بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی سازه های نامتقارن با استفاده از تحلیل فرکانسی

شراره رستمی حشمت آباد[۱]، علی اخترپور[۲*]، محمدامین محمدیار[۳]

۱ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

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

⋮

sh.rostami@mail.um.ac.ir
akhtarpour@um.ac.ir
amin.mohammadyar@mail.um.ac.ir

خلاصه

در طراحی لرزه ای سازه ها، شکل پذیری سازه در برابر زلزله دارای اهمیت ویژه ای بوده و همواره مورد توجه قرار می گیرد اما آنچه که اغلب از آن صرف نظر می‌شود، بحث مربوط به اثرات اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه ای سازه می‌باشد. در واقع می توان گفت در اغلب طراحی و آنالیزهایی که صورت می گیرد، شالوده سازه صلب فرض شده و با این فرض به تحلیل و بررسی آن پرداخته می‌شود در حالیکه وجود خاک زیر سازه در حالتی که صلب نباشد بر روی رفتار سازه تاثیر داشته و پاسخی متفاوت از حالت صلب از خود نشان می‌دهد. این پژوهش به بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار فرکانسی سازه های فولادی با سیستم سازه ای قاب خمشی می‌پردازد. از طرفی با توجه به اینکه هندسه همه سازه های قرار گرفته بر روی بستر غیرصلب، هندسه متقارن ندارند و هندسه نامتقارن تاثیر نامنظمی ناشی از اثر پیچش را بالا می‌برد لذا بدین منظور، دو سازه ۱۵ طبقه فولادی با هندسه نامتقارن مدلسازی شده و رفتار فرکانسی این سازه در حالتی که سازه بر روی بستر صلب قرار گرفته و تکیه گاه ثابتی دارد و همچنین در حالتی که سازه تحت اثر اندرکنش خاک و سازه قرار می گیرد، مورد بررسی واقع شده است. همچنین با توجه به این موضوع که در مدلسازی دو بعدی اثر پیچش دیده نمی‌شود لذا از مدلسازی و تحلیل سه بعدی جهت بررسی رفتار واقعی سازه ها استفاده شده است. در این پژوهش جهت تحلیل و آنالیز رفتار فرکانسی سازه ها، نرم افزار Abaqus به کار گرفته شده است و پس از انجام آنالیزها، مشاهده شد که اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه سبب کاهش فرکانس طبیعی سازه و افزایش دوره تناوب می‌شود.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، پاسخ فرکانسی، سازه نامتقارن، سیستم سازه‌ای قاب خمشی

۱. مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به گسترش ساخت و ساز، پروژه هایی ناگزیر در ساختگاه های نامناسب ژئوتکنیکی اجرا می شوند. با توجه به اینکه رفتار سازه در حالتی که سازه بر روی بستر صلبی قرار گرفته باشد متفاوت از حالتی است که بستر سازه غیرصلب و نامناسب باشد لذا بایستی اثر نامطلوبی بستر سازه در بررسی رفتار سازه لحاظ گردد [۱]. در این حالت، پاسخ سازه تحت تاثیر لایه های خاک زیرین سازه بوده و به طور متقابل پاسخ لایه خاک تحت تاثیر حضور سازه قرار گرفته بر روی آن می باشد این پدیده اثر «اندرکنش خاک و سازه» نام می گیرد. از طرفی دیگر، درصورتی که سازه دارای هندسه متقارن می باشد تحت اثر تحلیل های لرزه ای با توجه به انطباق مرکز جرم و سختی سازه بر روی هم، سازه رفتار منظمی از خود بروز می دهد این درحالی است که هندسه نامتقارن سازه، انطباق مرکز جرم و سختی را رقم نخواهد زد و لذا نامنظمی پیچشی سازه را به دنبال خواهد داشت.

