



Investigating the effect of the middle soft layer on the equivalent-linear and non-linear dynamic site responses

Yazdan Shamsmaleki¹ 

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.
E-mail: y.shamsmaleki@kut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2024-03-08

Received in revised form

2024-04-25

Accepted

2024-06-10

Available online

2024-06-21

Keywords:

One-dimensional seismic site response analysis,
Equivalent-linear response,
Non-linear response,
soft soil layer,
Acceleration spectral response

ABSTRACT

In this paper, the effect of the middle soft soil layer on the seismic response of a multi-layered site is investigated with the help of one-dimensional equivalent-linear and non-linear analysis methods. The constitutive model used for the multi-layer soil site is the viscoelastic model. Basically, in the discussions of soil dynamics, a soft soil layer with a low shear wave velocity is assumed, which is the basis of the analytical and numerical analyses of this research. In this study, the effect of the stiffness, geometric and spatial characteristics of the middle soft soil layer on the overall seismic response of the site in the field of spectral acceleration responses is investigated. The viscoelastic stress-strain relationship has been solved in the analysis of the equivalent-linear response using the analytical method and in the analysis of the non-linear response using the finite difference numerical method. Also, the effect of characteristics such as the depth of the soft soil layer, thickness, shear wave velocity, material damping, its density and other factors have been evaluated in the separate analyses. The results of this research show that the existence of the soft soil layer has a double effect on the seismic response of multi-layer sites. First, by increasing the thickness of the soft layer under the hard layer, this layer reduces the spectral response acceleration values like a damper. And on the other hand, by removing the upper hard layer and increasing the thickness of the soft layer up to the ground surface, the acceleration spectral amplification values, despite the decreasing trend, are several times the case when the hard layer is located on top of the soft layer. In both equivalent-linear and non-linear methods, with the increase in damping, the peaks of the acceleration response spectrum are smoothed, in addition to that, the spectral acceleration value also decreases. Besides, the non-linear method, in the conditions of the minimum damping ratio (i.e., critical damping ratio equal to zero), gives more response acceleration than the equivalent-linear method. Increasing the damping, as well as increasing the thickness of the soft layer, has caused a decrease in the response acceleration values of the multilayered site.

Cite this article: Shamsmaleki, Yazdan. (2024). Investigating the effect of the middle soft layer on the equivalent-linear and non-linear dynamic site responses. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(1), 19-37.

DOI: 10.22126/amcen.2024.3294



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.3294

Publisher: Razi University

Introduction

The site conditions and the location of structure construction, which sometimes face geotechnical risks, significantly impact the response of a surface structure over the construction and operation period. Field geotechnical identifications during the feasibility study and design phase of a structure can largely visualize the construction site conditions for the design engineer. Sometimes, after field surveys, layers with different hardness and resistance characteristics are revealed in the foundation of structures and the underlying soil layers. Studying the effects of these layers on the overall response of the foundation during an earthquake is one of the questions facing civil engineers. The main objective of this research is to understand the effects of soft soil layers on the dynamic response of a site, the results of which can be used as a criterion for judgment by design engineers. According to existing seismic codes, various commercial-research software programs have been developed from the beginning for analyzing the seismic response of multi-layered sites, such as SHAKE [1], DESRA-2 [2], DYNA1D [3], SHAKE91 [4], EERA [5], NERA [6], SHAKE2000 [7], ShakEdit [8], and DEEPSOIL [9]. Most software programs simulate and analyze a multi-layered soil model in a simplified one-dimensional form and are written based on computational logic, including the equivalent linear or non-linear method. In this research, the equivalent-linear seismic response analysis of a multi-layered site was estimated using the EERA software program, and the non-linear seismic response analysis of a multi-layered site was conducted using the NERA software.

Method

The equivalent-linear model of the stress-strain response of soil is presented based on the viscoelastic Kelvin-Voigt model to represent the variation of shear strains over time under dynamic loading (time effect in the analysis) according to Equation (1) below. In this model, shear stress is dependent on shear strain and the rate of shear strain concerning time:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

Additionally, in the non-linear hysteretic seismic stress-strain behavior of materials, the IM model proposed by Iwan and Mroz is used, and the hysteresis curve employed in this material behavior model is based on the Masing rule. The equations for these models are solved based on the relationships, methods, and processes presented in the references.

Results

In this section, a parametric study is conducted to investigate the effect of different geometric and resistance conditions of layers, including a soft intermediate layer and stiff upper and lower layers, on the seismic response of a multi-layered soil site. This parametric study aims to select these parameters so that a structure with the best compatibility in terms of positive performance against seismic loading can be constructed at each site. The ultimate goal of conducting these analyses is to prevent the occurrence of excessive amplification or magnification of response spectrum values in surface structures during an earthquake. This issue can lead to significant irreversible rotations

and deformations in structures and their destruction. As it can be seen from the results of both equivalent-linear and non-linear analyses, the changes of underground water table level have no effect on the spectral acceleration results of the site response. Of course, if the soil density of the layers, especially the soft layer, is not corrected according to the water level (that is, using saturated unit weight instead of wet or dry unit weights below the underground water table). Considering the dependence of the natural period (inverse of the natural frequency) of the structures (steel and concrete frames or masonry structures) on their height and also how the response accelerations are magnified in the present analysis, with the change of the conditions of the middle soft layer, the height of the structure in each soil site should be chosen in such a way that the phenomenon of resonance or the phenomenon of amplification does not happen despite the existence of a soft layer (or layers) and in the conditions of the difference in the stiffness of the soil layers.

Conclusions

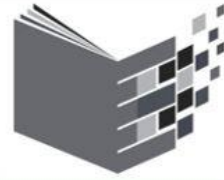
This study conducted a numerical investigation of the effect of an intermediate soft soil layer on the seismic response of multi-layered sites. The soft layer can be formed due to differences in soil density (a loose layer between two compact layers), cementation, and increased surface layer resistance due to its material, differences in material (a layer of clayey soil between two harder granular layers), or due to subsurface folding or cavities that over time fill with softer sediments. The basis for judging the softness or hardness of the soil layers in this study is based on the recorded values of shear wave velocity (V_s) in the soil layers. In the default case, in the numerical analyses, the critical damping ratio of the soil layers is assumed to be 5%. In some parametric studies of the present study, this value has varied. The effect of changing the geometric characteristics (thickness and location of the layer) and the hardness of the soft soil layer on the spectral acceleration response of the site through parametric analyses using equivalent-linear one-dimensional methods (in the EERA program) and non-linear methods (in the NERA program) has been examined. The main results obtained from this study can be summarized as follows:

1. The site response spectrum is not very sensitive to changes in the density of the soft layer and is only dependent on the shear wave velocity in this layer.
2. In both the equivalent-linear and non-linear methods, as the overburdened soil (the upper hard layer) increases in thickness on the soft layer, the values of the spectral acceleration response decrease so that the spectral acceleration response of the soil layers reach a negligible value close to zero at a maximum thickness of 1000 meters.
3. In both the equivalent-linear and non-linear methods, with an increase in the thickness of the soft layer, this layer acts like a mirror, causing a decrease in the acceleration response.
4. Changes in the thickness of the upper soft layer (without defining an upper hard layer) have a dual and contradictory effect: a decrease in acceleration response with an increase in the thickness of the soft layer and an overall increase in the magnification values in the acceleration response.

5. In the equivalent-linear analysis, with an increase in the shear wave velocity of the soft layer from a minimum value of 50 m/s to a value of 200 m/s, the acceleration response increases (maximum acceleration response)

Conflict of Interest

Author declared no conflict of interest.



بررسی اثر لایه نرم میانی بر پاسخ های دینامیکی معادل-خطی و غیر خطی ساختگاه

یزدان شمس ملکی^۱

۱. نویسنده مسئول ، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: y.shamsmaleki@kut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در تحلیل های این مقاله به بررسی اثر لایه خاک نرم میانی بر پاسخ لرزه ای ساختگاه چند لایه ای به کمک تحلیل های یک بعدی معادل-خطی و غیر-خطی پرداخته شده است. مدل رفتاری استفاده شده برای ساختگاه خاکی چندلایه ای، مدل ویسکوالاستیک است. اصولا در مباحث دینامیک خاک لایه نرم لایه ای با سرعت موج برشی کم فرض می شود، که مبنای تحلیل های عددی این تحقیق نیز همین پیش فرض اساسی است. در این مطالعه، اثر مشخصه های سختی، هندسی و مکانی (ژرفای قرارگیری) لایه نرم میانی بر پاسخ کلی ساختگاه در حوزه پاسخ های شتاب طیفی، مورد بررسی قرار می گیرد. رابطه تنش - کرنش ویسکوالاستیک، در بررسی پاسخ معادل-خطی به کمک روش تحلیلی و در بررسی پاسخ غیر-خطی به کمک روش عددی تفاضل محدود حل شده است. همچنین اثر مشخصه هایی همچون عمق قرارگیری لایه نرم، ضخامت لایه، سرعت موج برشی، میرایی و چگالی مصالح و عوامل دیگر در تحلیل های مجزایی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که وجود لایه خاک نرم اثری دو گانه بر پاسخ لرزه ای ساختگاه های خاکی چند لایه دارد، نخست آن که با افزایش ضخامت لایه نرم در زیر لایه ای سخت، این لایه همانند یک میراگر باعث کاهش مقادیر شتاب پاسخ طیفی می گردد و دوم اینکه با حذف لایه سخت فوقانی و با افزایش ضخامت لایه نرم تا سطح زمین، مقادیر بزرگنمایی طیفی شتاب علیرغم سیر کاهشی، چندین برابر حالتی است که لایه سخت در بالای لایه نرم واقع شده است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۱۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۰۴/۰۱

کلیدواژه ها:

پاسخ لرزه ای تحلیل یک بعدی ساختگاه، پاسخ معادل-خطی، پاسخ غیر-خطی، لایه خاک نرم، پاسخ طیفی شتاب.

