH26	8	7.2	6	12	-167.28	5.78	1372.1
5	2008/06/14-08:43	MYGH02	8	7.2	5.0	27	53.81	5.53	288.8

جدول ۸- ایستگاه‌های انتخاب شده برای زلزله 2008/07/24-00:26 [۱۹]

ردیف	زمان	نام ایستگاه	عمق کانونی km	M _{JMA}	Intensity _{JMA}	فاصله تا ایستگاه km	Max.acc bot(gal)	Rd	Max.acc top(gal)
1	2008/07/24-00:26	IWTH02	108	6.8	5.8	24	21.44	31.24	1185.9
2	2008/07/24-00:26	IWTH03	108	6.8	4.9	8	49.30	17.39	736.1
3	2008/07/24-00:26	IWTH09	108	6.8	4.9	40	55.13	7.36	540
4	2008/07/24-00:26	IWTH13	108	6.8	4.2	24	39.90	3.52	236.2
5	2008/07/24-00:26	IWTH14	108	6.8	4.9	23	-48.00	9.48	548.1
6	2008/07/24-00:26	IWTH17	108	6.8	4.5	10	-62.72	4.66	426.8
7	2008/07/24-00:26	IWTH18	108	6.8	4.8	30	-46.38	9.59	518.7
8	2008/07/24-00:26	IWTH21	108	6.8	5.2	38	-50.57	9.28	553.9



شکل ۵- یک نمونه لوگ خاک مربوط به ایستگاه (MYGH02) [۱۹]

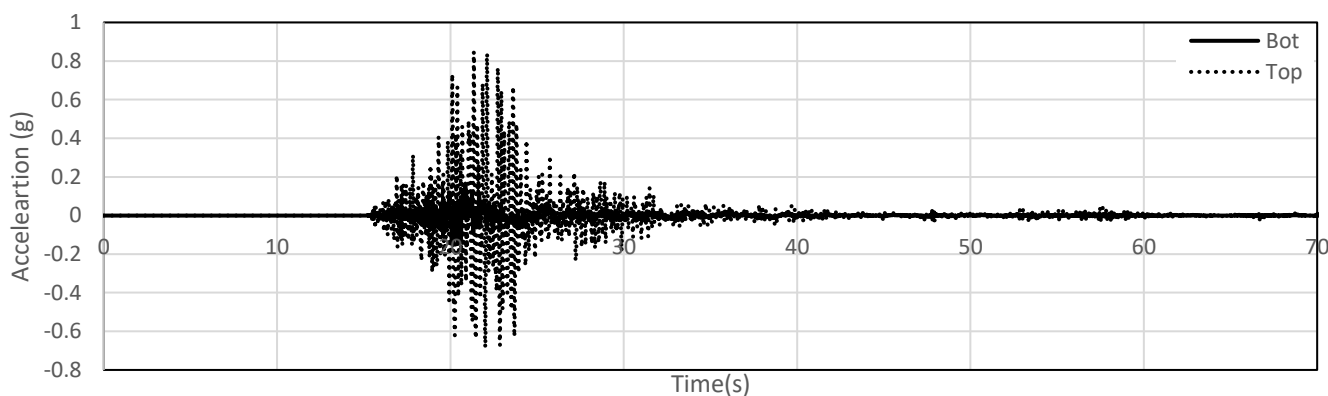
جدول ۹ - اطلاعات مربوط به لوگ خاک برای کلیه ایستگاه‌های بکار برده شده در بانک داده‌ها [۱۹]

KMMH01(Vs30=575m/s)			KMMH02(Vs30=577m/s)			KMMH03(Vs30=421m/s)			KMMH09(Vs30=400m/s)		
Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
1.00	200	150	2.00	240	120	2.00	280	150	4.00	300	150
9.00	1500	380	4.00	720	370	16.00	800	430	6.00	700	350
12.00	2400	790	16.00	2700	1100	12.00	1500	580	12.00	1100	530
16.00	3300	1200	20.00	2700	800	26.00	2500	720	18.00	1800	930
---	4200	1900	---	1900	630	24.00	2100	460	24.00	1700	670
						48.00	2800	1300	12.00	2300	960
						---	4100	2000	---	3300	1600
KMMH10(Vs30=463m/s)			KMMH12(Vs30=410m/s)			KMMH14(Vs30=248m/s)			KMMH16(Vs30=280m/s)		
Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
5.00	530	220	4.00	470	210	4.00	210	110	3.00	240	110
5.00	1000	340	50.00	1600	480	6.00	320	180	12.00	380	240
35.00	2400	730	38.00	1900	600	10.00	1580	330	18.00	1180	500
35.00	3600	1000	---	2100	1000	38.00	1580	480	8.00	1180	400
60.00	3200	1000				30.00	1870	480	28.00	1950	760
---	3400	1600				12.00	2580	690	32.00	2300	820
						---	3280	1540	32.00	2800	1470
									10.00	2800	700
									26.00	2800	1380
									32.00	2300	840
									32.00	2300	1470
									---	4800	2700
IWTH02(Vs30=390m/s)			IWTH03(Vs30=733m/s)			IWTH09(Vs30=967m/s)			IWTH13(Vs30=621m/s)		
Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
5.00	300	150	5.00	400	200	6.00	880	440	2.00	550	100
14.00	1800	450	17.00	2400	1400	10.00	3150	1040	2.00	550	200
8.00	2300	780	44.00	4800	2100	14.00	3150	1800	14.00	3930	1280
15.00	3400	1300	---	4800	2800	28.00	4120	2210	22.00	3930	1620
17.00	4000	1900				---	5700	2610	20.00	3930	2110
---	4500	2300							---	4190	2180
IWTH14(Vs30=816m/s)			IWTH17(Vs30=1270m/s)			IWTH18(Vs30=892m/s)			IWTH21(Vs30=521m/s)		
Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
2.00	550	170	2.00	580	240	2.00	450	180	2.00	330	150
4.00	1500	460	8.00	3000	1500	6.00	2410	680	6.00	1500	320
14.00	3010	1240	16.00	4960	1900	8.00	2410	1060	4.00	2080	400
26.00	4420	2000	44.00	4960	2600	44.00	5280	2270	8.00	3200	990
---	5300	2790	---	4960	2960	---	5860	2630	20.00	4540	1350
									30.00	4740	2000
									---	4980	2460
IWTH24(Vs30=486m/s)			IWTH25(Vs30=506m/s)			IWTH26(Vs30=371m/s)			AKTH04(Vs30=459m/s)		
Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Thick.(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
2.00	480	180	6.00	850	430	4.00	450	130	2.00	300	150
8.00	1770	480	28.00	1770	530	6.00	1660	460	18.00	880	430
38.00	1960	590	30.00	2310	680	26.00	1660	540	12.00	3000	980
8.00	1570	300	48.00	2310	1120	---	1830	680	38.00	3000	1150
34.00	1570	550	64.00	4010	1780				---	3000	1500
28.00	1930	600	28.00	2620	1380						
---	1930	540	---	3180	1810						