۲. اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه

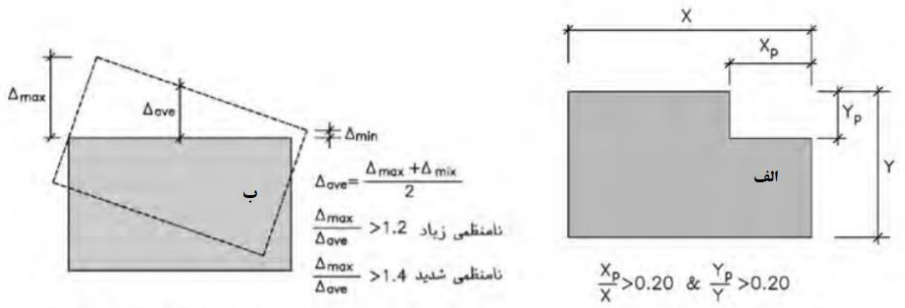
هنگامی که سازه ای بر روی بستر خاکی اجرا می شود، بسته به جنس و میزان نرم بودن خاک اثرات ناشی از عبور امواج لرزه ای از داخل محیط خاکی و بازتاب امواج از آن محیط به سازه مستقر بر روی آن، رفتار لرزه ای سازه را تحت تاثیر قرار می دهد. در واقع آنچه که بر این تغییر رفتار سازه و خاک تاثیرگذار است اثر مودهای غالب سازه، کاهش انرژی ناشی از امواج لرزه ای به دلیل میرایی هندسی و مصالح خاک می باشد [۱]. اما نکته ای که در رابطه با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه بایستی به آن توجه کرد، عبارت است از تعیین ضوابطی که الزام می کند چه مواقعی اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه ضرورت دارد و رفتار سازه به صورت واقعی تر و دقیق تر مدلسازی می‌شود. با توجه تحقیقات صورت گرفته مشاهده شده است که اعمال اندرکنش خاک و سازه، زمانی که رابطه زیر برقرار باشد، ضروری است :

$$V_S \times h/f < 20 \qquad (1)$$

در رابطه فوق V_S سرعت امواج برشی خاک، f فرکانس اصلی سازه با فرض اینکه تکیه گاه سازه صلب می باشد و h ارتفاع آن می باشد.
در سازه های قابی شکل $f \approx 30/h$ و برای سازه هایی که سیستم سازه ای دیوار برشی دارند، $f \approx 45/h$ می‌باشد. در صورتی که از این روابط تقریبی استفاده شود و در رابطه (۱) جاگذاری شود، می توان نتیجه گرفت که برای سازه های قابی شکل، $V_S \leq 600$ m/s بوده و سازه های دارای دیوار برشی برابر خواهد بود با $V_S \leq 900$ m/s. در صورت برقراری شرایط مذکور تاثیر اندرکنش خاک و سازه قابل ملاحظه خواهد بود [۲]. اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی پاسخ سازه و پارامترهای آن، تغییراتی ایجاد می کند که از جمله این پارامترها می توان به میرایی، زمان تناوب، تغییرمکان سازه، شکل مود سازه، برش پایه و لنگر واژگونی اشاره کرد. آنچه که در این پژوهش بدان پرداخته می شود پارامتر دوره تناوب است لذا در بررسی این پارامتر مهم می توان گفت، حرکت گهواره های در سازه که از نتایج اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه است منجر به افزایش پریود طبیعی سازه می شود که این پدیده، رفتار سازه را تحت تاثیر خود قرار می دهد. افزایش زمان تناوب سازه بسته به شرایط خاک و زمان تناوب خاک باعث افزایش یا کاهش شتاب وارد شده به سازه می‌شود [۲].

۲. سازه نامتقارن

یکی از عوامل نامنظمی در سازه ها، نامنظمی هندسی در پلان می باشد که باعث پیچش در سازه می شود و از علل مهم آسیب دیدگی سازه ها حین وقوع زلزله به شمار می‌آید. علت اصلی وقوع پیچش مربوط به عدم انطباق مرکز جرم و سختی سازه می‌باشد. براساس آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) نامنظمی هندسی در پلان و نامنظمی پیچشی به صورت شکل ۱ تعریف می شود. همچنین براساس شکل ۱.ب مشاهده می شود که نامنظمی پیچشی به دو حالت نامنظمی پیچشی زیاد و نامنظمی پیچشی شدید می تواند رخ دهد.