استناد: شمس ملکی، یزدان. (۱۴۰۳). بررسی اثر لایه نرم میانی بر پاسخ های دینامیکی معادل-خطی و غیرخطی ساختگاه. مجله مدل سازی پیشرفته

در مهندسی عمران، ۱(۱)، ۳۷-۱۹. DOI: 10.22126/amcen.2024.3294



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

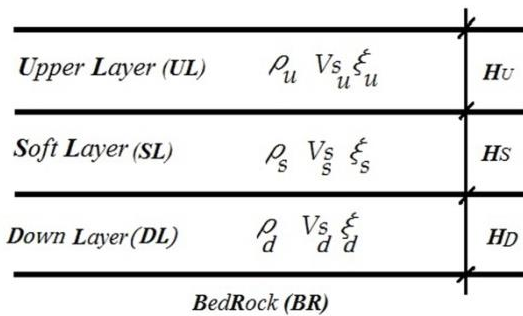
به طور اساسی شرایط ساختگاه و محل احداث سازه‌ها که گاهی با مخاطرات ژئوتکنیکی مواجه هستند، اثر فراوانی بر پاسخ یک سازه سطحی در طول زمان ساخت و بهره برداری از آن دارد. شناسایی‌های ژئوتکنیکی میدانی در مرحله مطالعات امکان سنجی و طراحی یک سازه می‌تواند، تا حد زیادی شرایط بستر احداث سازه را پیش روی مهندس طراح مجسم کند. گاهی اوقات پس از بررسی‌های صحرائی، وجود لایه‌هایی با سختی و مشخصه‌های مقاومتی متفاوت، در محل بستر سازه‌ها و لایه‌های زیرین زمین، آشکار می‌گردد. بررسی اثرات این لایه‌ها بر پاسخ کلی بستر در حین رخداد زلزله، یکی از سوالات پیش روی مهندسی عمران ابنیه است. وجود لایه‌ای نرم (با سرعت موج برشی کمتر) در بین چند لایه سخت‌تر (با سرعت موج برشی بیشتر)، می‌تواند پاسخ کلی ساختگاه را دستخوش تغییرات عمده‌ای کند. اصولاً اگر لایه نرم، لایه‌ای با ضخامت کم و در ژرفای نزدیک به سطح باشد و هزینه‌های اجرای پروژه نیز جابگو باشند، مهندس طراح می‌تواند آن را به کلی حذف یا بهسازی کند. مشکل زمانی پیش می‌آید که لایه نرم دارای وسعت زیاد یا در عمقی باشد که تغییر و اصلاح خصوصیات آن، غیر اقتصادی یا به طور کلی غیرممکن باشد. در چنین شرایطی، بهترین اقدام، شناخت دقیق اثرات گوناگون این لایه بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه است. پس از این مرحله، بسته به شرایط پروژه در دست احداث، می‌توان نسبت به تصمیم‌گیری در خصوص احداث سازه، عدم احداث، بهسازی لایه نرم، حذف لایه نرم و ... اقدام کرد.

هدف عمده این تحقیق، شناخت اثرات لایه خاک نرم بر پاسخ‌های دینامیکی ساختگاه است، که نتایج آن می‌تواند به عنوان معیاری برای قضاوت توسط مهندسی طراح مورد استفاده قرار بگیرد. بر اساس مفاد آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، نرم افزارهای تجاری-تحقیقاتی مختلفی از آغاز برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌های چند لایه‌ای ایجاد شده‌اند از قبیل برنامه‌های: SHAKE [۱]، DESRA-2 [۲]، DYNAID [۳]، SHAKE91 [۴]، EERA [۵]، NERA [۶]، SHAKE2000 [۷]، ShakEdit [۸] و

DEEPSOIL [۹]، که عموم این نرم افزارها به شکل یک بعدی، مدل ساختگاه چندلایه خاکی را شبیه‌سازی ساده سازی و تحلیل می‌کنند و بر اساس منطق‌های محاسباتی شامل روش معادل-خطی یا روش غیر-خطی نوشته شده‌اند. در همین راستا در این تحقیق، تحلیل پاسخ لرزه‌ای معادل-خطی ساختگاه چند لایه‌ای به کمک برنامه نرم افزاری EERA [۵] و تحلیل پاسخ لرزه‌ای غیر-خطی ساختگاه چند لایه توسط نرم افزار NERA [۶] برآورد شده است.

این نرم افزارها [۶ و ۵] بر اساس برنامه‌های نوشته شده در زبان برنامه نویسی فورترن ۹۰^۱ عمل می‌کنند و در برنامه صفحه گسترده اکسل^۲ قابل بارگذاری و استفاده است. اولین تلاش‌ها برای بررسی پاسخ ساختگاه حاوی خاک نرم در حین رخداد زلزله، توسط ادریس^۳ [۱۰] انجام شد. کوشش‌های فراوانی جهت بررسی پاسخ ساختگاه‌های خاکی چند لایه صورت گرفته است، که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده در مراجع [۱۱-۱۵] اشاره نمود. همچنین لایسمر و همکاران^۴ [۱۶] اثر مشخصه‌های سنگ - بستر بر پاسخ ساختگاه را مورد بررسی قرار دادند. سوگیتو^۵ [۱۷] راه حل معادل-خطی برای بررسی پاسخ ساختگاه چند لایه را مورد بررسی قرار داد و جوینر و همکاران^۶ [۱۸] به بررسی حل پاسخ غیر-خطی ساختگاه پرداختند. افزون بر تمامی این تحقیقات صورت گرفته و بشمار تحقیق دیگری که در زمینه پاسخ ساختگاه تا به حال انجام شده است، مطالعه حاضر قصد دارد به واسطه بررسی جزئیات و از طریق ارزیابی طیف‌های مختلف پاسخ شتاب، به بررسی اثر لایه نرم میانی بر پاسخ ساختگاه چند لایه‌ای بپردازد. در این راستا، چنانچه قبلاً نیز ذکر شد، برای رسیدن به این هدف، دو روش تحلیل پاسخ ساختگاه یک بعدی معادل-خطی [۵] و غیر-خطی [۶] مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات ارزشمند متعددی در سال‌های اخیر در خصوص پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌ها انجام شده است [۱۹-۲۳]. در تعدادی از این مطالعات، روش تحلیل پاسخ ساختگاه مشابه مطالعه حاضر از نوع تحلیل یک بعدی و اغلب خطی بوده است [۲۴-۲۷]. همچنین تحلیل‌های احتمالاتی پاسخ خطر لرزه‌ای سایت (زمین) [۲۸-۲۹] و

^۱ Lysmer et al.^۲ Sugito et al.^۳ Joyner et al.^۱ FORTRAN90^۲ Excel^۳ Idriss



شکل ۱. تعریف مسئله لایه خاک نرم مابین دو لایه خاک سخت مجاور

$$(V_{S_s} < V_{S_u}, V_{S_d})$$

جدول ۱. مشخصات لایه های خاک برای انجام تحلیل های پارامتری.

نسبت میرایی بحرانی پیش فرض ξ (%)	ضخامت لایه H(m)	سرعت موج برشی V_s (m/s)	چگالی γ (kN/m ³)	لایه های بستر
۵	۵	۴۰۰	۱۸	لایه بالایی (UL) Sand
۵	۵	۱۰۰	۱۵	لایه نرم (SL) Clay
۵	۵	۴۵۰	۱۸	لایه پایینی (DL) Sand
۵	-	۱۰۰۰	۲۲	سنگ بستر (BR) Rock

اغلب جهت انجام تحلیل‌های لرزه‌ای معادل-خطی و غیر-خطی ساختگاه، به دو دسته منحنی ورودی شامل: (۱) کاهش مدول برشی با کرنش برشی و (۲) نسبت میرایی نیاز است. نمونه منحنی‌های کاهش مدول برشی و نسبت میرایی در تحلیل‌های معادل - خطی و غیر - خطی برای خاک رسی (لایه نرم میانی) در شکل ۲، برای خاک ماسه‌ای (لایه سخت) در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای تحلیل‌های معادل-خطی و غیر-خطی، مطابق مطالب مندرج در مراجع موجود [۳۲-۳۷] آورده شده است. همچنین رکورد زلزله استفاده شده که برای فرکانس قطع ۲۰ هرتز فیلتر شده و نیز به شتاب حداکثر ۲۰٪ شتاب ثقل (یعنی 0.2g)، مقیاس گردیده، در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. جهت بررسی بیشتر، طیف فوریه و طیف توان، رکورد زلزله اولیه قبل از فیلترسازی و مقیاس کردن، در شکل ۷ آورده شده است. مشخصات لرزه‌ای و مشخصه‌های

نیز نحوه انتشار امواج [۳۰-۳۱] دیگر موضوعات و عناوین عمده این تحقیقات بوده است. در ادامه جزئیات دیگری از روش‌ها و فرضیات استفاده شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری عمده این تحقیق، مقایسه دو نوع پاسخ طیفی شتاب حاصل شده از روش‌های معادل - خطی و غیر - خطی برای ساختگاه لایه‌ای با اختلاف سختی مشخص بین لایه‌هاست، که قبلاً کمتر بدان پرداخته شده است.

