



Parametric Study of Structure-Soil-Structure Interaction in Time and Frequency Domains

B. Madani¹, F. Behnamfar^{2*}

¹ M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

ABSTRACT: In this paper, focusing on structure-soil-structure interaction, dynamic behavior of two adjacent structures with flexible base is studied. The main identifiers of this structure-soil-structure interaction system are defined with dimensionless parameters. With considering a logical range of the parameters, various states including most practical cases are calculated. Soil flexibility and dynamic correlation between two adjacent structures through the soil are accounted for using springs and dashpots at the base of the structures. The equations of motion are solved in time and frequency domains for two adjacent single degree of freedom systems to make it possible to study parametrically the effect of structure-soil-structure interaction on the responses. As a result of harmonic analysis, natural frequencies with and without considering damping, damping ratios and amplitude of the system's dynamic responses are calculated and compared with those of the single building (no adjacency). Also, the cases prone to a possible pounding are recognized. By analyzing such a system in both time and frequency domain, it is shown that with appropriate arrangements, both of the analysis procedures result in the same responses for an interaction problem.

Review History:

Received: 2019-04-17

Revised: 2019-10-26

Accepted: 2019-11-12

Available Online: 2019-12-25

Keywords:

Adjacent structures

soil-structure interaction

structure-soil-structure interaction

natural frequency

damping ratio

1. INTRODUCTION

Two neighboring structures can impact each other. Such a phenomenon is called pounding. In addition, cross interaction of adjacent structures through a soft soil can exchange the vibration energy between buildings and make the problem even more complex.

Ghandil et al. [1] extended the equivalent linear method of soil dynamics for the effects of overburden stresses of two adjacent buildings. They divided the soil medium to near-field and far-field domains and modified the shear modulus and damping ratio of soil in the near-field soil medium.

Kirkwood and Dashti [2] studied the dynamic response of two adjacent structures resting on liquifiable soil using centrifuge test. They concluded that it was possible to minimize the foundation and structure's response by appropriate positioning of the structures. Bybordiani and Arici [3] examined the dynamic responses of two adjacent buildings including story drifts and the base shear with regard to the clear distance. It was observed that at close distances, cross-interaction of two tall buildings being much different in lateral stiffness could result in seismic responses even larger than those occurring in a similar single building on rigid base. Ngo et al. [4] explored the height and mass differences as parameters affecting the dynamic responses of two adjacent buildings using centrifuge experiments. In the tests, increase of the response of the smaller building and its reduction for the larger building were observed with regard to their single

building counterparts.

In this study, effects of pounding and soil flexibility on the inelastic response of selected adjacent steel structures are studied. Clear distances up to the seismic codes prescribed value are considered. A coupled model of springs and dashpots is utilized for through-the-soil interaction of the adjacent structures, for two types of soft soils.

2. METHODOLOGY

The system under study is shown in Figs. 1 and 2. Deliberately, The system has been taken to be simple enough for the dynamic characteristics as well as the dynamic response trends to be more easily understood. For this purpose, each neighboring structure is replaced with its fundamental mode mass and stiffness. Moreover, the flexibility and infinity of soil are modelled by the use of springs and dampers, respectively. The cross-interaction between the two buildings is modelled using the coupled springs and dampers that transfer the translational and rotational motions from one foundation to the other one.

In Fig. 1, m_i , m_{bi} , I_i , I_{bi} , c_i , k_p and h_i are respectively the structural mass, mass of the base, inertial mass moment of the structure, inertial mass moment of the base, damping coefficient, lateral stiffness, and height of the building and the index i is structure's counter ($i=1, 2$). Moreover, k_h , k_r , c_h , and c_r are respectively the stiffness and damping coefficients of soil for sway and rocking motions representing soil flexibility for the single buildings, and k_{hc} , k_{rc} , c_{hc} , and

*Corresponding author's email: farhad@cc.iut.ac.ir



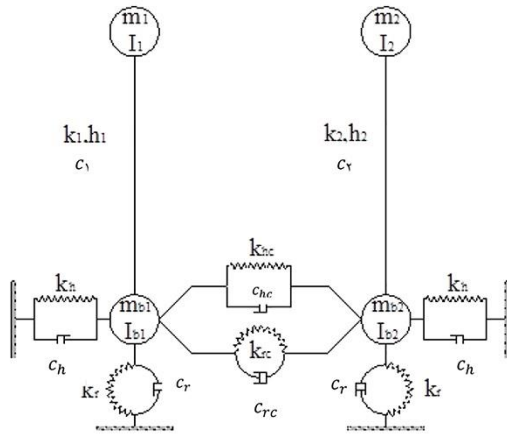


Fig. 1. The analytical model of the adjacent structures.

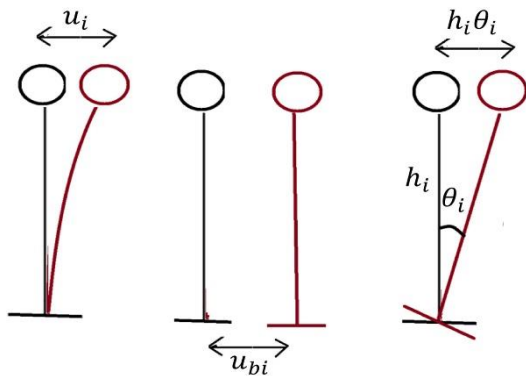


Fig. 2. The dynamic degrees of freedom.

c_{rc} are respectively the stiffness and damping coefficients of soil for sway and rocking motions representing soil flexibility for the cross interacting adjacent buildings. In this paper, the soil stiffness and damping coefficients suggested by Mulliken and Karabalis [5] have been used.

The equations of motion of the 6-degree of freedom system of Fig. 1 in the frequency domain are summarized as Eq. (1):

$$(-\hat{a}^2 [M] + i\hat{a} [C] + [K]) \{\bar{U}\} = \{\bar{P}\} \quad (1)$$

where $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{\bar{P}\}$, and $\{\bar{U}\}$ are respectively the mass, damping, and stiffness matrices and the equivalent force vector and the displacements vector of the system. Moreover, \hat{a} is the frequency ratio and i is the imaginary number. A similar equation appears also in the time domain under harmonic motion without the i factor.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The natural frequencies of the system are calculated by putting the right part of Eq. (1) equal to zero. They are normalized to the case of a similar single building. The resulting values are displayed as functions of the non-dimensional clear distance ($\bar{d} = d/a$) in Fig. 3 for the case of a system representing tall buildings, where d is the clear distance between buildings and a is the half width of the foundation.

As observed, inclusion of the cross-interaction results in

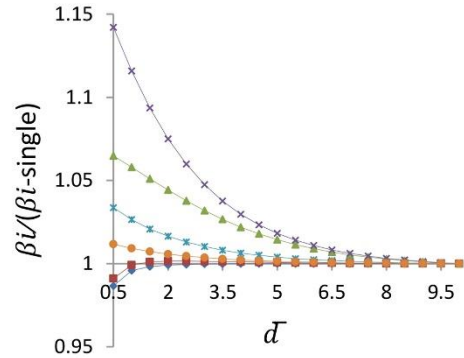


Fig. 3. Variation of the natural frequencies normalized to those of the single building.

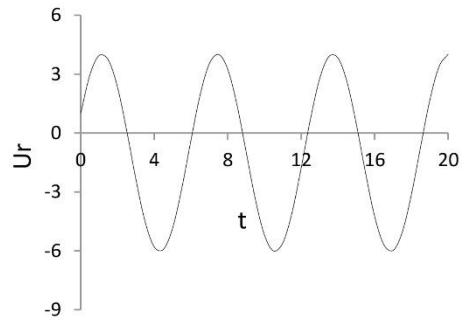


Fig. 4. Time history of the distance between the structural masses.

increase of the natural frequencies in most of the cases. While the maximum increase is for the mode primarily related to the motion at base, vibration of the structural masses witnesses not much variation in natural frequency.

The dynamic response of the system under a unit harmonic loading is calculated by solving Eq. (1) in the frequency or time domain. For instance, for the case equivalent to two tall buildings (similar to that of Fig. 3), time history of the relative distance U_r between the structural masses is shown in Fig. 4 for a close distance $\bar{d} = 0.1$. Frequency of the applied motion is assumed to be equal to the fixed base frequency the mass stiffer in lateral motion. Clearly, the masses collide with each other for the time instances when U_r is negative in the Fig.

4. CONCLUSIONS

Dynamic characteristics and responses of two adjacent buildings were determined in this study using a simple system of two lumped masses resting on structural and soil springs. It was concluded that cross-interaction could increase the natural frequencies up to 20%. For the harmonic response, both increase and decrease in response, up to about 40%, were seen in different cases. It was also shown that it was very likely for the pounding to occur at practical cases.

REFERENCES

[1] Ghandil, M., Behnamfar, F., Vafaeian, M.. "Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 80, pp. 149-162, 2016.
 [2] Kirkwood, P., Dashti, S. "A centrifuge study of seismic structure-

soil-structure interaction on liquefiable ground and implications for design in dense urban areas”, *Earthquake Spectra*, Vol. 34 No. 3, pp. 1113-1134, 2018.

- [3] Bybordiani, M. and Arici, Y. “Structure-soil-structure interaction of adjacent buildings subjected to seismic loading”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 48, pp. 731-748, 2019.
- [4] Ngo VL, Kim JM, Chang SH, Lee C. “Effect of height ratio

and mass ratio on structure-soil-structure interaction of two structures using centrifugal experiment”, *Applied Sciences*, Vol. 9, 536-561, 2019.

- [5] Mulliken, J. S. and Karabalis, D. L., “Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3D foundations and structures”, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 687-710, 1998.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Madani, F. Behnamfar, *Parametric Study of Structure-Soil-Structure Interaction in Time and Frequency Domains*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 679-682.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16156.6143](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16156.6143)





مطالعه ی پارامتری اندرکنش سازه-خاک-سازه در حوزه های زمان و فرکانس

بهاره مدنی^۱، فرهاد بهنام فر^{۲*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۲ دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۸-۰۴

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۲۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۰۴

کلمات کلیدی:

سازه های مجاور

اندرکنش خاک-سازه

اندرکنش سازه-خاک-سازه

فرکانس های طبیعی

میرایی

خلاصه: در این مقاله، با تمرکز بر تحلیل اندرکنش سازه-خاک-سازه، رفتار دینامیکی همزمان دو سازه ی مجاور و متکی بر بستر انعطاف پذیر مورد مطالعه قرار گرفته است. شاخص های اصلی معرف این سیستم سازه -خاک-سازه به صورت چند پارامتر بی بعد معرفی و در نظر گرفته شده و با منظور کردن بازه ای منطقی از مقادیر، حالات متنوعی شامل اغلب موارد عملی ممکن محاسبه گردیده است. انعطاف پذیری خاک و همبستگی دینامیکی دو سازه از طریق خاک، با استفاده از تعبیه ی فنرها و میراگرهایی در تکیه گاه سازه اعمال شده و مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حرکت در حوزه های زمان و فرکانس برای دو سیستم یک درجه آزاد مجاور حل شده و از این طریق مطالعه پارامتری اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه بر واکنش ها ممکن گردیده است. در نتیجه ی تحلیل های دینامیکی هارمونیک، فرکانس های طبیعی، نسبت های میرایی و دامنه ی واکنش دینامیکی سیستم محاسبه گردیده و با حالت عدم وجود سازه ی مجاور مقایسه گردیده است. همچنین حالات محتمل برای وقوع ضربه بین دو سازه ی مجاور تعیین شده است. در انجام تحلیل ها، کاربرد تحلیل در حوزه ی فرکانس و در حوزه ی زمان برای مطالعات فوق بررسی گردیده و نشان داده شده که با تمهیدات مناسب می توان از هر دو تحلیل به نتایج یکسانی از محاسبه اندرکنش بین سازه های مجاور دست یافت. در نتیجه، مشاهده شده که در نظر گرفتن اندرکنش متقابل در اغلب حالات منجر به افزایش فرکانس های طبیعی سیستم شده که به بیشترین افزایش مربوط به حرکت افقی پایه، تا بیش از ۲۰٪ می باشد. از سوی دیگر، در مودهای مربوط به حرکت افقی روسازه تغییر فرکانس چندانی مشاهده نمی شود. همچنین، مجاورت تأثیر چندانی بر مشخصات دینامیکی ساختمانهای کوتاه و سنگین ندارد، در حالیکه ساختمان بلند و سبک بیشتر تحت تأثیر مجاورت است طوریکه نسبت میرایی چنین سیستمی در حرکت گهواره ای تا دو و نیم برابر افزایش می یابد. اندرکنش متقابل سازه های سبک و بلند در خاکهای نرم تر موجب افزایش پاسخ سازه سخت تر تا حدود ۴۰٪ و کاهش پاسخ سازه نرم تر تا حدود ۱۵٪ می شود، اما روی خاک سخت پاسخ هر دو سازه کاهش می یابد که بیشینه تغییر، حدود ۴۰٪ می باشد.

