

مطالعه عددی تاثیرات اندرکنش سازه-خاک-سازه بر ضریب بزرگنمایی تغییرمکان و اصلاح آن برای قاب خمشی فولادی ویژه

رضا اسماعیل زاده شهری^۱، عباس کرم‌الدین^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده

با توجه به اهمیت ضریب بزرگنمایی تغییرمکان Cd در طراحی سازه‌ها و عدم در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه در پاسخ سازه‌ها، این مقاله اثرات مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر این ضریب، در سامانه سازه-خاک-سازه را بررسی کرده است. پارامترهای کلیدی شامل دوره تناوب سازه اصلی ($T1$) و مجاور ($T2$)، فاصله سازه‌ها (d) و نوع خاک هستند. هدف از این پژوهش، اصلاح ضریب Cd در قاب‌های فولادی ویژه تحت اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه، بدون مدل‌سازی سازه مجاور است. برای این منظور ۶ سازه ۲ تا ۱۵ طبقه واقع بر دو نوع خاک رسی به صورت دوتایی در سه فاصله صفر، ۱۰ و ۲۵ متری با استفاده از روش مستقیم به صورت غیرخطی مدل و با استفاده از روش تاریخچه زمانی غیرخطی تحلیل شده‌اند. بر اساس نتایج این کار، تکیه‌گاه نرم منجر به ایجاد طبقه نرم به دلیل افزایش شدید دررفت طبقه اول نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت می‌شود که حداقل این نسبت ۱/۱ و حداکثر آن ۳/۶۱ است؛ به طوری که با افزایش $T1$ و $T2$ مقدار این نسبت بیشتر می‌گردد. از طرفی برای سازه‌های اصلی با $T1$ در محدوده ۰/۷ تا ۱/۵ برابر دوره تناوب خاک، دررفت سازه دچار تشدید می‌شود. در نهایت با استفاده از نتایج کار و تحلیل رگرسیون، بر مبنای طیف پاسخ دررفت سازه‌ها روابطی جهت اصلاح ضریب Cd ارائه شده است. بر اساس رابطه به دست آمده، برای طراحی سازه بایستی مقادیر دررفت به خصوص دررفت طبقه اول افزایش یابد.

کلمات کلیدی: اندرکنش سازه-خاک-سازه، اندرکنش خاک-سازه، ضریب بزرگنمایی تغییرمکان، دررفت سازه، طبقه نرم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.113313.1424	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.113313.1424	۱۳۹۸/۱۰/۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۰۱/۲۷	۱۳۹۶/۱۰/۱۶
			عباس کرم‌الدین		*نویسنده مسئول:	
			a-karam@um.ac.ir		پست الکترونیکی:	

Numerical Study of Structure-Soil-Structure Interaction Effects on Deflection Amplification Factor and Correction for Special Steel Moment Frames

Reza Esmailzadeh Shahri ¹ Abbas Karamodin ^{*2}

1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Considering the importance of the deflection amplification factor, C_d , in the structural design and the lack of consideration of the structure-soil-structure interaction effects on structural response, this paper has investigated the effects of the most important parameters affecting this factor in the structure-soil-structure systems. Key parameters are period of main (T_1) and adjacent (T_2) structures, distance between the structures (d) and type of soil. The purpose of this study is to correct the C_d coefficient in steel moment frames under the influence of structural-soil-structure interaction effect. For this aim, 6 structures of 2 to 15 story based on two types of clay soil in a three distances of zero, 10 and 25 meters using direct method is modelled and analyzed with nonlinear time history method. According to the results, most of the story drifts is concentrated at the first story due to soft base. The minimum ratio of first story drift with respect to the fix-base, is 1.1 and the maximum is 3.61. Increasing T_1 and T_2 , the value of this ratio is increased. For the main structures with T_1 in the range of 0.7 to 1.5 times the soil period, the structural drift is intensified. Finally, using the results of this study and regression analysis, a correlation coefficient for the C_d is presented based on the spectral response of the structural drift. Based on the obtained relationship, story drifts, especially at first story, should be increased for the design of the structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 January 2018

Revise Date: 16 April 2018

Accept Date: 17 May 2018

Keywords:

Structure-soil-structure interaction, Soil-structure interaction, Deflection amplification factor, Structural drift, Soft story

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.113313.1424

*Corresponding author: Abbas Karamodin

Email address: a-karam@um.ac.ir

۱- مقدمه

تغییر شکل سازه‌ها یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی و شناخت رفتار سازه‌ها است. علاوه بر این، در بحث طراحی بر اساس عملکرد هم، تغییر شکل سازه نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در اغلب کارهای پژوهشی و اجرایی، محاسبه پاسخ سازه به‌خصوص تغییر شکل آن، بر مبنای ثابت بودن تکیه‌گاه انجام می‌شود؛ در حالی که در واقعیت، تکیه‌گاه سازه دارای تغییر شکل است. اهمیت این مسئله از آنجا افزایش می‌یابد که چندین سازه مجاور بر روی این تکیه‌گاه غیر ثابت و نرم (خاک) احداث شوند. با این کار امکان انتقال امواج یک سازه به سازه دیگر از طریق خاک وجود دارد (اندرکنش سازه-خاک-سازه)؛ بنابراین بررسی تغییر شکل سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه از اهمیت بالایی برخوردار است.

در دهه ۷۰ میلادی که اندرکنش سازه-خاک-سازه معرفی شده بود [۱]، بررسی اثرات این پدیده در پاسخ‌های تغییر شکل سازه، بخش مهمی از تحقیقات را در بر گرفت [۲، ۳]. با توسعه روش‌های عددی نظیر اجزای محدود و اجزای مرزی، لین و همکاران [۴] در یک مطالعه پارامتریک به بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه بر پاسخ سازه با تمرکز بر روی دو مؤلفه فاصله و مدفون‌شدگی پرداختند. در ادامه، گوان و نواک [۵، ۶] و هم‌چنین کیان و بسکاس [۷] با استفاده از روش اجزای مرزی اقدام به بررسی پاسخ‌های سازه کردند. در پژوهش‌های اخیر، قندیل و بهنام‌فر [۸، ۹]، با استفاده از روش خطی معادل و اصلاح آن به بررسی اندرکنش سازه-خاک-سازه پرداختند. آن‌ها با کاهش ثابت برشی و افزایش میرایی، این روش را برای تمامی سامانه‌ها کارآمد کردند.

مطالعه آزمایشگاهی اندرکنش سازه-خاک-سازه، از دیگر زمینه‌های تحقیقاتی در مورد آن می‌باشد. کلوتیو و همکاران [۱۰] با هدف بهبود بخشیدن روش ترکیبی اجزای محدود و اجزای مرزی برای استفاده در اندرکنش سازه-خاک-سازه و اندرکنش خاک-سازه با استفاده از آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌های واقعی و آزمایشگاهی، تحقیقات خود را انجام دادند. ترومیتا و همکاران [۱۱، ۱۲] دو نوع سازه (یک سازه کوتاه با قاب ارتجاعی و یک سازه ساخته‌شده با دیوار برشی و ارتفاع متوسط) را برای مطالعه اندرکنش سازه-خاک-سازه، با دستگاه سانتریفیوژ آزمایش کردند.