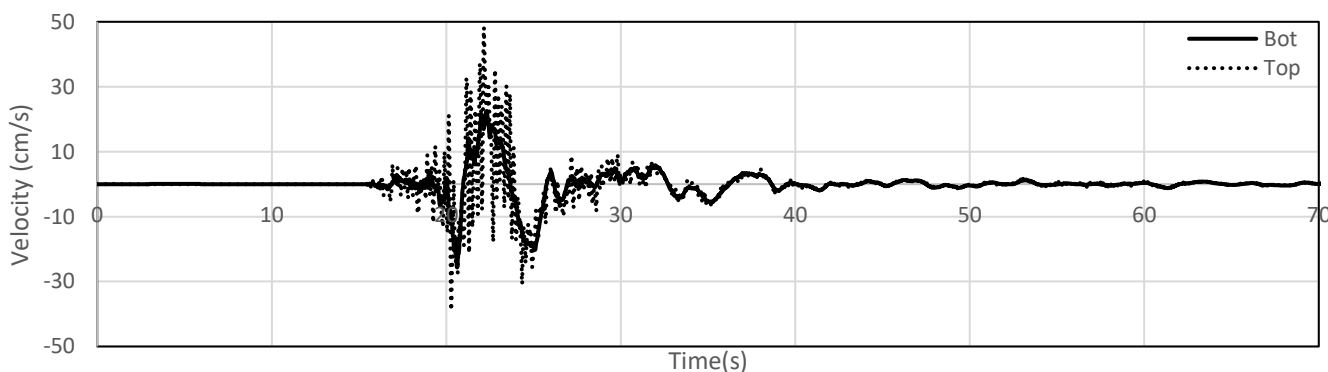
۴. تحلیل داده‌های شتابنگاری درون چاهی

متداول ترین روش تشریح حرکات زمین بهره‌گیری از تاریخچه زمانی می‌باشد. شتاب افقی حداکثر^{۲۳} PHA برای یک مولفه حرکت، بزرگترین مقدار (قدر مطلق) شتاب افقی بدست آمده از آن مولفه شتاب نگاشت است. PHA پارامتر مفیدی است اما در خصوص محتویات فرکانسی یا مدت حرکت اطلاعاتی نمی‌دهد. با توجه به اینکه سرعت، حساسیت کمتری نسبت به مولفه‌های فرکانس بالای زلزله دارد^{۲۴} PHV برای سازه‌ها با حساسیت و عملکرد در فرکانس‌های متوسط، کاربردی‌تر از PHA است. در مقایسه اهمیت PHA با شتاب قائم حداکثر^{۲۵} PVA در طراحی سازه به علت وزن سازه ساخته شده توجه کمتری می‌شود. طبق مطالعات صورت گرفته نسبت PVA به PHA کاملاً متغییر می‌باشد و مقدار آن بزرگتر از دو سوم در مناطق نزدیک کانون در زلزله‌های رخ داده متوسط تا بزرگ و کمتر از ۲/۳ در فواصل زیاد می‌باشد.

شتاب قائم در شکل (۶) تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی مولفه قائم برای عمق گمانه و سطح خاک در ایستگاه KMMH16 برای زلزله 2016/04/16-01:25 ترسیم شده است.



الف- تاریخچه شتاب در سطح و عمق

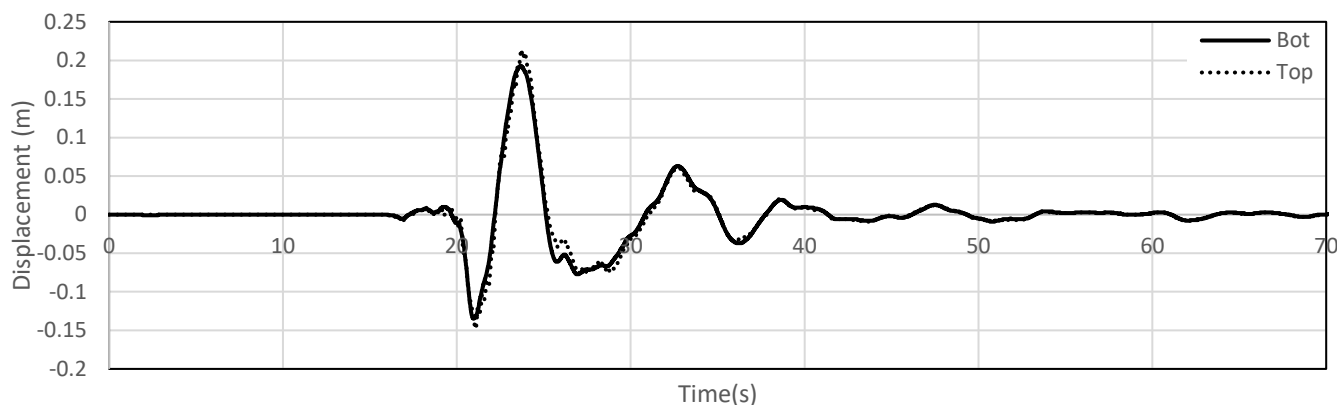


ب- تاریخچه سرعت در سطح و عمق

²³ Peak Horizontal Acceleration

²⁴ Peak Horizontal Velocity

²⁵ Peak Vertical Acceleration

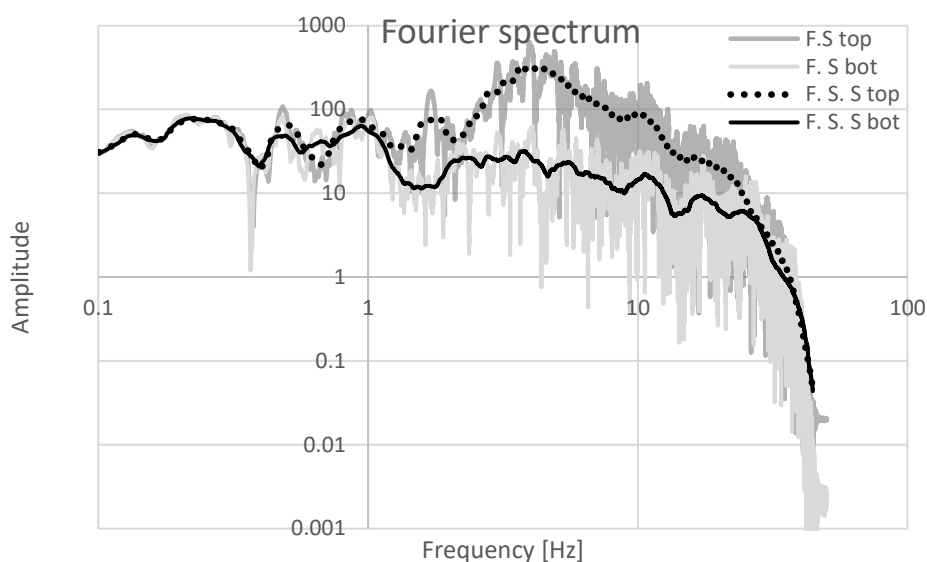


شکل ۶- تاریخچه جابجایی در عمق و سطح

شکل ۶- تاریخچه شتاب- سرعت و جابجایی مربوط به سطح و عمق در ایستگاه KMMH16 برای زلزله 2016/04/16-01:25

در شکل (۶ الف) مشاهده می‌شود که برای بازه گسترده ای از تاریخچه شتاب تقویت‌های بزرگی رخ می‌دهد ولی به طور نسبی دوام زلزله در سطح و عمق یکسان است. برای تاریخچه سرعت شکل (۶ ب) در عمق پالس سرعت مشهود است. در سطح، تاریخچه، نوسان- های شدیدی نسبت به عمق دارد و بزرگنمایی بزرگتر از ۲ دیده می‌شود. در شکل (۶ پ) جابجایی قائم بر خلاف شتاب و سرعت، در سطح به عمق تغییر خاصی نداشته و تقریباً یکسان هستند. قابل توجه است که این تشابه همواره رخ نداده و در سایر بررسی‌ها چنین تطابق کاملی مشاهده نگردید. در ادامه به بررسی و چگونگی تغییرات شتاب قائم با فاصله از کانون و تقویت امواج توسط خاک پرداخته می‌شود.

