



بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی تحلیل سه بعدی فرکانسی سازه‌های فلزی مفصلی با سیستم سازه‌های دیوار برشی

محمد امین محمدیار^۱، علی اخترپور^{۲*}

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

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

...

amin.mohammadyar@mail.um.ac.ir

akhtarpour@um.ac.ir

...

خلاصه

این مقاله به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ فرکانسی سازه‌های فلزی مفصلی با سیستم سازه‌های دیوار برشی می‌پردازد. بدین منظور، یک سازه نیمه بلند مرتبه طراحی شده در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحلیل می‌شود و پاسخ فرکانسی سازه در این حالت با در نظر گرفتن تکیه‌گاه ثابت مقایسه می‌گردد. در تحلیل دینامیکی سازه‌ها فرض می‌شود که خاک زیر شالوده صلب است و انعطاف‌پذیری آن صرف‌نظر می‌شود. اثرات اندرکنش خاک و سازه از انعطاف‌پذیری خاک زیر پی و ارتعاشات نسبی بین پی و سطح آزاد ناشی می‌شود. مدل‌سازی محیط خاک و سازه در نرم‌افزار Abaqus و مدل سازه به تنهایی با تکیه‌گاه صلب در نرم‌افزار ETABS، بر روی ساختمانی به تعداد طبقات ۱۳ که ۵ طبقه در زیر زمین قرار دارد انجام شده. نتایج آنالیزها موید این امر هستند که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سبب کاهش فرکانس طبیعی سازه و پاسخ سازه می‌شود.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، پاسخ فرکانسی، پاسخ سازه، سیستم سازه‌های دیوار برشی

۱. مقدمه

با گسترش تکنولوژی و شهرنشینی، پروژه‌های گسترده و وسیعی طراحی و اجرا می‌شوند که بعضی از این پروژه‌ها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شود. در هنگام وقوع زلزله در چنین شرایطی، اثرات متقابل خاک و سازه حائز اهمیت می‌باشد و رفتار سیستم سازه‌ها را به مقدار قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثرات اندرکنش خاک و سازه، اختلافات پاسخ سازه در حالتی که این پاسخ با فرض برابر بودن حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده است، را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت اصلاح شده یا واقعی پی نشان می‌دهد. این اختلافات به مشخصه‌های حرکت میدان آزاد زمین، خواص سازه و تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر (خاک مجاور و زیر پی) بستگی دارد. [۱].

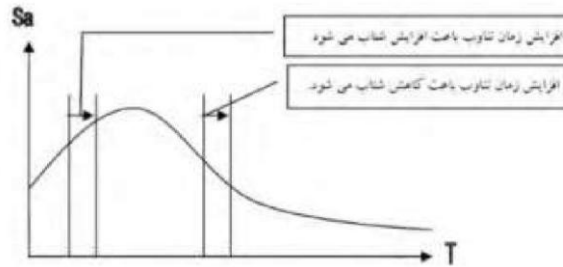
۲. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی زمان تناوب

اندرکنش خاک و سازه در اثر عبور امواج زلزله از میان سیستم خاک و سازه رخ می‌دهد که دارای اثراتی مانند تغییر تاثیر مودهای غالب در سازه و همچنین زائل شدن قسمت اعظم انرژی ارتعاشی توسط میرایی هندسی و میرایی داخلی یا مصالح خاک می‌باشد [۲]. بنابراین واضح است که در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه جهت دستیابی به پاسخ واقعی و پیش‌بینی رفتار سازه ضروری خواهد بود [۱].

رابطه بین زمان تناوب طبیعی سازه و خاک، یکی از عوامل موثر در پدیده اندرکنش می‌باشد و در رفتار سازه تاثیر بسزایی دارد. در زلزله ۱۹۷۰ گدیز (ترکیه)، قسمتی از یک کارخانه که در شهری به فاصله ۱۳۵ کیلومتری از کانون زلزله قرار داشت و در آن هیچ ساختمانی صدمه ندیده بود، خراب گردید. بررسی انجام شده نشان داد که زمان تناوب اصلی کارخانه (سازه) تقریباً با زمان تناوب خاک یکی بوده است [۲].

کاهش خواص دینامیکی خاک باعث افزایش پریود طبیعی سازه می‌شود و همچنین در نظر گرفتن اثر اندرکنش هم باعث افزایش پریود طبیعی سازه می‌شود [۳].