در طراحی انواع سازه‌ها، ابتدا سازه تحلیل خطی می‌شود و برای تبدیل تغییر شکل‌های خطی به غیرخطی، از ضریب بزرگنمایی تغییر شکل C_d استفاده می‌شود؛ اما اثرات تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر در این ضریب لحاظ نشده است. اثرات تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر که شامل اندرکنش خاک-سازه و سازه-خاک-سازه می‌گردد، باعث تغییر در مقادیر تغییر شکل سازه می‌شود. در ASCE7-10 [۱۳] و NIST GCR 12-917-21 [۱۴] برای اصلاح پاسخ تغییر شکل سازه در ترازهای ارتفاعی، رابطه (۱) بیان شده است:

$$\tilde{\delta}_x = \tilde{V} \left[\frac{M_0 h_x}{K_\theta} + \delta_x \right] \quad (1)$$

که در آن، \tilde{V} ، V ، M_0 ، h_x و K_θ و δ_x به ترتیب بیانگر برش پایه کاهش‌یافته در اثر اندرکنش خاک-سازه (بر اساس بند ۱۹-۲-۱ استاندارد ASCE7-10 [۱۳] و پیوست ۵ استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵])، برش پایه حالت تکیه‌گاه ثابت، لنگر واژگونی در پای سازه، ارتفاع تراز موردنظر، سختی حرکت گهواره‌ای پی و تغییر مکان جانبی سازه در حالت تکیه‌گاه ثابت است. با ضرب $\tilde{\delta}_x$ در C_d پاسخ غیرخطی سازه تحت اثر اندرکنش خاک-سازه به دست می‌آید. رابطه (۱) نقایصی از جمله عدم احتساب حرکت انتقالی و دورانی پی، عدم تأثیر مناسب اندرکنش حرکتی، تغییر شکل‌های غیرخطی خاک و اندرکنش سازه-خاک-سازه دارد؛ لازم به ذکر است که در ASCE7-16 [۱۶] این رابطه حذف شده است. با این اوصاف نیاز به بررسی‌های بیشتر در مورد اندرکنش سازه‌های مجاور محسوس است. هدف از این پژوهش، مطالعه عددی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر اندرکنش سازه-خاک-سازه در جهت شناخت و پیش‌بینی رفتار سازه‌ها، تعیین محدوده‌های تأثیرگذاری پارامترهای اصلی بر پاسخ‌های سازه و ارائه رابطه‌ای در جهت اصلاح ضریب بزرگنمایی تغییر شکل با احتساب اندرکنش سازه-خاک-سازه است.

۲- مدل سازی سامانه

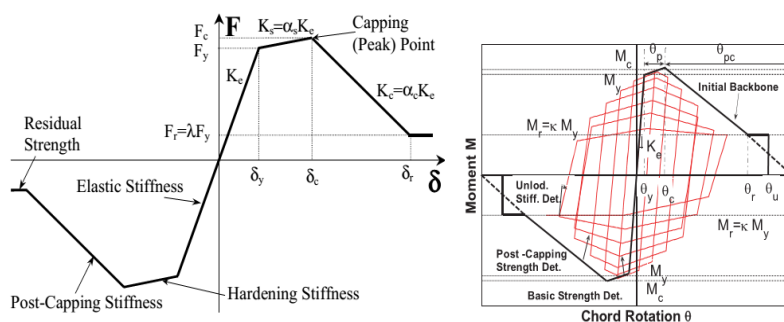
۲-۱- سازه‌ها

برای این پژوهش، سازه‌های ۲، ۳، ۶، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه با ارتفاع ۳ و دهانه‌های ۵ متری در نظر گرفته شده که برای طراحی این سازه‌ها از آیین‌نامه AISC360 [۱۷] استفاده گردیده است. همه سازه‌ها از نوع قاب خمشی ویژه با بار مرده ۷ و زنده ۲ کیلو نیوتن بر مترمربع و تنش تسلیم ۲۳۵ و نهایی ۳۶۲ مگا پاسکال هستند. سقف سازه‌ها همگی به صورت دیافراگم صلب فرض شده است. مشخصات مقاطع سازه‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات مقاطع سازه‌ها و دوره تناوب آن‌ها

دوره تناوب (ثانیه)	مقاطع		طبقه
	تیر	ستون	
۰/۶۶۱	IPE300,270	IPE270,240	۲
۱/۰۳۵۲	IPE300,270	BOX200X16,180X10	۳
۱/۳۵۹۲	IPE360,330,270	BOX300X25,280X20,200X16	۶
۱/۷۲۷۹	IPE450,400,330	BOX320X20,300X25,260X16	۱۰
۲/۰۸۸	IPE450,360,300	BOX320X25,320X20,260X16	۱۲
۲/۵۴۱	IPE450,400,330	BOX340X25,320X25,260X20	۱۵

برای اعمال رفتار غیرخطی بر المان‌های سازه از مدل پلاستیسیته متمرکز استفاده شده است. با توجه به خمشی بودن اتصالات، مفاصل پلاستیک تنها در دو انتهای المان‌ها با استفاده از فنرهای غیرخطی و سایر قسمت‌های سازه به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. برای تعریف رفتار فنرها، مدل ایبارا-کراوینکلر اصلاح شده [۱۸، ۱۹] (شکل ۱) به کار گرفته شده است. در شکل ۱، سختی الاستیک (K_e) با استفاده از سختی دورانی عضو K_{mem} ($6EI/L$) محاسبه می‌شود و سختی قسمت سخت‌شدگی کرنشی (K_s) و $post-capping$ (K_c) به صورت کسری از سختی الاستیک به دست می‌آید. مقدار ضریب سخت‌شدگی کرنشی (α_s) و $post-capping$ (α_c) فنر غیرخطی برابر ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است [۱۸]. سایر پارامترها که شامل ظرفیت شکل‌پذیری فنرها (δ_o/δ_y)، درصد مقاومت باقی‌مانده (K)، حداکثر دوران (θ_{II}) و دوران‌های مشخص شده در شکل ۱ (θ_p و θ_{pc}) با استفاده از ASCE41 [۲۰] محاسبه شده‌اند.



شکل ۱. رفتار غیرخطی مفاصل پلاستیک تعبیه‌شده در فنرهای دو انتهای المان‌ها [۱۸، ۱۹]

روابط موردنیاز برای محاسبه پارامترهای نشان داده‌شده در شکل ۱ به صورت روابط (۲) تا (۷) بیان شده است [۱۸]:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_{s,mem}}{n+1-n\alpha_{s,mem}} \quad (2)$$

$$\alpha_c = \frac{\alpha_{c,mem}}{n+1-n\alpha_{c,mem}} \quad (3)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta_y} = \left[\left(\frac{\delta_c}{\delta_y} \right)_{mem} - 1 \right] (1 - \alpha_{s,mem}) n + \left(\frac{\delta_c}{\delta_y} \right)_{mem} \quad (4)$$

$$\gamma_s = (n+1)\gamma_{mem} \quad (5)$$

$$K_e = (n+1)K_{mem} \quad (6)$$

$$K_{bc} = \frac{n+1}{n} K_{mem} \quad (7)$$

که در آن‌ها مقدار n برابر با ۱۰ فرض شده است [۱۸]. n پارامتری برای تبدیل مفصل پلاستیک به فنر غیرخطی است؛ از این رو می‌توان گفت سختی الاستیک فنر n برابر سختی الاستیک دورانی عضو است.

۲-۲- خاک

برای تحلیل سامانه‌ها از دو نوع خاک رس استفاده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها در جدول ۲ آمده که نام‌گذاری نوع خاک انتخابی که بر اساس ASCE7 [۱۳] انجام گرفته است، برابر تیپ ۳ و ۴ می‌گردد؛ در حالی که طبق استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵]، خاک‌ها در دو تیپ ۳ و ۴ گروه‌بندی می‌شوند. با توجه به این‌که در این مقاله از روش مستقیم جهت مدل‌سازی سامانه سازه-خاک-سازه استفاده شده، لازم است تا ابعاد کلی و جزئی سامانه به گونه‌ای انتخاب گردد تا رفتار واقعی خاک شبیه‌سازی شود. ابعاد کلی سامانه (شکل ۲) با استفاده از روش سعی و خطا تعیین شده است [۹]، به طوری که با افزایش مقدار ابعاد، پاسخ سامانه پایدار بماند؛ از این رو پاسخ‌های سازه و خاک در محدوده مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ پایدار شده‌اند. ابعاد المان‌های خاک باید از یک‌دهم کوچک‌ترین طول موج زلزله کمتر باشد [۲۱]؛ از این رو مقدار این ابعاد ۲/۵ متر فرض شده است.