یکی از مهم ترین عوامل در تخمین حرکت دینامیکی که باید به آن توجه داشت محتوای فرکانسی حرکت است. در شکل (۷) طیف فوریه و طیف فوریه همواره شده^{۲۶} FSS مربوط به شتابنگاشت شکل (۶ الف) نشان داده شده است. نحوه هموار شدن براساس روش هنینگ^{۲۷} می‌باشد.



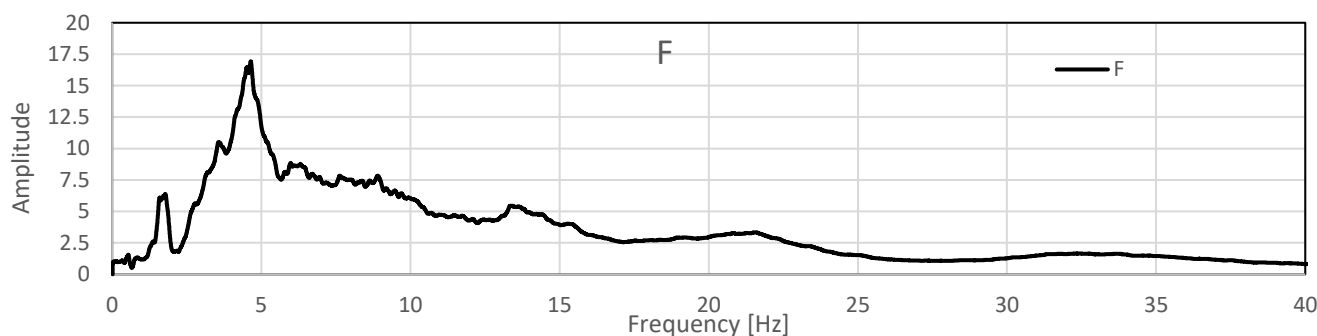
شکل ۷- طیف فوریه به همراه طیف فوریه هموار شده برای سطح و عمق در مختصات log-log برای ایستگاه KMMH16 در زلزله 2016/04/16-01:25

²⁶ Fourier Smoothed Spectrum

²⁷ Hanning

همانطور که پیش از این مشخص شده با انتقال امواج زلزله از عمق به سطح، مولفه‌های شتاب، سرعت و جابجایی تغییر می‌کنند. علت این تغییرات عمدتاً مربوط به تغییر لایه‌های سطحی و شرایط مرزی در سطح خاک است که جهت بیان آن از تابع انتقال استفاده می‌شود. به عبارت دیگر تابع انتقال چگونگی تشدید یا میرایی از حرکت بستر سنگی (حرکت ورودی) به حرکت سطح (حرکت خروجی) را نشان می‌دهد. برای شرایط ساده و ایده‌آل با استفاده از روش‌های کلاسیک می‌توان تابع انتقال را به صورت فرم بسته بدست آورد ولی در حالات کاربردی نیازمند حل‌های عددی است. جهت تشریح مطلب فوق و با فرض داشتن تابع انتقال به شکل (۸) که تاریخچه زمانی شتاب مربوط به زلزله ردیف ۷ جدول ۳ را نشان می‌دهد توجه نمایید. ابتدا تاریخچه زمانی در عمق را با استفاده از طیف فوریه به حوزه فرکانس برده (شکل F.S.S bot ۷)، در گام بعدی با ضرب تابع انتقال (شکل ۱۰ پ) در طیف فوریه، طیف جدیدی بدست می‌آید که مربوط به سطح خاک است (شکل ۱۰ ت) و در گام آخر با معکوس فوریه از حوزه فرکانس به حوزه زمان رفته و تاریخچه مولفه مدنظر بدست می‌آید (شکل ۱۰ ث). اما در این مقاله با توجه به داشتن تاریخچه زمانی در عمق و سطح از استراتژی دیگری جهت بدست آوردن تابع انتقال استفاده شد. بطوریکه تابع انتقال F از نسبت طیف فوریه در سطح F.S.S top نسبت به طیف فوریه در عمق F.S.S bot بدست آمد.

$$F = \frac{F.S.S_{top}}{F.S.S_{bot}} \quad (۸)$$



شکل ۸- تابع انتقال برای ایستگاه KMMH16 در زلزله 2016/04/16-01:25

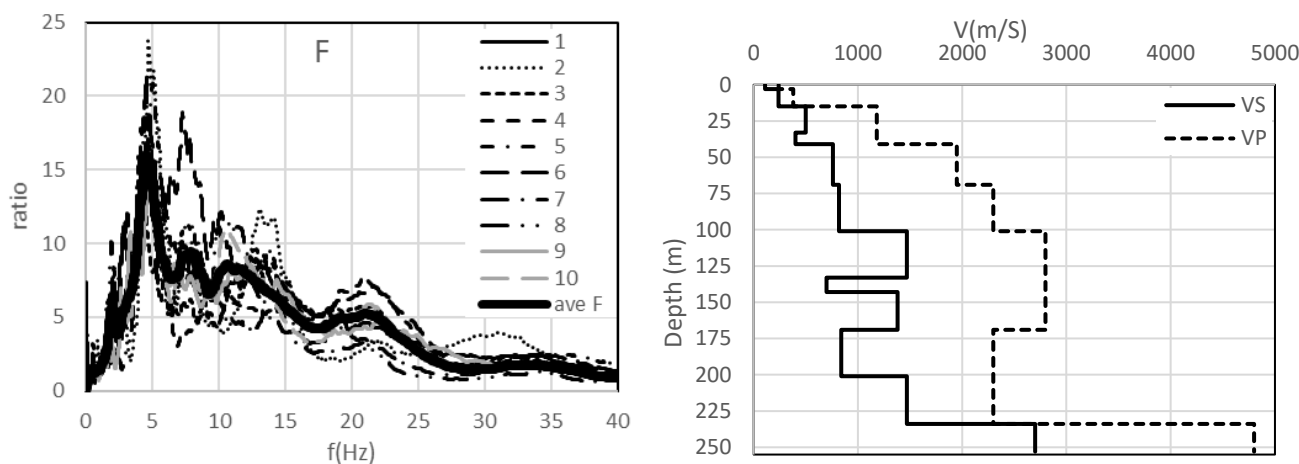
با توجه به رابطه (۸) توابع انتقال برای زلزله‌های جداول (۳) تا (۸) ترسیم شده است. برای جداول (۳) و (۴) و (۵) که دارای ایستگاه ثابت هستند ابتدا برای هر یک از ایستگاه‌ها توابع انتقال بدست آمده و سپس میانگین گیری انجام گرفت (شکل ۹). برای زلزله‌های جداول (۶) و (۷) و (۸) که در ایستگاه‌های متفاوت ثبت گردیده (شکل ۱۰) عمل میانگین گیری انجام نشده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده برای تابع انتقال در شکل (۹) می‌توان مشاهده کرد که نمودار میانگین تابع انتقال ۱۰ زلزله (ave F) در مقدار حداکثر (فرکانس ۵ هرتز) دارای خطایی کمتر از ۲۵٪ است. هر چند مقادیر نسبی تفاوت در فرکانس‌های دیگر بخصوص فرکانس‌های بالا می‌تواند بالاتر باشد اما از حیث اهمیت قابل توجه نیست. بنابراین عملکرد لایه‌های خاک در جهت قائم کمتر تابع شدت زلزله و شتاب وارده در بستر است و میانگینی از توابع انتقال بدست آمده برای یک لایه بندی مفروض، قابل کاربرد برای کلیه زلزله‌های حوزه نزدیک آن می‌باشد. از طرفی رفتار لایه بندی‌های مختلف با یکدیگر بسیار متفاوت هستند. بعضی از خاک‌ها (مانند ایستگاه KMMH16) حداکثر افزایش را در فرکانس‌های ۴ تا ۸ هرتز دارند این در حالی است که لایه بندی‌های (مانند ایستگاه IWTH25) دارای پهنای باند گسترده‌ای هستند. اما قابل توجه است که کلیه ایستگاه‌های بررسی شده در بین فرکانس‌های ۴ تا ۵ یک افزایش دامنه قابل توجه دارند که گاهی بزرگترین تشدید نیز در آن رخ می‌دهد. این بازه فرکانسی به فرکانس ارتعاش قائم ساختگاه اشاره دارد. وجود لایه‌های نرم با ضخامت بیش از ۲ متر بر روی لایه‌های سخت همانند ساختگاه ایستگاه‌های IWTH02, IWTH03 می‌تواند سبب تقویت بالای شتاب قائم گردد. از طرفی وجود لایه نرم با ضخامت کمتر از ۲ متر که بر روی خاک سخت و سنگی قرار گرفته است (مانند ساختگاه ایستگاه IWTH17) تاثیر چندانی بر روی تقویت شتاب قائم از خود نشان