۱-مقدمه

عبارتی اندرکنش متقابل می باشد که به آن توجه باز هم کمتری شده است. خاک به عنوان یک محیط رابط بین سازه های مجاور، وابستگی ارتعاشی میان آن ها ایجاد می کند بدین معنی که انتقال انرژی بین سازه های مجاور احیاناً علاوه بر ضربه، از طریق خاک نیز صورت می پذیرد که به آن اندرکنش متقابل نیز گفته می شود. در نظر گرفتن اندرکنش متقابل به همراه اندرکنش خاک-سازه منجر به واقع بینانه تر شدن نتایج تحلیل دینامیکی خاک-سازه به ویژه در

اندرکنش خاک-سازه نقش انکارناپذیری در آسیب های وارده در زلزله های پیشین دارد. توجه به این موضوع از دهه ی ۱۹۳۰ آغاز شده لیکن در مجموع، سهم نسبتاً کوچکی از تحقیقات مربوط به مهندسی زلزله را دربر می گیرد. از دیگر مسائل مربوط به انعطاف پذیری خاک، پدیده ی اندرکنش سازه-خاک-سازه و یا به

* نویسنده عهده دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir



طراحی سازه های خاص هنگامی که سازه های دیگری نیز موجودند می گردد.

برای مدل سازی خاک زیرسازه و درنظر گرفتن شرایط انعطاف پذیری خاک، دو روش کلی مستقیم و زیرسازه موجود است. در روش مستقیم سیستم سازه ای به همراه قسمتی از خاک اطراف آن به صورت یک جا مدل می شود. مرزهای مدل می تواند به اندازه ی کافی به دور برده شود تا اثرات امواج پراکنده شده از تکیه گاه سازه قبل از رسیدن به مرزها محو گردد. به جای آن می توان شرایط مرزی مناسبی تعریف نمود و مرزهای نزدیکتری را انتخاب کرد. در این روش انواع رفتارهای غیرخطی مادی و هندسی اجزا می تواند درنظر گرفته شود. همچنین قابلیت مدل سازی ناهمسانگردی و وجود لایه های مختلف خاک نیز موجود است. در روش زیرسازه مبنای کار تفکیک سیستم به دو جزء روسازه و زیرسازه می باشد. بخش روسازه شامل سیستم سازه ای و احیاناً ناحیه ی کوچکی از خاک زیر آن بوده و بخش زیرسازه معرف پی و خاک تکیه گاهی آن می باشد. در این روش پس از تعیین توابع مشخص کننده ی سختی و میرایی دینامیکی زیرسازه، فنرها و میراگرهای متناظر با توابع ذکر شده جایگزین محیط نیمه بینهایت خاکی زیرسازه می شود. همچنین می توان با استفاده از المان های فنر-میراگر مناسب، اندرکنش سازه-خاک-سازه را نیز لحاظ نموده و بدین ترتیب انتقال انرژی از طریق خاک بین فونداسیون های دو سازه ی مجاور را درنظر گرفت.

در مقام مقایسه، مطالعات کمتری را می توان یافت که به بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه بر پاسخ دینامیکی ساختمان های مجاور پرداخته باشد. کر و همکاران در سال ۲۰۰۱، به بررسی دو ساختمان مجاور با فرض رفتار خطی خاک پرداخته و برای تحلیل از نرم افزار *RUAUMOKO* استفاده نمودند [۱]. آن ها برای درنظر گرفتن اندرکنش متقابل از سیستم جرم-فنر-میراگر با توجه به مدل پیشنهادی مالیکن و کارابالیس [۲] استفاده کرده و نیز المان های ضربه را در تراز تمامی طبقات درنظر گرفتند. آن ها بیشترین تأثیر درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه را افزایش زمان تناوب سازه ی نوسان کننده اعلام کردند.

بهنام فر، سعادت پور و کرمانی در سال ۲۰۰۳ با بررسی دو سازه ی مجاور یک درجه آزاد اثرات انعطاف پذیری خاک را بررسی نمودند [۳]. در این تحقیق اندرکنش سازه-خاک-سازه طبق پارامترهای سختی و

میرایی پیشنهاد شده توسط مالیکن و کارابالیس [۲] لحاظ شده است. آن ها به این نتیجه رسیدند که تأثیر مجاورت ساختمانها بیش از هر چیز روی فرکانس حرکت گهواره ای آن ها و به صورت افزایش دهنده می باشد.

یحیایی و همکاران در سال ۲۰۰۸، به بررسی تأثیر اندرکنش متقابل بر ضربه بین دو ساختمان فولادی ۳۲ طبقه ی مجاور با استفاده از نرم افزار *Ansys5.4* پرداختند [۴]. درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه منجر به افزایش زمان تناوب و میرایی ساختمانها گردید که این تأثیر در ساختمانهای بلند بیشتر از ساختمانهای کوتاه دیده شد. همچنین درنظر گرفتن اندرکنش متقابل در اغلب حالات منجر به افزایش برش پایه و تغییر مکان ها شد و این افزایش به فاصله ی بین دو ساختمان نیز بستگی داشت.

کول و همکاران در سال ۲۰۱۱، از انعطاف پذیری خاک به عنوان یک جنبه ی کلیدی در تقویت جابجایی نسبی ساختمانها و افزایش احتمال خطر ناشی از ضربه یاد نمودند [۵]. آنها رابطه ای را برای افزایش زمان تناوب سازه ناشی از انعطاف پذیری خاک پیشنهاد نمودند. آن ها به این نتیجه رسیدند که درنظر نگرفتن تأثیر خاک موجب دست پایین تخمین زدن نیروی ضربه و احتمال وقوع ضربه می شود، بنابراین با اصلاح مقدار زمان تناوب ساختمان طبق رابطه ی پیشنهادی، اثر اندرکنش خاک-سازه را در ضربه به حساب آوردند.

یانکوسکی و همکاران در سال ۲۰۱۲، ضربه بین دو ساختمان سه طبقه ی مجاور را با فرض انعطاف پذیری خاک بررسی نمودند [۶]. آنها با بسط معادلات حاکم بر سیستم سازه های مجاور، به این نتیجه رسیدند که درنظر گرفتن حرکات افقی و گهواره ای خاک بر پاسخ سازه خصوصاً سازه ی سبک تر و انعطاف پذیرتر تأثیرگذار است به طوری که اندرکنش خاک-سازه منجر به کاهش حداکثر تغییرمکان، برش و نیروی ضربه گردیده و عموماً موجب افزایش حداکثر شتاب طبقات خواهد شد. همچنین درنظر گرفتن انعطاف پذیری خاک موجب افزایش تعداد دفعات ضربه در بالاترین تراز و عدم وقوع ضربه در طبقات دیگر می شود.

ناصرخاکی و همکاران در سال ۲۰۱۲، اندرکنش متقابل در دو مدل چند درجه آزاد را با استفاده از سیستم فنر-میراگر، مدل نمودند [۷]. آن ها به این نتیجه رسیدند که درنظر گرفتن انعطاف پذیری خاک موجب افزایش تغییرمکان و برش پایه در هر دو ساختمان مجاور

واکنش دو سازه مجاور را روی خاک روانگرا با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در نتیجه این پژوهش، عنوان گردید که با چیدمان صحیح می توان واکنش هایی شامل نشست و چرخش پی و نیز نیروهای وارده به سازه را به حداقل رساند. بایوردیانی و اریسی در سال ۲۰۱۹ مسئله اندرکنش سازه های مجاور را تحت بار زلزله مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. تغییرات واکنشهایی از قبیل دریافت طبقات و برش پایه با فاصله دو ساختمان محاسبه گردید. در این بررسی مشاهده شد که اندرکنش عرضی بین دو ساختمان بلند یا دو ساختمان با سختیهای بسیار متفاوت در فاصله کم می تواند به واکنشهایی حتی بیش از حالت ساختمان تک روی تکیه گاه صلب بینجامد. انگو و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تفاوتیهای ارتفاعی و جرمی روی واکنشهای دینامیکی دو ساختمان مجاور را با انجام آزمایش سانتریفیوژ بررسی نمودند [۱۵]. در نتیجه، افزایش واکنش سازه کوچکتر و کاهش واکنش سازه بزرگتر نسبت به حالت سازه تک مشاهده گردید و عنوان شد که هر دوی نسبتهای جرمی و ارتفاعی بر تغییر واکنش اثرگذارند.

بررسی مطالعات انجام شده تاکنون روی سیستم های سازه-خاک-سازه نشان می دهد که هنوز ابهامات زیادی در مورد چگونگی تأثیرپذیری مشخصات دینامیکی سیستم (زمانهای تناوب و نسبت های میرایی) و واکنش دینامیکی آن از اندرکنش سازه-خاک-سازه وجود دارد. در مطالعه ی حاضر سعی می شود ابعاد دیگری از این مسئله روشن گردد. مدل سازی سیستم از طریق فنرها و میراگرهای متمرکز انجام شده و از تحلیل های هارمونیکی در حوزه های زمان و فرکانس استفاده گردیده است.

۲- مدل مورد استفاده در تحقیق حاضر

در این مطالعه با درنظر گرفتن هریک از روسازه ها به صورت یک درجه آزاد و لحاظ نمودن انعطاف پذیری خاک در جهت های افقی و دورانی، دو ساختمان مجاور به صورت یک سیستم شش درجه آزاد طبق شکل (۱) مدل می شوند. همچنین درجات آزادی مربوط به چنین سیستمی در شکل (۲) نشان داده شده است.

در شکل (۱)، m_i ، m_{bi} ، I_i ، I_{bi} ، c_i ، k_i و h_i به ترتیب معرف جرم روسازه، جرم تکیه گاه، ممان اینرسی جرمی سازه، ممان اینرسی جرمی تکیه گاه، ضریب میرایی، سختی برشی و ارتفاع سازه

نسبت به حالت تکیه گاه صلب می گردد و همچنین ضربه، موجب ایجاد شرایط بحرانی تر شده که با درنظر گرفتن انعطاف پذیری خاک زیر فونداسیون شدت آن افزایش می یابد.