مدل رفتاری خاک از نوع الاستوپلاستیک است که روابط حوزه پلاستیک آن بر اساس نظریه چندصفحه‌ای به دست آمده و صفحات تسلیم آن از نوع ون‌میسز می‌باشد [۲۲]. این رفتار بر روی المان‌های چهار گرهی برای مدل‌سازی خاک اعمال شده است.

۳-۲- میرایی

در تحلیل دینامیکی سامانه‌های سازه-خاک-سازه، میرایی سازه با استفاده از میرایی رایلی و با در نظرگیری ۵ درصد میرایی برای موده‌های اول و سوم تعریف شد. هم‌چنین میرایی خاک که برای مستهلک کردن امواج بازتاب‌شده از سازه و پی به درون محیط خاک تعریف می‌شود، با استفاده از میراگرهای ویسکوز در راستای دو مرز قائم سامانه با ضریب میرایی ρAV_s که چگالی خاک، A سطح مقطع مشترک میراگر و V_s سرعت موج برشی است، تعبیه‌شده‌اند.

۳- روش اصلاح ضریب C_d

برای اصلاح تغییرشکل سازه تحت اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه در این پژوهش، اقدام به اعمال ضرایبی (C_m) در مقادیر C_d شده است. با توجه به حذف رابطه (۱) از ASCE7-16 [۱۶]، برای دستیابی به مقادیر ضرایب اصلاحی، از رابطه (۸) استفاده شده است:

$$C_{d,m} = C_d \times C_m \quad (۸)$$

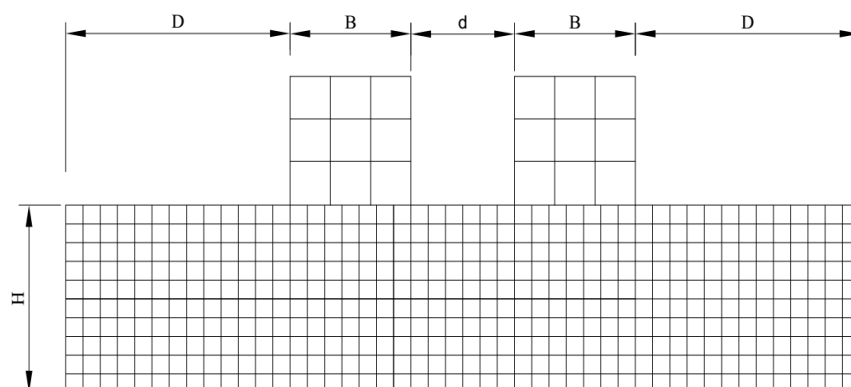
که در آن، $C_{d,m}$ و C_d به ترتیب ضریب بزرگنمایی اصلاح‌شده و ضریب بزرگنمایی آیین‌نامه و C_m از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$C_m = \frac{d_{SSSI,Model}}{d_{fix,Code}} \quad (۹)$$

که در آن، $d_{SSSI,Model}$ و $d_{fix,Code}$ به ترتیب حداکثر دریافت غیرخطی سامانه اندرکنش سازه-خاک-سازه مدل‌شده در نرم‌افزار و حداکثر دریافت غیرخطی حالت تکیه‌گاه ثابت با استفاده از آیین‌نامه است.

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی خاک

نوع خاک	V_s (m/s)	G_{max} (Kpa)	C_u (Kpa)	T_s (s)
۳	۲۰۰	۷۲,۰۰۰	۸۰	۰/۹۱
۴	۱۷۰	۵۲,۰۲۰	۴۵	۱/۰۸



شکل ۲. مشخصات ابعادی سامانه سازه-خاک-سازه

جدول ۳. مقادیر عددی ابعاد سامانه سازه-خاک-سازه برحسب متر

د	H	B	D	نوع خاک
۱۰، ۲۵ و ۱۰۰	۴۵	۱۵	۴۰	۳
	۴۵	۱۵	۷۰	E

الگوریتم محاسبه ضریب اصلاحی تغییرشکل $C_{d,m}$ به این صورت است که در گام اول، نسبت کلیه دریافت سامانه‌های سازه-خاک-سازه به دریافت سازه‌های متناظر در حالت تکیه‌گاه ثابت (تحت اثر بارگذاری جانبی بیان شده در استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵]) در قالب C_m محاسبه شده است؛ در گام بعد، با انجام تحلیل رگرسیون، رابطه‌ای برای ضرایب اصلاحی C_m به دست آمده است. برای دستیابی به این مقادیر، از تحلیل‌های تاریخچه زمانی در محیط نرم‌افزار OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) [۲۳] استفاده شده است. این تحلیل‌ها برای ۶ سازه فولادی در محدوده دوره تناوب ۰/۶۶۱ تا ۲/۵۴۱ ثانیه به صورت دوبعدی در سه فاصله مختلف صفر، ۱۰ و ۲۵ متری با استفاده از ۸ رکورد زلزله و دو نوع خاک، به صورت غیرخطی انجام گرفته است (در مجموع ۱۲۶ سامانه و نزدیک به ۱۰۰۰ تحلیل).

۴- تحلیل اندرکنش سازه-خاک-سازه

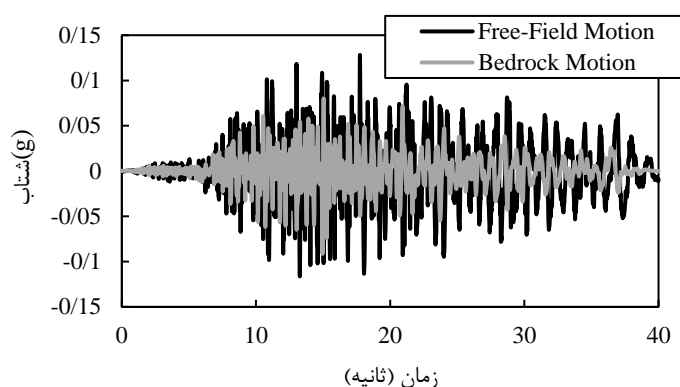
دو گروه ۸ تایی از رکوردهای زلزله متناسب با نوع خاک مدل، از پایگاه اطلاعاتی PEER [۲۴] برای تحلیل دینامیکی سامانه‌ها انتخاب شده است. مطابق ASCE7 [۱۳] در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر دوره تناوب هر سازه، باید طیف میانگین رکوردهای زلزله از طیف طرح آیین‌نامه بالاتر باشد؛ بر این اساس، ضرایب مقیاس در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. رکوردهای زلزله و ضرایب مقیاس آن‌ها

سازه (طبقه)						ایستگاه	زلزله
۱۵	۱۲	۱۰	۶	۳	۲		
خاک نوع ۳							
۳/۲۴	۳/۷۵	۴	۴/۲۷	۴/۶۷	۵/۰۳	CHY033	Chichi
۲/۳۱	۲/۷۲	۲/۹۴	۳/۵	۴/۲۹	۴/۷۹	CMR180	Northridge
۲	۲/۰۴	۲/۱۱	۲/۲۴	۲/۳۱	۲/۴۴	TCU141	Chichi
۱/۱	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۲۱	۱/۳۱	PAE055	Loma Prieta
۰/۶۴	۰/۷	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۹	HSP000	Loma Prieta
۱/۳۲	۱/۲۹	۱/۳۱	۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۳	DLT262	Imperial Valley-06
۲/۷۴	۳/۰۵	۳/۱۳	۳/۳۱	۳/۴۸	۳/۹۴	OSA000	Kobe
۱/۲۱	۱/۳	۱/۳۸	۱/۴۸	۱/۵۴	۱/۶۷	YAE000	Kobe
خاک نوع ۴							
۰/۹۷	۱/۰۶	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۱۲	۱/۱۴	IVW360	Superstition Hills-02
۰/۶۱	۰/۶۶	۰/۷۰	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۸۴	A1090	Loma Prieta
۲/۸۶	۲/۸۶	۲/۸۹	۲/۷۱	۲/۵۵	۲/۴۴	WAT180	Northridge