نداده‌اند. خاک‌ها با لایه بندی‌های متعدد مانند ساختگاه ایستگاه KMMH16 دارای رفتار نسبتاً ثابتی هستند، همچنین وجود لایه بندی نرم با عمق زیاد مانند ساختگاه ایستگاه IWTH24 ممکن است سبب تقویت شدید شتاب قائم نگردد.

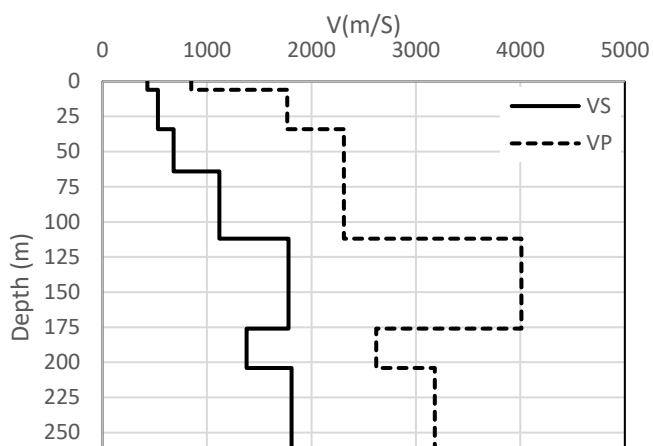
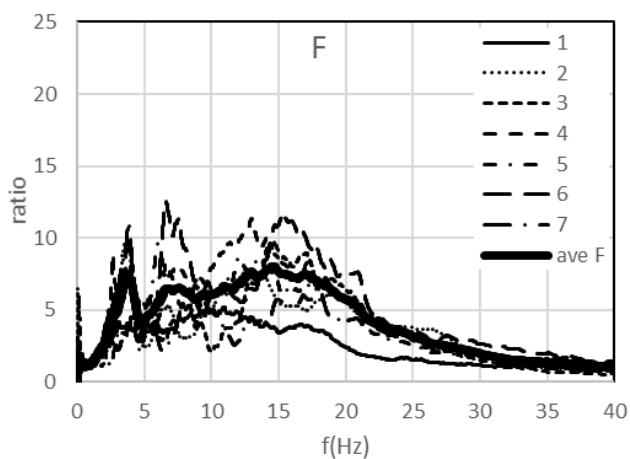
براساس اطلاعات استخراج شده از رکوردهای درون چاهی در فرکانس‌های بیش از ۰.۲۵ هرتز، حداقل افزایش ۲ برابری در تقویت شتاب قائم از عمق بیش از ۱۰۰ متر به سطح زمین با هر نوع لایه بندی مشهود است. سهم بالایی از این تقویت می‌تواند مربوط به تغییر شرایط مرزی باشد. عمده تقویت فرکانس‌های شتاب در حوزه نزدیک در بازه ۳ تا ۱۸ هرتز مشاهده می‌گردد. همچنین تقویت فرکانس‌های کمتر از ۲.۵ هرتز برای کلیه شرایط ایستگاه‌ها نامحسوس است. بطور نسبی میزان افزایش شتاب، از عمق به سطح، تنها در فرکانس‌های کمتر از ۲۰ هرتز به جنس و لایه بندی خاک وابسته است. تابع انتقال در ساختگاه‌های سنگی و سخت مانند ایستگاه IWTH25 در مقایسه با ساختگاه لایه‌ای و نرم مانند KMMH16، دارای فرکانس‌های بزرگتری برای تشدید هستند.

بطور کلی مشاهده گردید که تابع انتقال نقش مهمی در تقویت شتاب دارد اما به تنهایی گویای تقویت شتاب از عمق به سطح نیست و عوامل دیگری همچون فرکانس غالب زلزله ورودی به ساختگاه موثر است. اثرات حوزه نزدیک برای مناطق کوهستانی و سنگی با وسعت بسیار بیشتری مشاهده می‌شود بطوریکه شتاب قائم در بستر، برای مناطق کوهستانی (مانند بخشی از منطقه IWATEKEN در ژاپن) تا فواصل نسبتاً طولانی از کانون بدون کاهش محسوسی در عمق گمانه است.

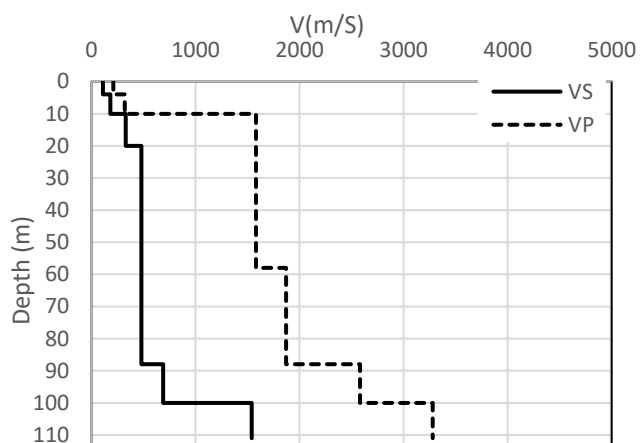
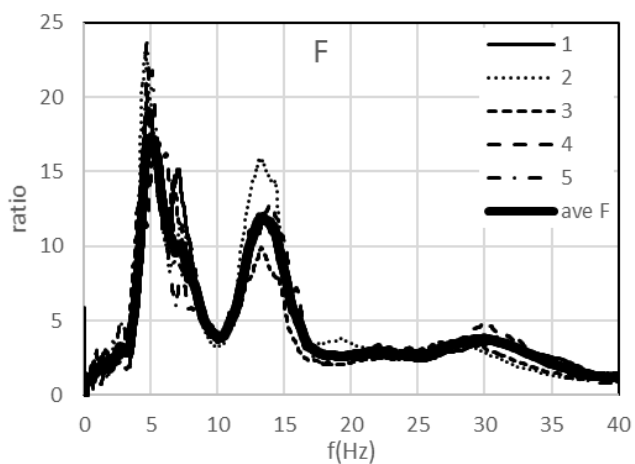
رفتار غیر خطی مصالح ساختگاه در جهت افقی با رفتار مصالح ساختگاه در جهت قائم کاملاً متفاوت بوده و اثر اندرکنشی شتاب قائم و مولفه‌های شتاب افقی در مصالحی همچون خاک (سنگ یا خاک) که در آن رفتار در جهت‌های مختلف متفاوت است نیازمند به بررسی آزمایشگاهی و تحلیل‌های سه بعدی اجزا محدود است و استفاده از تحلیل‌های یک و یا حتی دو بعدی نتایج دقیقی را در این خصوص ارائه نمی‌دهد.