فارقالی در سال ۲۰۱۴ به بررسی دو ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه ی مجاور با فرض رفتار خطی و با لحاظ نمودن انعطاف پذیری خاک پرداخت [۸]. وی برای مدل سازی رفتار خاک از فنرهای انتقالی در سه جهت مختصاتی استفاده نمود و به بررسی سه نوع خاک نرم، متوسط و سخت پرداخت. وی نتیجه گیری نمود که با کاهش سختی خاک، پیوند سه مود اول سازه افزایش می یابد. نیز پاسخ سازه واقع بر خاک سخت بسیار نزدیک به حالت سازه با تکیه گاه گیردار می باشد. این شباهت در برش طبقات چشمگیرتر است.

دوبر و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی دو ساختمان مجاور در فواصل مختلف از یکدیگر با درنظر گرفتن انعطاف پذیری خاک پرداختند [۹]. آنها برای شبیه سازی رفتار خاک از سه فنر انتقالی و سه فنر دورانی استفاده نمودند. آنها نتیجه گیری کردند که در تمامی فواصل درنظر گرفته شده انعطاف پذیری خاک منجر به افزایش زمان تناوب هر دو سازه، افزایش تغییر مکان و نیز افزایش تعداد ضربه بین دو ساختمان می گردد.

پاوار و مورنال در سال ۲۰۱۵ دو ساختمان غیرمتقارن مجاور را با درنظر گرفتن خاک زیر سازه بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن خاک زیر سازه از برخی جهات دارای تاثیر مثبت و از برخی جهات دارای تاثیر منفی می باشد [۱۰]. به طوریکه در نظر گرفتن اندرکنش منجر به کاهش برش پایه و شتاب مطلق طبقات و نیز افزایش تغییر مکان طبقات و زمان تناوب خواهد شد. آلدایک و همکاران در سال ۲۰۱۶ دو و سه ساختمان مجاور را روی میز لرزان مورد آزمایش قرار دادند [۱۱]. ایشان نتیجه گرفتند که بسته به ارتفاع ساختمان، وجود ساختمانهای مجاور می تواند واکنش لرزه ای آن را کاهش یا افزایش دهد.

قندیل و همکاران در سال ۲۰۱۶ روش خطی معادل برای تحلیل دینامیکی را به حالت خاک در نزدیکی دو سازه مجاور گسترش دادند [۱۲]. آنها محدوده خاک را به دو ناحیه نزدیک (در مجاورت شالوده) و دور تقسیم بندی نموده و با انجام تحلیل های دینامیکی متعدد و برازش منحنی، روابطی را برای اصلاح ضریب برشی و نسبت میرایی خاک مجاور شالوده محاسبه کردند. کرکوود و دشتی در سال ۲۰۱۸

می باشد.

برای تعیین سیستم اندرکنشی لازم است ضرایب سختی و میرایی پی محاسبه گردد. در مورد اندرکنش خاک-سازه ی منفرد معمولاً امروزه از روابط آیین نامه ای، مانند معادلات ذکر شده در ASCE41-06 [۱۶] یا نشریه ی ۳۶۰ [۱۷] استفاده می شود. چنین معادلاتی برای حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه به راحتی در دسترس نیست. یکی از مطالعات معروف موجود در این زمینه، پژوهش مالیکن و کارابالیس [۲] می باشد که در آن با تحلیل های پارامتری متعدد و با استفاده از روش کمترین مربعات روابطی برای ضرایب سختی و میرایی در اندرکنش متقابل ارائه شده است. این ضرایب چنانکه در بخش مرور ادبیات اشاره گردید، بعداً توسط محققین مختلف دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به این سابقه، در مطالعه ی حاضر نیز از ضرایب پیشنهادی مرجع [۲] برای سختی و میرایی اندرکنش خاک-سازه و اندرکنش سازه-خاک-سازه استفاده گردیده است. روابط مربوط به این ضرایب در جداول (۱) تا (۳) ذکر گردیده است.

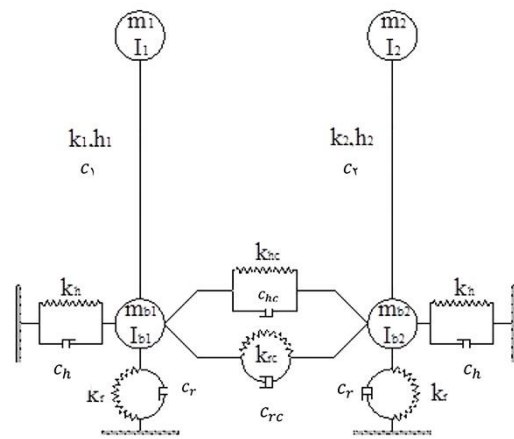
در جدول فوق، U ضریب پواسون، ρ چگالی جرمی و G مدول برشی خاک می باشد. همچنین شعاع دایره ی معادل با پی مربعی، m جرم پی و a نصف بعد پی مربعی می باشد. جرم M معرف حاصل جمع جرم فونداسیون (m) و جرم خاک مرتبط با آن (m_p) است.

جدول (۲) توصیف کننده ی پارامترهای سختی و میرایی در اندرکنش متقابل است. نحوه ی محاسبه ی ثابت های Γ و ψ در جدول (۳) آمده است. با توجه به جدول (۳) ضرایب سختی و میرایی متقابل تنها به فاصله ی بین دو فونداسیون و بعد فونداسیون مربعی وابسته می باشد.

۳- معادلات حرکت

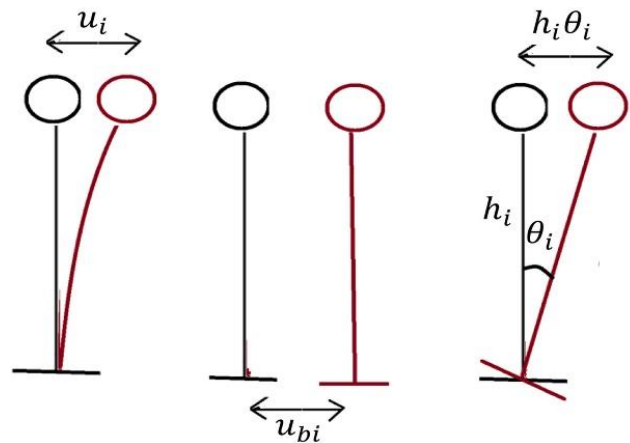
۳-۱ معادلات حاکم در حوزه ی فرکانس

با تعریف تغییرمکان زمین در زلزله برحسب فرکانس به صورت $u_g = \bar{u}_g e^{i\omega t}$ که در آن ω فرکانس تحریک و $\bar{u}_g(\omega)$ دامنه ی تحریک به ازای فرکانس مزبور می باشد، بین پاسخ های سیستم در حالت ماندگار روابط (۱) و (۲) موجود است:



شکل ۱. مدل تحلیلی سازه های مجاور با در نظر گرفتن حرکات افقی و دورانی پی

Fig. 1. The analytical model of the adjacent structures



شکل ۲. درجات آزادی در سیستم سازه های مجاور.

Fig. 2. The dynamic degrees of freedom

بوده و اندیس i شمارنده ی ساختمان ($i = 1, 2$) می باشد. همچنین درارتباط با سختی و میرایی خاک، k_h ، c_h ، k_r و c_r به ترتیب ضرایب سختی و میرایی در اندرکنش خاک-سازه ی منفرد در جهات افقی و دورانی و k_{hc} ، c_{hc} و k_{rc} ، c_{rc} به ترتیب ضرایب سختی و میرایی اندرکنش متقابل سازه-خاک-سازه در جهت های افقی و دورانی است. بنابراین با توجه به شکل (۲) تغییرمکان افقی هریک از جرم های m_i مجموع سه جمله ی تغییرمکان است: u_i ، u_{bi} و $h_i \theta_i$ که به ترتیب بیانگر تغییرمکان سازه نسبت به تکیه گاه آن، تغییرمکان سازه به همراه تکیه گاه آن (برابر با تغییر مکان افقی پایه) و تغییرمکان افقی سازه ناشی از چرخش تکیه گاه (حرکت گهواره ای)

جدول ۱. ضرایب جرم، سختی و میرایی برای مدل اندرکنش خاک-فونداسیون [۲]

Table 1. Mass, stiffness and damping coefficients for the soil-foundation interaction model

میرایی C	سختی استاتیکی K	جرم (ممان اینرسی) خاک m_v	شعاع معادل r_0	نسبت (ممان اینرسی) جرمی β	درجه آزادی
$\frac{0.8a}{V_s} K$	$\frac{4.7Ga}{1-\nu}$	$\frac{0.27m}{\beta}$	$\frac{2a}{\sqrt{\pi}}$	$\frac{(1-\nu)}{4} \frac{m}{\rho r_0^3}$	قائم
$\frac{0.163a}{V_s} K$	$\frac{9.2Ga}{2-\nu}$	$\frac{0.095m}{\beta}$	$\frac{2a}{\sqrt{\pi}}$	$\frac{(7-8\nu)}{32(1-\nu)} \frac{m}{\rho r_0^3}$	افقی
$\frac{0.6a}{V_s} K$	$\frac{4Ga^3}{1-\nu}$	$\frac{0.24m}{\beta}$	$\frac{2a}{\sqrt[4]{3\pi}}$	$\frac{3(1-\nu)}{8} \frac{m}{\rho r_0^5}$	دورانی
$\frac{0.127a}{V_s} K$	$8.31Ga^3$	$\frac{0.045m}{\beta}$	$\frac{2a}{\sqrt[4]{3\pi}}$	$\frac{m}{\rho r_0^5}$	پیچشی

جدول ۲. ضرایب متقابل سیستم اندرکنشی فونداسیون-خاک - فونداسیون [۲]

Table 2. Cross coefficients of the soil-foundation interaction system

حرکت پیچشی	حرکت دورانی	حرکت افقی	حرکت قائم	
$\Gamma_{\phi_3} \times Ga^3$	$\Gamma_{\phi_2} \times \frac{Ga^3}{(1-\nu)}$	$\Gamma_1 \times \frac{Ga}{(2-\nu)}$	$\Gamma_3 \times \frac{Ga}{(1-\nu)}$	سختی
$\Psi_{\phi_3} \times \frac{Ga^4}{V_s}$	$\Psi_{\phi_2} \times \frac{Ga^4}{V_s(1-\nu)}$	$\Psi_1 \times \frac{Ga^2}{V_s(2-\nu)}$	$\Psi_3 \times \frac{Ga^2}{V_s(1-\nu)}$	میرایی

در جدول فوق V_s سرعت موج برشی در خاک میباشد.