شکل ۱- الف) نامنظمی هندسی در پلان. ب) نامنظمی پیچشی [۳]

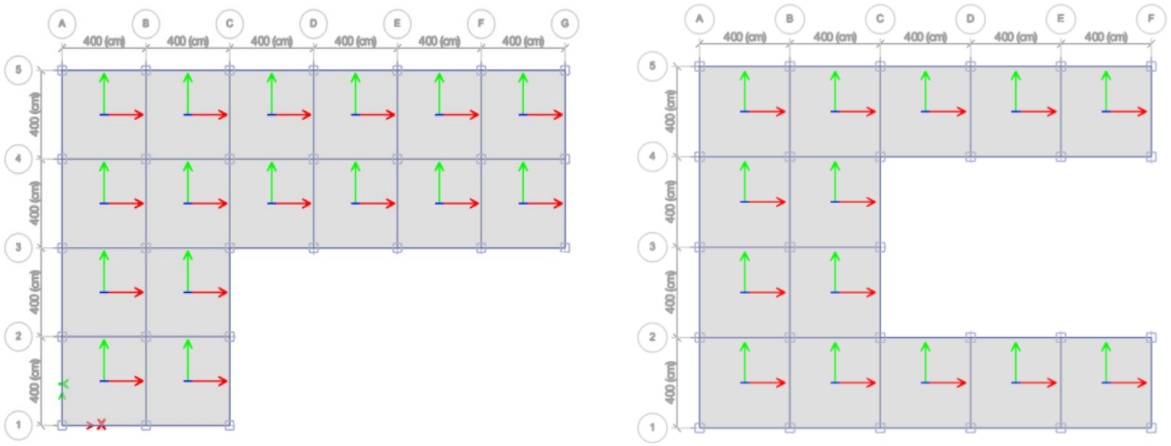
۴. مدلسازی سازه و خاک

در این پژوهش جهت بررسی رفتار سازه های نامتقارن با اعمال تاثیر اندرکنش خاک و سازه، دو سازه فولادی با پلان های نامتقارن و به ارتفاع ۴۵ متر با تعداد طبقات ۱۵، درنظر گرفته شده است. سیستم سازه ای، قاب خمشی بوده و این دو سازه به دو حالت تکیه گاه صلب و تکیه گاه غیرصلب مدلسازی

شده اند. در جدول ۱ مقاطع مورد استفاده در سازه ها جهت مدل سازی ارائه شده است. همچنین در شکل ۲ پلان مربوط به سازه های نامتقارن قابل مشاهده است. پلان شکل۲.الف تحت عنوان پلان C شکل و پلان شکل ۲.ب تحت عنوان پلان L شکل نامگذاری شده است.

جدول ۱- مقاطع مورد استفاده در سازه ها

ارتفاع (متر)	مقاطع ستون ها	طول (متر)	مقاطع تیرها	طبقه
۳	Box 550*25	۴	IPE 300	۱-۳
۳	Box 500*20	۴	IPE 300	۴-۶
۳	Box 450*15	۴	IPE 300	۷-۹
۳	Box 400*12	۴	IPE 270	۱۰-۱۲
۳	Box 350*12	۴	IPE 270	۱۳-۱۵



(ب) (الف)

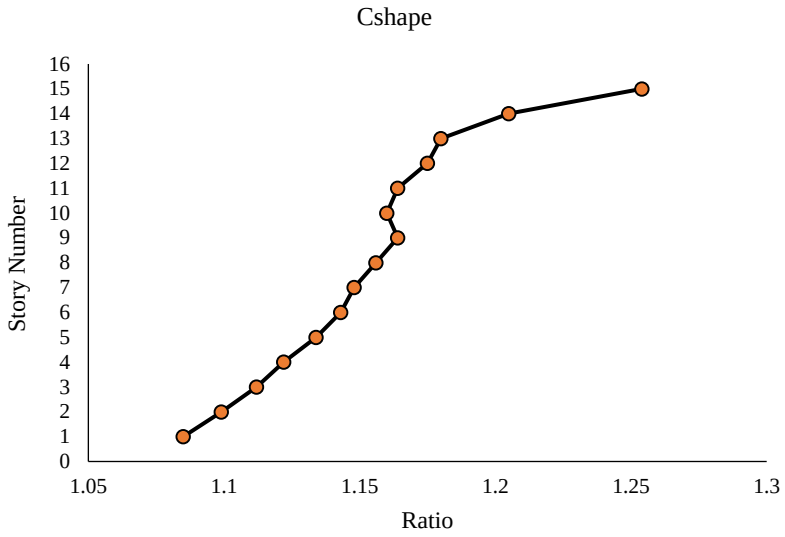
شکل ۲- پلان سازه های نامتقارن الف) سازه با پلان C شکل. ب) سازه با پلان L شکل.