۱/۹۴	۱/۹۶	۱/۹۴	۱/۹۹	۲/۰۹	۲/۲۹	CHY054	Chichi
۳/۱۷	۲/۶۹	۲/۶۴	۲/۶۲	۲/۳۵	۱/۸۸	SMN05EW	Tottori
۰/۷۵	۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۱	۱/۰۰	MYG005N	Iwate
۱/۳۳	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۳۴	۱/۲۸	E03270	El Mayor
۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۸	REHSN02E	Darfield

برای استفاده از رکوردهای زلزله در تحلیل سامانه سازه-خاک-سازه، باید آن‌ها تبدیل به رکوردهای اعمالی در سنگ‌بستر شوند؛ زیرا شتاب‌نگاشت‌های موجود، پاسخ سطح زمین (میدان آزاد) هستند. برای این منظور می‌توان رکوردهای زلزله موجود را به‌عنوان تحریک در بالاترین سطح مدل خاک بدون سازه اعمال کرد. پس از تحلیل مدل خاک، پاسخ به‌دست‌آمده برای تراز سنگ‌بستر به‌عنوان رکوردهای جدید استفاده می‌شود. در شکل ۳، مقایسه‌ای بین رکورد اعمالی به سطح و خروجی آن در سنگ‌بستر انجام شده است.



شکل ۳. رکوردهای زلزله اعمالی به سطح و سنگ‌بستر برای زلزله نورث‌ریج در خاک تپ ۴

۵- تغییر شکل سازه‌ها در اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه و خاک-سازه

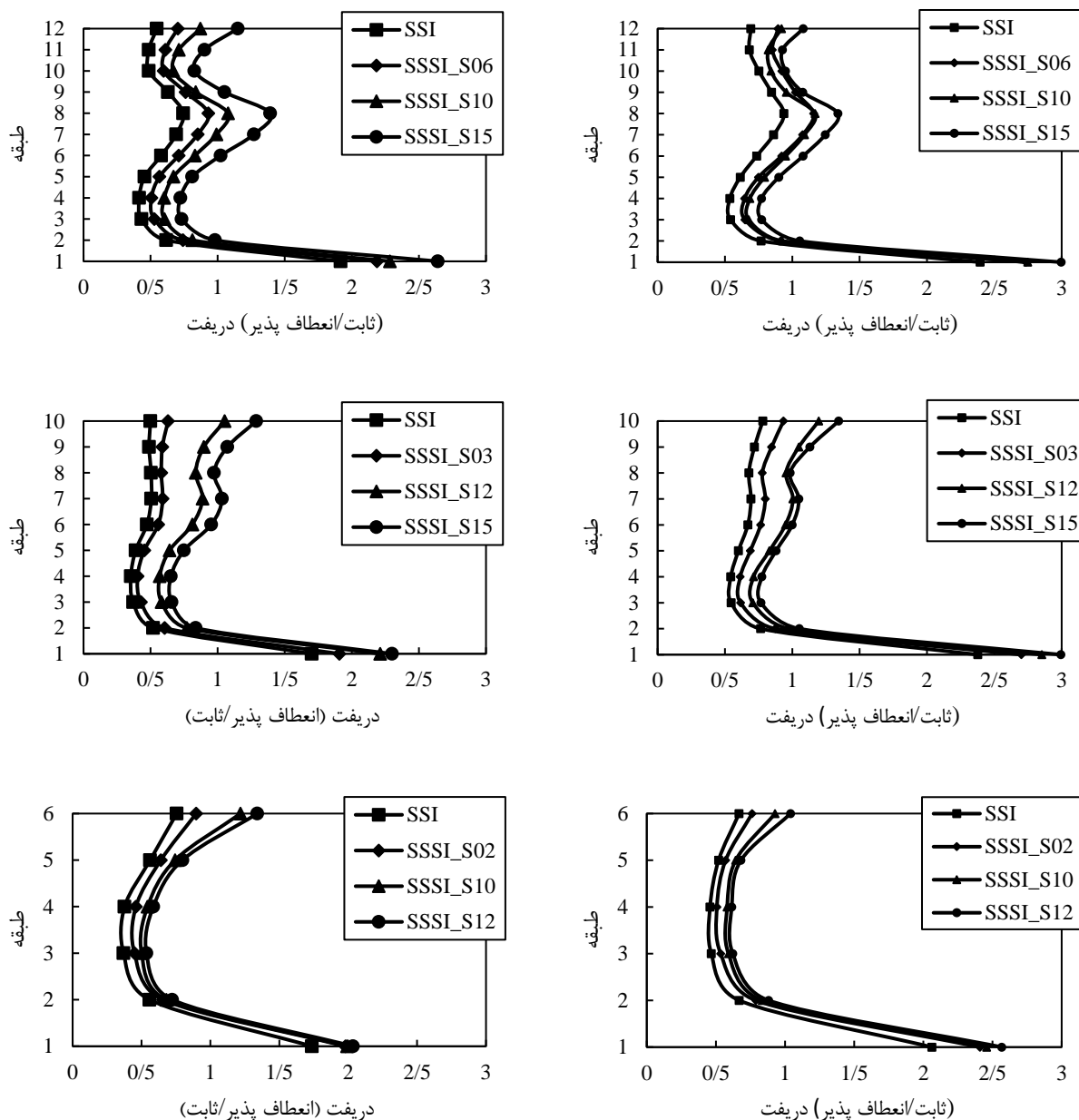
۵-۱- دررفت بین طبقاتی

مقادیر دررفت بین طبقاتی سازه‌ها در حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه و خاک-سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، وجود تکیه‌گاه نرم باعث افزایش شدید دررفت طبقه اول سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت می‌شود. در بین سامانه‌های سازه-خاک-سازه با فاصله صفر، حداقل نسبت دررفت ۱/۱ برای سازه‌های ۲ طبقه مجاور هم و حداکثر آن، ۳/۶۱ برای سازه‌های ۱۵ طبقه مجاور هم است. در بین سامانه‌های خاک-سازه، به‌غیر از سازه ۲ طبقه که نسبت دررفت آن ۰/۸۴ است، در سایر سامانه‌ها، تکیه‌گاه نرم منجر به تمرکز تغییر شکل‌ها در طبقه اول و افزایش زیاد آن نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت می‌گردد. در سایر طبقات، تغییرات نسبت دررفت نظم مشخصی ندارد؛ حداکثر نسبت دررفت بعد از طبقه اول، برای سازه ۱۲ طبقه در طبقه هشتم رخ می‌دهد درحالی‌که برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه در بام ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است، با کاهش ارتفاع (کاهش دوره تناوب) سازه مجاور، توزیع نسبت دررفت طبقات به‌جز طبقه اول، یکنواخت می‌گردد.