جدول ۳. ثابتهای ضرایب متقابل سیستم اندرکنشی فونداسیون-خاک-فونداسیون [۲]

Table 3. Constants of the cross coefficients of the soil-foundation interaction system

حرکت پیچشی	حرکت دورانی	حرکت افقی	حرکت قائم	
0.05931	$-0.04234 + 0.2396 \log_{10}(d/a)$	$3.7561 \times 10^{-0.18995(d/a)}$	$1.614 \times 10^{-0.16257(d/a)}$	سختی Γ
$4.4429 - 2.9125 \log_{10}(d/a)$	$7.3823 - 6.775 \log_{10}(d/a)$	13.2875	8.504	میرایی Ψ

در جدول فوق d معرف فاصله ی فونداسیونهای مجاور میباشد.

$$\bar{h}_i = h_i / a \quad (12)$$

$$\beta = \omega / \omega_1 \quad (13)$$

$$\beta_0 = \omega_2 / \omega_1 \quad (14)$$

در روابط فوق، ω_i فرکانس طبیعی هر سازه با پای صلب بوده و \hat{I}_i نسبت میرایی، \bar{S}_i نسبت سختی-ارتفاع سازه به خاک، \bar{m}_i نسبت جرم سازه به خاک، \bar{h}_i نسبت لاغری سازه، β نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سازه ی ۱ و β_0 نسبت فرکانس های طبیعی دو سازه می باشد. به این ترتیب معادلات (۳) تا (۸) رامی توان به شکل ماتریسی (۱۵) نوشت.

$$(-\beta^2 [M] + i\beta [C] + [K])\{\bar{U}\} = \{\bar{P}\} \quad (15)$$

به طوریکه $[M]$ ماتریس جرم سیستم بوده و عبارتست از:

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 + \bar{m}_{b1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 + \bar{I}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\hat{a}_0^2} & \frac{1}{\hat{a}_0^2} & \frac{1}{\hat{a}_0^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\hat{a}_0^2} & \frac{(1 + \bar{m}_{b2})}{\hat{a}_0^2} & \frac{1}{\hat{a}_0^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\hat{a}_0^2} & \frac{1}{\hat{a}_0^2} & \frac{(1 + \bar{I}_2)}{\hat{a}_0^2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن روابط زیر با توجه به جدول (۱) تعریف می شود:

$$\bar{m}_{bi} = \frac{m_{fi} + m_{vs}}{m_i} = \bar{m}_{fi} + \frac{(24.32 / \pi^{(3/2)})}{\bar{m}_i \bar{h}_i} \frac{1 - \nu}{7 - 8\nu} \quad (17)$$

$$\bar{I}_i = \frac{I_i + I_{fi} + I_{vs}}{m_i h_i^2} = 1 + \frac{1}{12 \bar{h}_i^2} (1 + \bar{m}_{fi}) + \frac{(20.48 / (3\pi)^{(5/4)})}{\bar{m}_i \bar{h}_i^3} \frac{1}{1 - \nu} \quad (18)$$

ماتریس میرایی سیستم بوده و عبارتست از: $[C]$

$$[C] = \begin{bmatrix} 2c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{h1} + c_{hc1} & 0 & 0 & -c_{hc1} & 0 \\ 0 & 0 & c_{r1} + c_{rc1} & 0 & 0 & -c'_{rc1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2c_2}{\hat{a}_0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_{hc2}}{\hat{a}_0} & 0 & 0 & \frac{(c_{h2} + c_{hc2})}{\hat{a}_0} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c'_{rc2}}{\hat{a}_0} & 0 & 0 & \frac{(c_{r2} + c_{rc2})}{\hat{a}_0} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{cases} u_1 = \bar{u}_1 e^{i\omega t} \rightarrow \dot{u}_1 = i\omega \bar{u}_1 e^{i\omega t}, \ddot{u}_1 = -\omega^2 \bar{u}_1 e^{i\omega t} \\ u_{b1} = \bar{u}_{b1} e^{i\omega t} \rightarrow \dot{u}_{b1} = i\omega \bar{u}_{b1} e^{i\omega t}, \ddot{u}_{b1} = -\omega^2 \bar{u}_{b1} e^{i\omega t} \\ \theta_1 = \bar{\theta}_1 e^{i\omega t} \rightarrow \dot{\theta}_1 = i\omega \bar{\theta}_1 e^{i\omega t}, \ddot{\theta}_1 = -\omega^2 \bar{\theta}_1 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_2 = \bar{u}_2 e^{i\omega t} \rightarrow \dot{u}_2 = i\omega \bar{u}_2 e^{i\omega t}, \ddot{u}_2 = -\omega^2 \bar{u}_2 e^{i\omega t} \\ u_{b2} = \bar{u}_{b2} e^{i\omega t} \rightarrow \dot{u}_{b2} = i\omega \bar{u}_{b2} e^{i\omega t}, \ddot{u}_{b2} = -\omega^2 \bar{u}_{b2} e^{i\omega t} \\ \theta_2 = \bar{\theta}_2 e^{i\omega t} \rightarrow \dot{\theta}_2 = i\omega \bar{\theta}_2 e^{i\omega t}, \ddot{\theta}_2 = -\omega^2 \bar{\theta}_2 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

با توجه به تعداد درجات آزادی، برای هر نیمه ی سیستم دو معادله ی حرکت افقی، یکی برای سازه و دیگری برای سازه به علاوه ی پی آن، و یک معادله ی حرکت گهواره ای (چرخشی) برای سازه و پی آن به صورت روابط (۳) تا (۸) نوشته می شود معادلات سازه ی ۱:

$$m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_{b1} + h_1 \ddot{\theta}_1) + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = -m_1 \ddot{u}_g \quad (3)$$

$$m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_{b1} + h_1 \ddot{\theta}_1) + m_{b1} \ddot{u}_{b1} + c_h \dot{u}_{b1} + c_{hc} (\dot{u}_{b1} - \dot{u}_{b2}) + k_h u_{b1} + k_{hc} (u_{b1} - u_{b2}) = -(m_1 + m_{b1}) \ddot{u}_g \quad (4)$$

$$m_1 h_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_{b1} + h_1 \ddot{\theta}_1) + (I_1 + I_{b1}) \ddot{\theta}_1 + c_r \dot{\theta}_1 + c_{rc} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k_r \theta_1 + k_{rc} (\theta_1 - \theta_2) = -m_1 h_1 \ddot{u}_g \quad (5)$$

معادلات سازه ی ۲:

$$m_2 (\ddot{u}_2 + \ddot{u}_{b2} + h_2 \ddot{\theta}_2) + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 = -m_2 \ddot{u}_g \quad (6)$$

$$m_2 (\ddot{u}_2 + \ddot{u}_{b2} + h_2 \ddot{\theta}_2) + m_{b2} \ddot{u}_{b2} + c_h \dot{u}_{b2} + c_{hc} (\dot{u}_{b2} - \dot{u}_{b1}) + k_h u_{b2} + k_{hc} (u_{b2} - u_{b1}) = -(m_2 + m_{b2}) \ddot{u}_g \quad (7)$$

$$m_2 h_2 (\ddot{u}_2 + \ddot{u}_{b2} + h_2 \ddot{\theta}_2) + (I_2 + I_{b2}) \ddot{\theta}_2 + c_r \dot{\theta}_2 + c_{rc} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k_r \theta_2 + k_{rc} (\theta_2 - \theta_1) = -m_2 h_2 \ddot{u}_g \quad (8)$$

روابط فوق را با استفاده از پارامترهای بی بعد زیر می توان به صورت بدون بعد درآورد. پارامترهای بی بعد عبارتند از:

$$\xi_i = \frac{c_i}{2m_i \omega_i} \quad (9)$$

$$\bar{S}_i = \omega_i h_i / V_s \quad (10)$$

$$\bar{h}_i = h_i / a \quad (11)$$

همچنین $\{\bar{U}\}$ بردار درجات آزادی تغییرمکانی سیستم و $\{\bar{P}\}$ بردار نیروی تعمیم یافته ی سیستم بوده و عبارتند از:

$$\{\bar{U}\} = \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_{b1} \\ h_1 \bar{\theta}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_{b2} \\ h_2 \bar{\theta}_2 \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{P}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ (1 + \bar{m}_{b1}) \\ 1 \\ \frac{1}{\beta_0^2} \\ \frac{1 + \bar{m}_{b2}}{\beta_0^2} \\ 1 \\ \frac{1}{\beta_0^2} \end{Bmatrix} \beta^2 \bar{u}_g \quad (31)$$

با این توصیف پارامترهای بااهمیت و مستقل مسئله در حالت کلی عبارتند از: $\bar{s}_1, \bar{v}, \bar{d}, \beta_0, \bar{h}_1, \bar{m}_1, \bar{s}_1$ و \bar{g} . نشان دهنده ی سختی/ارتفاع روسازه ی ۱ روی خاک زیر آن می باشد. به این ترتیب با افزایش مقدار این پارامتر، سختی/ارتفاع سازه بیشتر یا سختی خاک کمتر می شود، در نتیجه اثر اندرکنش خاک-سازه بیشتر خواهد شد. همانگونه که ذکر شد، \bar{m}_1 معرف نسبت جرم سازه ی ۱ به جرم خاک هم حجم آن است. بنابراین افزایش مقدار این پارامتر معادل افزایش اینرسی سازه و در نتیجه افزایش اثر اندرکنش خاک-سازه می باشد. \bar{h}_1 بیان کننده ی نسبت لاغری و معرف میزان تأثیر حرکت گهواره ای بر واکنش اندرکنشی خاک-سازه است.

در این مطالعه برای استفاده ی بعدی در مطالعه ی تقریبی برخورد، زمان تناوب های دو سازه کاملاً متفاوت و نسبت آن ها (β_0) برابر با ۲ فرض شده است. بنابراین سازه ی ۲ نسبت به سازه ی ۱ سخت تر می باشد. همچنین با توجه به عدم حساسیت واکنش دینامیکی سیستم به ضریب پواسون [۱۸]، مقدار متوسط ۰/۳۵ برای ضریب پواسون در نظر گرفته شده و مقدار نسبت میرایی برای هر دو ساختمان (ξ_i) به طور یکسان برابر با ۰/۰۵ فرض شده است. پارامتر \bar{d} نسبت فاصله ی لب به لب پی ها را به نصف بعد شالوده نشان می دهد ($\bar{d} = d/a$). افزایش مقدار این پارامتر معادل با دور شدن سازه ها و کاهش اهمیت اندرکنش متقابل سازه های مجاور می باشد.

۳-۳ معادلات حاکم در حوزه ی زمان

با تعریف تغییر مکان زمین در زلزله برحسب زمان به صورت $u(g) = \sin(\omega t)$ پاسخ سیستم در حالت ماندگار به فرم زیر

که در آن روابط زیر با توجه به جداول (۱) و (۲) تعریف می گردد:

$$c_{hi} = \frac{c_h}{m_i \omega_i} = \left(\frac{1.4996}{2 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{m}_i \bar{s}_i} \quad (20)$$

$$c_{hci} = \frac{c_{hc}}{m_i \omega_i} = \left(\frac{\Psi_h}{2 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{m}_i \bar{s}_i} \quad (21)$$

$$c_{ri} = \frac{c_r}{m_i h_i^2 \omega_i} = \left(\frac{2.4}{1 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{m}_i \bar{s}_i \bar{h}_i^2} \quad (22)$$

$$c_{rci} = \frac{c_{rc}}{m_i h_i^2 \omega_i} = \left(\frac{\Psi_r}{1 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{m}_i \bar{s}_i \bar{h}_i^2} \quad (23)$$

$$c'_{rci} = \frac{c_{rc}}{m_i h_1 h_2 \omega_i} = \left(\frac{\Psi_r}{1 - \nu} \right) \frac{(h_2 / h_1)^{(2i-3)}}{\bar{m}_i \bar{s}_i \bar{h}_i^2} \quad (24)$$

همچنین $[K]$ ماتریس سختی سیستم بوده و عبارتست از:

$$[K] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{h1} + k_{hc1} & 0 & 0 & -k_{hc1} & 0 \\ 0 & 0 & k_{r1} + k_{rc1} & 0 & 0 & -k'_{rc1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{hc2} & 0 & 0 & k_{h2} + k_{hc2} & 0 \\ 0 & 0 & -k'_{rc2} & 0 & 0 & k_{r2} + k_{rc2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

که در آن روابط زیر با توجه به جداول (۱) و (۲) تعریف می شود:

$$k_{hi} = \frac{k_h}{m_i \omega_i^2} = \left(\frac{9.2}{2 - \nu} \right) \frac{\bar{h}_i}{\bar{s}_i^2 \bar{m}_i} \quad (26)$$

$$k_{hci} = \frac{k_{hc}}{m_i \omega_i^2} = \left(\frac{\Gamma_h}{2 - \nu} \right) \frac{\bar{h}_i}{\bar{s}_i^2 \bar{m}_i} \quad (27)$$

$$k_{ri} = \frac{k_r}{m_i h_i^2 \omega_i^2} = \left(\frac{4}{1 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{s}_i^2 \bar{m}_i \bar{h}_i} \quad (28)$$

$$k_{rci} = \frac{k_{rc}}{m_i h_i^2 \omega_i^2} = \left(\frac{\Gamma_r}{1 - \nu} \right) \frac{1}{\bar{s}_i^2 \bar{m}_i \bar{h}_i} \quad (29)$$

$$k'_{rci} = \frac{k_{rc}}{m_i h_1 h_2 \omega_i^2} = \left(\frac{\Gamma_r}{1 - \nu} \right) \frac{(h_2 / h_1)^{(2i-3)}}{\bar{s}_i^2 \bar{m}_i \bar{h}_i} \quad (30)$$

می باشد.