در ادامه جهت بررسی برقراری شرط مربوط به نامنظمی هندسی در پلان (روابط ذکر شده در شکل ۱) برای سازه های نامتقارن C شکل و L شکل جدول ۲ ارائه شده است که براساس این جدول، نسبت مقدار برآمدگی در پلان به بعد کلی پلان در راستای موردنظر بیشتر از مقدار تعیین شده است لذا شرط مربوط به نامنظمی هندسی در پلان برقرار است.

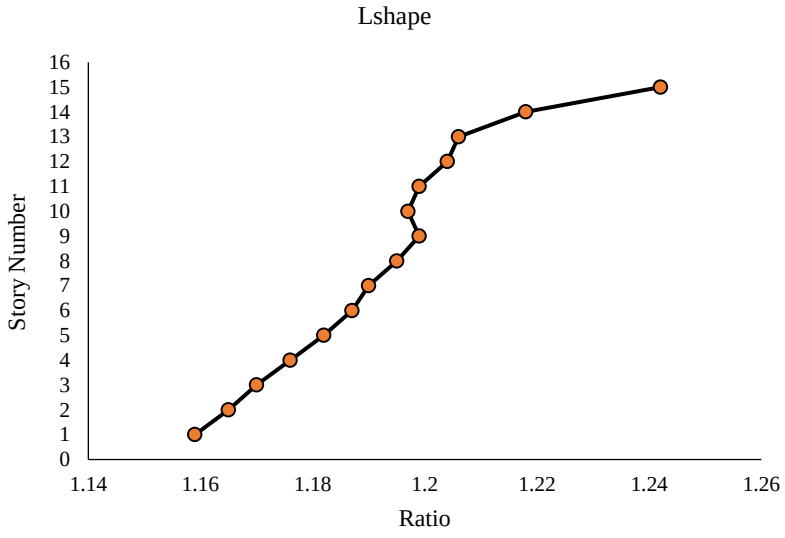
جدول ۲- بررسی برقراری شرط نامنظمی هندسی در پلان

سازه	راستای x	راستای y	Ratio	
سازه C شکل	12	8	راستای x	0.60>0.2
	20	16	راستای y	0.50>0.2
سازه L شکل	16	8	راستای x	0.67>0.2
	24	16	راستای y	0.50>0.2

جهت بررسی نامنظمی پیچشی، دو سازه نامتقارن در نرم افزار Etabs مدلسازی نموده و پس از تحلیل، روابط مربوط به برقراری شرط نامنظمی پیچشی که در شکل (۱) ذکر شده است، مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج تحلیل برای دو سازه نامتقارن در نمودار های ۱ و ۲ قابل مشاهده است. براساس نمودار ۱ و ۲ می توان مشاهده نمود که سازه C شکل و L شکل دچار نامنظمی پیچشی خواهند شد و این نوع نامنظمی، از نوع «نامنظمی زیاد» است.



نمودار ۱- بررسی شرط برقراری نامنظمی پیچشی سازه C شکل



نمودار ۲- بررسی شرط برقراری نامنظمی پیچشی سازه L شکل

پارامترهای مورد استفاده جهت مدلسازی رفتار خاک، در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است ابعاد خاک مدل شده به دلیل اثرات ارتعاش سازه و ساختگاه، پنج برابر عرض پی سازه درنظر گرفته شده است [۴]. همچنین عمق محیط خاک حداقل ۳۰ متر درنظر گرفته شده است. در جدول ۴ المان های مورد استفاده در نرم افزار آباکوس برای اجزای مختلف سازه و خاک ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده جهت مدلسازی محیط خاک [۵]