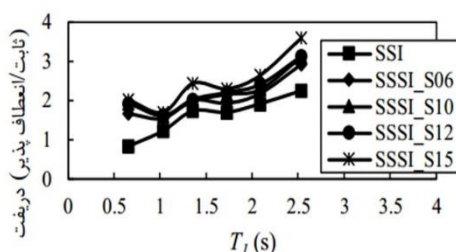
بر اساس شکل ۴، با افزایش ارتفاع سازه، مقادیر نسبت دررفت افزایش می‌یابد که شدت این افزایش در طبقه اول بیشتر است. افزایش ارتفاع سازه مجاور هم بر مقدار نسبت دررفت می‌افزاید. برای وضوح بیشتر این مسئله، شکل ۵ ترسیم شده است که محور افقی آن، دوره تناوب کلیه سازه‌ها و محور قائم، نسبت دررفت طبقه اول (حداکثر مقدار) می‌باشد. بر اساس شکل ۵، با افزایش دوره تناوب سازه اصلی و مجاور، مقادیر نسبت دررفت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شدت تأثیر افزایشی دوره تناوب سازه اصلی (T_1) بیشتر از سازه مجاور است.

برای مقایسه دررفت در حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه نسبت به حالت اندرکنش خاک-سازه، شکل ۶ ترسیم شده است. مطابق شکل ۶، هر چه اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه شدیدتر می‌شود (به معنی افزایش دوره تناوب سازه اصلی و مجاور)، نسبت دررفت در طبقات بالاتر افزایش بیشتری نسبت به طبقات پایین‌تر می‌یابد؛ البته در یک‌سوم ارتفاع بالایی سازه‌ها، نسبت دررفت دچار کاهش ناگهانی می‌شود ولی در طبقه آخر این کاهش جبران می‌گردد. با کاهش زیاد دوره تناوب سازه مجاور و یا افزایش فاصله سازه‌ها، تمرکز نسبت دررفت به طبقه اول منتقل می‌شود.

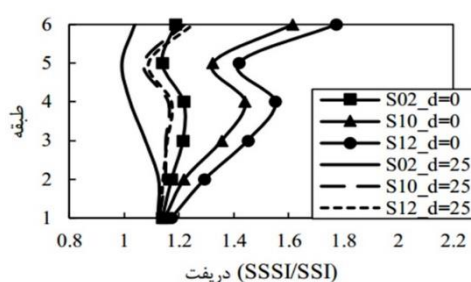
از دیگر نتایج شکل ۶، تأثیرات بیشتر اندرکنش سازه-خاک-سازه نسبت به اندرکنش خاک-سازه است که در تمامی سامانه‌ها مشهود می‌باشد.



شکل ۴. نسبت دررفت بین طبقاتی در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر به حالت تکیه‌گاه ثابت برای سازه‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ طبقه در فاصله صفر نسبت به سازه مجاور (SSI) بیانگر اندرکنش سازه اصلی و SSSI_Si بیانگر مجاورت سازه اصلی با سازه تطبیقه بر روی الف) خاک نوع ۳ و ب) خاک نوع ۴



شکل ۵. نسبت دررفت طبقه اول در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر به حالت تکیه‌گاه ثابت برای خاک نوع ۴ و فاصله صفر (T_1)، دوره تناوب سازه‌های اصلی)



شکل ۶. دررفت طبقات سازه ۶ طبقه در حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه نسبت به خاک-سازه برای خاک نوع ۴ در دو فاصله (d) صفر و ۲۵ متری

۲-۵- جابجایی جانبی طبقات

با توجه به شکل ۷ که نشان‌دهنده توزیع جابجایی جانبی طبقات حالت تکیه‌گاه نرم نسبت به تکیه‌گاه ثابت است، مشابه پاسخ دررفت، بیشترین نسبت جابجایی در طبقه اول رخ داده است. کلیه سازه‌هایی که در مجاورت سازه ۱۵ طبقه قرار گرفته‌اند، جابجایی تمامی طبقاتشان از حالت تکیه‌گاه ثابت بیشتر شده و با افزایش دوره تناوب سازه اصلی و مجاور مقادیر نسبت جابجایی افزایش یافته است. از طرفی هم، علاوه بر طبقه اول در طبقه دوم و سوم هم مقادیر نسبت جابجایی حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه از حالت تکیه‌گاه ثابت بیشتر شده است. بر اساس شکل ۷، اثرات خاک ۳ از خاک ۴ در نسبت جابجایی بیشتر است؛ حداقل این تفاوت پاسخ‌های مربوط به دو خاک، ۸ درصد می‌باشد.

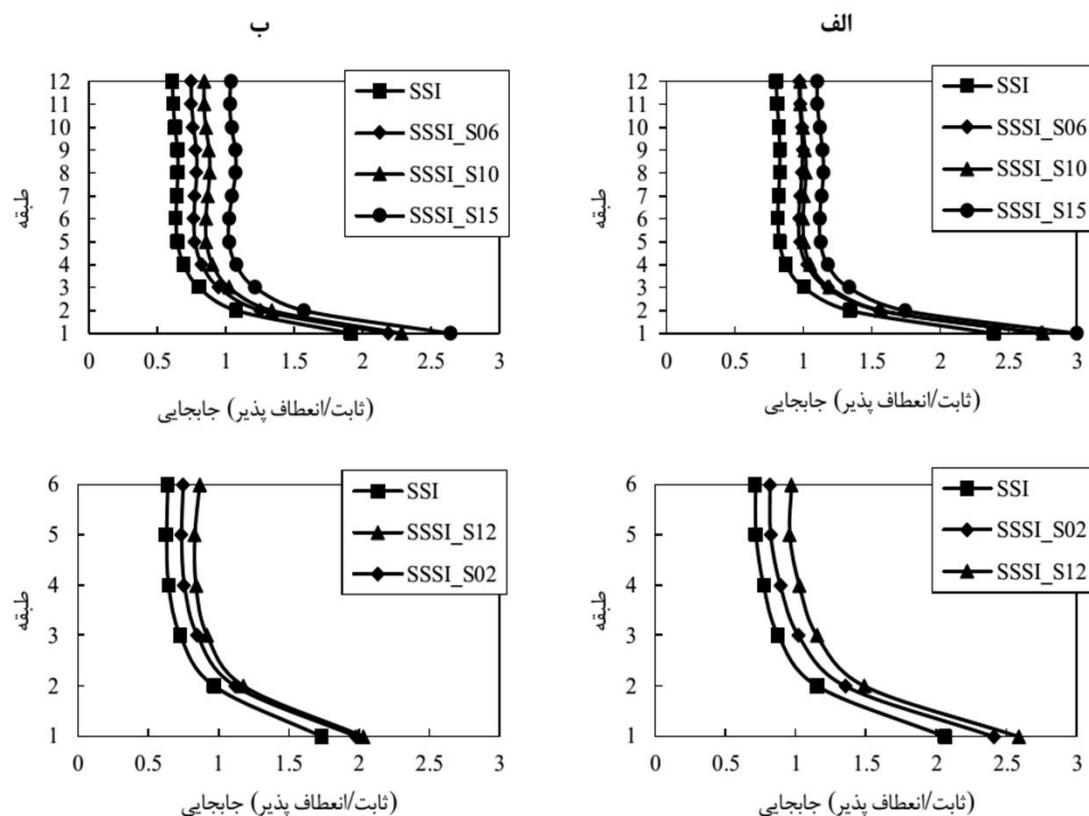
۲-۶- تعیین پارامترهای کلیدی

بر اساس نتایج پژوهش، می‌توان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در اندرکنش سازه-خاک-سازه را به صورتی که در این بخش آمده است، بررسی نمود. این پارامترها شامل دوره تناوب سازه‌ها، فاصله آن‌ها و نوع خاک هستند.