همچنین $[C]$ ، ماتریس میرایی، به صورت زیر است:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C]_1 & [C]_{12} \\ [C]_{21} & [C]_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$[C]_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2\xi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\xi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(c_{h1} + c_{hc1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (c_h + c_{hc})\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(c_{r1} + c_{rc1}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{r1} + c_{rc1} & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$[C]_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{hc1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{hc}\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c'_{rc1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c'_{rc1} & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$[C]_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{hc2}}{\beta_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c_{hc2}}{\beta_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c'_{rc2}}{\beta_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c'_{rc2}}{\beta_0} & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$[C]_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2\xi_2}{\beta_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2\xi_2}{\beta_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(c_{h2} + c_{hc2})}{\beta_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(c_{h2} + c_{hc2})}{\beta_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{r2} + c_{rc2}}{\beta_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{r2} + c_{rc2}}{\beta_0} & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

ماتریس سختی بوده و عبارتست از: $[K]$

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_1 & [K]_{12} \\ [K]_{21} & [K]_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\begin{cases} u_1 = \bar{u}_1 \sin(\omega t) + \bar{\bar{u}}_1 \cos(\omega t) \\ u_{b1} = \bar{u}_{b1} \sin(\omega t) + \bar{\bar{u}}_{b1} \cos(\omega t) \\ \theta_1 = \bar{\theta}_1 \sin(\omega t) + \bar{\bar{\theta}}_1 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} u_2 = \bar{u}_2 \sin(\omega t) + \bar{\bar{u}}_2 \cos(\omega t) \\ u_{b2} = \bar{u}_{b2} \sin(\omega t) + \bar{\bar{u}}_{b2} \cos(\omega t) \\ \theta_2 = \bar{\theta}_2 \sin(\omega t) + \bar{\bar{\theta}}_2 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (33)$$

در معادلات (۳۲) و (۳۳) ضرایب توابع مثلثاتی نشان دهنده ی دامنه ی واکنش مربوط به جمله ی مورد نظر می باشد. با نوشتن معادلات تعادلی مشابه با روابط (۳) تا (۸)، دستگاه معادله ی ماتریسی حرکت به فرم زیر حاصل می شود که ماتریس های آن در روابط (۳۵) تا (۵۳) ارائه گردیده است. مؤلفه های ماتریس های ذکر شده، قبلاً تعریف شده اند.

$$(-\hat{a}^2 [M] + \hat{a} [C] + [K]) \{ \bar{U} \} = \{ \bar{P} \} \quad (34)$$

که در آن، $[M]$ ماتریس جرم بوده و به فرم زیر می باشد:

$$[M] = \begin{bmatrix} [M]_1 & 0 \\ 0 & [M]_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$[M]_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 + \bar{m}_{b1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 + \bar{m}_{b1} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 + \bar{I}_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 + \bar{I}_1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$[M]_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} \\ \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1 + \bar{m}_{b2}}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1 + \bar{m}_{b2}}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} \\ \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1 + \bar{I}_2}{\beta_0^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1}{\beta_0^2} & 0 & \frac{1 + \bar{I}_2}{\beta_0^2} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\{\bar{U}\}_2 = \begin{Bmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_{b2} \\ \bar{u}_{b2} \\ h_2 \bar{\theta}_2 \\ h_2 \bar{\theta}_2 \end{Bmatrix} \quad (50) \quad [K]_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{h1} + k_{hc1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{h1} + k_{hc1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{r1} + k_{rc1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{r1} + k_{rc1} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\{\bar{P}\} = \begin{Bmatrix} \{\bar{P}\}_1 \\ \{\bar{P}\}_2 \end{Bmatrix} \quad (51) \quad [K]_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{hc1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{hc1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k'_{rc1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k'_{rc1} \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\{\bar{P}\}_1 = \begin{Bmatrix} \beta^2 \\ 0 \\ (1 + \bar{m}_{b1}) \beta^2 \\ 0 \\ \beta^2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (52) \quad [K]_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{hc2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{hc2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k'_{rc2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k'_{rc2} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\{\bar{P}\}_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\beta^2}{\beta_0^2} \\ \frac{\beta^2}{\beta_0^2} \\ 0 \\ (1 + \bar{m}_{b2}) \beta^2 \\ \frac{\beta^2}{\beta_0^2} \\ 0 \\ \frac{\beta^2}{\beta_0^2} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (53) \quad [K]_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{h2} + k_{hc2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{h2} + k_{hc2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{r2} + k_{rc2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{r2} + k_{rc2} \end{bmatrix} \quad (47)$$

۴- فرکانس های طبیعی سیستم

۴-۱ فرکانس های طبیعی با حذف میرایی

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای سیستم بر فرکانس های طبیعی سیستم شش درجه آزاد، با حذف میرایی از رابطه ی (۱۵) معادله ی زیر حاصل می شود.

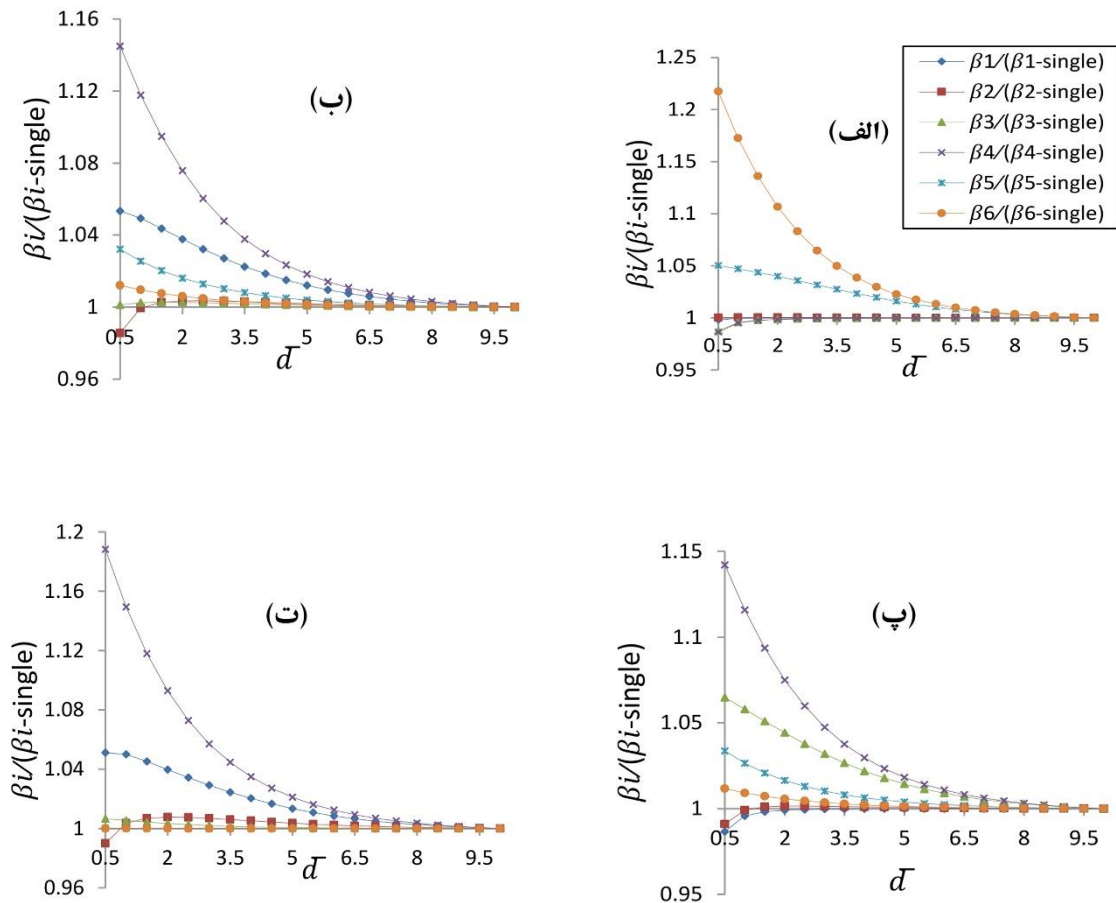
$$([K] - \beta^2 [M]) \{\bar{U}\} = \{0\} \quad (54)$$

با حل معادله ی مشخصه ی فوق برای مقادیر معلوم پارامترهای اصلی مسئله، شش ریشه ی حقیقی و مثبت برای \hat{a} بدست می آید که نماینده ی فرکانس های ارتعاشی سیستم شش درجه آزاد است. این مقادیر برای بازه ای از \bar{d} نسبت به حالت بدون تأثیر مجاورت، که بنا به فرض در آن $\bar{d} = 10$ در نظر گرفته می شود، نرمال شده اند. در این محاسبات، مقادیر پارامترهای بدون بعد برای

$\{\bar{U}\}$ و $\{\bar{P}\}$ بردارهای دامنه ی واکنش و نیروی تعمیم یافته ی سیستم بوده و به صورت زیر می باشند:

$$\{\bar{U}\} = \begin{Bmatrix} \{\bar{U}\}_1 \\ \{\bar{U}\}_2 \end{Bmatrix} \quad (48)$$

$$\{\bar{U}\}_1 = \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_1 \\ \bar{u}_{b1} \\ \bar{u}_{b1} \\ h_1 \bar{\theta}_1 \\ h_1 \bar{\theta}_1 \end{Bmatrix} \quad (49)$$



شکل ۳. تغییرات فرکانسهای سیستم نسبت به حالت بدون مجاورت بر حسب \bar{d} با حذف میرایی

الف- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ ، ب- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$

پ- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 5)$ ، ت- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 0.3)$

Fig. 3. Variation of the natural frequencies normalized to those of the single building, no damping

حرکت افقی پایه می باشد به طوریکه بیشترین مقدار افزایش فرکانس این مود نسبت به حالت بدون مجاورت، برای ساختمان سبک و بلند با اندرکنش کم، ۲۱٪ و با اندرکنش زیاد ۱۴٪ است. همچنین مقدار این افزایش برای ساختمان کوتاه و سنگین با اندرکنش کم برابر با ۱۴٪ و با اندرکنش زیاد ۱۸٪ می باشد و در موده‌های مربوط به حرکت افقی روسازه تغییر فرکانس چندانی مشاهده نمی شود. در ساختمان سبک و بلند با نرم تر شدن خاک میزان تغییرات فرکانس مود حرکت افقی پایه کاهش یافته اما در ساختمان کوتاه و سنگین این مقدار افزایش یافته است. مشاهده می شود که با افزایش فاصله، فرکانس طبیعی

ساختمان سبک و بلند مساوی $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ و $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 5)$ و برای ساختمان کوتاه و سنگین مساوی $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$ و $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 0.3)$ به ترتیب معادل حالات اندرکنش کم و اندرکنش زیاد با خاک در نظر گرفته شده است. شکل (۳) مقادیر همپایه شده ی \hat{a} را بر حسب \bar{d} نشان می دهد.