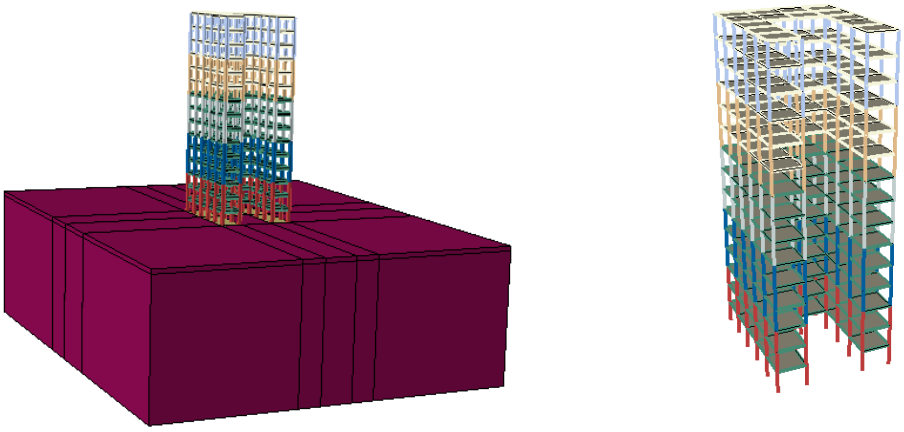
نوع خاک	مدل رفتاری خاک	وزن مخصوص (Kg/m^3)	سرعت موج برشی (m/s)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (KN/m^2)
CL	موهر کولمب - پلاستیسیته	1470	150	0.4	12	20

جدول ۴- نوع المان‌ها در نرم افزار Abaqus

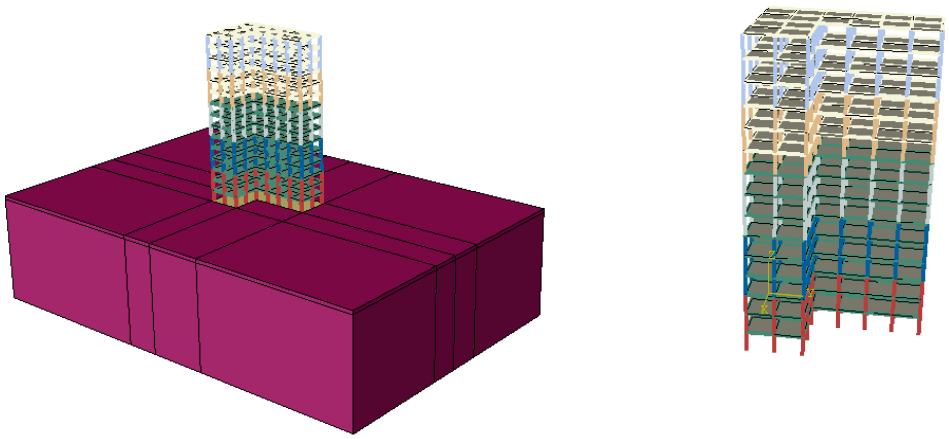
اجزا مدل	المان	نوع المان	اجزا مدل	المان	نوع المان
خاک	Solid	C3D8R	تیر	Beam	B31
سقف	Shell	S4R	ستون	Beam	B31
فونداسیون	Shell	S4R			

۵. مدلسازی در آباکوس

مدلسازی صورت گرفته در نرم افزار آباکوس برای سازه C شکل و L شکل به صورت تکیه گاه صلب و غیرصلب مدلسازی شده است که در شکل ۳ و ۴ قابل مشاهده است.



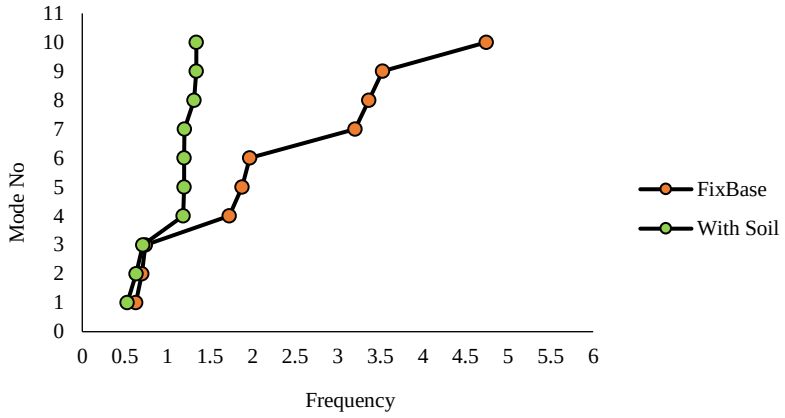
شکل ۳- سازه های مدل شده C شکل در نرم افزار آباکوس در حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب



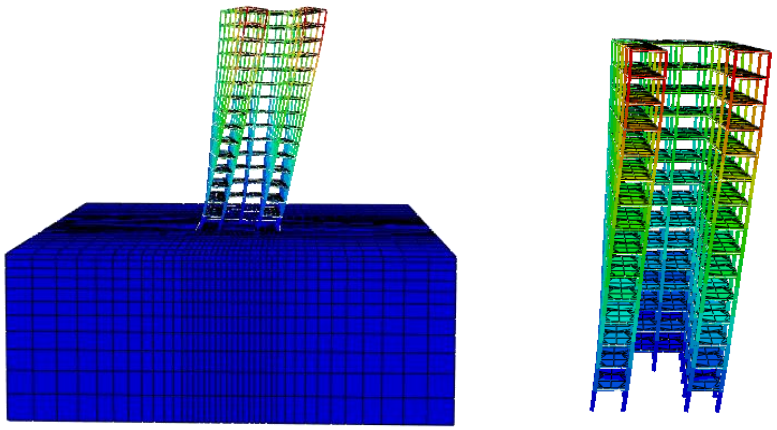
شکل ۴- سازه های مدل شده L شکل در نرم افزار آباکوس در حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب.

۵. تحلیل نتایج

براساس مدلسازی صورت گرفته در آباکوس برای سازه C شکل در حالت تکیه گاه صلب و غیر صلب نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی برای ده مود اول تحلیل، در نمودار ۳ قابل مشاهده است. براساس این نتایج، می توان گفت فرکانس مود های مربوط به سازه نامتقارن C شکل با تکیه گاه صلب بیشتر از فرکانس مربوط به سازه C شکل با تکیه گاه غیرصلب می باشد به عبارتی دیگر اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش دوره تناوب سازه خواهد شد. همچنین در شکل ۵ می‌توان مود های اول سازه در دو حالت صلب و غیرصلب را مشاهد کرد.

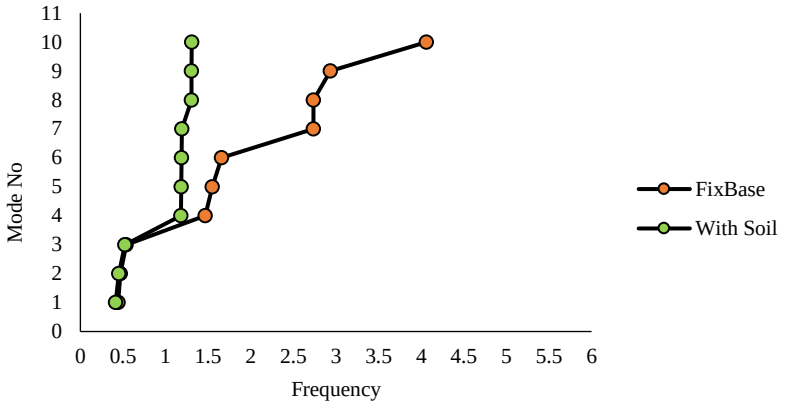


نمودار ۳- تغییرات فرکانس ده مود اول سازه C شکل در حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب

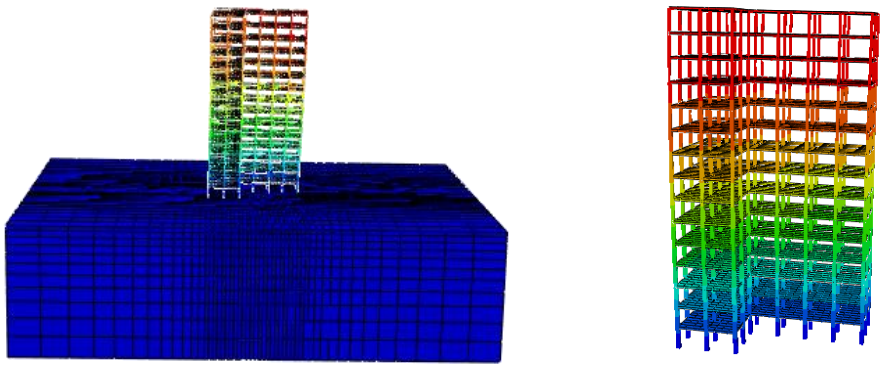


شکل ۵- شکل مود اول سازه C شکل در دو حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب.