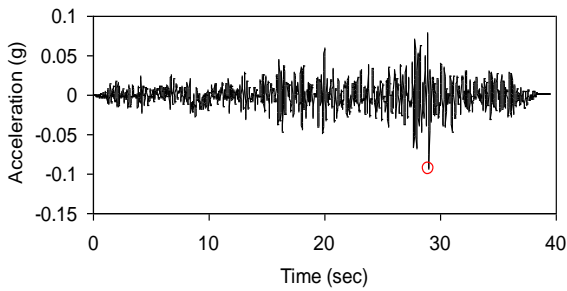
۲. تعریف مسئله و پارامترهای تحلیل

هندسه مدل مورد بررسی این تحقیق مطابق شکل ۱ است. همچنین مشخصات دینامیکی پیش فرض مصالح لایه‌های خاک که در تحلیل‌ها از آن‌ها استفاده شده است، بر حسب مندرجات جدول ۱ می‌باشند. در این جا لایه ای از خاک نرم (با سرعت موج برشی کمتر) مابین دو لایه خاک سخت‌تر (با سرعت موج برشی بیشتر) قرار گرفته است. مشخصات ویسکوالاستیک لایه‌های خاک شامل چگالی (دانسیته) لایه ρ و نسبت میرایی لایه است. در عمل چنین شرایطی زمانی پیش می‌آید که خاکریزهایی دستی (مصنوعی) با تراکم بالا و ضخامت‌های مختلف، بر لایه‌های از خاک در محل تحمیل می‌شود. حال لایه‌ی خاک محلی، ممکن است میزان سختی‌ای کمتر یا بیشتر، نسبت به لایه‌(های) خاکریز فوقانی خود داشته باشد. همچنین گاهی لایه‌های سطحی به خاطر جنس خود، سختی بیشتری نسبت به برخی لایه‌های زیرین دارند و پوسته‌ای سخت در سطح زمین ایجاد می‌کنند، که در اثر فشارهای سربار فوقانی زیاد، دچار نشست‌های بیش از حد بر اثر نشست و افت لایه نرم زیرین می‌شوند.

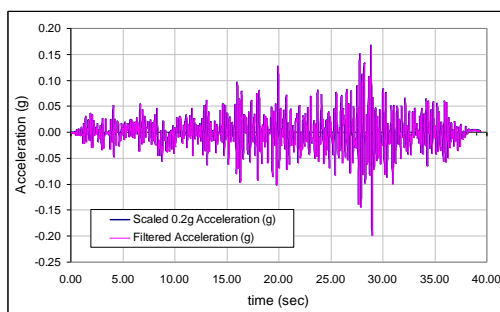
علاوه بر این، چاه‌های آب تحت فشار و مجراهای عبور آب‌های زیرزمینی در لایه‌های زیرین زمین که باعث نرم شدن لایه‌های خاک می‌گردند، از دیگر عوامل ایجاد پدیده قوس زدگی^۷ در لایه‌های فوقانی و شکل گیری لایه نرم و فروافت (نشست) سطح زمین در منطقه مورد نظر هستند. سیمانی شدن^۸ لایه فوقانی و ایجاد پوسته‌ای صلب و سخت در اثر ترکیبات شیمیایی موجود در خاک لایه فوقانی، عامل دیگری است که موجب تغییر سختی ناگهانی در لایه‌های خاک متوالی می‌گردد.

⁸ Cementation

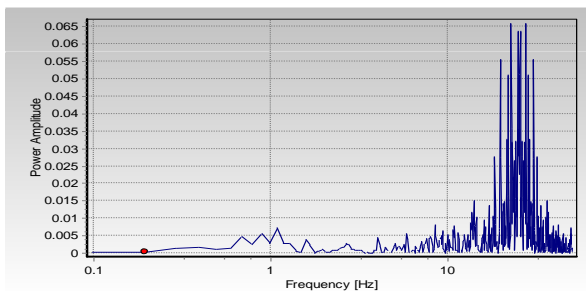
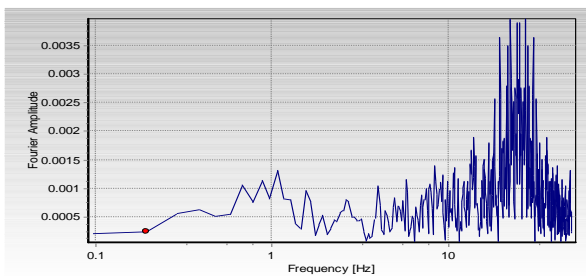
⁷ Arching phenomenon



شکل ۵. رکورد مولفه افقی طولی زلزله مقیاس نشده طبس در ایستگاه بجستان.

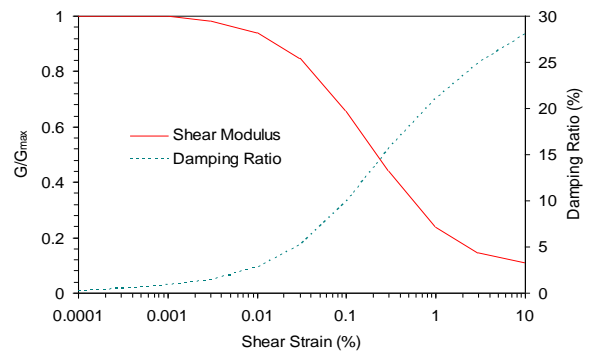


شکل ۶. مولفه افقی طولی زلزله طبس در ایستگاه بجستان، مقیاس شده به ۲۰٪ شتاب نقل و فیلتر شده برای فرکانس قطع ۲۵ هرتز.

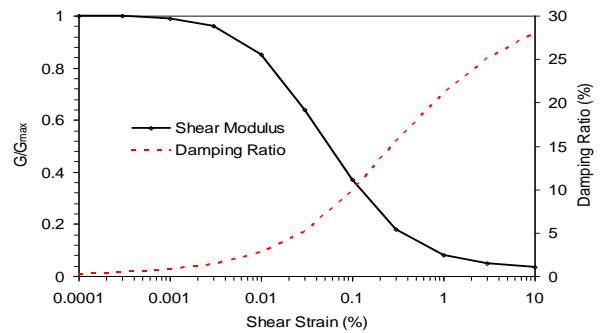


شکل ۷. (شکل بالا) طیف فوری و (شکل پایین) طیف توان مولفه افقی طولی زلزله طبس در ایستگاه بجستان مقیاس شده به ۲۰٪ شتاب نقل.

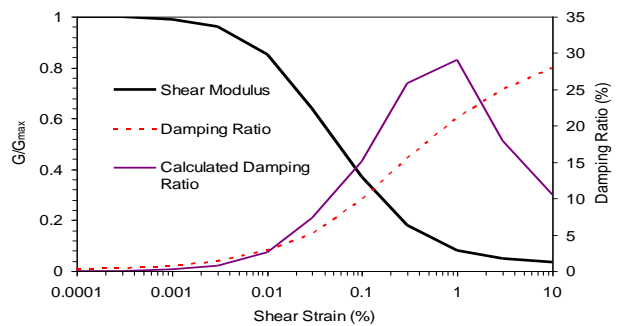
دینامیکی رکورد زلزله استفاده شده در جدول ۲ داده شده است (۲۰ پارامتر لرزه‌ای مختلف رکورد زلزله).



شکل ۲. نمونه منحنی‌های تغییرات نسبت میرایی و کاهش مدول برشی با کرنش برشی در تحلیل‌های EERA و NERA برای لایه نرم رسی.



شکل ۳. نمونه منحنی‌های تغییرات نسبت میرایی و کاهش مدول برشی با کرنش برشی در تحلیل‌های EERA برای لایه ماسه‌ای.



شکل ۴. نمونه منحنی‌های تغییرات نسبت میرایی و کاهش مدول برشی با کرنش برشی در تحلیل‌های NERA برای لایه ماسه‌ای.

جدول ۲. مشخصه های لرزه ای مولفه افقی طولی مقیاس نشده زلزله طیس در ایستگاه بجستان (تاریخ وقوع ۱۶/۰۹/۱۹۷۸).

ردیف	پارامتر لرزه ای	مقدار	ردیف	پارامتر لرزه ای	مقدار
۱	شتاب زمین بیشینه PGA (g)	۰/۰۱۶	۱۱	سرعت مطلق تجمعی CAV (cm/s)	۱۷/۱۵۴
۲	سرعت زمین بیشینه PGV (cm/s)	۰/۳۱۹	۱۲	شدت طیفی شتاب ASI (g.s)	۰/۰۰۳
۳	جابجایی بیشینه زمین PGD (cm)	۰/۴۸۰	۱۳	شدت طیفی سرعت VSI (cm)	۱/۲۴۰
۴	نسبت PGV/PGA (s)	۰/۰۲۱	۱۴	شدت هازنر HI (cm)	۱/۱۴۴
۵	مقدار RMS ^۹ شتاب (g)	۰/۰۰۳	۱۵	شتاب بیشینه پایدار SMA (g)	۰/۰۰۷
۶	مقدار RMS سرعت (cm/s)	۰/۱۳۱	۱۶	سرعت بیشینه پایدار SMV (cm/s)	۰/۲۶۳
۷	مقدار RMS جابجایی (c)	۰/۲۵۲	۱۷	شتاب طراحی موثر EDA (g)	۰/۰۰۳
۸	شدت آریاس (m/s)	۰/۰۰۱	۱۸	پارامتر A95 (g)	۰/۰۱۶
۹	شدت مشخصه (-)	۰/۰۰۰	۱۹	پریود غالب Tp (s)	۰/۰۴۰
۱۰	چگالی انرژی ویژه (cm ² /s)	۰/۱۳۶	۲۰	پریود میانگین Tm (s)	۰/۱۴۴

۳. معرفی روش و معادلات حاکم

مدل معادل - خطی پاسخ تنش - کرنش خاک را بر اساس مدل تنش - کرنش ویسکو الاستیک کلون-ویت^{۱۰} برای منظور نمودن آهنگ کرنش های برشی با زمان اعمال بار دینامیکی (اثر زمان در تحلیل ها) مطابق معادله (۱) در زیر ارائه می کند [۳۸]. در این مدل، تنش برشی وابسته به کرنش برشی و آهنگ (نرخ) کرنش برشی است:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

که در آن τ تنش برشی، γ کرنش برشی، $\dot{\gamma}$ آهنگ کرنش برشی نسبت به زمان، η ویسکوزیته و G مدول (سختی) برشی توده خاک در هر لایه است. همچنین در مدل غیر-خطی هیستریزس رفتار تنش-کرنش لرزه ای مصالح از نوع مدل IM است، که توسط ایوان^{۱۱} [۳۹] و امرز^{۱۲} [۴۰] پیشنهاد شده و منحنی هیستریزس استفاده شده در این مدل رفتاری مصالح، بر مبنای قاعده مسینگ^{۱۳} [۴۱] است. حل معادلات این مدل ها بر اساس روابط، روش ها و فرآیندهای مطرح شده در مراجع [۴۲-۴۴] است.