توجه به نمودارهای فوق، در نظر گرفتن اندرکنش متقابل در اغلب حالات منجر به افزایش فرکانس های طبیعی سیستم یا سخت تر عمل کردن آن شده است. بیشترین تأثیر مجاورت روی موده‌های مربوط به

طبق رابطه ی فوق بردار $\{U\}$ از ضرب سه مؤلفه حاصل شده است. دو ترم اول این رابطه دامنه ی حرکت مود j ام بوده که شامل دو بخش میراشونده و بخش ثابت دامنه حرکت می باشد. همچنین بخش نوسانگر معادله ی فوق را می توان به صورت توابع مثلثاتی طبق رابطه ی (۶۳) نوشت.

$$e^{\pm ip_j t} = \cos(p_j t) \pm i \sin(p_j t) \quad (63)$$

بنابراین $\hat{1}_j$ نسبت میرایی و p_j (بخش موهومی r_j) مقدار فرکانس طبیعی با در نظر گرفتن میرایی را نشان می دهد.

$$\hat{u}_D = p_j \quad (64)$$

بنابراین از ۶ مود حاصله برخی از آن ها که متناظر با مقادیر حقیقی r هستند، دارای فرکانس طبیعی صفر و نسبت میرایی یک می باشند. این مودها متناظر با میرایی بحرانی بوده و به دلیل میرایی زیاد، از اهمیت کمتری برخوردارند.

در شکل های زیر فرکانس های طبیعی حاصله و نسبت های میرایی در حالات مختلف نشان داده شده اند. این مقادیر نسبت به حالت بدون مجاورت مقیاس شده اند.

در نمودارهای فوق تنها ۴ فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سیستم نشان داده شده و دو فرکانس دیگر مربوط به حالاتی است که ضریب میرایی برابر با یک بوده و به تبع آن فرکانس طبیعی صفر می باشد. با تحلیل مودی انجام شده، نتیجه گیری می شود که مودهایی که از اهمیت کمتری برخوردارند مربوط به حرکت افقی و گهواره ای پایه در سازه ی ۲ (سازه ی سخت تر) است. از سوی دیگر دیده می شود که در ساختمان بلند و سبک، در نظر گرفتن اندرکنش متقابل موجب افزایش فرکانس های طبیعی سیستم خصوصاً در مود مربوط به حرکت گهواره ای ساختمان ۱ می شود که بیشینه ی تغییرات آن نسبت به حالت بدون مجاورت در حالت اندرکنش کم ۲۰٪ و در اندرکنش زیاد ۱۷٪ است. در مقابل، اندرکنش متقابل تأثیر چندانی بر فرکانس های طبیعی هیچ یک از مودها در ساختمان کوتاه و سنگین ندارد. همچنین در ساختمان بلند و سبک با نرم تر شدن خاک میزان تغییرات فرکانس مود حرکت گهواره ای پایه کاهش و در ساختمان کوتاه و سنگین به مقدار ناچیزی افزایش یافته است. در ارتباط با نسبت میرایی نیز دیده می شود که در ساختمان بلند و

سیستم به فرکانس سازه تک میل می کند که مورد انتظار است.

۲-۴ فرکانس های طبیعی سیستم با در نظر گرفتن میرایی

برای حصول مقادیر فرکانس با در نظر گرفتن میرایی، معادله ی ماتریسی (۱۵)، به شکل زیر بازنویسی می شود [۱۹].

$$\begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}\} \\ \{\dot{U}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}\} \\ \{U\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P(t)\} \end{Bmatrix} \quad (55)$$

با تعریف ماتریس های زیر و جایگذاری آن در رابطه ی (۵۵):

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$\{U\} = \{\psi\} e^{rt}, \{Z\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{U}\} \\ \{U\} \end{Bmatrix}, \{z\} = \begin{Bmatrix} r\{\emptyset\} \\ \{\emptyset\} \end{Bmatrix} \quad (57)$$

مسئله ی مقدار ویژه به فرم زیر حاصل می شود.

$$r\{z\} = -[A]^{-1}[B]\{z\} \quad (58)$$

مقادیر بدست آمده برای r و $\{\emptyset\}$ اعداد مختلط مزدوج یا اعداد حقیقی هستند، بنابراین می توان آن ها را به شکل زیر تعریف نمود:

$$r_j = -q_j \pm ip_j \quad (59)$$

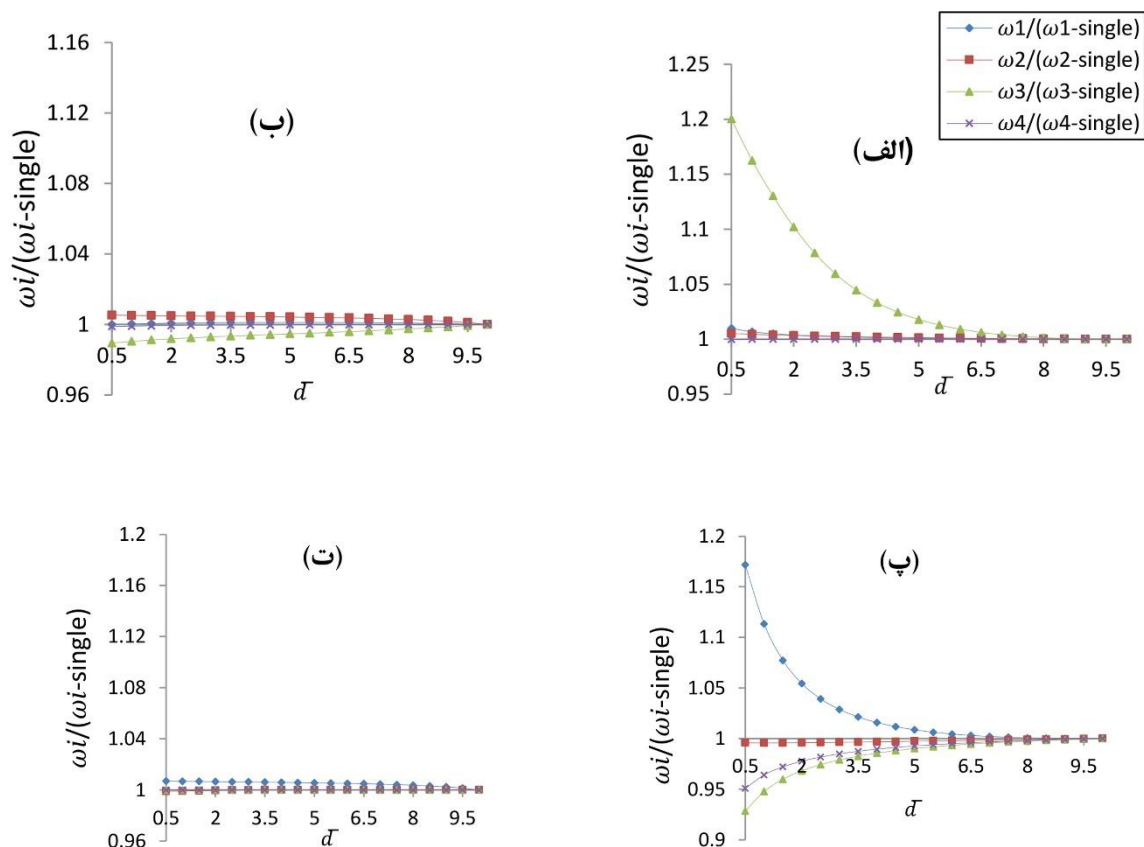
$$\{\emptyset_j\} = \{\phi_j\} \pm i\{x_j\} \quad (60)$$

پارامترهای s_j و $\hat{1}_j$ طبق رابطه ی (۶۱) قابل تعریف است.

$$s_j = \sqrt{q_j^2 + p_j^2}, \quad \xi_j = \frac{q_j}{s_j} \quad (61)$$

با جایگذاری روابط فوق در معادله ی (۵۷)، بردار تغییرمکان به شکل زیر حاصل می شود.

$$\begin{aligned} \{U\} &= \{\psi\} e^{rt} = \left(\{\phi_j\} \pm i\{x_j\} \right) e^{(-q_j \pm ip_j)t} \\ &= e^{-\xi_j s_j t} \left(\{\phi_j\} \pm i\{x_j\} \right) e^{\pm ip_j t} \end{aligned} \quad (62)$$



شکل ۴. تغییرات فرکانسهای طبیعی سیستم نسبت به حالت بدون مجاورت بر حسب \bar{d} با در نظر گرفتن میرایی.

$$\text{الف- } (\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5), \text{ ب- } (\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$$

$$\text{پ- } (\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 5), \text{ ت- } (\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 0.3)$$

Fig. 4. Variation of the natural frequencies normalized to those of the single building, damping included

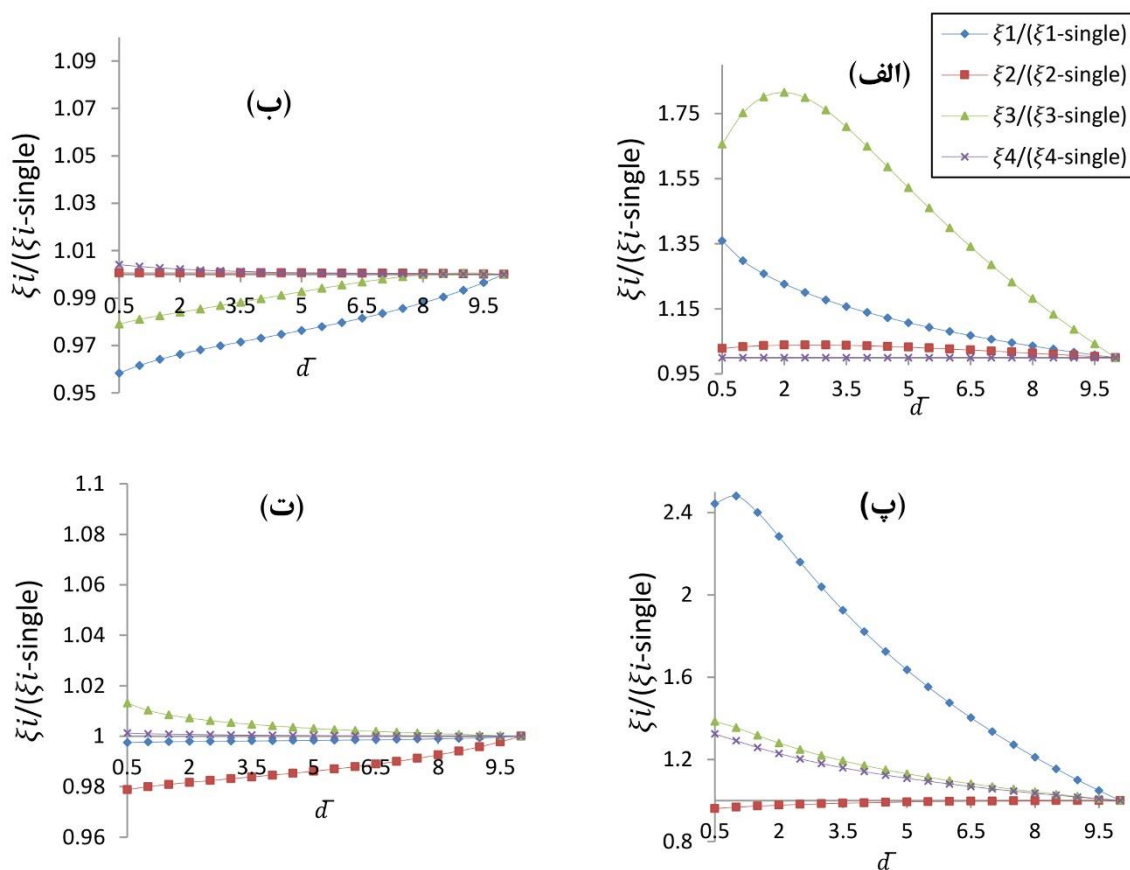
که با افزایش فاصله، مشخصات دینامیکی سیستم به مشخصات سازه تک میل می نماید که مطابق با شرایط فیزیکی مسئله است. از سوی دیگر، نتایج کلی بندهای ۴-۱ و ۴-۲ با نتایج موردی مراجع ۳، ۴ و ۱۴ که تعداد کمی از حالات (از نظر تعداد و فاصله ساختمانها و نرمی خاک) را بررسی کرده اند مطابقت دارد درحالیکه در این مقاله بررسی بسیار جامعتری از نظر دامنه تغییرات پارامترها به عمل آمده است.

۵- پاسخ هارمونیک سیستم با محاسبه در حوزه های فرکانس و زمان

۵-۱ محاسبه ی پاسخ سیستم در حوزه ی فرکانس

با توجه به معادله ی (۱۵) پاسخ سیستم در حوزه ی فرکانس از

سبک، در نظر گرفتن اندرکنش متقابل موجب افزایش میرایی سیستم خصوصاً در مود مربوط به حرکت گهواره ای ساختمان ۱ می شود که بیشینه ی تغییرات آن نسبت به حالت بدون مجاورت در حالت اندرکنش کم ۸۱٪ و در اندرکنش زیاد ۱۴۷٪ است. در مقابل، اندرکنش متقابل تأثیر چندانی بر میرایی هیچ یک از مودها در ساختمان کوتاه و سنگین ندارد. با مقایسه ی نمودارهای حاصله در این قسمت و قسمت قبل نتیجه گیری می شود که در نظر گرفتن میرایی موجب آگاهی از مودهای با اهمیت ناچیز شده و با حذف این مودها می توان دریافت که مجاورت تأثیر چندانی بر مشخصات دینامیکی ساختمان کوتاه و سنگین ندارد، در حالیکه ساختمان بلند و سبک بیشتر تحت تأثیر مجاورت است. مشابه شکل ۳، در شکلهای ۴ و ۵ هم مشاهده می شود



شکل ۵. تغییرات نسبت های میرایی سیستم نسبت به حالت بدون مجاورت بر حسب \bar{d} .

الف- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ ، ب- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$

پ- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 5)$ ، ت- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 10, \bar{h}_1 = 0.3)$

Fig. 5. Variation of the damping ratios normalized to those of the single building

U_2 ، حداکثر مقادیر $|U_1|$ و $|U_2|$ در بازه $0 \leq \beta \leq 30$ محاسبه شده و نسبت به مقادیر متناظر در حالت بدون مجاورت نرمال شده اند. تغییرات این مقادیر نسبت به \bar{d} در حالات $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ و $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 5)$ برای ساختمان سبک و بلند و $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$ و $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 0.3)$ برای ساختمان کوتاه و سنگین در شکل ۶ نمایش داده شده است.

باتوجه به شکل فوق، در ساختمان های بلند و سبک، برای مقادیر کوچکتر \bar{S} که نشان دهنده ی خاک سخت تر است، اندرکنش متقابل موجب کاهش پاسخ هر دو سازه می شود. در این حالت بیشترین میزان کاهش مقدار پاسخ برای سازه ی ۱، ۲۸٪ و برای سازه ی ۲، ۱۰٪ می باشد. در همین ساختمان برای مقادیر بزرگتر \bar{S}

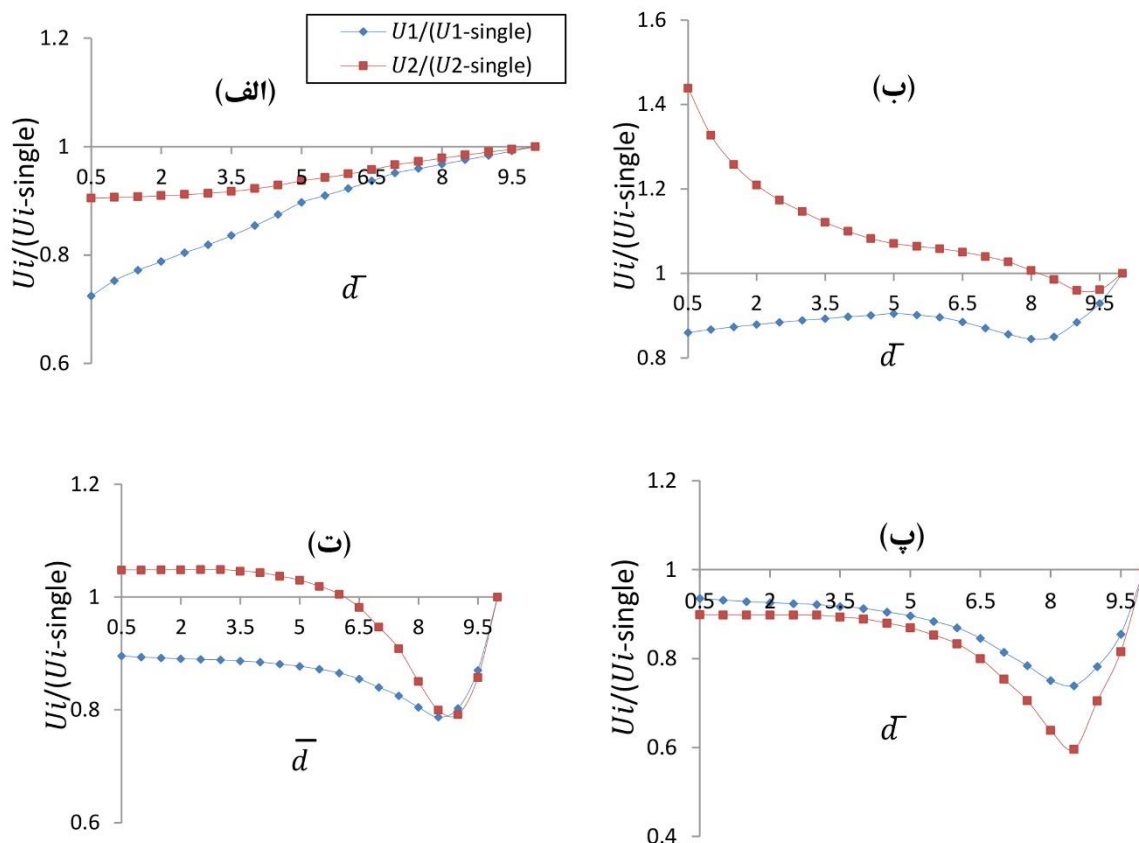
رابطه ی زیر حاصل می شود:

$$\{\bar{U}\} = (-\beta^2 [M] + i\beta [C] + [K])^{-1} \{\bar{P}\} \quad (65)$$

همانطور که قبلاً گفته شد بردار $\{\bar{U}\}$ شامل ۶ مؤلفه است که سه مؤلفه ی اول آن مربوط به مولفه های جابجایی سازه ی ۱ و سه مؤلفه ی دوم مربوط به سازه ی ۲ می باشد. بنابراین مقادیر جابجایی کل سازه های ۱ و ۲ در حوزه ی فرکانس به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} U_1 = \bar{u}_1 + \bar{u}_{b1} + h_1 \bar{\theta}_1 \\ U_2 = \bar{u}_2 + \bar{u}_{b2} + h_2 \bar{\theta}_2 \end{cases} \quad (66)$$

با استفاده از روابط فوق و با توجه به مختلط بودن مقادیر U_1 و



شکل ۶. پاسخ سازه های ۱ و ۲ نسبت به حالت بدون مجاورت بر حسب \bar{d} .

الف- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ ، ب- $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 5)$

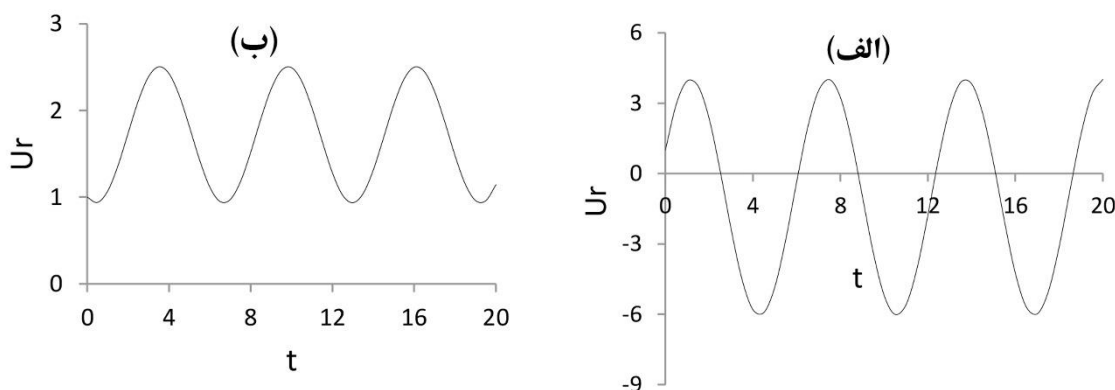
پ- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 0.3)$ ، ت- $(\bar{m}_1 = 5, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 0.3)$

Fig. 6. Response of the structures 1 and 2 normalized to that of the single building

۲، ۴٪ می باشد.

بنابر مطالب گفته شده، در هر دو سازه، کاهش سختی خاک موجب افزایش پاسخ سازه ی ۲ که سازه ی سخت تر است، نسبت به حالت بدون مجاورت می شود، بنابراین می توان نتیجه گرفت اندرکنش متقابل در خاکهای نرم تر موجب افزایش پاسخ سازه با فرکانس بیشتر و کاهش پاسخ سازه با فرکانس کمتر می شود. علاوه بر این، در شکل ۶ همگرایی سریعتر واکنش حداکثر سیستم به بیشینه واکنش سازه تک در حالات الف و ب مشاهده می گردد. همچنین، نتایج کلی تغییرات واکنش که از بررسی حالات متنوعی در این مقاله به دست آمده است، با نتایج موردی مراجع ۴، ۱۲، ۱۴ و ۱۵ همخوانی مناسبی دارد.

که نشان دهنده ی خاک نرم تر یا ساختمان سخت تراست، مجاورت موجب کاهش پاسخ سازه ی ۱ و افزایش پاسخ سازه ی ۲ در فواصل کم می شود. در این حالت بیشترین مقدار تغییرات پاسخ برای سازه ی ۱، ۱۶٪ کاهش و برای سازه ی ۲، ۴۳٪ افزایش می باشد. در ساختمان کوتاه و سنگین، در مقادیر کوچکتر \bar{S} ، اندرکنش متقابل موجب کاهش پاسخ هر دو سازه شده و بیشترین مقدار کاهش پاسخ برای سازه ی ۱، ۲۷٪ و برای سازه ی ۲، ۴۱٪ می باشد. در همین ساختمان برای مقادیر بزرگتر \bar{S} مشابه با ساختمان بلند و سبک، مجاورت موجب کاهش پاسخ سازه ی ۱ و افزایش پاسخ سازه ی ۲ در فواصل کم دو سازه می شود به طوریکه بیشترین مقدار کاهش پاسخ برای سازه ی ۱، ۲۲٪ و بیشترین مقدار افزایش پاسخ برای سازه ی



شکل ۷. فاصله بین دو سازه بر حسب زمان.

$$\text{الف} - (\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5) \quad \text{ب} - (\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 5)$$

Fig. 7. Time history of the distance between the structural masses

و خاک حتی در حالت خطی اغلب در حوزه فرکانس حل شده اند که منجر به تحلیل اعداد مختلط می گردد که برای استفاده های مهندسی مطلوب و خوشایند نیست. مطالعات و محاسبات فوق نشان می دهد که در تحلیل های خطی به راحتی می توان از حوزه ی زمان برای مسائل اندرکنش متقابل سازه-خاک-سازه نیز بهره جست.