الف) تابع انتقال برای زلزله‌های ردیف ۱ تا ۱۰ از جدول ۳ ایستگاه KMMH16 به همراه لوگ خاک

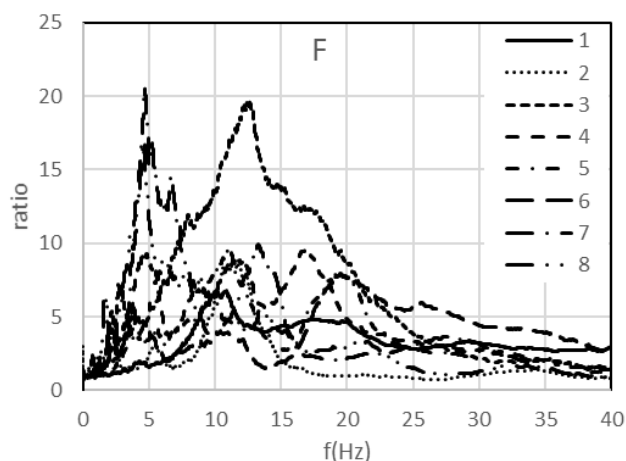


ب) تابع انتقال برای زلزله‌های ردیف ۷ تا ۴ جدول ۴ ایستگاه IWTH25 به همراه لوگ خاک

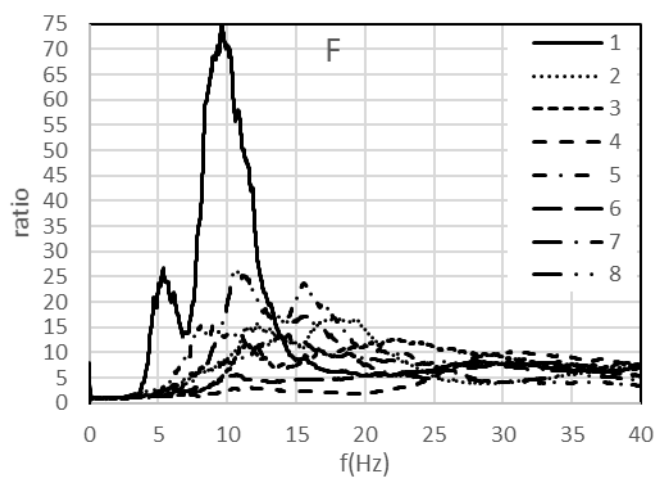
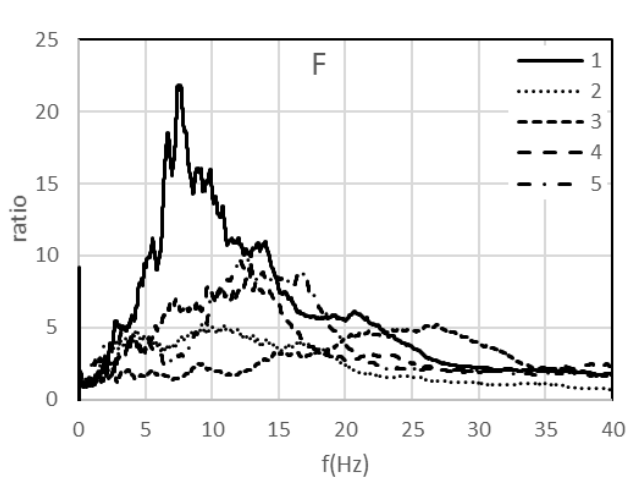


ب) تابع انتقال برای زلزله‌های ردیف ۱ تا ۵ جدول ۵ ایستگاه KMMH14 به همراه لوگ خاک

شکل ۹- مقایسه و ترسیم توابع انتقال برای زلزله‌های آورده شده در جدول ۳ تا ۵



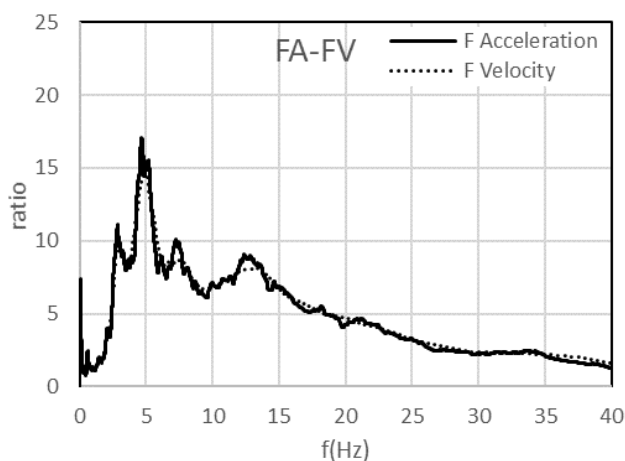
الف) تابع انتقال برای ایستگاه‌های ردیف ۸ تا ۱ جدول ۶ زلزله 2016/04/16-01:25



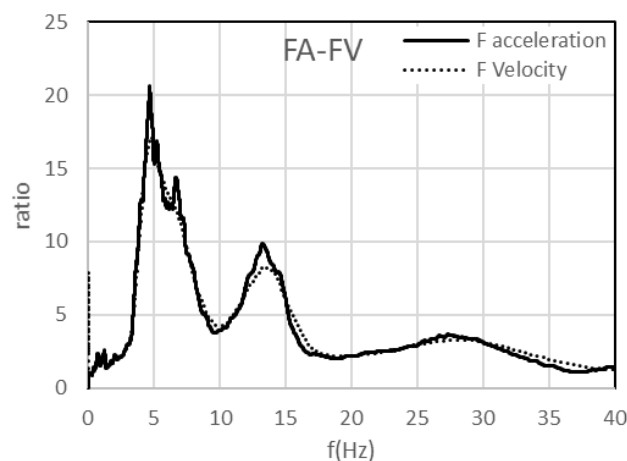
ب) تابع انتقال برای ایستگاه‌های ردیف ۸ تا ۱ جدول ۸ زلزله 2008/07/24-00:26 (ب) تابع انتقال برای ایستگاه‌های ردیف ۵ تا ۱ جدول ۷ زلزله 2008/06/14-08:43

شکل ۱۰- مقایسه و ترسیم توابع انتقال برای زلزله‌های آورده شده در جدول ۸ تا ۶

جهت کامل شدن بررسی اثرات خاک و توابع انتقال، تابع انتقال سرعت برای دو زلزله ردیف ۷ و ۸ جدول (۶) به صورت موردی بدست آمد. روند بدست آوردن تابع انتقال همانند آنچه که برای توابع انتقال شتاب بیان شد می‌باشد. بطور نمونه در شکل (۱۱) توابع انتقال سرعت برای این دو زلزله ترسیم گردیده و با توابع انتقال شتاب نظیرشان مقایسه شده است. در مقایسه توابع انتقال برای سرعت و شتاب، تشابه کلی مشهود است و تنها در فرکانس‌های بالا ممکن است جزئی تفاوت وجود داشته باشد. عمل کرد خاک در تقویت یا تضعیف فرکانس‌های سرعت قائم در حوزه نزدیک، یکسان و مشابه شتاب است.