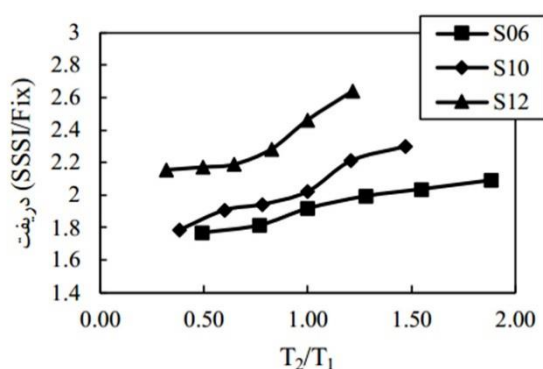
۱-۶- دوره تناوب سازه‌ها

دوره تناوب سازه اصلی و مجاور که در این مقاله به ترتیب با T_1 و T_2 نشان داده شده است، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در اندرکنش سازه-خاک-سازه هستند. شکل ۵ بخشی از تأثیرات این پارامترها را بیان کرده است. برای بررسی راحت و واضح‌تر تأثیرات دوره تناوب سازه‌ها، شکل ۸ ایجاد شده است. بر اساس شکل ۸، با افزایش دوره تناوب سازه اصلی و مجاور اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه افزایش می‌یابد. با بررسی شیب نمودارها می‌توان گفت تأثیر دوره تناوب سازه مجاور تا نسبت دوره تناوب سازه مجاور به اصلی (T_2/T_1) ۰/۶۷، نسبت به مقادیر

بزرگ‌تر از ۰/۶۷ کمتر است؛ به طوری که در مقادیر T_2/T_1 بزرگ‌تر از ۰/۶۷ افزایش زیادی در مقادیر نسبت دریافت دیده می‌شود. از سویی دیگر، با کاهش دوره تناوب سازه اصلی به کمتر از ۱/۳۵ ثانیه، تأثیرات دوره تناوب سازه مجاور به علت کاهش شیب منحنی کم می‌گردد؛ از این رو اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه برای سازه‌های بلند بیشتر بوده و در صورت وجود سازه‌ای هم‌تراز و یا بلندتر در مجاور یک سازه بلند، اندرکنش سازه-خاک-سازه بیشترین اثرات خود را می‌گذارد.



شکل ۷. جابجایی جانبی سازه ۶ و ۱۲ طبقه با تکیه‌گاه نرم نسبت به تکیه‌گاه ثابت در فاصله صفر برای الف) خاک نوع ۳ و ب) خاک نوع ۴

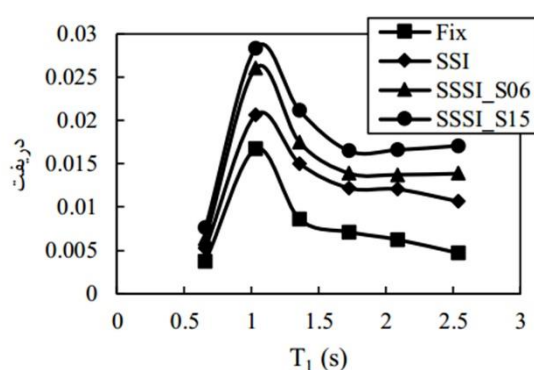


شکل ۸. دریافت طبقه اول سازه‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ طبقه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در مجاورت سایر سازه‌ها برای خاک نوع ۴ و فاصله صفر (S_i بیانگر سازه اصلی با T_1 طبقه، دوره تناوب سازه اصلی و T_2 دوره تناوب سازه مجاور)

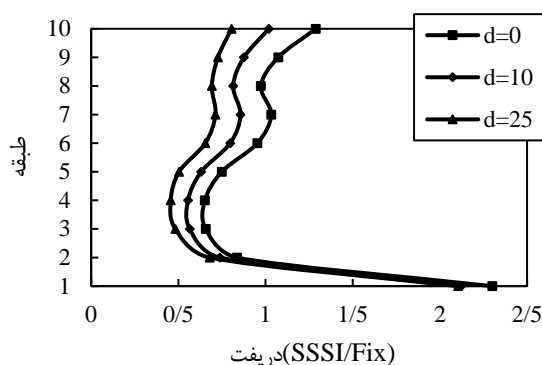
بررسی مقادیر مطلق دررفت سازه‌ها که منجر به تشکیل پدیده تشدید می‌گردد، در شکل ۹ مطرح شده است. دوره تناوب خاک ۴، ۱/۰۸ ثانیه است که سازه ۳ طبقه نزدیک‌ترین دوره تناوب را به آن دارد. مطابق شکل ۹ و سایر نتایج، مقادیر عددی دررفت سازه ۳ طبقه در مجاورت سازه ۶، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱/۷۷، ۱/۷۵، ۱/۷۱ و ۱/۵۹ برابر میانگین دررفت سایر سازه‌ها به‌جز سازه ۲ طبقه می‌شود. بنابراین تکیه‌گاه نرم باعث تشدید پاسخ سازه‌های کوتاه (در این مقاله ۳ طبقه) می‌گردد. به‌طور کلی برای سازه‌های قرار گرفته بر هر دو خاک، تشدید در محدوده ۰/۷ تا ۱/۵ برابر دوره تناوب خاک رخ می‌دهد که بیشترین اثرات تشدید در حالتی است که دوره تناوب سازه اصلی (T_1) و خاک برابر باشند و برای سازه‌های با دوره تناوب کمتر از ۰/۷ دوره تناوب خاک (سازه ۲ طبقه)، کمترین میزان دررفت مشاهده شده است.

۲-۶- فاصله سازه‌ها

پارامتر فاصله سازه‌ها یکی دیگر از مهم‌ترین شاخصه‌های تأثیرگذار در سامانه سازه-خاک-سازه است. انتظار می‌رود مطابق شکل ۱۰ با افزایش فاصله سازه‌ها اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه کاهش یابد ولی با بررسی‌های این مقاله همواره این اتفاق رخ نمی‌دهد.



شکل ۹. طیف پاسخ دررفت سازه‌ها در حالات مختلف تکیه‌گاهی برای خاک نوع ۴



شکل ۱۰. دررفت سازه ۱۰ طبقه در مجاورت سازه ۱۵ طبقه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت برای خاک ۴ در سه فاصله (d) صفر، ۱۰ و ۲۵ متری

طبق شکل ۱۱ که دررفت سازه ۱۰ طبقه در مجاورت سازه ۱۵ طبقه را نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در سه فاصله معین نشان می‌دهد، رفتار پارامتر فاصله سازه‌ها یکسان نیست. برای مقادیر T_2/T_1 کمتر از ۰/۸۸، سازه‌های مجاور با فاصله دورتر که در این کار ۲۵ متر است، بیشترین پاسخ را دارند و با افزایش مقدار T_2/T_1 پاسخ‌های سازه در هر سه فاصله به هم نزدیک شده‌اند. اما برای مقادیر T_2/T_1 بیشتر از ۱/۱۲، بیشترین پاسخ مربوط به کمترین فاصله است. با میانگین گرفتن از این دو نقطه T_2/T_1 ، یک رابطه جدید در سامانه سازه-خاک-سازه بنام نسبت دوره تناوب مرزی $(T_2/T_1)_b$ تعریف می‌شود. بر اساس نتایج مشاهده‌شده در سایر سازه‌ها، دو پارامتر نوع خاک و دوره تناوب سازه

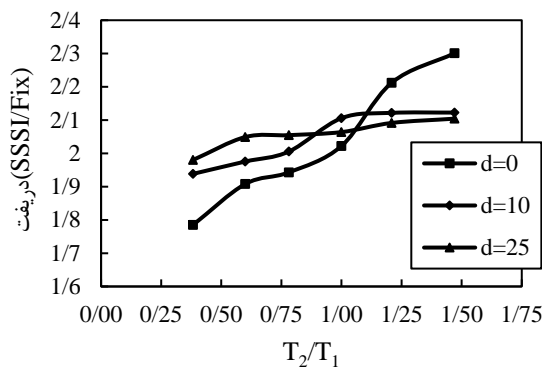
اصلی T_1 ، در تعیین رابطه $(T_2/T_1)_b$ مؤثر هستند؛ از این رو با استفاده از تحلیل رگرسیون مقادیر $(T_2/T_1)_b$ برای هر دو خاک ۴ و ۳ به صورت رابطه (۱۰) محاسبه شد:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_b = \frac{1.64}{T_1 - 0.104} \quad (E)$$