۴. بررسی یافته های مطالعات پارامتری

در این بخش به بررسی مطالعات پارامتری در خصوص اثر شرایط مختلف هندسی و مقاومتی لایه ها، شامل لایه نرم میانی و لایه های سخت فوقانی و تحتانی، بر پاسخ لرزه ای ساختگاه خاکی چند لایه پرداخته شده است. در این مجموعه مطالعات پارامتری، هدف این است که این پارامترها را به گونه ای انتخاب کرد که بتوان سازه ای با بهترین تطابق به لحاظ عملکرد مثبت در مقابل بارگذاری لرزه ای در هر ساختگاه احداث نمود. مقصود نهایی انجام این تحلیل ها، جلوگیری از رخداد پدیده تشدید یا بزرگنمایی بیش از حد مقادیر طیف پاسخ، در سازه های سطحی در هنگام وقوع زلزله است. این موضوع باعث رخداد دوران ها و تغییر شکل های بزرگ غیرقابل بازگشت در سازه ها و ویرانی آن ها می شود.

۴.۱. بررسی پارامتری اثر وجود و عدم وجود لایه نرم

برای بررسی حالت وجود یا عدم وجود لایه نرم میانی و اثر آن بر طیف پاسخ لرزه ای ساختگاه، دو حالت محتمل در دو تحلیل مجزای معادل-خطی و غیر-خطی در نظر گرفته می شود. هدف از در نظر گرفتن این دو حالت، تحلیل حساسیت طیف پاسخ به مقدار

⁹ Root mean square: RMS

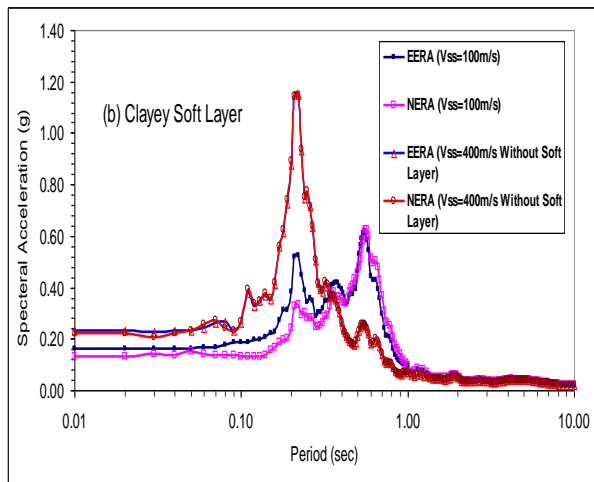
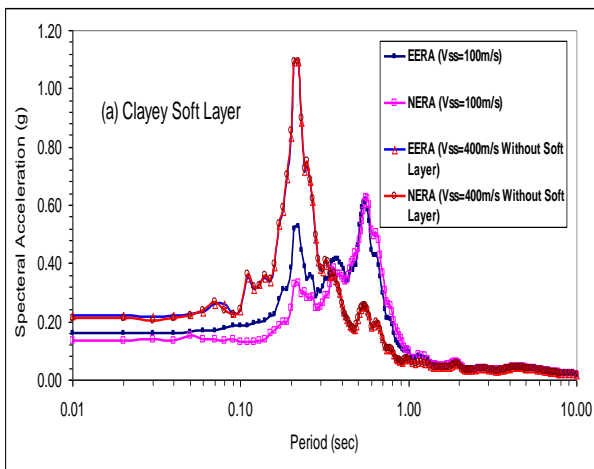
¹⁰ Kelvin-Voigt

¹¹ Iwan

¹² Mroz

¹³ Masing rule

ضخامت سربار (لایه سخت فوقانی) روی لایه نرم، مقادیر طیف پاسخ شتاب کاهش می‌یابد، به طوری که پاسخ طیف شتاب لایه‌های خاک در بیشینه ضخامت ۱۰۰۰m به نزدیک صفر می‌رسد. در کمینه ضخامت سربار برابر ۲ متر مقدار پاسخی بیشینه است. همچنین بازهم طیف پاسخ شتاب روش غیر-خطی، شکل ۹-ب، مقادیر کمتری نسبت به طیف پاسخ روش معادل-خطی، شکل ۹-آ، از خود نشان می‌دهد.



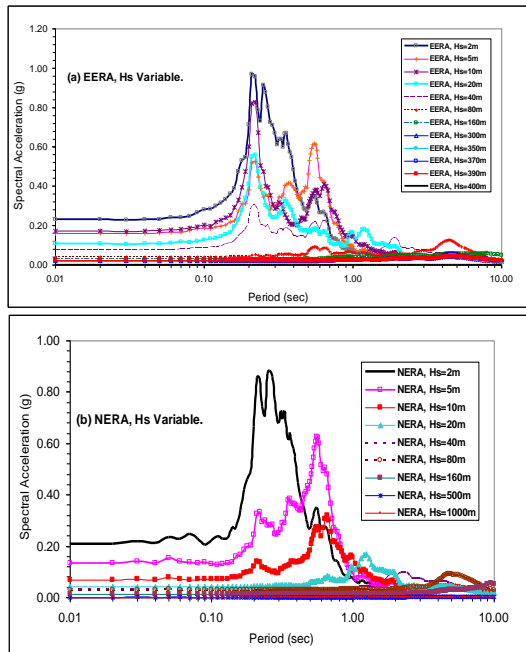
شکل ۸. بررسی حساسیت طیف پاسخ شتاب با نسبت میرایی ۰.۵٪ نسبت به وجود یا عدم وجود لایه نرم رسی: (آ) با فرض $\rho_s = \rho_u$ (ب) با فرض $\rho_s = \rho_s$.

کمی پارامتر چگالی خاک، علاوه بر تغییر سرعت موج برشی در لایه نرم است. مطابق شکل ۸، در تحلیل اول، در حالت نخست سرعت موج برشی برابر سرعت موج برشی لایه نرم و معادل (m/s) ۱۰۰ و چگالی خاک نرم برابر (kN/m^3) ۱۴ و در حالت دوم، سرعت موج برشی و چگالی خاک برابر سرعت موج برشی و چگالی خاک در لایه فوقانی فرض شده است (یعنی مدلسازی فرض عدم وجود لایه نرم میانی). در تحلیل دوم، سرعت موج برشی در حالت دوم برابر سرعت موج در لایه سخت فوقانی فرض شده است، با این تفاوت که چگالی خاک در لایه نرم در این حالت، دقیقاً همان چگالی اولیه در نظر گرفته شده برای لایه نرم است. از نتیجه این دو تحلیل اینگونه بر می‌آید که طیف پاسخ ساختمان چندان به چگالی لایه خاک نرم، حساس نیست و فقط به مقدار سرعت موج برشی در این لایه وابسته است. همچنین بر اساس شکل ۸، می‌توان گفت که لایه نرم پریردهای بالاتر (فرکانس‌های پایین تر) را دچار بزرگنمایی می‌کند و با حذف لایه نرم، مقادیر بزرگنمایی طیف پاسخ شتاب چند برابر می‌شود و از طرفی پریردهای پایین تر (فرکانس‌های بالاتر) دچار بزرگنمایی می‌گردند. از شکل ۸ مشخص است که مقادیر پاسخ شتاب غیر-خطی همواره کوچک‌تر یا برابر با مقادیر پاسخ معادل-خطی بدست آمده‌اند. الگوی شکل طیف پاسخ شتاب در پاسخ‌های معادل-خطی و غیر-خطی تقریباً روندی یکسان را دنبال می‌کند. این نتایج در شکل ۸ به طور بدیهی‌ای قابل ملاحظه است.

۲.۴. بررسی اثر موقعیت قرارگیری لایه نرم (اثر ضخامت لایه فوقانی H_u)

در این تحلیل‌ها (تحلیل‌های معادل-خطی و غیر-خطی) ضخامت لایه فوقانی متغیر فرض شده است. ضخامت این لایه H_u برابر ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ متر فرض شده است. هدف تعیین این موضوع است که در چه عمقی لایه نرم، دارای بیشترین اثر و در چه عمقی دارای کمترین اثر بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان است. در تمامی این تحلیل‌ها ضخامت لایه نرم میانی رسی ثابت و برابر ۵ متر است. همچنین به غیر از تغییرات ضخامت لایه فوقانی، سایر پارامترهای لایه نرم و لایه تحتانی و سنگ بستر، همگی ثابت هستند. چنانچه از شکل ۹ بر می‌آید، در هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی، با افزایش

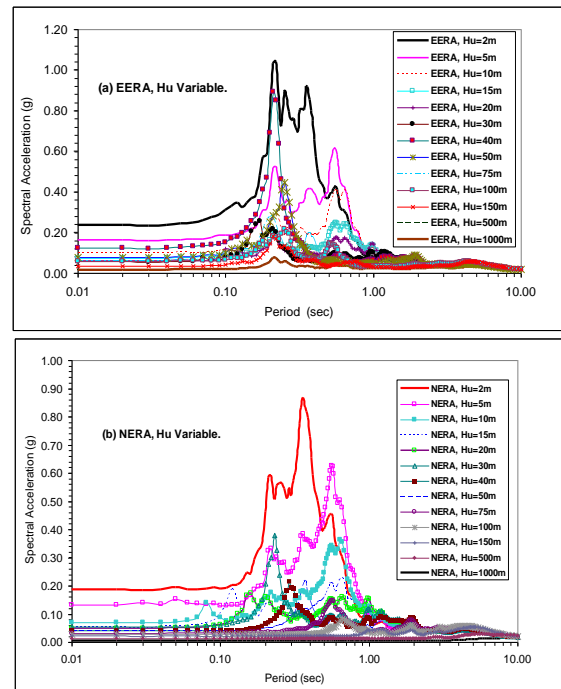
چندلایه در نظر می‌گیرد، به طور کلی متفاوت با روش معادل-خطی است.



شکل ۱۰. طیف پاسخ شتاب برای نسبت میرایی ۵٪ و لایه خاک نرم رسی (EERA)؛ (ب) روش تحلیل غیر-خطی (NERA).