ب) جدول ۶ ردیف ۸ ایستگاه KMMH16



الف) جدول ۶ ردیف ۷ ایستگاه KMMH14

شکل ۱۱- مقایسه تابع انتقال شتاب و سرعت برای زلزله 2016/04/16-01:25 در دو ایستگاه متفاوت

۵. بررسی شتاب طیفی

بیان کاربردی دیگری که در مهندسی زلزله استفاده می‌شود طیف پاسخ است. جهت بررسی افزایش پاسخ از عمق به سطح از تابع افزایش پاسخ R استفاده گردید. بطوریکه نسبت طیف پاسخ شتاب قائم در سطح ($S_{AV top}$) به طیف پاسخ شتاب قائم در عمق ($S_{AV bot}$) با RA و همچنین نسبت طیف پاسخ سرعت قائم در سطح ($S_{VV top}$) به طیف پاسخ سرعت قائم در عمق ($S_{VV bot}$) با RV تعریف گردید. میرایی لحاظ شده برای کلیه محاسبات طیف پاسخ مقدار ۰.۵٪ در نظر گرفته شد.

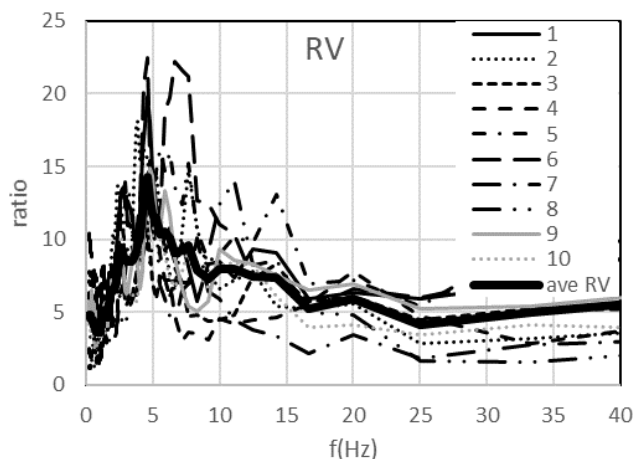
(۹)

$$RA = \frac{S_{AVtop}}{S_{AVbot}}$$

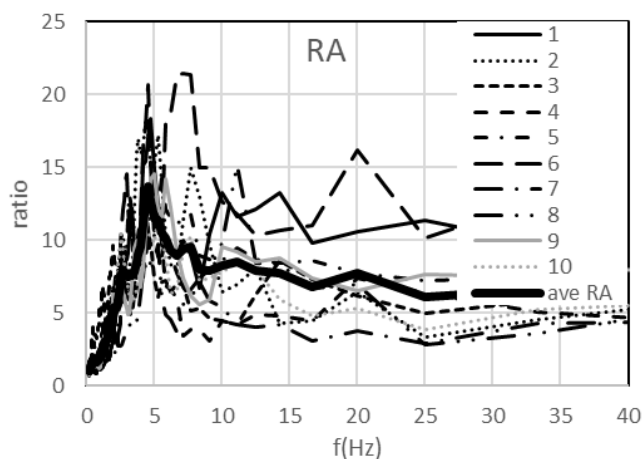
$$RV = \frac{S_{VVtop}}{S_{VVbot}}$$

(۱۰)

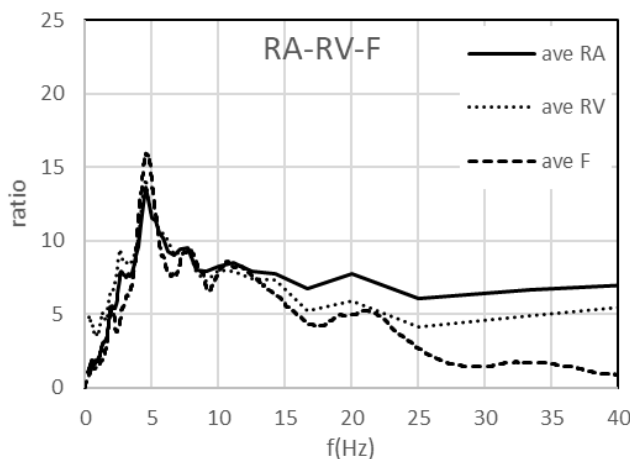
طیف پاسخ بر اساس کد نوشته شده در نرم افزار MATLAB محاسبه گردید. نمودارهای مربوط برای RA و RV برای زلزله‌های جداول (۳) و (۴) و (۵) به ترتیب در اشکال (۱۲) تا (۱۴) همراه با میانگیری ترسیم شده است.



ب) ترسیم توابع RV به همراه میانگینش



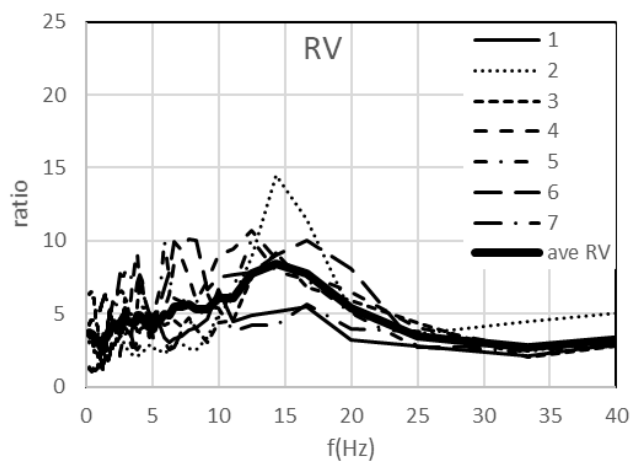
الف) ترسیم توابع RA به همراه میانگینش



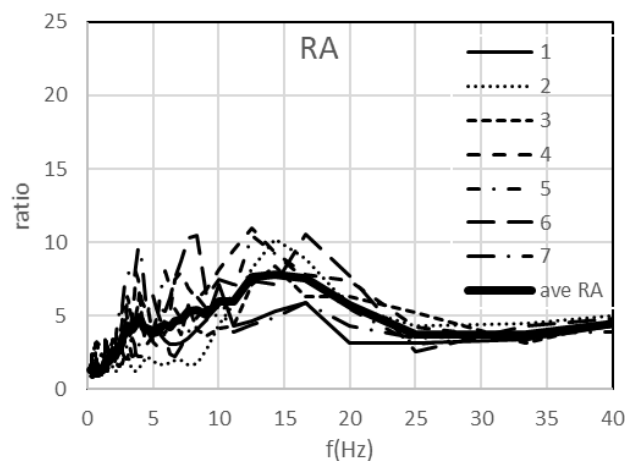
پ) مقایسه میانگین تابع انتقال F با میانگین توابع RA و RV