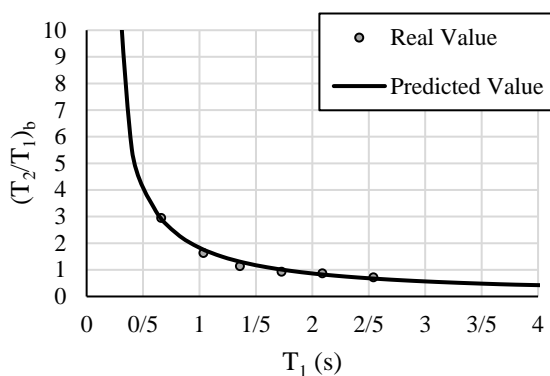
$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_b = \frac{2.06}{T_1 + 0.193} \quad (D)$$

(۱۰)

همچنین شکل ۱۲، مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده برای $(T_2/T_1)_b$ بر اساس رابطه (۱۰) را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۲، در سازه‌های با دوره تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، همواره با افزایش فاصله سازه‌ها تأثیرات اندرکنش سازه-خاک-سازه کاهش می‌یابد و در سازه‌های با دوره تناوب کمتر از ۰/۵ ثانیه همواره افزایش فاصله سازه‌ها موجب افزایش پاسخ می‌گردد. از طرفی در محدوده دوره تناوب ۱/۳۵ تا ۲/۵ ثانیه (سازه‌های نیمه‌بلند)، مقدار $(T_2/T_1)_b$ نزدیک به یک است؛ بنابراین می‌توان گفت در این محدوده، در صورتی که سازه مجاور دوره تناوبی بزرگ‌تر از سازه اصلی داشته باشد، افزایش فاصله سازه‌ها باعث کاهش پاسخ می‌شود و در صورتی که دوره تناوب سازه مجاور کمتر از سازه اصلی باشد، کمترین اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه هنگامی است که فاصله دو سازه در کمترین مقدار ممکن باشد. لازم به ذکر است که این پدیده نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.



شکل ۱۱. دریفت سازه ۱۰ طبقه در مجاورت سایر سازه‌ها نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در سه فاصله صفر، ۱۰ و ۲۵ متری برای خاک نوع ۴



شکل ۱۲. نسبت دوره تناوب مرزی $(T_2/T_1)_b$ برای خاک نوع ۴

۷- تحلیل رگرسیون

مطابق روش این مقاله که در بند ۳ بدان اشاره شد، برای اصلاح ضریب بزرگنمایی تغییرشکل، از تحلیل رگرسیون استفاده شده است. برای این منظور، لازم است مقادیر واقعی C_m تعیین و بر اساس تابع فرضی مدل رگرسیون، مقادیر پیش‌بینی شده برای C_m محاسبه گردد. با این اوصاف، ابتدا نسبت مقادیر حداکثر دریافت سازه‌ها (دریافت طبقه اول) در سامانه‌های اندرکنش سازه-خاک-سازه به دریافت متناظر با آن سازه در شرایط تکیه‌گاه ثابت و تحت بارگذاری جانبی استاتیکی معادل (مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵]) تعیین شده است؛ سپس بر اساس تابع مدل رگرسیون غیرخطی، مقادیر پیش‌بینی شده برای C_m محاسبه شده‌اند. به‌طور کلی برای تعیین C_m از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود:

$$C_m = C_{m,SSI} \times C_{fix} \quad (11)$$

که در آن، $C_{m,SSI}$ نسبت پاسخ دریافت در حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه به حالت اندرکنش خاک-سازه (مطابق استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵]) و C_{fix} ضریب تبدیل هستند. C_{fix} ضریب $C_{m,SSI}$ را تبدیل به پاسخ دریافت سازه در حالت اندرکنش سازه-خاک-سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت می‌کند.

۷-۱- ضریب $C_{m,SSI}$

رابطه (۱۲)، این تابع را بیان می‌کند:

$$C_{m,SSI} = b_1 + b_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{b_3} + b_4 (T_1)^{b_5} + b_6 \left(\frac{d}{B} \right)^{b_7} \quad (12)$$

که در آن، ضرایب b_i ، با استفاده از تحلیل رگرسیون محاسبه شده‌اند؛ سایر پارامترها قبلاً توضیح داده شده است. با این اوصاف دو رابطه برای خاک ۳ و ۴ ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که مبنای محاسبه روابط، شکل ۹ (طیف پاسخ دریافت سازه‌ها) است. در خاک ۴ برای مقادیر $(T_2/T_1) < (T_2/T_1)_b$ ، رابطه (۱۳):

$$C_{m,SSI} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{0.07} - (T_1)^{0.32} + 0.0043 \left(\frac{d}{B} \right)^{3.74} + 1.53 \quad (13)$$

و برای مقادیر $(T_2/T_1) > (T_2/T_1)_b$ ، رابطه (۱۴) ارائه شده است:

$$C_{m,SSI} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{0.126} - (T_1)^{0.244} - \left(\frac{d}{B} \right)^{0.0025} + 0.48 \quad (14)$$

لازم به ذکر است که روابط (۱۳) و (۱۴) برای مقادیر $T_1 > T_s$ که دوره تناوب خاک می‌باشد، قابل استفاده است؛ برای مقادیر $T_1 < T_s$ ، رابطه (۱۵) ارائه شده است:

$$C_{m,SSI} = 1 \quad T_1 \leq 0.7T_s$$

$$C_{m,SSI} = \frac{C_{m,SSI,T_s} - 1}{0.3T_s} (T_1 - T_s) + C_{m,SSI,T_s} \quad 0.7T_s < T_1 < T_s \quad (15)$$

که در آن، C_{m,SSI,T_s} مقدار C_m در روابط (۱۳) یا (۱۴)، به ازای T_1 برابر T_s است. مقدار RMSE (Root mean squared error) برای روابط خاک ۴ برابر با ۰/۰۳۹۸ است.

برای خاک ۳ هم مشابه خاک ۴ روابطی جهت اصلاح ضریب بزرگنمایی تغییرمکان بیان شده است. در خاک ۳ برای مقادیر $(T_2/T_1) < (T_2/T_1)_b$ ، رابطه (۱۶):

$$C_{m,SSI} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{0.036} - (T_1)^{0.46} + 0.078 \left(\frac{d}{B} \right)^{2.00} + 1.73 \quad (16)$$

و برای مقادیر $(T_2/T_1) > (T_2/T_1)_b$ ، رابطه (۱۷) ارائه شده است:

$$C_{m,SSI} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.42} - (T_1)^{0.91} - 0.056\left(\frac{d}{B}\right)^{2.00} + 2.3 \quad (17)$$

لازم به ذکر است که روابط (۱۶) و (۱۷) برای مقادیر $T_1 > T_s$ که دوره تناوب خاک می باشد، قابل استفاده است؛ برای مقادیر $T_1 < T_s$ ، رابطه (۱۵) قابل استفاده است با این تفاوت که در آن، مقدار C_{m,SSI,T_s} مقدار C_m در روابط (۱۶) یا (۱۷)، به ازای T_1 برابر T_s است. مقدار RMSE برای روابط خاک ۳ برابر با ۰/۰۱۰۵ است.