۴.۴ بررسی اثر تغییرات ضخامت لایه نرم میانی بدون لایه سخت فوقانی

در تحلیل این قسمت، مشخصات لایه سخت فوقانی در مدلسازی پروفیل چند لایه خاک حذف می‌شود و لایه فوقانی به کلی در مدلسازی نادیده گرفته می‌شود. از طرفی مانند حالت تحلیل قبلی، ضخامت لایه نرم که در این شرایط از حالت میانی خارج شده است، افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در حالت عدم وجود لایه سخت فوقانی، مقادیر طیفی شتاب پاسخ چندین برابر افزایش یافته است و بسیار بزرگ‌تر از حالتی هستند که لایه سخت فوقانی با ضخامت ثابت، در حین تغییرات ضخامت لایه نرم میانی وجود دارد. این نشان دهنده این واقعیت است که لایه سخت فوقانی علیرغم ضخامت ناچیز خود، زمانی که روی لایه‌ای نرم قرار می‌گیرد، تاثیر بسزایی در کاهش مقادیر طیف شتاب پاسخ پروفیل خاک چند لایه دارد. این موضوع می‌تواند باعث کاهش چشمگیر خسارات در سازه‌های سطحی حین وقوع زلزله شود.

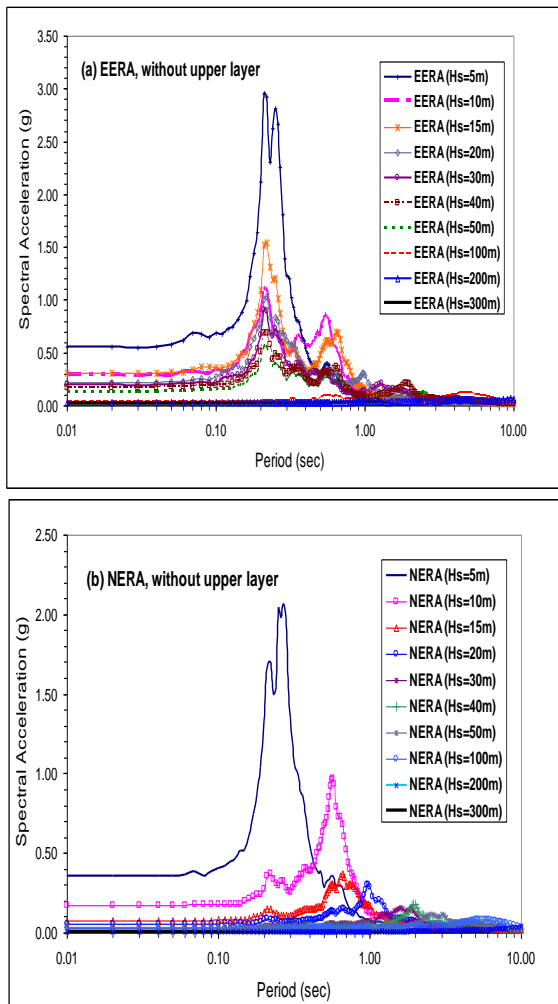


شکل ۹. طیف پاسخ شتاب برای نسبت میرایی ۵٪ و لایه خاک نرم رسی ($V_{S_s}=100\text{m/s}$) با ضخامت ۵ متر؛ (آ) تحلیل ارتجاعي معادل-خطی؛ (ب) تحلیل ارتجاعي غیر-خطی، با تغییر ضخامت سربار فوقانی.

۳.۴ بررسی اثر تغییرات ضخامت لایه نرم میانی (Hs)

در این تحلیل با ثابت نگه داشتن هندسه و مشخصات مقاومتی دینامیکی لایه‌های فوقانی و تحتانی لایه نرم و با حفظ مشخصات مقاومتی (و سختی) لایه نرم، ضخامت این لایه را تغییر داده تا اثر آن بر طیف پاسخ مشخص گردد. چنانچه در شکل ۱۰، مشاهده می‌گردد در هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی با افزایش ضخامت لایه نرم، این لایه همانند یک میراگر باعث کاهش شتاب پاسخ شده است. همچنین مطابق شکل‌های ۱۰-آ و ۱۰-ب با افزایش ضخامت لایه نرم، علیرغم کاهش مقدار شتاب پاسخ، پیوندهای بالاتر (فرکانس‌های پایین‌تر) دچار افزایش پاسخ شتاب (بزرگنمایی) شده‌اند. همچنین مقادیر طیفی شتاب‌های پاسخ روش غیر-خطی کمتر از روش معادل-خطی است. از طرفی روش غیر-خطی نسبت به روش معادل-خطی به لحاظ تاثیر پذیری کمتر از محدودیت‌های محاسبات عددی، محدوده بزرگ‌تری از ضخامت‌های لایه نرم (تا ۱۰۰۰m) را می‌تواند مدلسازی کند. در واقع شکل اعمال چرخه‌های تکراری که روش غیر-خطی برای حل مدل

چپ). مطابق شکل ۱۲- ب نیز روندی مشابه برای پاسخ غیر-خطی با تغییرات سرعت موج برشی در لایه نرم مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۱. اثر تغییرات ضخامت لایه نرم با حذف لایه سخت فوقانی با نسبت میرایی بحرانی برابر ۵٪ بر پاسخ طیفی یک بعدی در: (آ) تحلیل معادل-خطی؛ (ب) تحلیل غیر-خطی.

در این حالت در حالات تحلیل معادل - خطی و غیر- خطی، با افزایش ضخامت لایه نرم و مشابه حالت قبلی که لایه سخت فوقانی موجود است، ابتدا تا ضخامت ۱۵m برای لایه نرم، طبیعت نوسانی کاهش- افزایشی با روند کلی کاهش در پاسخ شتاب وجود دارد و بعد از ضخامت ۱۵m، افزایش ضخامت لایه نرم همانند یک میراگر عمل کرده و پاسخ شتاب طیفی را کاهش می‌دهد. تحلیل این بخش و بخش قبلی نشان می‌دهد که حضور لایه سخت فوقانی یا افزایش ضخامت لایه نرم میانی، به طور مجزا، هر دو باعث کاهش پاسخ شتاب طیفی می‌شوند، اما وجود لایه سخت فوقانی هر چند با ضخامت کم، تاثیر چشمگیری در کاهش طیف پاسخ شتاب ساختمانی چند لایه دارد.

پس " بر هم نهی وجود لایه سخت فوقانی و افزایش ضخامت لایه نرم میانی بطور همزمان " می‌تواند باعث کاهش زیادی، در شتاب طیفی پاسخ ساختمانی چند لایه شود. مطابق شکل های ۱۱-آ و ۱۱-ب تغییرات لایه نرم فوقانی، اثری دو گانه و متضاد دارد: ۱- کاهش شتاب پاسخ با افزایش ضخامت لایه نرم و ۲- افزایش کلی مقادیر بزرگنمایی^{۱۴} در شتاب پاسخ. همچنین در روش غیر- خطی به طور مشهودی با افزایش ضخامت لایه نرم میانی، طیف پاسخ شتاب در پریودهای بزرگتر (فرکانس‌های کوچکتر) دچار بیشینه بزرگنمایی می‌گردد (حرکت قله-اوج منحنی‌ها به سمت راست)، از طرفی مجدداً پاسخ شتاب طیفی روش غیر- خطی از روش معادل- خطی کوچکتر شده است. دلیل اصلی این موضوع آنست که کاهش سختی مصالح در روش غیر-خطی نسبت به روش معادل-خطی با چرخه‌های حل، به مراتب هماهنگ تر است.

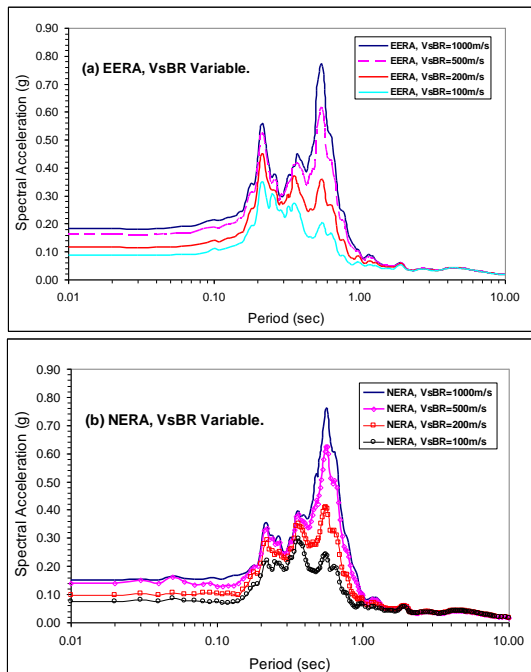
۵.۴. بررسی اثر سختی لایه نرم (اثر مقدار سرعت موج برشی در لایه)

مطابق شکل ۱۲-آ در تحلیل معادل- خطی با افزایش سرعت موج برشی لایه نرم از حداقل مقدار $50 (m/s)$ تا میزان $200 (m/s)$ شتاب پاسخ افزایش می‌یابد (بیشترین پاسخ شتاب) و بعد از آن با افزایش بیشتر سرعت موج برشی در لایه نرم، مقدار شتاب پاسخ روجه کاهش می‌گذارد، علاوه بر آن دوره (پریود) بیشینه شتاب پاسخ به سمت پریودهای کمتر جابه جایی^{۱۵} پیدا می‌کند (به سمت

¹⁵ Shift

¹⁴ Amplification

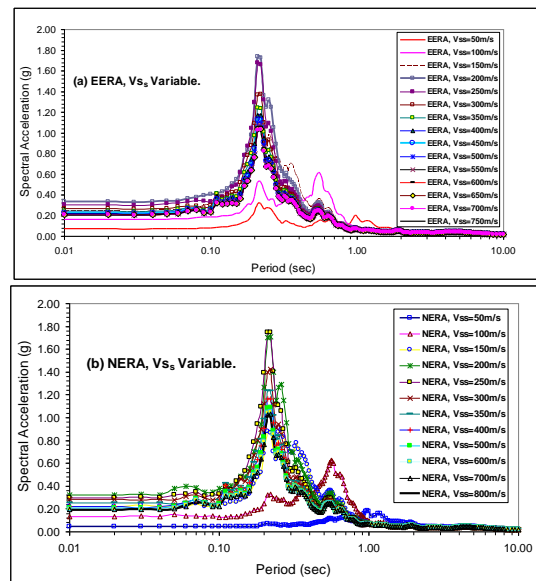
به شکلی ضعیف‌تر، در نتایج روش غیر - خطی، شکل ۱۳-ب، نیز مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۳. اثر سختی سنگ بستر تحتانی بر طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵٪: (آ) در تحلیل معادل - خطی؛ (ب) در تحلیل غیر - خطی.

۷.۴. بررسی اثر چگالی لایه خاک نرم

در این قسمت با ثابت نگه داشتن پارامترهای مدلسازی لایه‌ها، فقط چگالی وزنی (وزن مخصوص) لایه خاک نرم میانی در تحلیل‌ها دچار تغییر شده است. تغییرات چگالی لایه نرم می‌تواند به طور غیر مستقیم در طبیعت، بیانگر تغییر دو عامل باشد: یکی تغییرات تراز آب زیرزمینی (ظهور چگالی و وزن مخصوص به شکل‌های اشباع، موثر- غوطه‌ور- خشک و مرطوب و ...) و دیگری تغییرات میزان تراکم و نسبت تخلخل خاک. با افزایش تراکم خاک، جرم واحد حجم خاک افزایش یافته و باعث افزایش چگالی خاک می‌گردد، که خود با نسبت تخلخل خاک در ارتباط مستقیم است. با افزایش تراکم خاک، نسبت تخلخل خاک کاهش یافته و چگالی خاک (متناظر با وزن مخصوص = چگالی جرمی ضربدر شتاب ثقل) افزایش می‌یابد. چنانچه از منحنی‌های شتاب طیفی در این حالت می‌توان استنباط کرد، پاسخ‌های شتاب در هر دو حالت معادل-

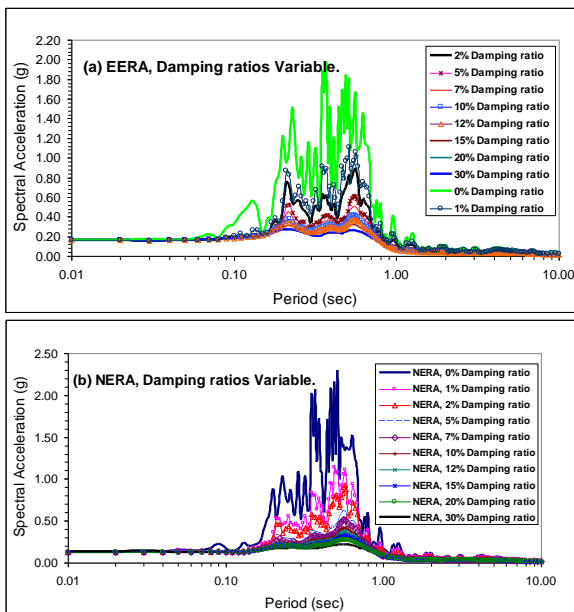


شکل ۱۴. بررسی اثر تغییرات سرعت موج برشی در لایه نرم با لحاظ نسبت میرایی بحرانی ۵٪ و $\rho_s = 14 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ در حالات: (آ) تحلیل معادل - خطی؛ (ب) تحلیل غیر - خطی.

۶.۴. بررسی اثر بستر صلب یا انعطاف پذیر

در این حالت با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای اثرگذار و تنها با تغییر سرعت موج برشی (سختی) در لایه سنگ بستر انتهایی، اقدام به انجام تحلیل‌هایی شده است [۱۶]. شایان توجه است که میرایی در تمامی تحلیل‌های این بخش، برابر ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است. در این تحلیل‌ها مشخص شده است که با افزایش سختی لایه سنگ بستر، مطابق شکل‌های ۱۳-آ و ۱۳-ب بر پاسخ شتاب، در هر دو حالت معادل - خطی و غیر - خطی افزوده می‌شود. همچنین قله‌های نمودار پاسخ شتاب غیر - خطی در پیوندهای کمتر (فرکانس‌های بیشتر)، مقادیر شتاب پاسخ کمتری نسبت به قله‌های طیف پاسخ شتاب معادل - خطی از خود نشان می‌دهند. پس در حالت کلی، افزایش سختی سنگ بستر لرزه‌ای، باعث کاهش شتاب پاسخ در سطح ساختگاه چند لایه‌ای می‌گردد. همچنین مطابق شکل ۱۳-آ مشاهده می‌گردد که در روش معادل - خطی با نرم‌تر شدن سنگ بستر (کاهش سختی آن)، قله‌های شتاب پاسخ در پیوندهای بیشتر هموار می‌شوند و در پیوندهای کمتر، مقادیر بیشتری از خود نشان می‌دهند. در اصل در این حالت پاسخ شتاب بستگی به سطح پیوند (فرکانس) دارد. مشابه چنین روندی

(حذف قله‌ها-اوج‌ها) و کاهش متناظر در مقادیر عددی قله‌های طیف پاسخ شتاب ساختگاه. همچنین روش غیر-خطی، شکل ۱۵-ب در شرایط نسبت میرایی کمینه (نسبت میرایی بحرانی برابر صفر) شتاب پاسخ بیشتری نسبت به روش معادل-خطی بدست می‌دهد. مطابق شکل‌های ۱۵-آ و ۱۵-ب، افزایش میرایی همانند افزایش ضخامت لایه خاک نرم، موجب کاهش در مقادیر شتاب پاسخ ساختگاه چند لایه‌ای شده است.

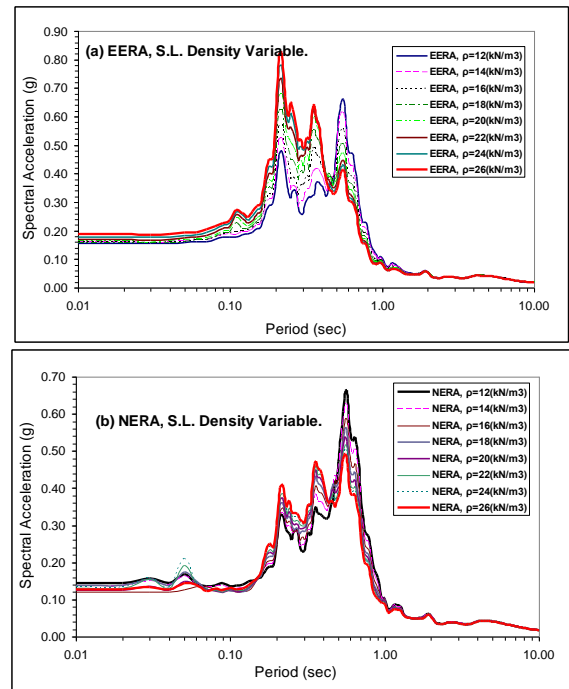


شکل ۱۵. طیف شتاب پاسخ در سطح زمین، در لایه نرم با $V_{Ss}=100$ (m/s): (آ) نتایج تحلیل معادل-خطی؛ (ب) نتایج تحلیل غیر-خطی.

۹.۴. بررسی اثر سطح آب زیرزمینی در لایه نرم

در این تحلیل اثرات وجود و عدم وجود تراز آب زیر زمینی^{۱۶} (G.W.T) در لایه‌های خاک مجاور لایه خاک نرم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که از نتایج هر دو تحلیل معادل-خطی، در شکل ۱۶-آ و غیر-خطی، در شکل ۱۶-ب، بر می‌آید، تغییرات تراز آب زیرزمینی بر نتایج شتاب طیفی پاسخ ساختگاه به ترتیب در برنامه‌های EERA و NERA در حال حاضر بی‌اثر است. البته چنانچه چگالی خاک لایه‌ها، به ویژه لایه نرم، مطابق با تراز آب

خطی و غیر-خطی، مابین پاسخ طیفی محدوده منحنی پاسخ کمینه و بیشینه چگالی لایه نرم قرار دارند. همچنین روند شکل گیری قله‌های پاسخ شتاب در دو روش معادل-خطی و غیر-خطی، مطابق شکل‌های ۱۴-آ و ۱۴-ب، معکوس یکدیگر شده است.



شکل ۱۶. پاسخ شتاب طیفی برای نسبت میرایی بحرانی ۰.۵٪ و سرعت موج برشی لایه نرم 100 (m/s): (آ) تحلیل معادل-خطی؛ (ب) تحلیل غیر-خطی.

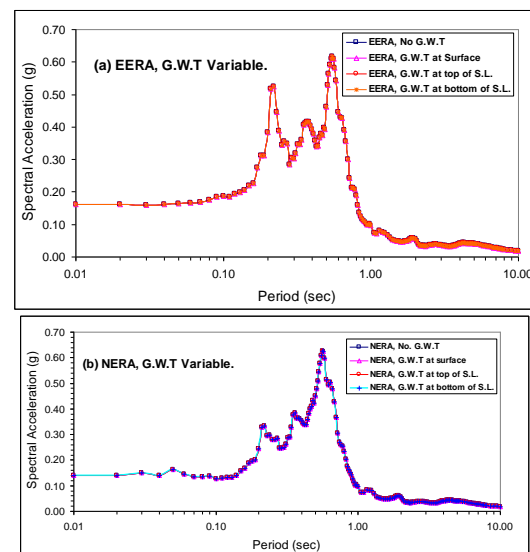
۸.۴. بررسی اثر نسبت میرایی لایه‌های خاک، بر پاسخ ساختگاه شامل لایه خاک نرم

در این حالت با فرض سرعت موج برشی حداقل برای لایه نرم رسی برابر 100 (m/s) و چگالی وزنی کمینه 14 (kN/m³) برای این لایه، با تغییر نسبت‌های میرایی بحرانی از صفر تا مقادیر ۰.۱٪، ۰.۲٪، ۰.۵٪، ۰.۷٪، ۱.۰٪، ۱.۲٪، ۱.۵٪، ۲.۰٪ و ۳.۰٪ اقدام به استخراج طیف پاسخ شتاب شده است. در هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی با افزایش میرایی، قله‌های طیف پاسخ شتاب هموار می‌شوند، علاوه بر آن مقدار شتاب طیفی نیز کاهش می‌یابد. پس افزایش میرایی باعث دو نتیجه می‌گردد، که عبارتند از هموار شدن شکل طیف پاسخ

¹⁶ Ground water table (G.W.T)

هر کدام از این لایه‌ها (لایه سخت سطحی یا لایه نرم میانی) پاسخ طیفی شتاب بزرگنمایی شده کاهش می‌یابد. مقادیر پاسخ شتاب روش غیر-خطی NERA در هر دو حالت کمتر از پاسخ روش معادل-خطی EERA است. یکی از علل این موضوع این است که روش غیر-خطی از تغییرات مماسی (تانژانت) مدول برشی خاک در چرخه‌های تناوبی بارگذاری لرزه‌ای استفاده می‌کند، حال آنکه روش معادل-خطی از تغییرات سکانت (وتری) مدول برشی G در محاسبات خود بهره می‌برد. همچنین روش غیر-خطی هماهنگی بهتری با میرایی مصالح در چرخه‌های تکراری محاسبات خود دارد، در حالی که روش معادل-خطی در این زمینه ضعف دارد. از سویی در نتایج روش معادل-خطی در عمق‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری افزایش و یا کاهش ناگهانی (پرش) در مقادیر شتاب طیفی پاسخ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۷(آ) دلیل این موضوع آنست که به ناگهان ضخامت لایه سخت فوقانی به شکل مضربی از ۵ متر (ضخامت لایه نرم) چند برابر می‌شود و روش معادل-خطی در بازتنظیم مقادیر کاهش سختی این لایه در محاسبات پاسخ‌های طیفی، ضعیف‌تر از روش غیر-خطی است. چرا که روش معادل-خطی به روش تحلیلی و روش غیر-خطی به روش عددی تفاضل محدود، مقادیر جدید به ویژه در نقاط مرزی بین لایه‌ها یا حین افزایش ضخامت لایه‌ها را محاسبه می‌کند. مشابه آن در شکل ۱۷(ب) به ناگهان ضخامت لایه نرم دو برابر می‌شود (یعنی ۱۰ متر)، که بازهم روش معادل-خطی این تغییر را به ویژه در بروز رسانی مقدار سختی واقعی کاهش یافته مدل عددی، دیرتر از روش غیر-خطی و در عمقی بعد از آن در نتایج محاسبات دخیل می‌کند. نکته جالب توجه آنست که همین تغییرات و الگوی مشابه آن، به شکل بسیار هموارتری در نتایج روش غیر-خطی هم وجود دارد. همه این اثرات ناشی از نحوه برخورد با کاهش سختی مصالح با افزایش سطح کرنش‌های برشی، در الگوریتم‌های محاسباتی دو روش متفاوت معادل-خطی و غیر-خطی است.

اصلاح نشود (یعنی استفاده از وزن مخصوص اشباع به جای وزن مخصوص مرطوب یا خشک، در زیر تراز آب زیرزمینی). نکته جانبی قابل توجه در نتایج این بخش، شکل ظاهری بزرگنمایی شتاب بستر در تحلیل‌های معادل-خطی و غیر-خطی است. به طوری که تحلیل معادل-خطی اوج‌های شتاب پاسخ به مراتب بزرگ‌تری، در پیوندهای پایین، نسبت به طیف غیر-خطی از خود نشان می‌دهد. نمودار شتاب طیفی پاسخ در نتایج هر دو روش به شکل سه - قله‌ای، ظاهر می‌شود که قله متناظر با حداقل پیوندها (فرکانس‌های بالاتر) در روش غیر-خطی هموارتر و با مقادیر کمتری نسبت به روش معادل-خطی بدست می‌آید، شکل ۱۶-ب. از سویی، بررسی تغییرات چگالی لایه خاک نرم (شامل موارد چگالی در حد مقادیر اشباع، مرطوب، غوطه ور یا خشک) و اثر آن بر طیف پاسخ شتاب، در بخش‌های قبلی مطالعات پارامتری، انجام شده و در مدلسازی عددی این قسمت اثر داده نشده است.



شکل ۱۶. پاسخ شتاب طیفی ساختمان برای نسبت میرایی ۵٪ و وزن مخصوص لایه نرم در حالات: (آ) تحلیل معادل-خطی؛ (ب) تحلیل غیر-خطی.

شکل ۱۷ پاسخ شتاب طیفی ساختمان معادل-خطی و غیر-خطی به ازای افزایش مقادیر پارامترهای ضخامت لایه سخت فوقانی (شکل ۱۷(آ)) و ضخامت لایه نرم میانی (شکل ۱۷(ب)) با نسبت میرایی بحرانی ۵٪ را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش ضخامت

دچار بزرگنمایی می‌کند و با حذف لایه نرم، مقادیر بزرگنمایی^{۱۷} طیف پاسخ شتاب چند برابر می‌شود و از طرفی پریودهای پایین‌تر (فرکانس‌های بالاتر) دچار بزرگنمایی می‌گردند.

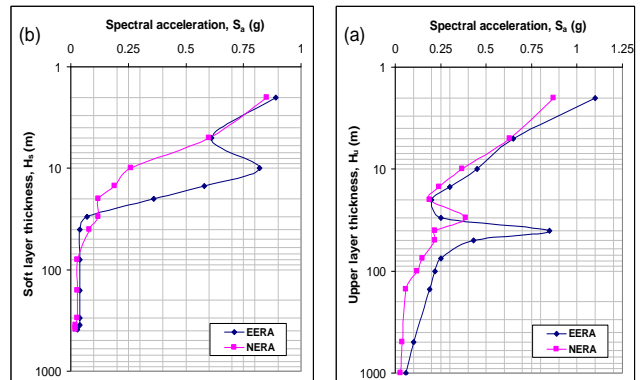
۲- در هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی، با افزایش ضخامت سربار خاکی (لایه سخت فوقانی) بر روی لایه نرم، مقادیر طیف پاسخ شتاب کاهش می‌یابد، به طوری که طیف پاسخ شتاب لایه‌های خاک در بیشینه ضخامت ۱۰۰۰ متری به نزدیک صفر و عددی ناچیز می‌رسد. در کمینه ضخامت سربار برابر ۲ متر مقدار پاسخ طیفی بیشینه است.

۳- در هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی، با افزایش ضخامت لایه نرم، این لایه همانند یک میراگر، باعث کاهش شتاب پاسخ شده است. با افزایش ضخامت لایه نرم، علیرغم کاهش مقدار شتاب پاسخ، پریودهای بالاتر (فرکانس‌های پایین‌تر) دچار افزایش شتاب (بزرگنمایی) می‌شوند. همچنین مقادیر طیفی شتاب‌های پاسخ روش غیر-خطی کمتر از روش معادل-خطی است.

۴- تغییرات ضخامت لایه نرم فوقانی (بدون تعریف لایه سخت فوقانی) اثری دو گانه و متضاد دارد: کاهش شتاب پاسخ با افزایش ضخامت لایه نرم و افزایش کلی مقادیر بزرگنمایی در شتاب پاسخ. همچنین در روش غیر-خطی، به طور مشهودی با افزایش ضخامت لایه نرم میانی، طیف پاسخ شتاب در پریودهای بزرگ‌تر (فرکانس‌های کوچک‌تر) دچار حداکثر بزرگنمایی می‌گردد.

۵- در تحلیل معادل-خطی، با افزایش سرعت موج برشی لایه نرم از حداقل مقدار ۵۰ (m/s) تا مقدار ۲۰۰ (m/s) شتاب پاسخ افزایش می‌یابد (بیشترین پاسخ شتاب) و بعد از آن با افزایش بیشتر سرعت موج برشی در لایه نرم، مقدار شتاب پاسخ شروع به کاهش می‌کند، علاوه بر آن پریود بیشینه شتاب پاسخ به سمت پریودهای کمتر، سمت چپ، جابه‌جایی پیدا می‌کند.

۶- در این تحلیل‌ها مشخص شده است که با افزایش سختی لایه سنگ بستر، بر پاسخ شتاب، در نتایج هر دو روش معادل-خطی و غیر-خطی افزایش می‌شود. همچنین قله‌های نمودار پاسخ شتاب غیر-خطی در پریودهای کمتر (فرکانس‌های بیشتر)، مقادیر شتاب پاسخ کمتری نسبت به قله‌های طیف پاسخ شتاب



شکل ۱۷. پاسخ شتاب طیفی ساختمان معادل-خطی و غیرخطی به ازای افزایش مقادیر پارامترهای: (آ) ضخامت لایه سخت فوقانی، (ب) ضخامت لایه نرم.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عددی اثر لایه خاک نرم میانی بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های چند لایه‌ای پرداخته شده است. لایه نرم می‌تواند ناشی از اختلاف تراکم لایه‌های خاک (لایه سست بین دو لایه متراکم)، سیماناسیون و افزایش مقاومت لایه سطحی به خاطر جنس آن، اختلاف جنس (لایه خاک رسی مابین دو لایه دانده‌ای سخت‌تر) و یا در اثر قوس زدگی یا حفرات زیرزمینی که به مرور زمان با آبرفت‌های نرم‌تر پر می‌شوند، شکل بگیرد. مبنای قضاوت این تحقیق، در خصوص نرم یا سخت بودن لایه‌های خاک، بر اساس مقادیر سرعت انتشار موج برشی (V_s) ثبت شده در لایه‌های خاک است. در حالت پیش فرض، در تحلیل‌های عددی نسبت میرایی بحرانی لایه‌های خاک برابر ۰.۵٪ فرض شده است و در برخی تحلیل‌های پارامتری مطالعه حاضر، مقدار آن تغییر داده شده است. اثر تغییر مشخصات هندسی (ضخامت و محل لایه) و سختی لایه خاک نرم، بر پاسخ طیفی شتاب ساختمان از طریق تحلیل‌های پارامتری به روش‌های یک بُعدی معادل-خطی (در برنامه EERA) و غیر-خطی (در برنامه NERA) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عمده حاصل از این مطالعه به شرح موارد زیر قابل بیان است:

- ۱- طیف پاسخ ساختمان‌ها چندان به تغییرات چگالی لایه نرم حساس نیست و فقط به سرعت موج برشی در این لایه وابسته است. می‌توان گفت که لایه نرم پریودهای بالاتر (فرکانس‌های پایین‌تر) را

¹⁷ Amplification (or magnification)

- University of California, Berkeley, December, (102p), (1972).
- [2] Lee, M. K. W. and Finn, W. D. L., "DESRA-2, Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential", *Faculty of Applied Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada*, (1978).
- [3] Prevost, J. H., "DYNA1D: A Computer Program for Nonlinear Seismic Site Response Analysis - Technical Documentation," *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Report NCEER-89-0025*, (1989).
- [4] Idriss, I.M. and Sun, J.I., "User's Manual for SHAKE91," *Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil Engineering, University of California, Davis*, (1992).
- [5] Bardet, J. P., Ichii, K., and Lin, C. H., "EERA, A computer program for Equivalent linear Earthquake site Response Analysis of layered soils deposits", *University of Southern California, Los Angeles*, (2000).
- [6] Bardet, J. P., and Tobita T., "NERA, A computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analysis of layered soils deposits", *University of Southern California, Los Angeles*, (2001).
- [7] Ordonez, G.A., "SHAKE2000, A computer program for the 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems", March 2006 - Revision, (2006).
- [8] Ordonez, G.A., "ShakEdit, A pre and postprocessor for SHAKE and SHAKE91", March 2006 - Revision, (2006).
- [9] Hashash, Y.M.A, Groholski, D.R., Phillips, C. A., Park, D, Musgrove, M., "DEEPSOIL 5.1 User Manual and Tutorial, 107p, A one-dimensional site response analysis program for perform both 1-D nonlinear and 1-D equivalent linear analyses", *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA*, (2012).
- [10] Idriss, I. M., "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes", *Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed*, Berkeley, California, Vol. II, May, (1990).
- [11] Matthiesen, R.B., Duke, C. M., Leeds, D. J. and Fraser, J. C., "Site Characteristics of Southern California Strong-Motion Earthquake Stations, Part Two", Report No. 64-15. *Department of Engineering, University of California, Los Angeles*, August (1964).
- [12] Idriss, I. M. and Seed, H. B., "Seismic Response of Horizontal Soil Layers", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 94, No. 4, pp.1003-1031, (1968).
- [13] Kanai, K., "Relation Between the Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motions", *Bulletin*, Tokyo Earthquake Research Institute, (1951).

معادل - خطی، از خود نشان می دهند. پس در حالت کلی، افزایش سختی سنگ بستر لرزه ای، باعث کاهش شتاب پاسخ در سطح ساختمان چند لایه ای می شود.

۷- با تغییر چگالی لایه خاک نرم، پاسخ های شتاب در هر دو روش تحلیل معادل - خطی و غیر - خطی، مابین پاسخ طیفی محدوده کمینه و بیشینه چگالی لایه خاک نرم قرار دارند. همچنین روند شکل گیری قله های پاسخ شتاب در دو روش معادل - خطی و غیر - خطی، وارون یکدیگر شده است.

۸- در هر دو روش معادل - خطی و غیر - خطی، با افزایش میرایی خاک، قله های طیف پاسخ شتاب هموار می شوند، علاوه بر آن مقدار شتاب طیفی نیز کاهش می یابد. همچنین روش غیر - خطی، در شرایط نسبت میرایی حداقل (نسبت میرایی بحرانی برابر صفر) شتاب پاسخ بیشتری نسبت به روش معادل - خطی بدست می دهد. افزایش میرایی همانند افزایش ضخامت لایه نرم، موجب کاهش در مقادیر شتاب پاسخ ساختمان چند لایه ای شده است.

۹- چنانچه از نتایج هر دو روش تحلیلی معادل - خطی، و غیر - خطی بر می آید، تغییرات تراز آب زیرزمینی بر نتایج شتاب طیفی پاسخ ساختمان در مدلسازی های این مطالعه، بی اثر است. البته چنانچه چگالی خاک لایه ها، به ویژه لایه نرم، مطابق با تراز آب اصلاح نشود (یعنی استفاده از وزن مخصوص اشباع به جای وزن مخصوص مرطوب یا خشک در زیر تراز آب زیرزمینی).

۱۰- با توجه به وابستگی پررود طبیعی (وارون فرکانس طبیعی) سازه ها (قاب های فولادی یا بتنی و سازه های بنایی) به ارتفاع آن ها و نیز چگونگی بزرگنمایی شتاب های پاسخ در تحلیل حاضر، با تغییر شرایط لایه نرم میانی، می بایست ارتفاع سازه در هر ساختمان، طوری انتخاب گردد، که پدیده تشدید یا پدیده بزرگنمایی با وجود لایه (یا لایه های) نرم و در شرایط تفاوت سختی و مقاومت در لایه های خاک، اتفاق نیفتد.

References

- [1] Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", *Report No. UCB/EERC-72/12*, Earthquake Engineering Research Center,

- Dynamics and Earthquake Engineering*, 127 (2019) 105860,(2019).
- [26] Phillips C., Hashash Y.M.A., “Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29(2009)1143-1158, (2009).
- [27] Tao Y., Rathje E., “Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 128 (2020) 105865,(2020).
- [28] Gao J.C., Chan C.H., Lee C.T., “Site-dependent ground-motion prediction equations and uniform hazard response spectra”, *Engineering Geology* 292 (2021) 106241.
- [29] Nguyen H.V., Lee J.H., “Probabilistic site response analysis for nuclear facilities considering variability of soil properties and its effects on uniform hazard response spectra and ground motion response spectra”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150 (2021) 106953,(2021).
- [30] Anthi M., N. N., “A wave propagation algorithm for nonlinear site response analysis of layered soil accounting for liquefaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 149 (2021) 106860,(2021).
- [31] Tsai C.C., Liu in H.W., “Site response analysis of vertical ground motion in consideration of soil nonlinearity”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 102 (2017) 124-136,(2017).
- [32] Hardin, B. O. and Drnevich, V. P., “Shear Modulus and Damping in Soils: I. Measurement and Parameter Effects”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. 6, pp. 603-624,(1972).
- [33] Hardin, B. O., and Drnevich, V. P., “Shear Modulus and Damping in Soils: II. Design Equations and Curves”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. 7, pp. 667-691,(1972).
- [34] Seed, H. B. and Idriss, I. M., “Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis”, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48p,(1970).
- [35] Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K., “Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 11 2, No. GTI 1, November, pp.1016-32,(1986).
- [36] Sun, J.I., Golesorkhi, R. and Seed, H.B., “Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils”, Report No. UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 42p,(1988).
- [14] Tsai, N. C., and Housner, G.W., “Calculation of Surface Motions of a Layered Half Space”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 60, No. 5, pp. 1625-1651,(1970).
- [15] Roesset, J.M. and Whitman, R.V., “Theoretical Background for Amplification Studies”, Research Report No. R69-15, Soils Publications No. 231, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, (1969).
- [16] Lysmer, J., Seed, H. B. and Schnabel, P. B., “Influence of Base-Rock Characteristics on Ground Response”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, No. 5, pp. 1213-1232,(1971).
- [17] Sugito, M., “Frequency-dependent equivalent strain for equi-linearized technique”, *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 1, A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 655-660,(1995).
- [18] Joyner, W.B. and Chen, A.T.F., “Calculation of nonlinear ground response in earthquakes,” *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 65, pp. 1315-1336,(1975).
- [19] Fabozzi S., Catalano S., Falcone G., Naso G., Pagliaroli A., Peronace E., Porchia A., Romagnoli G., Moscatelli M., “Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: Application to seismic microzonation studies in Italy”, *Engineering Geology*,(2020).
- [20] Sáenz M., César Sierra, Juan Vergara, Juan Jaramillo, Juan Gomez, “Site specific analysis using topography conditioned response spectra”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 123 (2019) 470-497,(2019).
- [21] Sun R., Yuan X., “A holistic equivalent linear method for site response analysis”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,(2020).
- [22] Chang J., Deng Y., Xuan Y., Yan Z., Wu W., He J., “The dynamic response of sites with earth fissures as revealed by microtremor analysis-A case study in the Linfen Basin, China”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 132 (2020) 106076,(2020).
- [23] Du W., Pan T.C., “Site response analyses using down hole arrays at various seismic hazard Levels of Singapore”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90:169-182,(2016).
- [24] Garcia-Suarez J., Seylabi E., Asimaki D., “Linear one-dimensional site response analysis in the presence of stiffness-less free surface for certain power-law heterogeneities”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 141 (2021) 106530,(2021).
- [25] Manha N.H., Chang N.Y., “A new viscous damping formulation for 1D linear site response analysis”, *Soil*

- [37] Vucetic, M. and Dobry, R., "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 1, January, pp. 89-107,(1991).
- [38] Kramer, S.L., "*Geotechnical Earthquake Engineering*", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 254-280,(1996).
- [39] Iwan, W. D., "On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 34, pp.612-617, (1967).
- [40] Mróz, Z., "On the description of anisotropic work hardening", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.15, pp.163-175,(1967).
- [41] Masing, G., "Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing", *Proceedings of the Second International Congress of Applied Mechanics*, pp.332-335,(1926).
- [42] Bendat, J. S., and A. G. Piersol, "*Random Data, Analysis and Measurement Procedures*", John Wiley & Sons, New York, pp. 334-383,(1986).
- [43] Cooley, J. W. and Tukey, J. W., "An Algorithm for the Machine Calculations of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation*, 19(90), pp. 297-301, (1965).
- [44] Meirovitch, L., "Analytical Methods in Vibrations", The MacMillan Company, NY, pp. 400-401,(1967).