شکل ۱۲- توابع RA و RV برای زلزله‌های جدول ۳، ایستگاه KMMH16

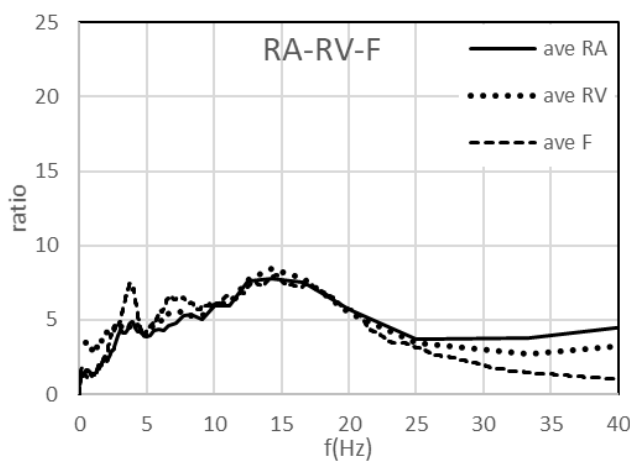
در شکل (الف ۱۲) و (ب ۱۲) به ترتیب توابع RA و RV به همراه میانگین برای ۱۰ زلزله جدول ۳ ترسیم شده است. در شکل (پ ۱۲) میانگین RA و RV به همراه میانگین F که از شکل (الف ۹) آورده شده مقایسه شده است. هر سه نمودار تا فرکانس ۵ هرتز با شیب تندی افزایش می‌یابند و در فرکانس ۵ هرتز به حداکثر مقدارشان می‌رسند. تطبیق نسبتاً کاملی بین هر سه نمودار تا فرکانس ۱۲ هرتز وجود دارد. در شکل (الف ۱۳) و (ب ۱۳) تفاوت نمودار ۲ با سایر زلزله‌ها دارای بیشترین تفاوت است که می‌توان بخشی از آن را به خفیف‌تر بودن زلزله ($M=3.9$) و انتظار رفتار متفاوت ساختگاه نسبت داد.



ب) ترسیم توابع RV به همراه میانگینش



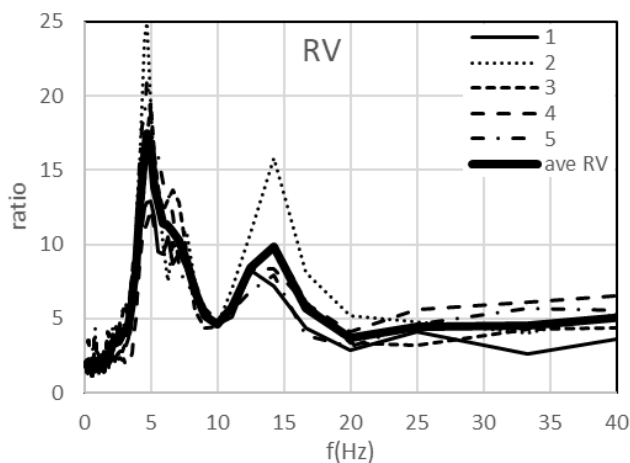
الف) ترسیم توابع RA به همراه میانگینش



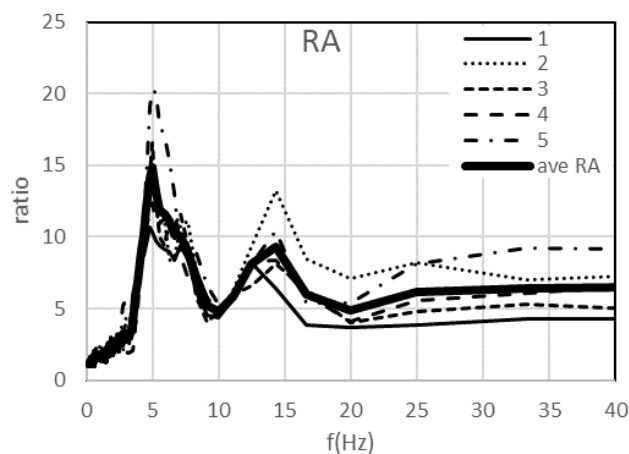
پ) مقایسه میانگین تابع انتقال F با میانگین توابع RA و RV

شکل ۱۳- توابع RA و RV برای زلزله‌های جدول ۴، ایستگاه Iwth25

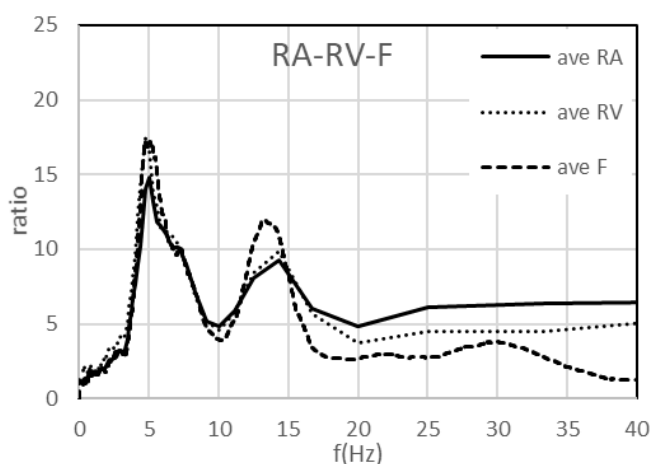
در شکل (۱۳الف) و (۱۳ب) به ترتیب توابع RA و RV به همراه میانگین برای ۷ زلزله جدول ۴ ترسیم شده است. در شکل (۱۳پ) میانگین RA و RV به همراه میانگین F که از شکل (۹ب) برگرفته شده مقایسه شده است. هر سه نمودار تا فرکانس ۱۵ هرتز با شیب ملایمی افزایش می‌یابند و در فرکانس ۱۵ هرتز به حداکثر مقدار ۸ میرسند. همچنین مشاهده می‌گردد که تطبیق نسبتاً کاملی بین هر سه نمودار تا فرکانس ۲۵ هرتز وجود دارد.



ب) ترسیم توابع RV به همراه میانگینش



الف) ترسیم توابع RA به همراه میانگینش



پ) مقایسه میانگین تابع انتقال F با میانگین توابع RA و RV

شکل ۱۴- توابع RA و RV برای زلزله‌های جدول ۵، ایستگاه KMMH14

در شکل (الف) و (ب) به ترتیب توابع RA و RV به همراه میانگین برای ۵ زلزله جدول ۵ ترسیم شده است. در شکل (پ) میانگین RA و RV به همراه میانگین F که از شکل (پ) اخذ شده مقایسه شده است. هر سه نمودار تا قبل از فرکانس ۵ هرتز دارای یک شکستگی هستند و در فرکانس ۵ هرتز به حداکثر مقدار خود می‌رسند.

تغییرات RA و RV به طور کیفی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد عمدتاً RA و RV در بخش وسیعی از فرکانس‌ها مشابه یکدیگرند. تفاوت RA و RV بیشتر در فرکانس‌های بسیار پایین و یا فرکانس‌های بلند دیده شد. همچنین توابع ترسیم شده RA و RV تا فرکانس‌های ۱۵ هرتز شباهت بسیاری به تابع انتقال (F) دارند.