۶- بررسی بروز ضربه بین دو سازه

در این قسمت به شناسایی حالاتی که در آنها امکان وقوع ضربه بین دو ساختمان مجاور هست، پرداخته می شود. بدین منظور پارامتر U_r که معرف فاصله ی بین دو سازه است، تعریف شده است. با محاسبه ی مقدار این پارامتر، می توان گفت که مثبت بودن آن به منزله ی عدم برخورد (وجود فاصله بین دو سازه) و منفی بودن آن، نشان دهنده ی وقوع برخورد بین سازه های مجاور است. در تحلیل زمانی سیستم، تابع تحریک زلزله برابر با $u_g = \sin(\omega t)$ در نظر گرفته شد. با توجه به روابطی که قبلاً ذکر گردید، مقادیر U_1 و U_2 را می توان بر حسب زمان به ازای \bar{d} و β معلوم طبق رابطه ی (۶۸) بدست آورد. این مقادیر به صورت اعداد حقیقی مثبت یا منفی می باشند. در اینجا برای دو سازه ی مجاور، ۴ حالت نسبت به یکدیگر می توان در نظر گرفت که بسته به وقوع هر یک، پارامتر U_r به صورت زیر تعریف می شود:

۵-۲ محاسبه ی پاسخ سیستم در حوزه ی زمان

با توجه به معادله ی (۳۴) پاسخ سیستم در حوزه ی زمان از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\{\bar{U}\} = ([K] + \beta[C] - \beta^2[M])^{-1} \{\bar{P}\} \quad (۶۷)$$

طبق روابط (۳۲) و (۳۳) پاسخ کل هر یک از دو سازه بر حسب زمان طبق رابطه ی (۶۸) حاصل می گردد:

$$\begin{cases} U_1 = (\bar{u}_1 + \bar{u}_{b1} + h_1 \bar{\theta}_1) \sin(\omega t) + (\bar{u}_1 + \bar{u}_{b1} + h_1 \bar{\theta}_1) \cos(\omega t) \\ U_2 = (\bar{u}_2 + \bar{u}_{b2} + h_2 \bar{\theta}_2) \sin(\omega t) + (\bar{u}_2 + \bar{u}_{b2} + h_2 \bar{\theta}_2) \cos(\omega t) \end{cases} \quad (۶۸)$$

بنابراین می توان حداکثر تغییر مکان سازه های ۱ و ۲ را طبق روابط زیر محاسبه نمود:

$$\begin{cases} U_1 = \sqrt{(\bar{u}_1 + \bar{u}_{b1} + h_1 \bar{\theta}_1)^2 + (\bar{u}_1 + \bar{u}_{b1} + h_1 \bar{\theta}_1)^2} \\ U_2 = \sqrt{(\bar{u}_2 + \bar{u}_{b2} + h_2 \bar{\theta}_2)^2 + (\bar{u}_2 + \bar{u}_{b2} + h_2 \bar{\theta}_2)^2} \end{cases} \quad (۶۹)$$

محاسبه ی مقادیر حداکثر U_1 و U_2 در بازه ی $0 \leq \beta \leq 30$ که نسبت به مقادیر متناظر در حالت بدون مجاورت مقیاس شده اند منجر به نمودارهایی عیناً مشابه با شکل ۶ می گردد که نشان دهنده ی امکان استفاده از هر دو تحلیل زمانی و فرکانسی به منظور فوق است. از نقطه نظر عملی، در ادبیات مهندسی زلزله، مسائل اندرکنش سازه

شدید میرایی سیستم، تا دو نیم برابر، در مود گهواره ای ساختمان بلند و سبک می شود درحالیکه بر میرایی ساختمان کوتاه و سنگین تاثیر چندانی ندارد.

همچنین از تحلیل هارمونیکی سیستم نتیجه می شود که روی خاکهای سخت تر که اندرکنش سازه با خاک کم است، مجاورت موجب کاهش پاسخ هر دو سازه شده که بیشینه کاهش در حدود ۴۰ درصد می باشد. روی خاکهای نرم تر که اندرکنش زیادتر است، مجاورت پاسخ سازه ی سخت تر بین دو سازه ی مجاور را در ساختمانهای بلند و سبک تا ۴۳٪ افزایش داده و باعث کاهش پاسخ سازه ی نرم تر تا ۱۶٪ می شود. در حالت اخیر، اگر ساختمانها کوتاه و سنگین باشند نیز تغییرات واکنش به همین ترتیب بوده ولی دامنه آن بسیار محدودتر است طوریکه مقادیر افزایش و کاهش به ترتیب ۴ و ۲۲ درصد می باشد. با مقایسه ی نتایج حاصله در حوزه های زمان و فرکانس نتیجه گیری می شود که به راحتی می توان از تحلیل در حوزه ی زمان برای تعیین مقادیر فرکانس های طبیعی، نسبت های میرایی، واکنش دینامیکی سیستم اندرکنشی و تعیین امکان برخورد دو سازه استفاده کرد که مزیت بزرگ آن کار با اعداد حقیقی است.

مراجع

- [1] Rahman, A. M. Car, A. J. and Moss, P. J., "Seismic pounding of a case of adjacent multiple-storey buildings of differing total heights considering soil flexibility effects", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 40-59, 2001.
- [2] Mulliken, J. S. and Karabalis, D. L., "Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3D foundations and structures", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 687-710, 1998.
- [3] Behnamfar, F. Kermani, M. and Saadatpour, M., "Variation of natural frequencies of adjacent structures resting on flexible soil", *6th International Conference of Civil Engineering*, Esfahan, Iran, 2003.
- [4] Yahyai, M. Mirtaheri, M. Mahoutian, M. Daryan, A. and Assareh, M., "Soil Structure Interaction between Two Adjacent Buildings under Earthquake Load", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, pp. 121-125, 2008.

$$U_r = \begin{cases} d - |U_1| + |U_2| & U_1 > 0, U_2 > 0 \\ d - |U_1| - |U_2| & U_1 > 0, U_2 < 0 \\ d + |U_1| + |U_2| & U_1 < 0, U_2 > 0 \\ d + |U_1| - |U_2| & U_1 < 0, U_2 < 0 \end{cases} \quad (70)$$

در ادامه، برای مثال، پارامتر U_r به ازای $\beta = 1$ و برای مقادیر $\bar{d} = 0.1$ و $a = 10$ محاسبه می شود. نمودارهای زیر تغییرات این پارامتر را بر حسب زمان نشان می دهد. همانطور که گفته شد مقادیر منفی برای U_r نشان دهنده ی وقوع برخورد بین دو سازه مجاور است.

طبق شکل بالا نتیجه گیری می شود که برای مقادیر $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 0.75, \bar{h}_1 = 5)$ در حالت $\beta = 1$ برخورد رخ می دهد درحالیکه برای $(\bar{m}_1 = 0.3, \bar{s}_1 = 5, \bar{h}_1 = 5)$ به ازای $\beta = 1$ وقوع برخورد ممکن نیست. البته باید توجه نمود که از شکل هایی مشابه با شکل ۶ فقط برای بررسی وقوع یا عدم وقوع ضربه استفاده می شود. پس از اولین برخورد، مثلا در شکل ۶-الف از لحظه ۲/۵ ثانیه به بعد، مقادیر تغییرمکانها با آنچه در شکل دیده می شود متفاوت خواهد بود.

۸- جمع بندی

در این مطالعه با بررسی مدل ساده ای از دو سازه ی متفاوت مجاور واقع بر خاک انعطاف پذیر و از طریق تحلیل در حوزه های زمان و فرکانس، تاثیر اندرکنش متقابل بر فرکانس های طبیعی سیستم و تغییرمکان هارمونیکی سازه های مجاور بررسی گردید. نتایج نشان می دهد که اندرکنش متقابل موجب افزایش فرکانس های طبیعی مربوط به حرکات افقی و گهواره ای تکیه گاه سیستم می گردد. با حذف میرایی بیشترین تاثیر مجاورت در مودهای مربوط به حرکت افقی پایه دیده می شود و در مودهای مربوط به حرکت افقی روسازه تغییر فرکانس چندانی مشاهده نمی شود. بیشترین مقدار افزایش فرکانس مود حرکت افقی پایه نسبت به حالت بدون مجاورت، برای ساختمان سبک و بلند ۲۱٪ و برای ساختمان کوتاه و سنگین ۱۸٪ می باشد. همچنین با لحاظ نمودن میرایی نتیجه گیری می شود که مودهایی که از اهمیت کمتری برخوردارند مربوط به حرکت افقی و گهواره ای پایه در سازه ی سخت تر است. در ارتباط با نسبت میرایی نیز دیده می شود که در نظر گرفتن اندرکنش متقابل موجب افزایش

- two and three adjacent buildings (SSSI)", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 89, pp. 219-232, 2016.
- [12] Ghandil, M., Behnamfar, F., Vafaeian, M.. "Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 80, pp. 149-162, 2016.
- [13] Kirkwood, P., Dashti, S. "A centrifuge study of seismic structure-soil-structure interaction on liquefiable ground and implications for design in dense urban areas", *Earthquake Spectra*, Vol. 34 No. 3, pp. 1113-1134, 2018.
- [14] Bybordiani, M. and Arici, Y. "Structure-soil-structure interaction of adjacent buildings subjected to seismic loading", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 48, pp. 731-748, 2019.
- [15] Ngo VL, Kim JM, Chang SH, Lee C. "Effect of height ratio and mass ratio on structure-soil-structure interaction of two structures using centrifugal experiment", *Applied Sciences*, Vol. 9, 536-561, 2019.
- [16] ASCE, "Seismic rehabilitation of existing buildings, ASCE Standard ASCE/SEI 41-06", *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia, 2007.
- [17] Document No. 360. "Instructions for Seismic Strengthening of Existing Buildings", *Office for Technical Affairs, Criteria Development and Reduction of Earthquake Vulnerability*, Tehran, Iran, 2005.
- [18] Wolf, J. P., *Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- [19] Asghari, A., *Modal analysis method for linear structures located on fixed and flexible bases*, MSc thesis, Isfahan University of Technology, 2005.
- [5] Cole, G. Chouw, N. and Dhakal. R., "Building and bridge pounding damage observed in the 2011 Christchurch Earthquake ", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 334-341, 2011.
- [6] Mahmoud, S. Abd-Elhamed, A. and Jankowski, R., "Earthquake-induced pounding between equal height multi-storey buildings considering soil-structure interaction" *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 1021-1048, 2012.
- [7] Naserkhaki, S. Abdul Aziz, F. N. A. and Pourmohammad, H., "Earthquake induced pounding between adjacent buildings considering soil-structure interaction", *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 11, pp. 343-358, 2012.
- [8] Farghaly, A. A., "Optimization of viscous dampers with the influence of soil structure interaction on response of two adjacent 3-D buildings under seismic load", *International Organization of Scientific Research Journal of Engineering*, Vol. 04, pp. 18-27, 2014.
- [9] Dobre, D. Dragomir, C. and Georgescu, E., "Pounding effects during an earthquake, with and without consideration of soil-structure interaction", *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, 2014.
- [10] Pawar, P. D. and Murnal, P. B., "Effect of seismic pounding on adjacent buildings considering soil-structure interaction", *International Journal of Advance Foundation and Research in Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 286-294, 2015.
- [11] Aldaikh, H., Alexander, N.A., Ibraim, E., Knappett, J. "Shake table testing of the dynamic interaction between

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Madani, F. Behnamfar, Parametric Study of Structure-Soil-Structure Interaction in Time and Frequency Domains, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2761-2778.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16156.6143