۷-۲- ضریب C_{fix}

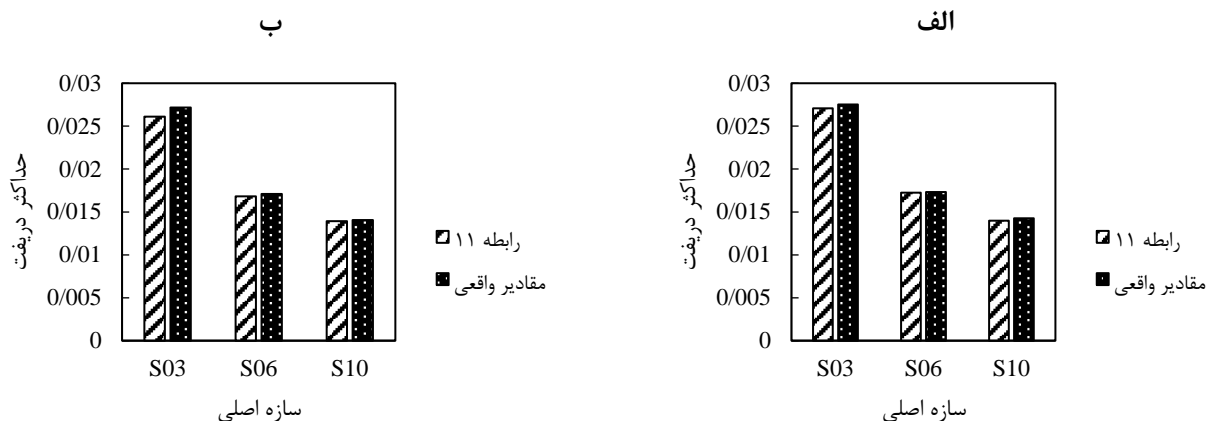
با توجه به رابطه (۱) که در استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] آمده است، نسبت پاسخ سازه در حالت اندرکنش خاک-سازه به حالت تکیه گاه ثابت محاسبه شده است به طوری که در رابطه (۱۸) این نسبت به صورت ضریب C_{fix} تعیین شده است:

$$C_{fix} = 0.02(T_1)^3 - 0.016(T_1)^2 + 0.011(T_1) + 1.0 \quad (18)$$

رابطه (۱۸) تنها برای خاک‌هایی با شرایط یادشده در این مقاله قابل استناد است.

۸- ارزیابی روابط

بر اساس تحلیل رگرسیون غیرخطی انجام شده در این پژوهش، می توان مقدار حداکثر دررفت پیش بینی شده برای سازه ها تحت اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه (رابطه (۱۱)) را با مقادیر به دست آمده از تحلیل سامانه اندرکنش سازه-خاک-سازه مقایسه کرد. برای این منظور شکل ۱۳، ترسیم شده است. بر اساس این شکل، درصد خطای مقادیر پیش بینی شده و واقعی کمتر از ۵ درصد می باشد.



شکل ۱۳. مقایسه حداکثر دررفت پیش بینی شده و مقادیر واقعی برای سازه های ۳، ۶ و ۱۰ طبقه در مجاورت سازه های الف) ۱۰ طبقه و ب) ۶ طبقه

۹- نتیجه گیری

این مقاله با انجام یک مطالعه عددی اقدام به اصلاح ضریب بزرگنمایی تغییر مکان C_d کرده است. برای این منظور ۶ سازه با دوره تناوب های ۰/۶۶۱ تا ۲/۵۴۱ ثانیه تحت اثر ۸ رکورد زلزله، تحلیل تاریخچه زمانی شده اند. در مدل سازی سامانه ها، رفتار غیرخطی سازه و خاک در نظر گرفته شده است.

برای اصلاح ضریب C_d ، از ضریب C_m استفاده شده است. ضریب C_m ، نسبت حداکثر دررفت سازه در سامانه سازه-خاک-سازه به دررفت متناظر آن سازه تحت اثر تحریک نامبرده در استاندارد ۲۸۰۰ با تکیه گاه ثابت می باشد. با انجام تحلیل رگرسیون، مقادیر پیش بینی شده برای C_m محاسبه شده است که این مقادیر با توجه به خطای پایین (کمتر از ۵ درصد) نسبت به مقادیر واقعی، قابل استناد هستند. لازم به

ذکر است که پارامترهای مؤثر در انجام تحلیل رگرسیون، سه پارامتر دوره تناوب سازه اصلی (T_1) و مجاور (T_2)، نوع خاک و نسبت فاصله سازه‌ها (d/B) می‌باشند که شاخص‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در اندرکنش سازه-خاک-سازه هستند.

منابع

- [1] Lou, M. Wang, H. Chen, X. and Zhai, Y. (2011). Structure–soil–structure interaction: Literature review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 1724-1731.
- [2] Warburton, G. B. Richardson, J. D. and Webster, J. J. (1972). Harmonic Response of Masses on an Elastic Half Space. *Journal of Engineering for Industry*, vol. 94, pp. 193-200.
- [3] Kobori, T. Minal, R. and Kusakabe, K. Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System, I. (1973).
- [4] Lin, H. T. Roesset, J. and Tassoulas, J. (1987). Dynamic interaction between adjacent foundations. *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 15, pp. 323-343.
- [5] Guan, F. and Novak, M. (1994). Transient Response of Multiple Rigid Foundations on an Elastic, Homogeneous Half-Space. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, pp. 656-663.
- [6] Guan, F. and Novak, M. (1994). Transient Response of an Elastic Homogeneous Half-Space to Suddenly Applied Rectangular Loading. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, pp. 256-263.
- [7] Qian, J. and Beskos, D. E. (1996). Harmonic wave response of two 3-D rigid surface foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 95-110.
- [8] Ghandil, M. and Behnamfar, F. (2015). The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 75, pp. 1-17.
- [9] Ghandil, M. Behnamfar, F. and Vafaeian, M. (2016). 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.
- [10] Clouteau, D. Broc, D. Devésá, G. Guyonvarh, V. and Massin, P. (2012) Calculation methods of Structure–Soil–Structure Interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 129-142.
- [11] Trombetta, N. W. Mason, H. B. Hutchinson, T. C. Zupan, J. D. Bray, J. D. and Kutter, B. L. (2014). Nonlinear Soil–Foundation–Structure and Structure–Soil–Structure Interaction: Centrifuge Test Observations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140.
- [12] Trombetta, N. W. Mason, H. B. Hutchinson, T. C. Zupan, J. D. Bray, J. D. and Kutter, B. L. (2015). Nonlinear Soil–Foundation–Structure and Structure–Soil–Structure Interaction: Engineering Demands. *Journal of Structural Engineering*, vol. 141.
- [13] ASCE7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, 2010.
- [14] NIST-GCR-12-917-21, "Soil-Structure Interaction for Building Structures," *NEHRP Consultants Joint Venture (a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering)*, 2012.
- [15] Standard 2800, *Design of structures against earthquake*, Building and House Research Center (BHRC), 2014
- [16] ASCE7-16, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [17] AISC360, *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*, 2010.
- [18] Ibarra, L. F. and Krawinkler, H. (2005). *Global collapse of frame structures under seismic excitations*: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [19] Lignos D. G. Krawinkler, H. and Whittaker, A. S. (2011). Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 40, pp. 807-825.
- [20] ASCE41, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings," *American Society of Civil Engineers, Reston, VA*, 2013.
- [21] Jeremic, B. Jie G. Preisig, M. and Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 38, p. 699.
- [22] Z. Yang, J. Lu, and A. Elgamal, "OpenSees Soil Models and Solid-Fluid Fully Coupled Elements," *User's Manual. Ver*, vol. 1, 2008.
- [23] OpenSees, "Open system for earthquake engineering simulation," *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*.
- [24] PEER ground motion database. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>