در مقایسه بین نتایج بدست آمده از رکوردهای درون چاهی با دو آیین نامه Eurocode 8 و ASCE7 که در بخش (۲) تشریح گردید، هر دو آیین نامه برای زمان تناوب‌های بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ (فرکانس‌های ۶/۶۷ تا ۲۰) مقدار ثابتی برای شتاب در نظر گرفته‌اند و اثرات جنس لایه سطحی خاک در Eurocode 8 بی‌تاثیر است. در حالی که طبق بررسی انجام شده تنها وجود یک لایه خاک نرم می‌تواند سبب تشدید شتاب قائم گردد و استفاده از سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر از ساختگاه ممکن است برخلاف اطمینان باشد. همچنین متشابه در نظر گرفتن شکل طیف پاسخ شتاب قائم با طیف پاسخ شتاب افقی نتایج مناسبی ندارد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله به منظور بررسی اثرات دقیقتر بزرگنمایی شتاب قائم زلزله در حوزه نزدیک در اثر آبرفت، از ۴۱ رکورد قوی درون چاهی ناشی از ۲۰ زلزله با بزرگای $3.9 \leq M_{JMA} \leq 7.3$ از شبکه لرزه نگاری KiK-net ژاپن استفاده گردید. با انتخاب رکوردهای درون چاهی بدون استفاده از مدل سازی های عددی و اجزای محدود، امکان تحلیل دقیق و واقعی رفتار خاک در هر دو حوزه زمان و فرکانس فراهم می گردد. تحلیل در حوزه فرکانس با تابع انتقال (F) و در حوزه زمان با نسبت تغییرات طیف پاسخ (RA, RV) بررسی گردید. و در ادامه به منظور روشن شدن عملکرد خاک در تقویت امواج، پارامترهای RA, RV, F به صورت جداگانه و همزمان باهم مقایسه شدند. تغییرات RA و RV به طور کیفی مورد بررسی قرار گرفت.

۱. در بررسی های انجام شده مشاهده گردید که شتاب قائم در حوزه نزدیک از عمق به سطح، به طور قابل ملاحظه تقویت می شود. میزان شتاب قائم در عمق، عموماً بستگی به بزرگای زلزله داشته و با فاصله گرفتن از کانون کاسته می شود. مقدار تقویت شتاب از عمق به سطح، بستگی به لایه بندی خاک و محتویات فرکانسی زلزله دارد.

۲. میزان بزرگای زلزله به تنهایی نمی تواند تغییرات شدیدی در تابع انتقال در جهت قائم ایجاد نماید. اما بزرگنمایی خاک با تابع انتقال مفروض که شکل نسبتاً ثابتی دارد، تحت فرکانس های ورودی متفاوت میتواند عملکرد کاملاً متفاوتی نشان دهد.

۳. اثرات حوزه نزدیک برای مناطق کوهستانی و سنگی با وسعت بسیار بیشتری مشاهده شد. همچنین شتاب قائم در بستر، برای مناطق کوهستانی (با ساختار سنگی) که عمدتاً با لایه های خاک سطحی بسیار کم عمق پوشیده شده اند (مانند بخشی از منطقه IWATEKEN در ژاپن) تا فواصل نسبتاً طولانی از کانون بدون کاهش محسوس در مقدار شتاب قائم در عمق گمانه بودند. تابع انتقال در ساختگاه های سنگی و سخت در مقایسه با ساختگاه لایه ای و نرم، دارای فرکانس های بزرگتری برای تشدید هستند.

۴. عمل کرد خاک در تقویت یا تضعیف فرکانس های شتاب و سرعت قائم در حوزه نزدیک، یکسان است. عمده تقویت فرکانس های شتاب و سرعت قائم در حوزه نزدیک در بازه ۳ تا ۱۸ هرتز مشاهده گردید. همچنین تقویت فرکانس های کمتر از ۲.۵ هرتز در شتاب و سرعت قائم برای کلیه شرایط ایستگاه ها نامحسوس می باشد. بطور نسبی میزان افزایش شتاب و سرعت قائم، از عمق به سطح، تنها در فرکانس های کمتر از ۲۰ هرتز به جنس و لایه بندی خاک وابسته است.

۵. لایه های سطحی خاک نرم بسته به ضخامتشان می توانند نقش اساسی در افزایش شتاب قائم در سطح زمین در ساختگاه های سنگی را داشته باشند. بطوریکه وجود لایه نرم خاک سطحی (تیپ نوع ۳) با عمق بیش از ۲ متر که بر روی سنگ قرار گرفته سبب افزایش شدید مولفه شتاب قائم در سطح گردد. در هر صورت حداقل افزایش ۲ برابری در تقویت شتاب قائم از عمق بیش از ۱۰۰ متر به سطح زمین با هر نوع لایه بندی قابل انتظار است. این میزان تقویت مربوط به تغییر شرایط مرزی است.

۶. در مقایسه بین آیین نامه ASCE7 و یورو کد ۸ با نتایج این مقاله، دیدگاه آیین نامه ASCE7 در ارائه طیف شتاب قائم به نتایج واقعی نزدیکتر است.

مراجع

- [1] Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Pearson Education India.
- [2] Naeim, F. (Ed.). (1989). The seismic design handbook. Springer Science & Business Media.
- [3] <https://www.kyoshin.bosai.go.jp>
- [4] Kokusho, T., & Sato, K. (2008). Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array strong motion records. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(9), 707-716.
- [5] Mohraz, B., & Tiv, M. (1991, August). Spectral shapes and amplifications for the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989. In Lifeline Earthquake Engineering (pp. 562-571). ASCE.

- [6] Stewart, J. P., Chiou, S. J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G., & Abrahamson, N. A. (2002). Ground motion evaluation procedures for performance-based design. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(9-12), 765-772.
- [7] Bozorgnia, Y., & Niazi, M. (1993). Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(8), 695-707.
- [8] Bozorgnia, Y., & Campbell, K. W. (2004). The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02), 175-207.
- [9] Bozorgnia, Y., Niazi, M., & Campbell, K. W. (1995). Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake. *Earthquake spectra*, 11(4), 515-525.
- [10] HUANG, H. C., & CHIU, H. C. (1996). Estimation of site amplification from Dahan downhole recordings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 25(4), 319-332.
- [11] Noguchi, S., Sato, H., & Sasatani, T. (2012, September). Characterization of nonlinear site response based on strong motion records at K-NET and KiK-net stations in the east of Japan. In *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal (pp. 24-28).
- [12] Yang, Z., Yuan, J., Liu, J., & Han, B. (2017). Shear modulus degradation curves of gravelly and clayey soils based on KiK-Net in situ seismic observations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9), 06017008.
- [13] Han, B., Zdravkovic, L., Kontoe, S., & Taborda, D. M. (2017). Numerical investigation of multi-directional site response based on KiK-net downhole array monitoring data. *Computers and Geotechnics*, 89, 55-70.
- [14] Pilz, M., & Cotton, F. (2019). Does the one-dimensional assumption hold for site response analysis? A study of seismic site responses and implication for ground motion assessment using KiK-Net strong-motion data. *Earthquake Spectra*, 35(2), 883-905.
- [15] Afshari, K., & Stewart, J. P. (2022). Effectiveness of 1D ground response analyses at predicting site response at California vertical array sites.
- [16] Kaklamanos, J., & Bradley, B. A. (2018). Challenges in predicting seismic site response with 1D analyses: Conclusions from 114 KiK-net vertical seismometer arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A), 2816-2838.
- [17] American Society of Civil Engineers. (2017, June). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- [18] Code, P. (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
- [19] Storg Motion Seismograph Networks (K-NET, kik-net) <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshi>