

Evaluation of Soil Contribution to Seismic Response of Soil-Structure Systems Using Recorded Data During Small-scale earthquakes

Shaghayegh Vaseghiamiri¹, Mohammad Ali Ghannad^{2*}

1- Ph.D., dept. of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2 -Professor, dept. of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

This paper investigates the importance of super-structure modeling in estimating soil contribution to the seismic response of soil-structure systems. For this purpose, soil-structure systems with different lateral resisting systems are studied and the values for the main parameters of the system, including parameters determining the soil-structure-interaction (SSI) and the contribution of flexural and shear deformation to the total response of the system are determined. To this end, a one-bay frame with flexural-shear behavior is utilized to model the super-structure in the soil-structure system. In this research, different soil-structure systems are studied using artificial and real acceleration floor responses. The results from investigating different soil-structure systems showed that the proposed method to identify the system can estimate the main parameters of the soil-structure system with acceptable accuracy. Moreover, the results showed that two different systems with different lateral resisting systems and the amount of soil contribution can be identified with almost the same floor acceleration responses. For an instant, a moment-frame system located on soft soil with relatively high soil-structure-interaction may have the same floor acceleration responses as a shear-wall located on firm soil with less soil's contribution. This observation shows the importance of using more realistic modeling for the super-structure in soil-structure systems to achieve more reliable estimates of soil contribution to the system's response.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 February 2021

Revise Date: 20 June 2021

Accept Date: 04 July 2021

Keywords:

Soil-structure-interaction

Flexural-shear model

System identification

Seismic acceleration response

Non-classic modal analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.274646.2370>

*Corresponding author: Mohammad Ali Ghannad

Email address: Ghannad@sharif.ir

تعیین میزان مشارکت خاک در پاسخ سیستم‌های خاک-سازه با استفاده از داده‌های ثبت شده در زلزله‌های کوچک-مقیاس

شقایق واثقی امیری^۱، محمدعلی قناد^{۲*}

۱- دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه، اهمیت نحوه مدل‌سازی سازه در تخمین میزان مشارکت خاک در پاسخ سیستم‌های خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سیستم‌های خاک-سازه با سیستم باربر جانبی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مقدار پارامترهای اصلی سیستم شامل پارامتر تعیین‌کننده میزان اندرکنش خاک و سازه و پارامتر تعیین‌کننده نسبت مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی در پاسخ کل سیستم شناسایی شده‌اند. در این راستا، از یک قاب تک-دهانه با رفتار خمشی-برشی برای مدل‌سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه استفاده شده است. در این مطالعه، سیستم‌های مختلف خاک-سازه با استفاده از داده‌های پاسخ شتاب مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از شناسایی سیستم‌های خاک-سازه نشان دادند که روش ارائه شده با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی پارامترهای سیستم خاک-سازه می‌باشد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهند که می‌توان دو سازه با سیستم‌های باربر جانبی متفاوت و مقادیر متفاوتی از میزان مشارکت خاک پیدا نمود، به طوری که پاسخ‌های به دست آمده در طبقات این دو سیستم با هم مطابقت قابل قبولی داشته باشند. برای مثال، ممکن است یک سازه قاب خمشی که روی یک خاک نرم با میزان مشارکت خاک زیاد قرار گرفته است، پاسخی مشابه با پاسخ یک سیستم با دیوار برشی واقع بر خاک سخت با میزان اندرکنش خاک و سازه کم‌تر داشته باشد. چنین مشاهده‌ای اهمیت استفاده از مدل‌های واقع‌گرایانه برای مدل‌سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه را برای تخمین دقیق‌تری از میزان مشارکت اندرکنش خاک و سازه نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، مدل رفتاری خمشی-برشی، شناسایی سیستم، پاسخ لرزه‌ای شتاب، تحلیل مودال غیر-کلاسیک

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.274646.2370
۱۳۹۹/۱۲/۰۸	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	doi: 10.22065/jsce.2021.274646.2370
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		محمدعلی قناد Ghannad@sharif.ir			

۱- مقدمه

هدف از این مطالعه، بررسی اهمیت مدل‌سازی سازه در تخمین میزان مشارکت اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سیستم می‌باشد. در راستای این هدف، در این مطالعه به بررسی میزان مشارکت اندرکنش خاک و سازه و نسبت تغییرشکل‌های خمشی و برشی در پاسخ کل سیستم‌های خاک-سازه با سیستم‌های باربر جانبی مختلف پرداخته شده است.

بیشتر از سه دهه است که تاثیر اندرکنش خاک و سازه برای مهندسين و محققين آشکار شده است. در زمینه تاثیرات اندرکنش خاک و سازه روی پاسخ خطی سازه‌ها، تحقیقات بسیاری در دهه ۱۹۷۰ میلادی صورت گرفت [1,2]. در این مطالعات، یک مدل تک درجه آزادی جای‌گزین سازه اصلی شده است. بعدتر، رفتار خطی سیستم‌های خاک-سازه با صرف نظر از جرم پی و به صورت یک سازه تک درجه آزادی مورد مطالعه قرار گرفت [3-6]. در این مطالعات، نشان داده شد که تاثیر اصلی اندرکنش خاک و سازه، افزایش زمان تناوب و به طور معمول افزایش میرایی مود اول ارتعاش می‌باشد. تخمین سیستم خاک-سازه به این صورت بعدها پایه اصلی برای ضوابط طراحی قرار گرفت [7].

در زمینه بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه، مطالعات تجربی زیادی برای تعیین اهمیت خاک و تاثیر آن بر پاسخ سیستم‌های خاک-سازه صورت گرفته است. تمرکز بخش عمده‌ای از مطالعات تجربی روی سیستم‌های خاک-سازه، استخراج مشخصات دینامیکی سیستم و اثرات اندرکنشی از پاسخ دینامیکی سازه‌ها بوده است. به عنوان نمونه، شفک^۱ [8]، با ساخت یک مدل دو درجه آزادی (یک درجه آزادی انتقالی برای پی و یک درجه آزادی انتقالی برای سازه فوقانی)، نحوه تغییرات فرکانس‌های سیستم دو درجه آزادی را بر اساس خواص هر یک از درجات آزادی مورد بررسی قرار داد. بعدتر، تودوروسکا^۲ [9]، در زمینه شناسایی خصوصیات دینامیکی سیستم‌های خاک-سازه، روشی بر اساس تداخل‌سنجی لرزه‌ای یک مدل خاک-سازه که هم زمان اثرات درگیر حرکات انتقالی و دورانی را در نظر می‌گیرد، ارائه داد. در مطالعات مذکور در زمینه شناسایی سیستم‌های خاک-سازه، تمرکز اصلی روی نحوه اندرکنش خاک با سازه و تاثیرگذاری خاک غیر-صلب روی زمان تناوب و میرایی مود اول ارتعاشی سیستم بوده است. این در حالی است که در مطالعات تجربی، معمولاً پاسخ شتاب سیستم‌ها ثبت می‌شوند و مشارکت موده‌های بالاتر ارتعاشی در پاسخ شتاب سیستم دارای اهمیت بیش‌تری است.

موضوع دیگری که در مطالعات تجربی در زمینه بررسی اندرکنش خاک و سازه مهجور مانده است، توجه به واقعیت مدل رفتاری سازه‌ها می‌باشد. به طوری که در اکثر این تحقیقات، از مدل‌های بسیار ساده‌ای جهت مدل‌سازی سازه فوقانی استفاده شده است [8,9]. مطالعات انجام شده در زمینه بررسی تاثیر مدل‌سازی سازه بر پاسخ سیستم، دلالت بر اهمیت موضوع نحوه مدل‌سازی دارند [10-13]. در این مطالعات، از یک مدل پیوسته با رفتار خمشی-برشی برای مدل‌سازی سیستم استفاده شده است. این مدل، از یک تیر پیوسته برشی و یک تیر پیوسته خمشی که توسط بی‌نهایت المان صلب محوری به هم متصل شده‌اند تشکیل می‌شود. در این مدل، پارامتر α ، که نسبت سختی تیر برشی به خمشی را بیان می‌کند، نسبت مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی را در پاسخ کل سیستم تعیین می‌کند. مقدار صفر این پارامتر بیان‌کننده سازه‌ای با رفتار خمشی خالص و مقدار بی‌نهایت آن حاکی از رفتاری کاملاً برشی است. مدل پیوسته خمشی-برشی، در مطالعه دیگری برای بررسی رفتار چند ساختمان واقعی مورد استفاده قرار گرفت [12]. در این مطالعه، برای هر ساختمان، پارامتر α ، زمان تناوب مود اول و میرایی‌های موده‌ها به گونه‌ای تعیین شدند که پاسخ شتاب تقریب زده شده با استفاده از مدل به پاسخ ثبت شده در آن سازه نزدیک باشد. نتایج به دست آمده با پاسخ‌های ثبت شده مطابقت خوبی دارند. نکته حائز اهمیت در این مطالعه، این است که در مدل پیوسته خمشی-برشی، از تاثیرات اندرکنشی خاک و سازه بر پاسخ سیستم صرف نظر شده است. ساختمان‌های مورد بررسی در مطالعه [12] در شهر سان‌فرانسیسکو واقع شده‌اند و تحت زلزله لوماپریتا^۳ ۱۹۸۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مشارکت خاک در پاسخ ساختمان‌ها در این رویداد زلزله آشکار است.

¹ Safak

² Todorovska

³ Loma Prieta Earthquake(1989)

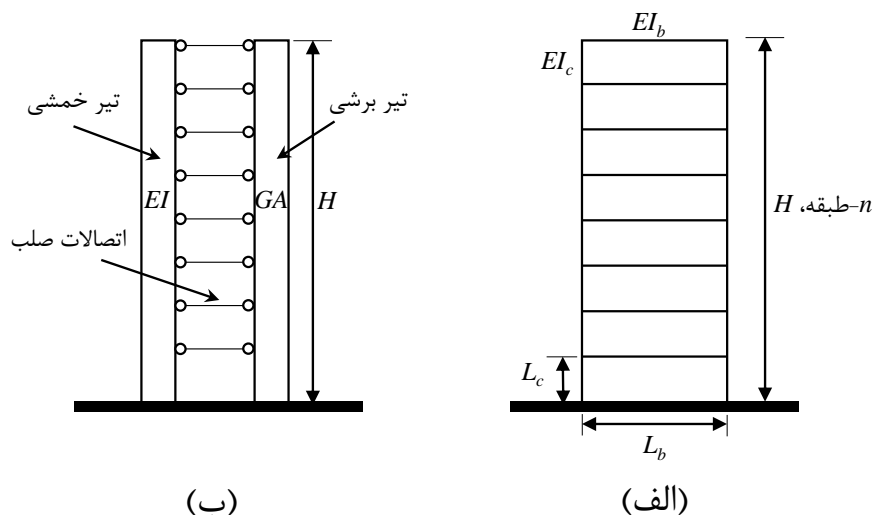
تاثیر هم زمان اندرکنش خاک و سازه و مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی روی پاسخ شتاب سازه‌ها و مشخصات دینامیکی سیستم‌های خاک-سازه توسط توکلی مورد مطالعه قرار گرفت [14]. در این مطالعه، تاثیر اندرکنش خاک و سازه و پارامتر α ، روی زمان تناوب، میرایی، اشکال مودی، و پاسخ شتاب طبقات سیستم خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که هر دو پارامتر α و اندرکنش خاک و سازه روی مشخصات دینامیکی سیستم تاثیر می‌گذارند و صرف نظر کردن از تاثیر آنها می‌تواند منجر به خطای نتیجه‌گیری در مورد پاسخ و خصوصیات سیستم گردد.

با توجه به مطالب ذکر شده، هر دو عامل انعطاف‌پذیری خاک زیر پی و نحوه مدل‌سازی سیستم، به طور اخص در نظر گرفتن هم زمان تغییرشکل‌های برشی و خمشی در پاسخ سیستم، بر مشخصات دینامیکی و پاسخ کلی سیستم خاک-سازه تاثیر می‌گذارند. در نتیجه، در نظر نگرفتن هر یک از این دو عامل منجر به بروز خطای نتیجه‌گیری در مورد سیستم‌های خاک-سازه می‌گردد. بنابراین، برای تعیین میزان تاثیر اندرکنش خاک و سازه روی پاسخ شتاب سیستم‌های خاک-سازه، باید از مدل‌های رفتاری واقع‌گرایانه‌تری برای مدل‌سازی سازه فوقانی استفاده شود. هم چنین، برای مطالعه پاسخ شتاب سیستم، باید اثرات مودهای بالاتر ارتعاش در پاسخ سیستم در نظر گرفته شود.

در این مطالعه، سیستم‌های مختلف خاک-سازه که پاسخ شتاب آن‌ها در ترازهای مختلف سازه تحت یک رکورد زلزله مشخص می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته‌اند و پارامترهای اصلی سیستم شامل پارامتر تعیین کننده میزان اندرکنش خاک و سازه و پارامتر تعیین کننده میزان مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی شناسایی می‌شوند. برای این منظور، از یک قاب تک-دهانه با رفتار خمشی-برشی برای مدل‌سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه استفاده شده است. در این مطالعه، رفتار سیستم خاک-پی، بر اساس مدل‌های مخروطی و با استفاده از فنر و میراگرهایی در درجات آزادی افقی و دورانی مدل شده است. رفتار سیستم در این مطالعه به صورت خطی فرض شده است. در ادامه نحوه مدل‌سازی و روش شناسایی سیستم‌های خاک-سازه ارائه شده است.

۱- مدل خمشی-برشی

شکل ۱(الف) قاب به کار گرفته شده در این مطالعه را برای مدل‌سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه نشان می‌دهد. قاب نشان داده شده در شکل ۱(الف) معادل مدل پیوسته تقوی و میراندا^۴ [10] است که در شکل ۱(ب) نشان داده شده است.



شکل ۱: (الف) مدل قاب تک-دهانه، (ب) مدل پیوسته تقوی و میراندا [10]

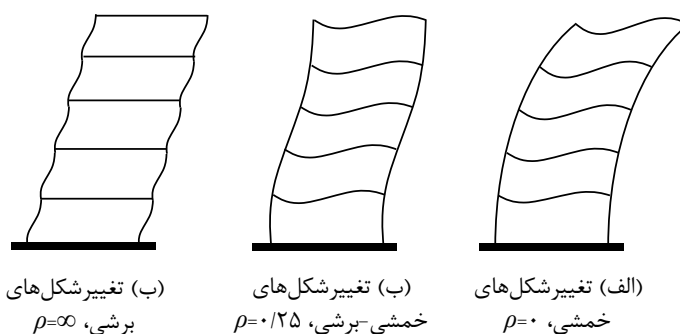
⁴ Miranda

در مدل قاب تک-دهانه، n تعداد طبقات، H ارتفاع کل سازه، L_c ارتفاع ستون، و L_b طول تیر می‌باشد. مدل پیوسته از یک تیر طره برشی و یک تیر طره خمشی تشکیل می‌شود که توسط بی‌نهایت المان محوری صلب به هم متصل شده‌اند. اگر در قاب تک-دهانه، تعداد طبقات، n ، به سمت بی‌نهایت میل کند، رفتار قاب به رفتار مدل پیوسته نزدیک می‌شود.

هدف از استفاده از مدل سازه خمشی-برشی به عنوان جای‌گزین سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه، در نظر گرفتن اثر هم‌زمان و مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی در پاسخ سیستم می‌باشد. پارامتری که در قاب خمشی-برشی معرف این مشارکت است، پارامتر ρ می‌باشد که توسط رابطه (۱) تعیین می‌گردد [15].

$$\rho = \frac{\sum_{\text{Beams}} \frac{EI_b}{L_b}}{\sum_{\text{Columns}} \frac{EI_c}{L_c}} \quad (1)$$

در این رابطه، I_b و I_c به ترتیب ممان اینرسی مقاطع ستون و تیر می‌باشند و E مدول الاستیسیته ماده تشکیل دهنده اعضای تیر و ستون می‌باشد. در این قاب، با افزایش ارتفاع، از سختی جانبی تیرها و ستون‌ها کاسته می‌شود. به طوری که نسبت سختی جانبی طبقه آخر به سختی جانبی طبقه اول برابر δ می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) می‌توان دریافت که اگر ρ برابر با صفر باشد، گره‌ها می‌توانند آزادانه بچرخند و قاب مانند یک تیر خمشی عمل می‌کند (شکل ۲ الف)). در مقابل اگر $\rho = \infty$ باشد، تیرها مانع چرخش گره‌ها شده و اتصالات تیر به ستون به سمت اتصال صلب میل می‌نمایند. بنابراین در این حالت، قاب به صورت یک قاب برشی عمل می‌کند و تغییرشکل‌های آن کاملاً برشی هستند (شکل ۲ ج)). به این ترتیب، برای هر قاب که ρ در بازه صفر تا ∞ قرار گرفته باشد، تغییرشکل‌های سازه ترکیبی از تغییرشکل‌های برشی و خمشی خواهد بود (شکل ۲ ب)).



شکل ۲: مدل‌های عمومی تغییرشکل ساختمان چند طبقه [14]

در مدل پیوسته، α پارامتر تعیین‌کننده میزان مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی در پاسخ سیستم می‌باشد که توسط رابطه (۲) تعریف می‌شود [11].

$$\alpha = H \sqrt{\frac{GA_0}{EI_0}} \quad (2)$$

در این رابطه، H ارتفاع تیرهای پیوسته، و GA_0 و EI_0 به ترتیب سختی تیر طره برشی و خمشی در پایین ستون می‌باشند. با برابر قرار دادن معادلات حرکت حاکم بر مدل پیوسته و قاب خمشی-برشی n -طبقه، می‌توان نشان داد که رابطه (۳) بین پارامترهای ρ و α برقرار است [14].

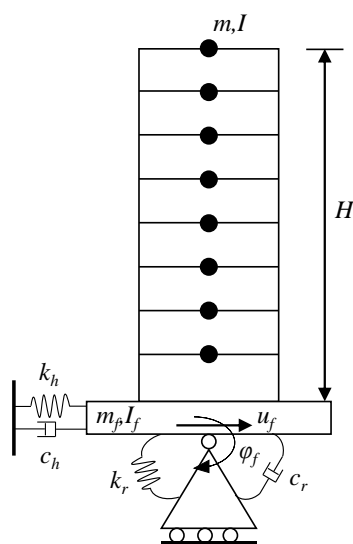
$$\rho = \frac{\alpha^2}{12n^2} \quad (3)$$

با دقت در رابطه (۳) می‌توان دریافت که دو پارامتر ρ و α با هم ارتباط مستقیم دارند. بنابراین آنچه در مورد ρ بیان شد، در رابطه با α نیز صدق می‌کند. به عبارت دیگر، α برابر با صفر معرف رفتار خمشی خالص می‌باشد و $\alpha = \infty$ به سازه‌های برشی تعلق دارد و مقادیر میانی α بیانگر ترکیبی از تغییرشکل‌های برشی و خمشی است. مقدار α در هر سازه با توجه به سیستم باربر جانبی آن تعیین می‌شود. در ساختمان‌هایی با دیوار برشی و قاب‌های مهاربندی شده، مقدار α در محدوده صفر تا $1/5$ قرار دارد. در ساختمان‌هایی با سیستم باربر جانبی دوگانه شامل ترکیبی از قاب‌های خمشی و دیوارهای برشی و یا ترکیبی از قاب خمشی و قاب مهاربندی شده، مقدار α معمولاً در بازه $1/5$ تا 5 قرار می‌گیرد. α در ساختمان‌های قاب خمشی معمولاً بین 5 تا 20 تغییر می‌کند [16].

۲- مدل سازی سیستم خاک-سازه

در این مطالعه، از مدل تحلیلی کلاسیک برای مدل سازی سیستم‌های خاک-سازه استفاده شده است. شکل ۳ مدل گسسته استفاده شده در این مطالعه برای شبیه سازی رفتار سیستم‌های خاک-سازه را نشان می‌دهد؛ پی به صورت یک دیسک صلب با شعاع r_f ، جرم m_f و ممان اینرسی جرمی I_f می‌باشد. در این مدل، خاک همگن، ایزوتروپیک، و در تماس کامل با پی فرض شده است. تغییرشکل پی با استفاده از دو درجه آزادی با نام‌های حرکت انتقالی، u_f ، و حرکت دورانی، φ_f ، تعریف شده است. در این مدل، سازه فوقانی با استفاده از مدل قاب خمشی-برشی که در بخش قبلی معرفی شد مدل شده است. ارتفاع تمام طبقات برابر L_c و عرض دهانه قاب برابر با L_b می‌باشد. نسبت سختی خمشی تیرها به ستون‌ها در همه طبقات برابر با ضریب ρ می‌باشد. کلیه طبقات دارای ممان اینرسی یکسان I و جرم یکسان m هستند که به طور متمرکز در تراز کف طبقه قرار دارد.

سیستم خاک-پی با استفاده از مدل بنیادی پارامتر-متمرکز^۵ که توسط وولف^۶ [17] برای تقریب مقاومت ظاهری دیسک صلب روی نیم‌فضای هم‌گن ارائه شده است، مدل شده است. بر همین اساس، سیستم خاک-پی با استفاده از فنر و میراگر در درجات آزادی انتقالی و دورانی پی مدل شده است. نحوه قرارگیری این فنر و میراگرها در شکل ۳ نشان داده شده است. روابط (۴) تا (۶) ضرایب فنرها و میراگرهای انتقالی و دورانی سیستم خاک-پی را نشان می‌دهد. در این روابط، ν ، ρ_s و V_s به ترتیب چگالی، ضریب پواسون، و سرعت موج برشی خاک می‌باشند.



شکل ۳: مدل خاک-سازه

⁵ Lumped parameter model

⁶ Wolf

$$k_h = \frac{8\rho_s V_s^2 r}{(2-v)}, \quad k_r = \frac{8\rho_s V_s^2 r^3}{3(1-v)} \quad (4)$$

$$c_h = \pi\rho_s V_s r_0^2, \quad c_r = \frac{\pi}{2}\rho_s V_s r_0^4 \quad (5)$$

$$V = \begin{cases} V_s \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}} & v \leq 1/3 \\ 2V_s & 1/3 \leq v \leq 1/2 \end{cases} \quad (6)$$

در این مطالعه، ماتریس میرایی ذاتی سیستم خاک-سازه قبل از اضافه شدن میرایی‌های انتشاری خاک، کلاسیک فرض شده است. اصولاً در سازه‌های معمول مقدار میرایی کم است. از سوی دیگر توزیع میرایی در ارتفاع سازه تقریباً یکنواخت می‌باشد. از این رو می‌توان میرایی سازه را از نوع کلاسیک فرض نمود. بنابراین ماتریس میرایی مربوط به میرایی‌های ذاتی سیستم خاک-سازه، با فرض کلاسیک بودن و مشخص بودن میرایی‌های ذاتی همه مودهای ارتعاشی، تعیین می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که کلاسیک بودن ماتریس میرایی ذاتی سیستم، لزوماً بیانگر کلاسیک بودن ماتریس کلی میرایی سیستم خاک-سازه نمی‌باشد. زیرا در ماتریس میرایی ذاتی، اثر میراگرهای خارجی در درجات آزادی انتقالی و دورانی خاک هنوز لحاظ نشده‌اند. جزئیات بیشتر در خصوص معادلات حرکت و تشکیل ماتریس‌های سختی، جرم و میرایی در مرجع [18] ارائه شده است.

۳- پارامترهای کلیدی سیستم خاک-سازه

پارامترهای اصلی که بیان‌کننده سیستم خاک-سازه در این مطالعه هستند، عبارتند از:

۱- نسبت سختی قاب خمشی-برشی، α :

همان‌طور که در بخش‌های گذشته شرح داده شد، پارامتر α ، معرف مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی در تغییرشکل کل سازه می‌باشد و به نسبت سختی خمشی تیرها به ستون‌های مدل قاب خمشی-برشی بستگی دارد. در این مطالعه، محدوده پارامتر α برای ساختمان‌های متداول، بین صفر تا ۳۰ در نظر گرفته شده است.

۲- زمان تناوب اصلی سازه، T_1 :

T_1 ، زمان تناوب مود اول ارتعاش مدل قاب خمشی-برشی است. با مشخص بودن مقدار T_1 و ضریب α ، زمان تناوب سایر مودهای ارتعاشی قابل محاسبه می‌باشد [18].

۳- تعداد طبقات قاب خمشی-برشی، n :

تعداد طبقات باید به گونه‌ای انتخاب شود که عملکرد پیوسته سیستم تضمین گردد. بدین منظور در این مطالعه، از مقدار ۵۰ برای تعداد طبقات استفاده شده است که علاوه بر حفظ پیوستگی سیستم، باعث بهینه بودن زمان محاسبات می‌گردد.

۴- پارامترهای تعیین‌کننده تغییرات سختی در ارتفاع سازه، δ [14]:

در این مطالعه، نسبت سختی جانبی طبقه آخر به طبقه اول برابر $\delta=0.5$ فرض شده است.

۵- نسبت بعدی، \bar{h} :

$$\bar{h} = \frac{H_1}{r_f} \quad (7)$$

پارامتر \bar{h} برابر با نسبت ارتفاع موثر مود اول سازه، H_1 ، به شعاع پی معادل دایره‌ای، r_f ، می‌باشد. \bar{h} معرف لاغری سازه است و میزان مشارکت حرکت انتقالی و دورانی خاک را تعیین می‌کند. در این مطالعه، سه مقدار برای ضریب لاغری، شامل $\bar{h}=1$ ، برای ساختمان‌های کوتاه و چاق، $\bar{h}=2$ ، برای ساختمان‌های میانی، و $\bar{h}=4$ ، به عنوان یک ساختمان بلند و لاغر در نظر گرفته شده است.

۶- فرکانس بدون بعد، a_0 :

$$\bar{a}_0 = \frac{\omega_1^{\text{fix}} r_f}{V_s} \quad (8)$$

این پارامتر معرف نسبت سختی سازه به سختی خاک می‌باشد. اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های نسبتاً سخت که روی خاک نرم واقع شده‌اند دارای اهمیت بیش‌تری است. بنابراین شاخص \bar{a}_0 در واقع نشان دهنده اهمیت اندرکنش خاک و سازه است و مقادیر بزرگ آن بیان‌گر حالتی است که اثرات اندرکنش خاک و سازه مهم تلقی می‌گردد. در ساختمان‌های متداول، دامنه تغییرات \bar{a}_0 برای نسبت‌های مختلف \bar{h} متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال، برای $\bar{h}=1$ ، مقدار \bar{a}_0 در محدوده صفر تا $2/5$ تغییر می‌کند. در حالی که این مقدار برای نسبت‌های $\bar{h}=2$ و $\bar{h}=5$ به ندرت از $1/5$ و $0/5$ بیشتر می‌شود [19]. از این رو در این مطالعه، برای مقایسه بهتر نتایج، از پارامتر a_0 رابطه (۹)، برای تعیین میزان اندرکنش خاک و سازه استفاده شده است.

$$a_0 = \bar{a}_0 \times \bar{h} = \frac{\omega_1^{\text{fix}} H_1}{V_s} \quad (9)$$

محدوده تغییرات a_0 ، مستقل از نسبت بعدی می‌باشد. به همین دلیل در این مطالعه، همواره پارامتر a_0 به عنوان نماینده میزان اندرکنش خاک و سازه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، محدوده تغییرات a_0 ، بین صفر تا ۳ برای ساختمان‌های متداول در نظر گرفته شده است [14].

۷- نسبت جرم بدون بعد، \bar{m} :

$$\bar{m} = \frac{M_{\text{Total}}}{\rho_s r_f^2 H} \quad (10)$$

این نسبت شاخصی از نسبت جرم سازه به جرم استوانه پر از خاک با شعاع r_f و ارتفاع H می‌باشد. در این رابطه H ، ارتفاع کل سازه و M_{Total} ، جرم کل سازه بدون در نظر گرفتن جرم پی می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهند که در ساختمان‌های معمول، محدوده تغییرات \bar{m} کم است [19]. در این مطالعه مقدار $\bar{m}=0/5$ فرض شده است.

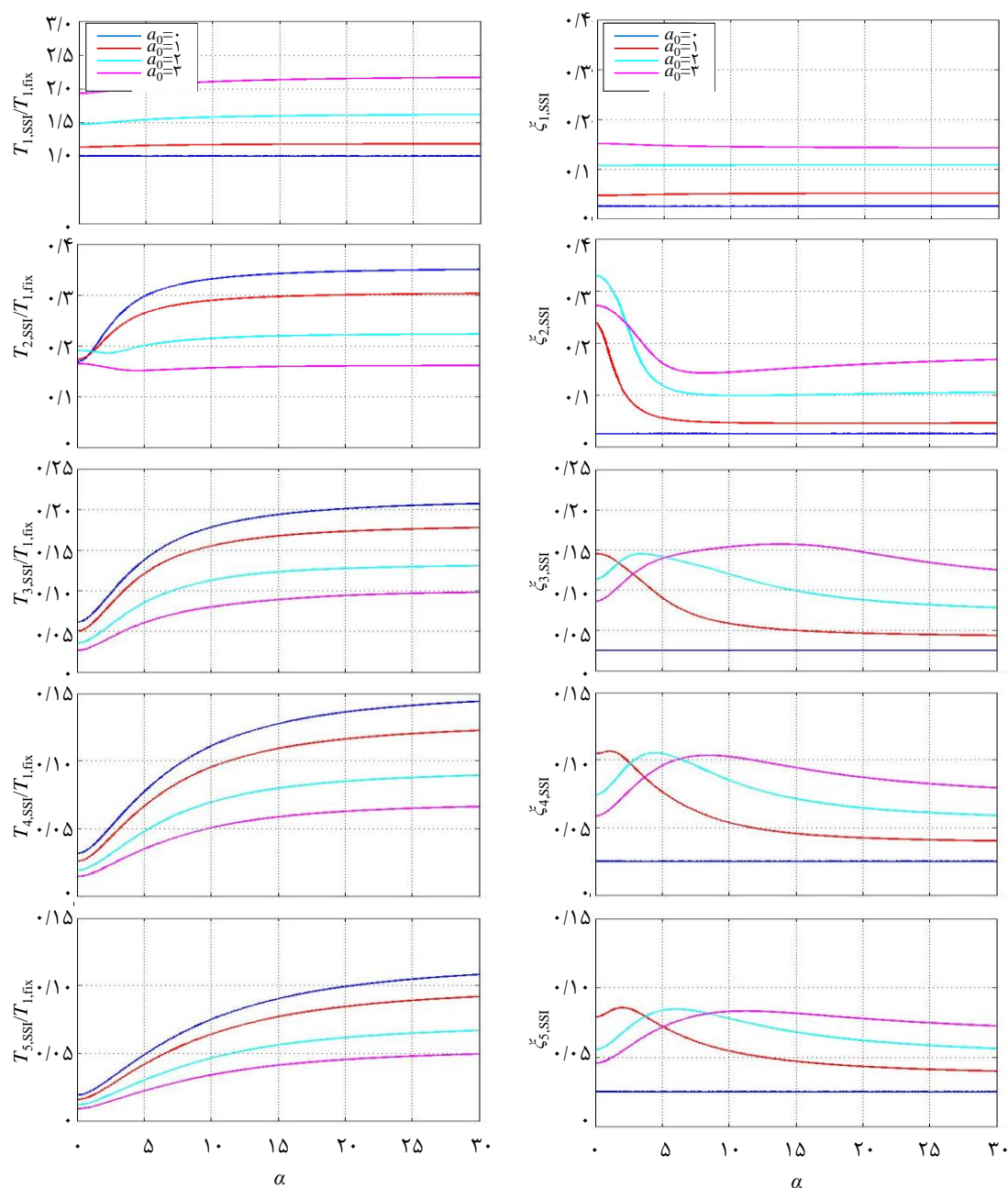
سایر پارامترهای تعریف‌کننده سیستم خاک-سازه میرایی ذاتی سازه، ξ ، و ضریب پواسون خاک، ν ، می‌باشد. ضریب پواسون خاک به جنس خاک بستری بستگی دارد. در این مطالعه مقدار ν برابر با $0/3$ در نظر گرفته شده است.

۴- تاثیر پارامترهای اصلی بر مشخصات دینامیکی سیستم خاک-سازه

در این بخش تاثیر پارامترهای اصلی سیستم خاک-سازه با مدل قاب خمشی-برشی، بر زمان تناوب و ضرایب میرایی مودهای ارتعاشی سیستم خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سیستم‌های خاک-سازه برای ۱، ۲، ۳ و $a_0 = 0$ و α بین صفر تا ۳۰ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این بخش، تغییرات نسبت زمان تناوب مودهای بالاتر ارتعاشی بر زمان تناوب مود اول سیستم، به جای مقدار مطلق زمان تناوب، مورد بررسی قرار گرفته است و مقدار T_1 عدد دل‌خواهی فرض شده است. هم چنین مقدار میرایی همه مودهای ارتعاشی در حالت $a_0=0$ ، برابر با $2/5\%$ و $\bar{h}=2$ در نظر گرفته شده است. شکل ۴ تغییرات نسبت زمان تناوب و میرایی مودهای ارتعاشی سیستم‌های خاک-سازه مورد بررسی را برای مودهای ارتعاشی ۱ تا ۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش

α ، زمان تناوب مود اول سیستم خاک-سازه تا حدی افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند. هم‌چنین، میزان تاثیر پارامتر α بر زمان تناوب مود اول با افزایش a_0 افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۴، مشاهده می‌شود که افزایش α و a_0 ، زمان تناوب مود اول افزایش می‌یابد. اما تاثیر α در مقایسه با a_0 بسیار ناچیز می‌باشد.

در مورد مودهای بالاتر سازه اوضاع کمی متفاوت است. در برخی موارد، ممکن است با افزایش a_0 ، زمان تناوب مودهای بالاتر سیستم خاک-سازه کاهش یابد و حتی از زمان تناوب سازه بر بستر صلب نیز کمتر شود [20]. چنین مشاهده‌ای ممکن است خلاف انتظار باشد. زیرا انتظار داریم با افزایش a_0 و نرم‌تر شدن کلی سیستم، پیوند مودهای مختلف آن افزایش یابد. اگر میراگرهای مربوط به خاک را از سیستم حذف کنیم، چنین روندی مشاهده می‌شود و زمان تناوب میرا با افزایش a_0 افزایش می‌یابد. لیکن، میرایی انتشاری خاک نقش اساسی در سیستم‌های خاک و سازه دارد و موجب غیر-کلاسیک شدن ماتریس میرایی سیستم می‌شود. در سیستم‌های با میرایی غیر-کلاسیک، با توجه به میزان و مکانیزم استهلاک انرژی، زمان تناوب مودهای مختلف می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد [21].



شکل ۴: تاثیر پارامترهای α و a_0 بر نسبت زمان تناوب و ضرایب میرایی مودهای ارتعاشی سیستم‌های خاک-سازه با $\bar{h}=2$

مشاهده دیگری که از شکل ۴ به دست می‌آید، این است که به طور کلی با افزایش α نسبت زمان تناوب مودهای بالاتر به زمان تناوب مود اول سیستم افزایش می‌یابد و مودهای بالاتر به مود اول نزدیک‌تر می‌شوند. به عنوان مثال، در سازه‌های برشی واقع بر بستر صلب، مودهای سازه به هم نزدیک می‌شوند و احتمال دارد بین مودهای مختلف تبادل انرژی رخ دهد. از آن جا که در یک سیستم با \bar{h} و a_0 مشخص، زمان تناوب مود اول با افزایش α تغییر چندانی نمی‌کند و تقریباً ثابت است، افزایش نسبت پریود مودهای بالاتر در اثر افزایش α به معنی افزایش زمان تناوب مودهای بالاتر سیستم در اثر افزایش α می‌باشد.

هم چنین، شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش شماره مود، نسبت زمان تناوب‌ها کم‌تر شده و تاثیر پارامتر α بر نسبت زمان تناوب، بیش‌تر نمایان می‌شود. در تمامی نمودارها، بیش‌ترین تغییرات در بازه $0 \leq \alpha \leq 10$ رخ می‌دهد و تقریباً برای α بزرگ‌تر از ۱۰، تغییرات

نسبت زمان تناوب ناچیز می باشد. نکته دیگری که در این نمودارها به چشم می خورد، آن است که تاثیر a_0 بر نسبت زمان تناوب مودهای بالاتر در سازه های برشی به مراتب بیش تر از سازه های دارای دیوارهای برشی و قاب مهاربندی شده می باشد.

حال به تاثیر پارامترهای α و a_0 بر ضرایب میرایی سیستم خاک-سازه می پردازیم. همان طور که اشاره شد، اضافه کردن خاک به سازه و میرایی انتشاری ناشی از آن، شکل ماتریس میرایی سیستم را تغییر می دهد و به این ترتیب تغییرات بسیاری را در سیستم ایجاد می کند. نمودارهای سمت راست شکل ۴، تغییرات ضرایب میرایی پنج مود اول سیستم خاک-سازه را برای مقادیر مختلف α و a_0 نشان می دهد. از آن جا که میرایی ذاتی سازه با پای صلب در تمامی مودها برابر ۲/۵٪ فرض شده است، نمودار میرایی همه مودها در $a_0=0$ ، از مقدار ۲/۵٪ شروع شده اند. با توجه به نمودار تغییرات میرایی مود اول سیستم با $\bar{n}=2$ ، مشاهده می شود که با افزایش α ، مقدار میرایی مود اول ابتدا کاهش می یابد و سپس ثابت می ماند. از سوی دیگر، مشاهده می شود که تاثیر α بر ضریب میرایی مود اول با افزایش a_0 افزایش می یابد. البته اثرات ذکر شده در کل ناچیز است و در کاربردهای عملی با تقریب خوبی می توان از آن صرف نظر نمود.

با دقت در نمودارهای مربوط به ضریب میرایی سایر مودها، مشاهده می شود که تغییرات این نمودارها از نظم سابق پیروی نمی کنند و بعضا تغییرات ناگهانی مشاهده می شود. تغییرات ضرایب مودهای بالاتر نشان می دهد که به ازای $a_0=1$ در بازه $0 \leq \alpha \leq 10$ ، مقادیر ضرایب مودهای بالاتر با شیب تندی کاهش می یابند و پس از آن روند کاهشی با سرعت کمتری ادامه می یابد. در مورد ۳ و $a_0=2$ ، وضعیت کمی متفاوت است. در نمودارهای مربوط ۳ و $a_0=2$ ، معمولا یک قله در بازه $0 \leq \alpha \leq 15$ مشاهده می شود و بعد از آن مقادیر میرایی کاهش می یابند. برای مقادیر α بزرگ تر از ۱۵، تغییرات با شیب ملایم تری رخ می دهد. به طور کلی می توان گفت زمان تناوب و میرایی مودهای ارتعاشی، برای سیستم های با رفتار خمشی بیشتر متاثر از مقدار پارامتر α می باشند و در مقادیر بالاتر این پارامتر، تغییرات در زمان تناوب و میرایی با شیب ملایم تری اتفاق می افتد.

۵- شناسایی سیستم های خاک و سازه

شناسایی سیستم با پای ثابت

در این مطالعه، روش شناسایی مبتنی بر پاسخ برای بررسی سیستم های خاک-سازه ارائه شده است. برای این منظور، از مدل قاب خمشی-برشی که روی فنر و میراگرهای معرف خاک قرار داده شده است، برای مدل سازی سیستم خاک-سازه استفاده شده است. هدف از شناسایی سیستم خاک-سازه، تعیین پارامترهای اصلی تعریف کننده سیستم، از جمله α ، a_0 و درصد های میرایی با داشتن پاسخ لرزه ای ثبت شده سیستم می باشد. به طور مشخص، هدف از شناسایی سیستم، پیدا کردن بهینه مقدار برای پارامترهای اصلی سیستم است به طوری که پاسخ واقعی ثبت شده در تراز طبقات سازه با پاسخ به دست آمده از مدل با مقادیر تعیین شده برای پارامترهای اصلی سیستم کمترین اختلاف ممکن را داشته باشد. برای این منظور، از تابع انتقال در حوزه فرکانس بین دو تراز مختلف از سیستم استفاده شده است. در این مطالعه، روش شناسایی ارائه شده توسط میراندا برای سازه ها روی بستر صلب [22] برای شناسایی سیستم های خاک-سازه تعمیم داده شده است.

ابتدا به شرح روش ارائه شده توسط میراندا [22] می پردازیم. در روش ارائه شده توسط میراندا، به منظور شناسایی سازه واقع بر بستر صلب، از مدل تیر پیوسته خمشی-برشی، شکل ۱ (ب) استفاده شده است. جزئیات مربوط به مدل سازی و تحلیل مدل در مرجع [23] ارائه شده است. برای یک سیستم پیوسته، پاسخ کل یک سیستم که تحت شتاب زمین، $\ddot{u}_g(t)$ قرار گرفته باشد، مطابق با رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} u_j(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_j \varphi_j(x) D_j(t) \quad (11)$$

در این رابطه، Γ_j ضریب مشارکت مود j -ام ارتعاش، $D_j(t)$ پاسخ جابجایی نسبی سیستم تک درجه آزادی با زمان تناوب T_j و ضریب میرایی ζ_j ، و φ_j دامنه مود j -ام ارتعاش در ارتفاع نسبی x می باشد [10]. برای یک سیستم تک درجه آزادی با سختی k ، جرم m و

ضریب میرایی ویسکوز c ، که تحت تحریک هارمونیک $\ddot{u}_g(t)$ ، رابطه (۱۲)، قرار گرفته است، پاسخ جابجایی سیستم طبق رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\ddot{u}_g(t) = 1 \cdot e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$D(t) = H(\omega) \cdot (-\ddot{u}_g(t)) = -H(\omega)e^{i\omega t} \quad (13)$$

در این رابطه، ω فرکانس تحریک، و $H(\omega)$ تابع انتقال وابسته به فرکانس بین شتاب زمین و جابجایی نسبی جرم سیستم تک درجه آزادی می‌باشد و طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$H(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 m + i\omega c + k} \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (۱۴) در رابطه (۱۱)، پاسخ جابجایی نسبی مدل پیوسته در ارتفاع نسبی x طبق رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$u(x,t) = -\sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_j \varphi_j(x) H_j(\omega) \cdot e^{i\omega t} \quad (15)$$

در این رابطه، $H_j(\omega)$ تابع انتقال مود j -ام ارتعاش سازه می‌باشد و طبق رابطه (۱۶) تعیین می‌گردد.

$$H_j(\omega) = \frac{1}{k_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} \quad (16)$$

در این رابطه، k_j و ω_j به ترتیب، سختی و فرکانس مود j -ام ارتعاشی سازه می‌باشند. با دو بار مشتق‌گیری از رابطه (۱۵)، شتاب نسبی در ارتفاع نسبی x طبق رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$\ddot{u}(x,t) = \omega^2 \sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_j \varphi_j(x) \frac{1}{k_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} \cdot e^{i\omega t} = A(\omega, x) \cdot e^{i\omega t} \quad (17)$$

در این رابطه، $A(\omega, x)$ دامنه پاسخ شتاب نسبی تحت تحریک هارمونیک می‌باشد. بنابراین، پاسخ شتاب کل سیستم در ارتفاع نسبی x طبق رابطه (۱۸) تعیین می‌گردد.

$$\ddot{u}_t(x,t) = \ddot{u}_g(t) + A(\omega, x) \cdot e^{i\omega t} \quad (18)$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در معادله (۱۸)، رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$\ddot{u}_t(x,t) = [1 + A(\omega, x)] \cdot e^{i\omega t} \quad (19)$$

تابع انتقالی که به کمک آن بتوان پاسخ شتاب مطلق سازه را در ارتفاع نسبی x به صورت تابعی از شتاب زمین بیان نمود، از تقسیم رابطه (۱۹) به رابطه (۱۲) طبق رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$G(x, \omega) = \frac{\ddot{u}_t(x,t)}{\ddot{u}_g(t)} = 1 + A(\omega, x) = 1 + \omega^2 \sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_j \varphi_j(x) \frac{1}{k_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} \quad (20)$$

حال، حالتی را در نظر می‌گیریم که شتاب مطلق سازه در ارتفاع نسبی x_1 مشخص و برابر $\ddot{u}_t(x_1, t)$ باشد. در این صورت، می‌توان پاسخ شتاب مطلق را در ارتفاع نسبی x_2 با استفاده از رابطه (۲۱) محاسبه نمود.

$$\ddot{u}_t(x_2, \omega) = \frac{G(\omega, x_2)}{G(\omega, x_1)} \ddot{u}_t(x_1, \omega) \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، اگر مقادیر دقیق پارامترهای اصلی سازه مشخص باشد و مدل مورد بررسی با واقعیت رفتاری سازه منطبق باشد، مقدار به دست آمده برای $\ddot{u}_t(x_2, \omega)$ با مقدار واقعی برابر خواهد بود. اما در اکثر مواقع، تنها تخمینی از پارامترهای اصلی سازه وجود دارد و مقدار به دست آمده برای $\ddot{u}_t(x_2, \omega)$ تخمینی از مقدار واقعی خواهد بود. در این مطالعه، مقدار تخمینی پاسخ شتاب مطلق در تراز x_2 با $\ddot{u}_t(x_2, \omega)$ نشان داده شده است. علامت تیلدا (\sim) در این نمایش نشان دهنده تقریبی بودن مقدار پاسخ می‌باشد. با این تعریف، تابع انتقال تقریبی بین تراز x و تراز پی، از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$\tilde{G}(x, \omega) = 1 + \omega^2 \sum_{j=1}^m \tilde{\Gamma}_j \tilde{\varphi}_j(x) \frac{1}{\tilde{k}_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\tilde{\omega}_j}\right)^2 + 2i\tilde{\zeta}_j \left(\frac{\omega}{\tilde{\omega}_j}\right)} \quad (22)$$

دو تفاوت اصلی بین رابطه (۲۲) و رابطه (۲۰) وجود دارد؛ اولاً، در رابطه (۲۲) مشخصات دینامیکی تقریبی به جای مقادیر دقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دوماً، برای محاسبه پاسخ کل در رابطه (۲۲)، تنها از m مود اول ارتعاش استفاده شده است. نسبت توابع انتقال در رابطه (۲۱)، را می‌توان به صورت تابعی از $m+2$ پارامتر، شامل فرکانس اصلی ارتعاش، ω_1 ، نسبت سختی جانبی، α ، و نسبت‌های میرایی m مود اول ارتعاشی، بیان نمود. مقدار تقریبی این پارامترها با بهینه کردن تابع هدف (۲۳) به دست می‌آید.

$$F_1(\omega_1, \alpha, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_m) = \frac{\sum_{j=1}^N \left(\ddot{u}_t(x_2, t_j) - \ddot{u}_t(x_2, t_j) \right)^2}{\max_{\forall t_j} \left| \ddot{u}_t(x_2, t) \right|^2} \quad (23)$$

در این رابطه، N تعداد نقاط رکورد می‌باشد. $\ddot{u}_t(x_2, t)$ را می‌توان طبق رابطه (۲۴) محاسبه نمود.

$$\ddot{u}_t(x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{G}(\omega, x_2)}{\tilde{G}(\omega, x_1)} \ddot{U}_t(x_1, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (24)$$

در این رابطه، $\ddot{U}_t(x_1, \omega)$ ، تبدیل فوریه تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده در تراز x_1 می‌باشد. به طور مشابه، می‌توان فرآیند شناسایی را با تعریف تابع هدف در حوزه فرکانس، به صورت رابطه (۲۵) انجام داد.

$$F_2(\omega_1, \alpha, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_m) = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\ddot{U}_t(x_2, \omega_j) - \ddot{U}_t(x_2, \omega_j) \right)^2}{\max_{\forall \omega_j} \left| \ddot{U}_t(x_2, \omega_j) \right|^2} \quad (25)$$

شناسایی سیستم خاک-سازه

برای شناسایی سیستم خاک-سازه، نمی‌توان از روش ارائه شده در بخش گذشته برای سازه‌های با پای ثابت استفاده کرد. زیرا اولاً، برای مدل سازه، به جای استفاده از مدل پیوسته، قاب n -طبقه مبنای مدل سازی سازه فوقانی قرار گرفته است. دوماً، در سیستم‌های خاک-سازه، به علت وجود اختلاف در سطح میرایی خاک و سازه، ماتریس میرایی سیستم از حالت کلاسیک خارج می‌شود و روش‌های متداول تحلیل مودال برای این سیستم‌ها قابل اجرا نمی‌باشد. رابطه (۲۶) پاسخ جابجایی سیستم‌های با میرایی غیر-کلاسیک را نشان می‌دهد که در مورد سیستم خاک-سازه در این مطالعه برقرار می‌باشد [24,25].

$$\{u(t)\} = \sum_{j=1}^n \left\{ \alpha_j^v \right\} p_j D_j(t) + \left\{ \beta_j^v \right\} \dot{D}_j(t) \quad (26)$$

در این روابط، $D_j(t)$ ، پاسخ جابجایی و $\dot{D}_j(t)$ ، سرعت نسبی سیستم تک درجه آزادی مود j -ام با فرکانس طبیعی p_j و ضریب میرایی ζ_j تحت تحریک زلزله $\ddot{u}_g(t)$ می‌باشند. $\{\alpha_j^v\}$ و $\{\beta_j^v\}$ بردارهایی با مقدار حقیقی هستند که از تحلیل مودال غیر-کلاسیک سیستم به دست می‌آید [25]. با مقایسه رابطه (26) با رابطه (11)، می‌توان نتیجه گرفت که در سیستم‌های با میرایی کلاسیک، مقدار $\{\beta_j^v\}$ برابر صفر بوده و $\{\alpha_j^v\}$ معادل $\Gamma_j\{\rho_j\}$ می‌باشد. بنابراین، بردارهای $\{\beta_j^v\}$ و $p_j\{\alpha_j^v\}$ به نوعی بیان‌گر میزان مشارکت مودهای مختلف سیستم خاک-سازه در پاسخ آن می‌باشند و اطلاعات کامل‌تری در مقایسه با شکل مودی در اختیار ما قرار می‌دهند.

حال به نحوه به دست آوردن تابع انتقال برای سیستم‌های خاک و سازه می‌پردازیم. طبق رابطه (13) و با جای‌گذاری مقدار $H_j(\omega)$ در این رابطه، پاسخ جابجایی نسبی مود j -ام تحت اثر تحریک هارمونیک طبق رابطه (27) تعیین می‌شود.

$$D_j(t) = \frac{-1}{k_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} e^{i\omega t} \quad (27)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (27) نسبت به زمان، پاسخ سرعت نسبی مود j -ام طبق رابطه (28) به دست می‌آید.

$$\dot{D}_j(t) = \frac{-1}{k_j} \cdot \frac{i\omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} e^{i\omega t} \quad (28)$$

با جای‌گذاری روابط (27) و (28) در رابطه (26)، $\{u(t)\}$ طبق رابطه (29) تعیین می‌شود.

$$\{u(t)\} = - \sum_{j=1}^n \left[\left(\left\{ \alpha_j^v \right\} p_j + i\omega \left\{ \beta_j^v \right\} \right) \cdot \left(\frac{1}{k_j} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} \right) \right] e^{i\omega t} \quad (29)$$

با دو بار مشتق‌گیری از رابطه (26)، پاسخ شتاب نسبی سیستم با میرایی غیر-کلاسیک تحت تحریک هارمونیک، طبق رابطه (30) به دست می‌آید.

$$\{\ddot{u}(t)\} = \sum_{j=1}^n \left[\left(\left\{ \alpha_j^v \right\} p_j + i\omega \left\{ \beta_j^v \right\} \right) \cdot \left(\frac{1}{k_j} \cdot \frac{\omega^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)} \right) \right] e^{i\omega t} \quad (30)$$

با اضافه کردن شتاب زمین به شتاب نسبی طبقات، پاسخ شتاب کل در تراز طبقه k -ام بر اساس رابطه (31) محاسبه می‌شود.

$$\ddot{u}_t(k, t) = (1 + A_{SSI}(k, \omega)) e^{i\omega t} \quad (31)$$

در این رابطه، $A_{SSI}(k, \omega)$ دامنه پاسخ شتاب نسبی در تراز طبقه k -ام تحت اثر تحریک هارمونیک در سیستم‌های خاک-سازه می‌باشد. مشابه روند توضیح داده شده برای سیستم‌های کلاسیک، تابع انتقال بین شتاب کل طبقه k -ام و شتاب زمین از رابطه (32) تعیین می‌گردد.

$$G_{SSI}(k, \omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \left[\left(\alpha_j^v(k) p_j + i\omega \beta_j^v(k) \right) \cdot \left(\frac{1}{k_j} \cdot \frac{\omega^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 + 2i\zeta_j \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)} \right) \right] \quad (32)$$

با محاسبه نسبت تابع انتقال دو تراز مختلف از سیستم، پاسخ شتاب در تراز طبقه k_2 را می‌توان بر حسب پاسخ شتاب کل در تراز طبقه k_1 ، طبق رابطه (۳۲) بیان نمود.

$$\ddot{U}_{SSI,t}(k_2, \omega) = \frac{G_{SSI}(\omega, k_2)}{G_{SSI}(\omega, k_1)} \dot{U}_{SSI,t}(k_1, \omega) \quad (33)$$

با استفاده از مشخصات تقریبی به جای مشخصات دقیق سیستم، رابطه (۳۳) به صورت رابطه (۳۴) بازنویسی می‌شود.

$$\ddot{U}_{SSI,t}(k_2, \omega) = \frac{\tilde{G}_{SSI}(\omega, k_2)}{\tilde{G}_{SSI}(\omega, k_1)} \ddot{U}_{SSI,t}(k_1, \omega) \quad (34)$$

در این روابط \tilde{G}_{SSI} ، از مجموع m مود اول به جای مجموع تمامی مودها محاسبه شده است.

۶- شناسایی سیستم خاک و سازه با استفاده از داده‌های مصنوعی

پارامترهای اصلی سیستم خاک-سازه شامل α ، a_0 ، \bar{h} ، T_1 ، و ضرایب میرایی مودهای ارتعاش می‌باشند. از میان این پنج پارامتر، نسبت بعدی سیستم، \bar{h} ، به مشخصات هندسی سیستم بستگی دارد. بنابراین مقدار آن را می‌توان به راحتی با دانستن سطح مقطع و ارتفاع سازه و پی محاسبه نمود. بنابراین، می‌توان مسئله شناسایی سیستم خاک-سازه را به یافتن چهار پارامتر باقی‌مانده محدود کرد. برای انجام فرآیند شناسایی در این بخش، ابتدا پاسخ شتاب طبقات با استفاده از مدل شکل ۳ و یک رکورد زلزله به عنوان تحریک به دست آمده‌اند و سپس پاسخ‌های به دست آمده به عنوان پاسخ معلوم در طبقات در نظر گرفته شده است.

برای شناسایی پارامترهای سیستم خاک-سازه، یک تابع هدف مورد نیاز است. تابع هدف در مسئله شناسایی، خطای پیش‌بینی پاسخ سیستم می‌باشد. پس از تعیین تابع هدف، با کمینه کردن تابع هدف، بهینه مقدار برای پارامترهای تعریف کننده سیستم به دست می‌آید. شکل‌های مختلفی را می‌توان برای تابع هدف در نظر گرفت. برای مثال در مرجع [16]، از دو تابع هدف که یکی از آنها اختلاف بین تاریخچه زمانی پاسخ شتاب تقریبی و واقعی و دیگری اختلاف بین طیف فوریه این دو تاریخچه زمانی می‌باشد، استفاده شده است. توابع دیگری را نیز می‌توان تعریف نمود. به عنوان نمونه، اختلاف بین طیف پاسخ شتاب تقریبی و واقعی یک طبقه می‌تواند معیار خطای تقریب و به عبارتی تابع هدف مسئله شناسایی در نظر گرفته شود. هم‌چنین می‌توان از اختلاف بین نسبت توابع انتقال تقریبی و واقعی بین دو طبقه برای این منظور استفاده کرد.

در این مطالعه، هر چهار تابع هدف ذکر شده، شامل تابع خطای تقریب تاریخچه زمانی پاسخ شتاب، خطای تقریب طیف فوریه پاسخ شتاب، خطای تقریب طیف پاسخ طبقه، و خطای تقریب نسبت تابع انتقال بین دو تراز از سیستم برای شناسایی سیستم‌های خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به منظور انتخاب یک تابع هدف از میان توابع هدف معرفی شده، نتایج به دست آمده از شناسایی یک سیستم با مشخصات معلوم با استفاده از هر یک از توابع هدف مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده برای شناسایی سیستم خاک-سازه با استفاده از چهار روش، نشان دادند که در هر چهار روش، خطای محاسبات به نسبت کوچک می‌باشند. اما نتایج به دست آمده از روش‌های خطای تقریب تاریخچه زمانی پاسخ شتاب و خطای تقریب طیف فوریه پاسخ شتاب، به مقادیر دقیق نزدیک‌تر بوده و از دقت بالاتری برخوردار هستند. در روش مقایسه طیف فوریه، تعداد محاسبات لازم برای رسیدن به نتیجه نهایی کمتر می‌باشد [18]. به همین جهت در این مطالعه، برای شناسایی سیستم‌های خاک و سازه از رابطه (۳۵) به عنوان تابع هدف استفاده شده است.

$$OF = \sum_{j=1}^{N_f} \left[\ddot{U}_t(k_1, \omega_j) - \tilde{U}_t(k_1, \omega_j, \{\tilde{X}\}) \right]^2 \quad (35)$$

در این رابطه، $\ddot{U}_t(k_1, \omega_j)$ مقدار تبدیل فوریه پاسخ شتاب کل ثبت شده در تراز طبقه k_1 و فرکانس ω_j ، $\tilde{U}_t(k_1, \omega_j, \{\tilde{X}\})$ مقدار تبدیل فوریه پاسخ شتاب کل تخمین زده شده در تراز طبقه k_1 و فرکانس ω_j با پارامترهای شناسایی شده $\{\tilde{X}\}$ می‌باشد. $\{\tilde{X}\}$ ، دسته پارامترهای تخمین زده شده برای مدل است که شامل α ، a_0 ، \bar{h} ، T_1 و ضرایب میرایی مودهای ارتعاش می‌باشد.

بررسی یکتایی نتایج به دست آمده

در این بخش به بررسی یکتایی پارامترهای تعیین شده از شناسایی سیستم خاک-سازه با روش معرفی شده در بخش‌های گذشته پرداخته شده است. در حقیقت می‌خواهیم بدانیم آیا برای یک سیستم که پاسخ طبقات آن تحت یک زلزله ثبت شده است، می‌توان فرضیات مختلفی برای میزان مشارکت خاک در پاسخ سیستم در نظر گرفت و مقداری برای پارامتر α یافت به طوری که علاوه بر مطابقت با سیستم سازه‌ای، منجر به تخمین قابل قبولی از پاسخ سیستم گردد یا خیر. برای این منظور، با استفاده از روش ارائه شده یک سیستم که پاسخ شتاب در دو تراز مختلف از آن مشخص می‌باشد مورد شناسایی قرار گرفته است. در این قسمت فرض شده است که مقدار زمان تناوب طبیعی اصلی سیستم از آزمایش‌های دینامیکی و یا تحلیل طیفی مشخص است. نسبت بعدی نیز که با توجه به مشخصات هندسی سیستم قابل محاسبه می‌باشد. برای بررسی امکان وجود چندین نتیجه برای پارامترهای شناسایی، با فرض مقادیر مشخصی برای پارامتر a_0 ، بهینه‌ترین مقدار برای α ، با کمینه نمودن تابع خطا تعیین شده است. برای این منظور، سه سیستم با مشخصات مختلف در نظر گرفته شده است. در هر سه سیستم میزان مشارکت خاک، a_0 ، نسبت بعدی و زمان تناوب اصلی با هم برابر می‌باشند. تفاوت سیستم‌ها در سیستم برابر جانبی می‌باشد. به طوری که در سیستم اول، سیستم برابر جانبی از نوع دیوار برشی بوده و مقدار $\alpha=1$ می‌باشد. در سیستم دوم، ترکیبی از قاب خمشی و قاب مهاربندی سیستم برابر جانبی را تشکیل می‌دهند و $\alpha=5$ است. در سیستم آخر، قاب خمشی به عنوان سیستم برابر جانبی عمل می‌کند و $\alpha=15$ می‌باشد. مشخصات این سه سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است. برای هر سیستم، پاسخ شتاب کل در دو تراز نسبی $x=1$ و $x=0.73$ تحت تحریک رکورد زلزله و با استفاده از مدل خاک-سازه محاسبه شده است. با دانستن پاسخ در دو تراز مختلف، مسئله شناسایی را می‌توان برای این سیستم‌ها حل نمود. برای این منظور، مقدار a_0 را به طور تدریجی از صفر افزایش داده و برای هر مقدار فرضی این پارامتر، مقادیر α و درصدهای میرایی شناسایی شده‌اند. جدول ۲ نتایج به دست آمده برای هر سه سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات سیستم‌های فرضی برای بررسی یکتایی نتایج شناسایی

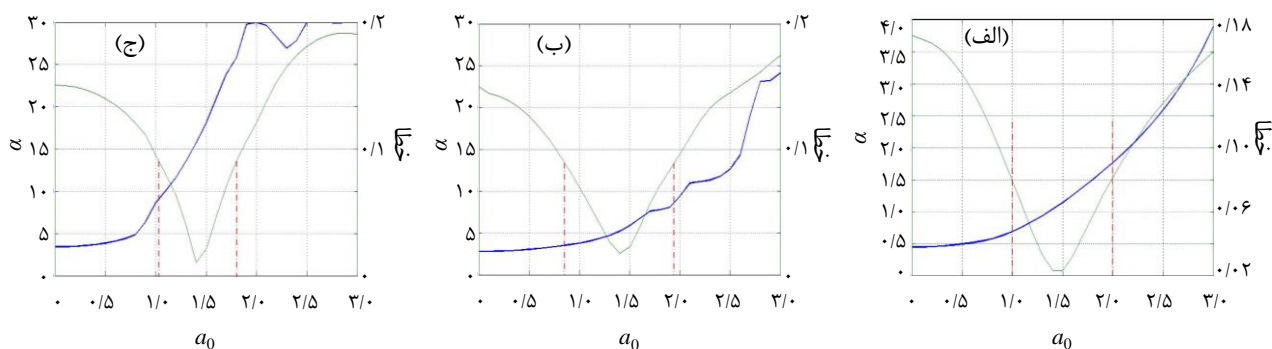
ζ_5	ζ_4	ζ_3	ζ_2	ζ_1	\bar{h}	a_0	α	$T_1(\text{sec})$	
۰/۰۷۰	۰/۰۹۵	۰/۱۴۲	۰/۳۰۰	۰/۰۷۵	۲	۱/۵	۱	۱	سیستم ۱
۰/۰۸۳	۰/۰۹۵	۰/۱۲۱	۰/۰۸۵	۰/۰۷۷	۲	۱/۵	۵	۱	سیستم ۲
۰/۰۵۶	۰/۰۵۷	۰/۰۷۱	۰/۰۶۹	۰/۰۷۹	۲	۱/۵	۱۵	۱	سیستم ۳

جدول ۲: نتایج به دست آمده از شناسایی سه سیستم

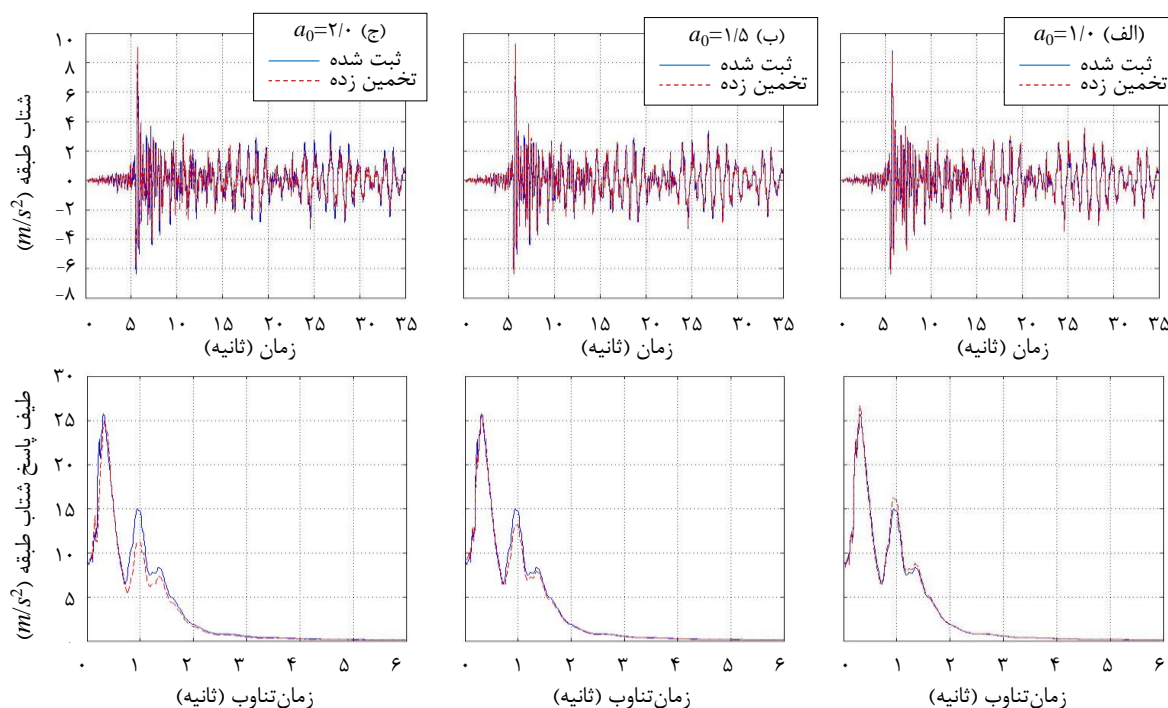
A			a_0
سیستم ۳	سیستم ۲	سیستم ۱	
۳/۴۱۳	۲/۷۷۲	۰/۴۵۲	۰
۳/۴۷۵	۲/۸۱۴	۰/۴۵۸	۰/۲
۳/۶۸۳	۲/۹۴۱	۰/۴۸۴	۰/۴
۴/۰۸۴	۳/۱۴۲	۰/۵۲۲	۰/۶
۴/۸۴۳	۳/۴۱۳	۰/۵۸۴	۰/۸
۸/۶۲۹	۳/۷۸۰	۰/۶۹۶	۱/۰
۱۱/۶۲۶	۴/۳۱۳	۰/۸۵۳	۱/۲
۱۵/۶۹۲	۵/۱۹۷	۱/۰۴۳	۱/۴
۲۰/۹۶۸	۶/۷۲۳	۱/۲۶۴	۱/۶
۲۵/۷۷۴	۷/۳۷۶	۱/۵۰۸	۱/۸
۳۰/۰۰۰	۹/۳۸۲	۱/۷۶۷	۲/۰
۲۸/۲۵۶	۱۱/۱۳۵	۲/۰۶۰	۲/۲
۲۷/۸۷۴	۱۱/۷۵۸	۲/۳۹۹	۲/۴
۳۰/۰۰۰	۱۴/۳۲۰	۲/۷۹۶	۲/۶
۲۹/۹۴۶	۲۳/۱۰۹	۳/۲۶۸	۲/۸
۳۰/۰۰۰	۲۴/۱۴۱	۳/۸۹۱	۳/۰

نمودارهای نشان داده شده در شکل ۵ (الف)، (ب)، و (ج)، به ترتیب تغییرات مقدار α شناسایی شده با فرض a_0 معلوم را بر حسب a_0 برای سیستم ۱، ۲، و ۳ نشان می‌دهد (منحنی آبی رنگ). هم چنین نمودار خطای تقریب برای هر مجموعه جواب شناسایی شده که بر اساس رابطه (۳۵) محاسبه شده است، در کنار نمودار تغییرات α در شکل نشان داده شده است (منحنی سبز). همان طور که در این نمودارها دیده می‌شود، نمودار α بر حسب a_0 دارای یک روند صعودی است. برای پی بردن به علت این اتفاق، نگاهی به نمودارهای شکل ۴ می‌اندازیم. در این نمودارها مشاهده می‌شود که نسبت زمان تناوب با افزایش a_0 کاهش می‌یابد. این در حالی است که در اثر افزایش α تغییرات این نسبت روند کاهشی دارد. از آن جا که زمان تناوب مود اول سیستم را ثابت فرض کرده بودیم، تغییر در نسبت زمان تناوب، در نتیجه تغییر در زمان تناوب مودهای بالاتر اتفاق می‌افتد. با توجه به این مطالب می‌توان گفت، هنگامی که مقدار فرضی a_0 سیستم را افزایش می‌دهیم، برای رسیدن به زمان تناوب یکسان برای سیستم، α بزرگ‌تری مورد نیاز است.

نکته دیگری که در این نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود، این است که خطای تقریب در نواحی دورتر از مقدار دقیق برای سیستم ۱ با رفتار خمشی، نسبت به سیستم های ۲ و ۳ که به سمت سیستم با رفتار برشی میل می‌کنند، دارای مقدار کم‌تری است. هم چنین شیب نمودار خطای سیستم ۳ نسبت به سیستم ۱ بیشتر بوده و محدوده مجاز برای آن کوچکتر می‌باشد. باز هم علت را می‌توان در نمودارهای شکل ۴ مشاهده کرد. همان طور که شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش α ، شیب تغییرات نسبت زمان تناوب بر حسب α ، کم‌تر می‌شود. بنابراین، در فرآیند بهینه‌سازی، نمی‌توان با تغییر در α ، تغییر به وجود آمده در اثر افزایش یا کاهش a_0 را با تغییر در مقدار α جبران نمود و در نتیجه خطای تقریب افزایش می‌یابد.

شکل ۵: نمودار تغییرات α و خطای تقریب بر حسب a_0 برای (الف) سیستم ۱، (ب) سیستم ۲، و (ج) سیستم ۳

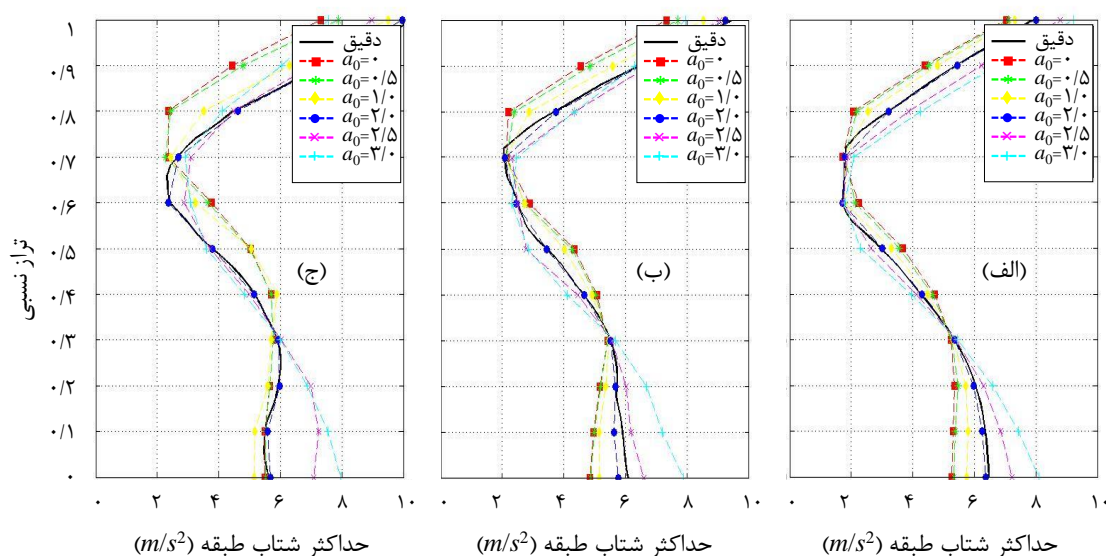
با دقت در نمودارهای شکل ۵، مشاهده می‌شود که با دور شدن از a_0 واقعی سیستم، خطای تقریب افزایش می‌یابد. اما در یک محدوده حول مقدار دقیق، خطای به دست آمده هم چنان کوچک است و تقریبی که از پاسخ به دست می‌دهد، تقریب قابل قبولی است. خطوط خط چین نشان داده شده در شکل ۵، نمودار خطا را در مقدار $0/08$ قطع می‌کند. در محدوده بین این دو خط، نتایج پارامترهای شناسایی شده از دقت کافی برای تخمین پاسخ سیستم برخوردار می‌باشند. شکل ۶، تاریخچه زمانی پاسخ شتاب و طیف پاسخ شتاب طبقه در تراز ۱ را برای سیستم دوم ($\alpha=5$) و برای سه مقدار a_0 نشان می‌دهند.



شکل ۶: مقایسه تاریخچه زمانی پاسخ شتاب و طیف پاسخ شتاب طبقه ثبت شده و تخمین زده شده در تراز نسبی ۱ سیستم با $\alpha=5$ و سه مقدار a_0

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، دقت پاسخ شتاب تخمین زده در تراز نسبی ۱ برای هر سه سیستم با مقادیر مختلف a_0 قابل قبول می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به خطاهای موجود در سیستم‌های ثبت رکورد، هم چنین عدم قطعیت‌های مربوط به اطلاعات سیستم خاک و سازه، از جمله جرم طبقات، میزان سختی عضوهای باربر جانبی و سرعت متوسط موج برشی، نمی‌توان به طور قطع پارامترهای شناسایی شده با کمترین میزان خطا را به عنوان پارامترهای معرف سیستم در نظر گرفت. یک مجموعه از جواب‌ها که با طبیعت سیستم مغایرتی نداشته باشند، می‌توانند به عنوان پارامترهای سیستم انتخاب شوند. چنین مشاهده‌ای اهمیت در نظر گیری مشارکت تغییرشکل‌های خمشی و برشی را در تغییرشکل کلی سیستم‌های خاک-سازه نشان می‌دهد. استفاده از مدلی که در آن از تغییرشکل‌های برشی یا خمشی صرف نظر شده باشد، می‌تواند منجر به نتیجه‌گیری اشتباه در خصوص میزان اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سیستم شود.

شکل ۷ تغییرات حداکثر پاسخ شتاب طبقات را برای شش مقدار a_0 در کنار مقادیر واقعی به دست آمده برای سه سیستم نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، برای a_0 های نزدیک‌تر به مقدار $a_0=1/5$ ، نتایج به مقادیر واقعی نزدیک‌ترند. هم چنین برای سیستم ۱ خطای محاسبات نسبت به دو سیستم دیگر کم‌تر می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه حداکثر شتاب طبقات واقعی و تخمین زده شده به ازای شش مقدار مختلف a_0 برای (الف) سیستم با $\alpha=1$ ، (ب) $\alpha=5$ ، و (ج) $\alpha=15$

۷- شناسایی سیستم خاک-سازه با استفاده از داده های واقعی

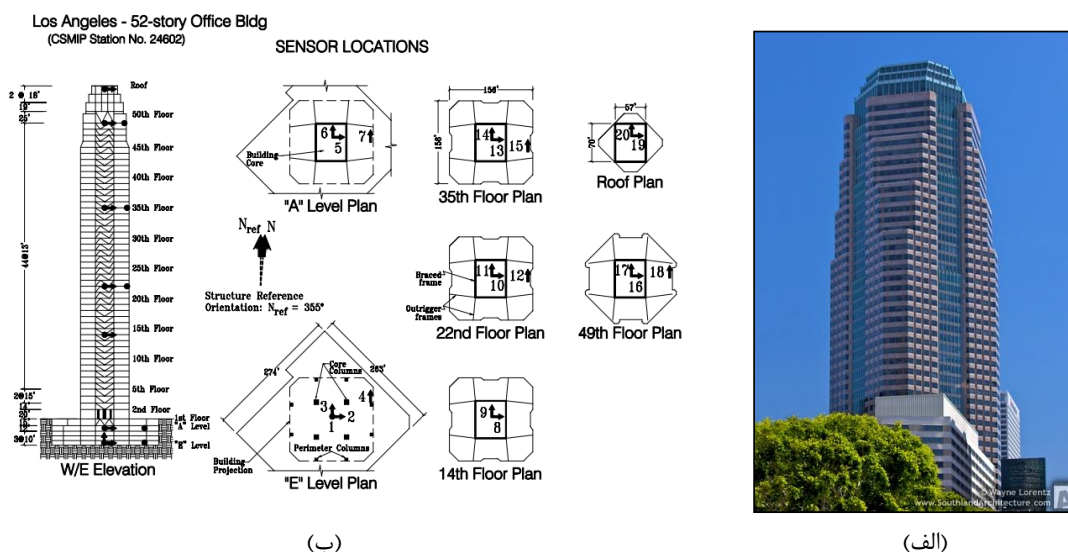
در بخش های گذشته، روش معرفی شده برای شناسایی سیستم های خاک و سازه با بررسی مدل های فرضی و با استفاده از داده های مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، از روش معرفی شده برای شناسایی یک سازه واقعی که پاسخ آن در طی زلزله های گذشته در دسترس می باشد استفاده شده است. ساختمان انتخاب شده، از ساختمان بانک سانوا^۷ واقع در شهر لوس آنجلس^۸، آمریکا، بررسی مشخصات دینامیکی صورت گرفته است. برای این منظور، از ساختمان ۵۲-طبقه بانک سانوا^۷ واقع در شهر لوس آنجلس^۸، آمریکا، استفاده شده است. ساختمان بانک سانوا که با نام های دیگری هم چون برج فیگورا و ایلشایر^۹ نیز شناخته می شود، یک ساختمان با قاب فولادی ۵۲-طبقه واقع در شهر لوس آنجلس در ایالت کالیفرنیا می باشد. طراحی این ساختمان در سال ۱۹۸۸ میلادی صورت گرفته است و در سال های ۹۰-۱۹۸۸ به مرحله اجرا رسیده است و مجهز به دستگاه های ثبت شتاب شده است. ارتفاع این سازه در حدود ۲۳۵ متر می باشد. طبقات سازه، پلانی مربعی شکل به ابعاد ۴۸×۴۸ متر دارند. شکل ۸ (الف) شکل کلی این ساختمان را نشان می دهد.

سیستم سازه ای این ساختمان از سه بخش اصلی تشکیل شده است: (۱) قاب مهاربندی مرکزی، (۲) ۱۲ ستون که ۸ ستون در محیط سازه و سایر ستون ها در قسمت مرکزی قرار دارند، و (۳) ۸ تیر با ارتفاع ۹۱۴ میلی متر در هر طبقه که ستون های داخلی را به ستون های خارجی متصل می کنند. سیستم باربر جانبی در هر دو جهت شامل قاب مهاربندی هم محور در قسمت مرکزی سازه و قاب خمشی در قسمت خارجی می باشد. این سازه در برنامه CSMIP مجهز به دستگاه های ثبت رکورد شده است. در مجموع، ۲۰ شتاب سنج در ۷ تراز مختلف، شامل طبقه ۲، تراز پایه، طبقات ۱۴، ۲۲، ۳۵، ۴۹، و بام در این ساختمان کار گذاشته شده است. شکل ۸ (ب) جانمایی این شتاب سنج ها را در این ساختمان نشان می دهد.

⁷ Sanwa bank plaza building

⁸ Los Angeles

⁹ Figueroa at Wilshire Tower



شکل ۸: (الف) شکل کلی ساختمان بانک سانوا (ب) جانمایی دستگاه‌های ثبت رکورد و نمای شرقی-غربی ساختمان بانک سانوا

از جمله زلزله‌های ثبت شده توسط دستگاه‌های ثبت رکورد در این ساختمان، می‌توان به زلزله نورث‌ریج (۱۹۹۴)^{۱۰} اشاره نمود. فاصله کانون این زلزله تا ساختمان بانک سانوا در حدود ۳۱ کیلومتر بوده و حداکثر شتاب ثبت شده در این ساختمان در دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی به ترتیب برابر 1.65 cm/s^2 و 1.09 cm/s^2 می‌باشد. خاک بستر این سازه از شیل سخت و سنگ ماسه با مقاومت فشاری تقریبی $718/2 \text{ kpa}$ تشکیل شده است.

به منظور شناسایی ساختمانی بانک سانوا، همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، دو پاسخ ثبت شده در دو تراز مختلف از سیستم مورد نیاز می‌باشد. برای این منظور، پاسخ شتاب دو طبقه از سازه تحت یک تحریک زلزله که توسط دستگاه‌های نصب ثبت شده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است. خلاصه‌ای از مشخصات ساختمان به همراه برخی پارامترهای مورد نیاز برای انجام محاسبات شناسایی و هم‌چنین رکورد انتخاب شده در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار ارائه شده به عنوان فرکانس مود اول سازه با فرض پای صلب، f_1^{fix} در این جدول، از نتایج به دست آمده در مطالعات صورت گرفته روی این ساختمان برداشته شده است [12]. حدس اولیه در مورد میزان مشارکت خاک، که در این جدول با a_0^{es} نشان داده شده است، طبق رابطه (۳۶) تعیین شده است. ارتفاع موثر مود اول بدون انجام تحلیل مودی برابر با مقدار تقریبی $\bar{H}_1=0.7H$ در نظر گرفته شده است.

$$a_0^{\text{es}} = \frac{0.7 \times 2\pi f_1^{\text{fix}} H}{V_s} \quad (36)$$

جدول ۳: داده‌های اولیه شناسایی ساختمان ۵۲-طبقه سانوا

نام ساختمان	سیستم باربر جانبی		سرعت متوسط موج برشی خاک	رویداد زلزله مورد استفاده	f_1^{fix} (Hz)			
	شرقی-غربی	شمالی-جنوبی			شرقی-غربی	شمالی-غربی	شرقی-شمالی	غربی-شمالی
ساختمان ۵۲-طبقه بانک سانوا	قاب خمشی و قاب مهاربندی	قاب خمشی و قاب مهاربندی	۳۰۰ m/s	نورث-ریج ۱۹۹۴	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۵۵	۰/۵۸

جدول ۴ نتایج به دست آمده از شناسایی این ساختمان را برای فرض‌های مختلفی از a_0 نشان می‌دهد. در فرآیند شناسایی، پارامترهای α و درصد‌های میرایی محاسبه شده‌اند. مقدار T_1 برای سیستم، از نتایج مطالعات تجربی، مشخص می‌باشد. هم‌چنین نسبت بعدی با معلوم بودن ارتفاع و شعاع معادل پی، قابل محاسبه می‌باشد. به جای در نظر گرفتن پارامتر a_0 در مجموعه پارامترهای مسئله

¹⁰ North Ridge Earthquake(1994)

شناسایی، مقدار مشخصی برای آن در نظر گرفته شده و مسئله شناسایی برای فرض‌های مختلفی از a_0 حل شده است. با انجام این کار، مجموعه جواب‌های ممکن برای یک سیستم تعیین شده است که علاوه بر آن که با طبیعت رفتاری سازه و خاک همگون است، تقریب قابل قبولی نیز از پاسخ‌های ثبت شده آن سیستم به دست می‌دهد.

جدول ۴: نتایج به دست آمده از شناسایی ساختمان با استفاده از داده‌های واقعی و فرضیات مختلف برای a_0

جهت	a_0	$T_1(\text{sec})$	α	ξ_1	ξ_2	ξ_3
شمالی-جنوبی	۰/۰	۵/۹	۱۰/۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۴
	۰/۳		۱۰/۸۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰	۰/۰۳۱
	۰/۵		۱۱/۹۷	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	۰/۰۳۹
	۰/۷		۱۷/۵۲	۰/۰۲۹	۰/۰۳۴	۰/۰۲۱
	۱/۰		۶/۲۵	۰/۰۹۶	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱
شرقی-غربی	۰	۶/۲	۶/۴۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰
	۰/۳		۸/۹۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰
	۰/۵		۷/۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰
	۰/۷		۱۵/۰۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰
	۱/۰		۱۲/۱۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار α به دست آمده برای ساختمان بانک سانوا در هر دو جهت بین ۶ تا ۱۸ می‌باشد. سیستم باربر جانبی این ساختمان در دو جهت از قاب خمشی و قاب مهاربندی تشکیل شده است. بنابراین، نتایج به دست آمده برای α در محدوده سیستم‌هایی با رفتار برشی قرار دارد که با رفتار سازه مطابقت دارد. پاسخ شتاب طبقات در ساختمان‌های بلندمرتبه تحت تحریک زلزله با استفاده از مدل تیر خمشی-برشی پیوسته و فرض صلبیت خاک در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [12]. در این مطالعه، به منظور تحقیق دقت روش ارائه شده، از چند ساختمان بلندمرتبه که مجهز به ابزار ثبت رکورد شده‌اند استفاده شده است. در میان این ساختمان‌های مورد بررسی، ساختمان بانک سانوا نیز قرار دارند.

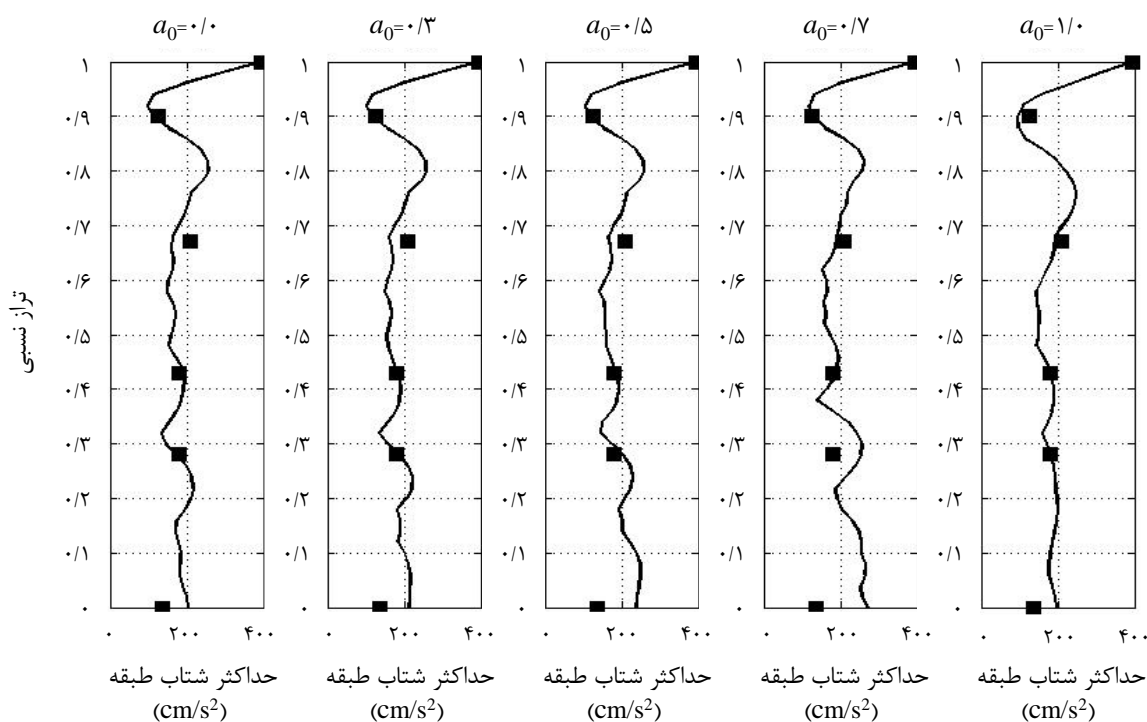
جدول ۵ نتایج به دست آمده در این مطالعه از شناسایی سیستم با فرض $a_0=0$ را در کنار نتایج ارائه شده در مرجع [12] نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقایسه نتایج به دست آمده با فرض $a_0=0$ با نتایج ارائه شده در مرجع [12]

جهت	مقدار شناسایی شده	نتیجه ارائه شده در [12]	مقدار شناسایی شده	نتیجه ارائه شده در [12]
شمالی-جنوبی	۱۰/۰۴	۹/۸۰	۱/۳	نتیجه ارائه شده در [12]
شرقی-غربی	۶/۴۹	۶/۹۰	۱/۵	نتیجه ارائه شده در [12]

همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از دو مطالعه، تفاوت اندکی با یکدیگر دارند. البته این موضوع قابل پیش‌بینی است. زیرا مدل‌های یکسانی در هر دو مطالعه برای سازه در نظر گرفته شده است و فرض صلبیت خاک نیز در هر دو برقرار می‌باشد. نتایج به دست آمده با فرض $a_0=0$ در مرجع [12] توانسته است به خوبی پاسخ سیستم را پیش‌بینی نماید. اما شاید این جواب تنها جواب مسئله شناسایی نباشد. همان طور که در جدول ۳ ارائه شده است، مقداری از مشارکت خاک در پاسخ سیستم انتظار می‌رود.

شکل ۹ مقایسه بین حداکثر شتاب طبقات تخمین زده شده برای ساختمان بانک سانوا را با مقادیر ثبت شده در طی زلزله نورث-ریج نشان می‌دهد. همان طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، حداکثر شتاب طبقات تخمین زده شده با مقادیر ثبت شده مطابقت خوبی دارند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت با استفاده از مدل ارائه شده برای سیستم خاک-سازه و استفاده از توابع انتقال برای شناسایی سیستم، می‌توان حداکثر شتاب طبقات یک سازه را با مدلی که تنها با ۴ پارامتر اصلی a_0 ، α ، \bar{h} و ضرایب میرایی تعریف می‌شود، تعیین نمود.

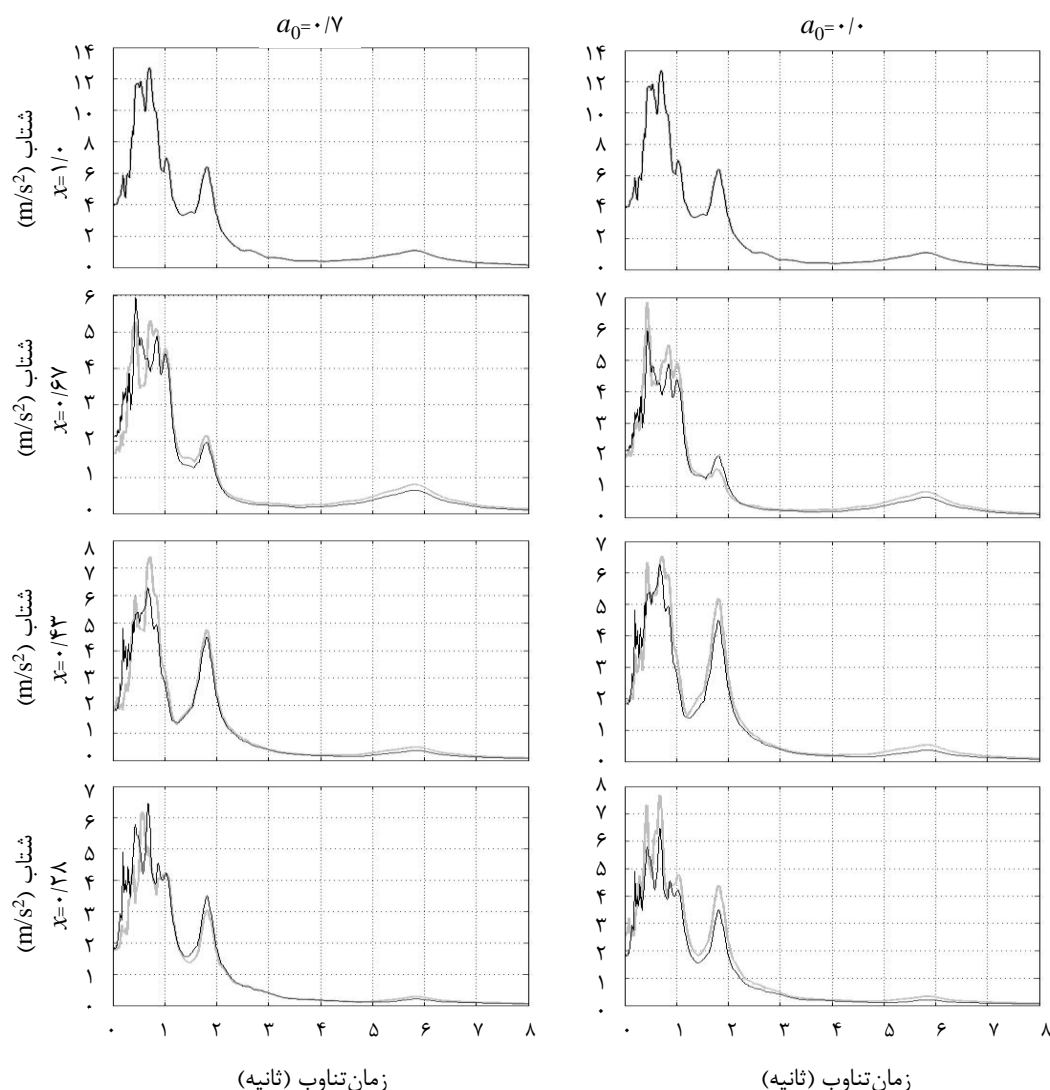


شکل ۹: مقایسه حداکثر شتاب طبقات محاسبه شده و ثبت شده تحت زلزله نورث ریج برای ساختمان ۵۲- طبقه سانوا در راستای شمالی-جنوبی

طیف پاسخ شتاب طبقه اطلاعات بیش تری در مقایسه با حداکثر شتاب طبقات در اختیار قرار می‌دهد. طیف‌های پاسخ طبقه اطلاعاتی در خصوص شدت حرکت طبقه در فرکانس‌های مختلف در اختیار قرار می‌دهند. به دست آوردن تخمین مناسبی از طیف پاسخ در طبقات مختلف یک سازه از تخمین تنها حداکثر پاسخ شتاب در طبقات دشوارتر می‌باشد. به عبارت دیگر، نتایج به دست آمده برای طیف پاسخ طبقات یک سیستم نسبت به حداکثر پاسخ طبقات همان سیستم، به انتخاب نسبت سختی جانبی α و ضرایب میرایی حساس‌تر می‌باشد. بنابراین، اگر مدلی بتواند طیف پاسخ شتاب طبقات یک سیستم را تخمین بزند، مدل خوبی محسوب می‌شود.

شکل ۱۰ طیف پاسخ شتاب ۰.۵٪ را برای ساختمان ۵۲- طبقه بانک سانوا را تحت زلزله نورث ریج، در راستای شمالی-جنوبی و برای ترازهای نسبی ۱، ۰/۶۷، ۰/۴۳، ۰/۲۸ و دو مقدار ۰ و $a_0=0.7$ نشان می‌دهد. در این شکل، خطوط پرننگ مشکی و خاکستری به ترتیب طیف پاسخ به دست آمده از شتاب ثبت شده و شتاب تخمین زده شده را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، نمودارهای تقریبی به خوبی بر مقادیر دقیق منطبق می‌باشد. طیف پاسخ در تراز بام دقیقاً با مقدار واقعی منطبق می‌باشد. زیرا از پاسخ شتاب ثبت شده در این تراز به عنوان ورودی به مدل تقریبی استفاده شده است. نمودارهای طیف پاسخ شتاب، در زمان تناوب طبیعی اصلی در راستای شمالی-جنوبی، $T_1=5/9$ sec و زمان تناوب مود دوم ارتعاشی سازه، $T_2=1/95$ sec، دارای قله می‌باشد. با افزایش ارتفاع طبقه، شکل قله مشهودتر می‌شود. مقدار طیف پاسخ در زمان تناوب مود دوم ارتعاشی، عموماً، به جز در طبقه ۳۵-ام، با افزایش شماره طبقه افزایش می‌یابد. علت کاهش مقدار طیف در این طبقه، واقع شدن محل تقریبی طبقه ۳۵-ام بر گره مود دوم ارتعاشی می‌باشد ($x=0.67$). سایر قله‌های طیف پاسخ، نشان دهنده زمان تناوب بالتر ارتعاشی می‌باشد ($T_3=1$ sec و $T_4=0.65$).

همان طور که در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تفاوت معناداری بین نتایج به دست آمده با فرض مقادیر مختلف برای a_0 مشاهده نمی‌شود. چنین مشاهده‌ای، بیان گر عدم وجود یک پاسخ منحصر به فرد برای ترکیب α و a_0 برای یک سیستم خاک-سازه مشخص می‌باشد و اهمیت مدل‌سازی واقع‌گرایانه برای تخمین درست‌تری از میزان اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: مقایسه طیف پاسخ شتاب طبقه تخمین زده شده و طیف پاسخ به دست آمده از رکوردهای واقعی برای ساختمان ۵۲-طبقه بانک سانوا در راستای شمالی-جنوبی برای $a_0=0.7$ و $a_0=0.0$

۸- خلاصه و جمع بندی

در این مطالعه، اهمیت نحوه مدل سازی سازه در تخمین میزان مشارکت خاک در پاسخ سیستم های خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، میزان مشارکت اندرکنش خاک و سازه و تغییرشکل های خمشی و برشی در پاسخ کل سیستم برای سیستم های مختلف خاک-سازه با سیستم های باربر جانبی مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. در این راستا، سیستم های مختلف خاک-سازه که پاسخ شتاب آن ها در ترازهای مختلف سازه تحت یک رکورد زلزله مشخص می باشد، مورد بررسی قرار گرفته اند و پارامترهای اصلی سیستم شامل پارامتر تعیین کننده میزان اندرکنش خاک و سازه و پارامتر تعیین کننده میزان مشارکت تغییرشکل های خمشی و برشی شناسایی می شوند.

در این مطالعه، از یک قاب تک-دهانه با رفتار خمشی-برشی برای مدل سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه استفاده شده است. در این مدل، پارامتر نسبت سختی، که با α نمایش داده شده است، مقدار مشارکت تغییرشکل های خمشی و برشی را در تغییرشکل کلی سازه تعیین می کند. مقدار پارامتر α به نسبت سختی تیر به ستون های قاب بستگی دارد. به طوری که مقدار $\alpha=0$ نماینده سازه با

رفتار کاملاً خمشی و $\alpha = \infty$ ، نماینده ساختمان‌هایی با رفتار کاملاً برشی می‌باشد. محدوده تغییرات α برای سازه‌های متداول بین ۰ تا ۳۰ می‌باشد. سیستم خاک-پی در این مطالعه، بر اساس مدل‌های مخروطی و با استفاده از فنر و میراگرهایی در درجات آزادی افقی و دورانی مدل شده است. رفتار سیستم در این مطالعه به صورت خطی فرض شده است.

برای شناسایی پارامترهای اصلی سیستم خاک-سازه، از تابع انتقال بین پاسخ‌های شتاب طبقات مختلف سازه استفاده شده است. برای این منظور، با استفاده از مدل خاک-سازه و فرضیات اولیه در خصوص پارامترهای اصلی سیستم، نسبت تابع انتقال بین دو تراز که پاسخ آن‌ها تحت یک رکورد زلزله مشخص می‌باشد، تشکیل داده می‌شود. سپس، یک تابع هدف به صورت خطای تخمین پاسخ در یکی از دو تراز، تعریف می‌شود. با کمینه کردن مقدار تابع هدف، بهینه مقادیر برای پارامترهای اصلی سیستم، شامل پارامتر α ، ضرایب میرایی مودهای ارتعاشی سیستم، و میزان مشارکت خاک، به دست می‌آید. از آنجا که برای تشکیل نسبت تابع انتقال، تنها پاسخ شتاب کل در دو طبقه متفاوت از یک سازه مورد نیاز می‌باشد، می‌توان از این روش شناسایی، برای بررسی سیستم‌هایی که تحریک ورودی به آنها در دسترس نمی‌باشد استفاده نمود.

در این مطالعه، سیستم‌های مختلف خاک-سازه با استفاده از داده‌های پاسخ شتاب مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از شناسایی سیستم‌های خاک-سازه با استفاده از داده‌های مصنوعی، نشان دادند که روش ارائه شده با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی پارامترهای سیستم خاک-سازه می‌باشد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهند که می‌توان دو سازه با سیستم‌های باربر جانبی متفاوت و مقادیر متفاوتی از میزان مشارکت خاک پیدا نمود، به طوری که پاسخ‌های به دست آمده در طبقات این دو سیستم با هم مطابقت قابل قبولی داشته باشند. برای مثال، ممکن است یک سازه قاب خمشی که روی یک خاک نرم با میزان مشارکت خاک زیاد قرار گرفته است، پاسخی مشابه با پاسخ یک سیستم با دیوار برشی واقع بر خاک سخت با میزان اندرکنش خاک و سازه کم‌تر داشته باشد. چنین مشاهده‌ای اهمیت استفاده از مدل‌های واقع‌گرایانه برای مدل‌سازی سازه فوقانی در سیستم خاک-سازه برای تخمین بهتری از میزان مشارکت اندرکنش خاک و سازه را نشان می‌دهد.

برای مطالعه سیستم‌های خاک-سازه با استفاده از داده‌های واقعی، از یک ساختمان ۵۲-طبقه واقع در شهر لوس‌انجلس، کالیفرنیا، استفاده شده است. نتایج ثبت شده روی این ساختمان، تحت تحریک زلزله نورثریج در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که این روش شناسایی می‌تواند حداکثر پاسخ شتاب را در ترازهای مختلف سیستم با دقت خوبی پیش‌بینی نماید. هم‌چنین مقادیر شناسایی شده برای پارامترهای اصلی سیستم با نتایج ارائه شده در مطالعات گذشته روی این ساختمان مطابقت دارد. هم‌چنین، وجود چند دسته جواب با ترکیب‌های مختلفی از پارامتر α و میزان اندرکنش خاک و سازه برای پیش‌بینی پاسخ شتاب برای این سازه مشاهده شد.

مراجع

- [1] Perelman, D.S., Parmelee, R.A., and Lee, S.L. (1968) SEISMIC RESPONSE OF SINGLE-STORY INTERACTION SYSTEMS. *Journal of the Structural Division*.
- [2] Sarrazin, M.A., Roesset, J.M., and Whitman, R.V. (1972) Dynamic Soil-Structure Interaction. *Journal of the Structural Division*. 98 (7), 1525–1544.
- [3] Jennings, P.C. and Bielak, J. (1973) Dynamics of building-soil interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 63 (1), 9–48.
- [4] Veletsos, A.S. and Meek, J.W. (1974) Dynamic behaviour of building-foundation systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 3 (2), 121–138.
- [5] Veletsos, A.S. and Nair, V.V.D. (1975) Seismic Interaction of Structures on Hysteretic Foundations. *Journal of the Structural Division*. 101 (1), 109–129.
- [6] Veletsos, A.S. (1977) Dynamics of structure-foundation systems. *Structural and Geotechnical Mechanics*. A volume honoring NM Newmark 333–361.
- [7] ATC (1978) Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings. Applied Technology Council, Palo Alto, California.
- [8] Şafak, E. (1995) Detection and Identification of Soil-Structure Interaction in Buildings from Vibration Recordings. *Journal of Structural Engineering*. 121 (5), 899–906.

- [9] Todorovska, M.I. (2009) Seismic Interferometry of a Soil-Structure Interaction Model with Coupled Horizontal and Rocking Response. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 99 (2A), 611–625.
- [10] Taghavi, S. and Miranda, E. (2005) Approximate Floor Acceleration Demands in Multistory Buildings. II: Applications. *Journal of Structural Engineering*. 131 (2), 212–220.
- [11] Taghavi-Ardakan, S. and Miranda, E. (2006) Probabilistic Seismic Assessment of Floor Acceleration Demands in Multi-Story Buildings. .
- [12] Reinoso, E. and Miranda, E. (2005) Estimation of floor acceleration demands in high-rise buildings during earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 14 (2), 107–130.
- [13] Miranda, E. and Taghavi, S. (2005) Approximate floor acceleration demands in multistory buildings. I: Formulation. *Journal of Structural Engineering*. 131 (2), 203–211.
- [14] Tavakoli, M. (2012) Effect of soil-structure interaction on floor acceleration response of buildings during earthquakes. M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology Tehran, Iran, 2012.
- [15] Chopra, A.K. (2011) Dynamics of Structures. 4th edition Pearson, Upper Saddle River, N.J.
- [16] Miranda, E. and Reyes, C.J. (2002) Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness. *Journal of Structural Engineering*. 128 (7), 840–849.
- [17] Wolf, J.P. (1994) Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [18] Vaseghiamiri, S. (2014) Evaluation of Soil Contribution to Seismic Response of Soil-Structure Systems Using Recorded Data During Small-scale earthquakes, M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology Tehran, Iran, 2014.
- [19] Ghannad, M.A., Fukuwa, N., and Nishizaka, R. (1998) A study on the frequency and damping of soil-structure systems using a simplified model. *Journal of Structural Engineering, AIJ*. 44B 85–93.
- [20] Ghodrati, E. (n.d.) The role of higher modes of vibration on seismic response of soil-structure systems, M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology Tehran, Iran, n.d.
- [21] Veletsos, A.S. and Ventura, C.E. (1986) Modal analysis of non-classically damped linear systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 14 (2), 217–243.
- [22] Lignos, D.G. and Miranda, E. (2014) Estimation of base motion in instrumented steel buildings using output-only system identification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 43 (4), 547–563.
- [23] Miranda, E. and Akkar, S.D. (2006) Generalized Interstory Drift Spectrum. *Journal of Structural Engineering*. 132 (6), 840–852.
- [24] Frazer, R.A., Duncan, W.J., and Collar, A.R.C. (1947) Elementary Matrices. 1st ed. Cambridge University Press, .
- [25] Hurty, W.C. (1964) Dynamics of Structures. Fifth Printing edition Prentice Hall, .