همچنین براساس مدل سازی صورت گرفته برای سازه L شکل در حالت تکیه گاه صلب و غیر صلب و انجام تحلیل فرکانسی، نتایج حاصل برای ده مود اول تحلیل برای دو حالت ذکر شده در نمودار ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج ، مجددا مشاهده می شود که فرکانس مود های مربوط به سازه نامتقارن L شکل با تکیه گاه صلب بیشتر از فرکانس مربوط به سازه L شکل با تکیه گاه غیرصلب می باشد. درنتیجه می توان گفت اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش دوره تناوب سازه خواهد شد. همچنین در شکل ۶ می‌توان مود های اول سازه در دو حالت صلب و غیرصلب را مشاهد کرد.



نمودار ۴- تغییرات فرکانس ده مود اول سازه L شکل در حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب.



شکل ۶- شکل مود اول سازه L شکل در دو حالت تکیه گاه صلب و غیرصلب.

با توجه به جدول ۴ و ۵ می‌توان مشاهده کرد که اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه منجر به افزایش پریود سازه می‌شود.

جدول ۴- مقایسه زمان تناوب مودهای اول برای سازه C شکل

شماره مود	مقدار زمان تناوب با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه (s)	مقدار زمان تناوب با تکیه گاه صلب (s)	درصد افزایش
مود اول	1.89	1.59	15.8%
مود دوم	1.58	1.43	9.4%
مود سوم	1.4	1.34	4.2%

جدول ۵- مقایسه زمان تناوب مودهای اول برای سازه L شکل

شماره مود	مقدار زمان تناوب با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه (s)	مقدار زمان تناوب با تکیه گاه صلب (s)	درصد افزایش
مود اول	2.41	2.26	6.2%
مود دوم	2.21	2.12	4.07%
مود سوم	1.90	1.86	2.10%

براساس آیین‌نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) جهت تعیین دوره تناوب سازه تجربی ساختمان های فولادی قاب خمشی، می توان از رابطه (۲) استفاده کرد.

$$T=0.08H^{0.75} \quad (2)$$

در این رابطه T دوره تناوب و H ارتفاع سازه می‌باشد. جهت مقایسه زمان تناوب حاصل از رابطه تجربی استاندارد ۲۸۰۰ و زمان تناوب حاصل از نرم افزار Abaqus بایستی رابطه تجربی فوق در ۱,۲۵ ضرب شود و سپس مقایسه صورت بگیرد. در جدول ۶ مقایسه مربوط به زمان تناوب مود اول سازه های نامتقارن با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه و رابطه (۲) مشاهده نمود. براساس نتایج مشاهده می شود که اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه افزایش زمان تناوب سازه را به دنبال خواهد داشت.

جدول ۶- مقایسه زمان تناوب حاصل از نرم افزار Abaqus و آیین نامه ۲۸۰۰

نحوه بدست آوردن زمان تناوب	زمان تناوب با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه (S)	زمان تناوب بدست آمده از آیین نامه ۲۸۰۰ (S)	درصد افزایش
Cshape-Abaqus	1.89	1.73	8.4%
Lshape-Abaqus	2.41	1.73	28.2%

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش دو سازه نامتقارن ۱۵ طبقه با پلان C شکل و L شکل مدلسازی شد و پس از تحلیل فرکانسی رفتار سازه های نامتقارن در حالتی که سازه دارای تکیه گاه صلب و غیر صلب بود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی، نشان داد اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه موجب کاهش فرکانس سازه شده که افزایش پریود سازه را به دنبال خواهد داشت.

۷. مراجع

۱. محمدیار, م.ا. و ع. اخترپور, بررسی تاثیر اندرکنش خاک وسازه برروی تحلیل سه بعدی فرکانسی سازه های فلزی مفصلی با سیستم سازه ای دیوار برشی, دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۱۳۹۹.

۲. محمودی, م.ر, ه. شفیعی, و ح. مظاهری, بررسی روش های لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و طراحی سازه ها, سومین کنفرانس سالانه پژوهش های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری. ۱۳۹۶.

۳. شهرسازی, و.م.و., آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰).

۴. Rayhani, M. and M.H. El Naggar, *Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil*. International Journal of Geomechanics, 2008. **8**(6): p. 336-346.

۵. Bagheri, M., M.E. Jamkhaneh, and B. Samali, *Effect of seismic soil–pile–structure interaction on mid- and high-rise steel buildings resting on a group of pile foundations.* International Journal of Geomechanics, 2018. **18**(9): p. 04018103.