ایجاد حرکت گهواره‌ای در سازه که خود از اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد؛ می‌تواند منجر به افزایش پریود طبیعی سازه گردد. افزایش زمان تناوب بر پاسخ سازه نیز تاثیرگذار خواهد بود. افزایش زمان تناوب ممکن است با توجه به شرایط خاک و زمان تناوب باعث افزایش یا کاهش شتاب وارد بر سازه شود (شکل ۱) [۴].



شکل ۱- تغییرات زمان تناوب و شتاب [۴]

۳. اعتبار سنجی مدل‌سازی سازه و خاک در تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار Abaqus

ظهور رایانه‌های قدرتمند به طور قابل توجهی روش‌های محاسباتی را تغییر داد. به عنوان مثال محدوده روش‌های عددی گسترده‌تر از روش‌های تحلیلی شده و استفاده از روش‌های المان محدود و اختلاف محدود برای مطالعه رفتار پیچیده اندرکنش محبوب‌تر شده است. با استفاده از این روش، محققان قادر به مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی محیط خاک با درجه بالایی از دقت شده‌اند [۵]. با توجه به مدل‌سازی یک قاب فلزی به همراه محیط خاک باید به طریقی صحت نتایج ارائه شده در مبحث تحلیل فرکانسی به اثبات برسد. به همین منظور ابتدا به بررسی و مقایسه نتایج تحلیل در نرم‌افزار Abaqus و ETABS معتبر پرداخته می‌شود.

۳-۱ تحلیل فرکانسی قاب سه طبقه دو بعدی

همواره جهت صحت سنجی نرم‌افزارها به بررسی مدل‌های ساده و قابل حل توسط محاسبات دستی پرداخته می‌شود. از اینرو یک قاب خمشی فلزی سه طبقه به مشخصات جدول (۱) و (۲) در نرم‌افزار Abaqus و ETABS مدل‌سازی و تحلیل شده است.

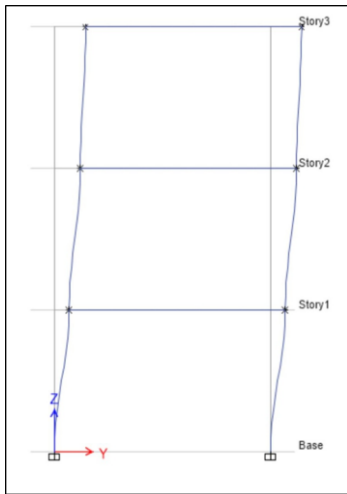
جدول ۱- مشخصات مقطع ستون

مقطع	عرض مقطع (mm)	طول مقطع (mm)	ضخامت مقطع (mm)
Box200*200*T10	200	200	10

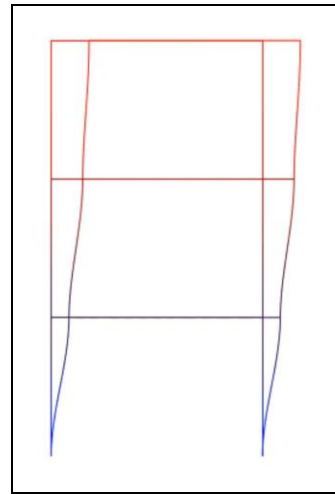
جدول ۲- مشخصات مقطع تیر

مقطع	ارتفاع تیر (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت جان تیر (mm)	ضخامت بال تیر (mm)
GIR270	270	125	6	10

تغییر شکل مدل دو قاب در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است که کاملاً شبیه هم هستند و مقادیر فرکانس مدل اول در جدول (۳) ارائه شده است که مقدار بسیار ناچیزی تفاوت دارند، بر این اساس دقت بالای نرم‌افزار Abaqus در تحلیل فرکانسی قاب‌های ساختمانی مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- مدل اول در نرم‌افزار ETABS



شکل ۲- مدل اول در نرم‌افزار Abaqus

جدول ۳- مقادیر فرکانس طبیعی

نرم‌افزار	شماره مدل	فرکانس طبیعی
Abaqus	1	9.7087 Hz
ETABS	1	9.6990 HZ

۲-۳ تحلیل فرکانسی خاک دو بعدی

از مهمترین بخش‌های این پژوهش بررسی صحت نتایج تحلیل فرکانسی خاک می‌باشد. در این قسمت یک محیط خاک دو بعدی به ارتفاع ۶۰ متر در ابعاد ۱۰۰، ۵۰ و ۱۵۰ متر به مشخصات جدول (۴) مورد ارزیابی قرار گرفته که طبق اشکال (۴)، (۵) و (۶) در تحلیل دو بعدی طول مدل تاثیری در نتایج ندارد و نتایج آن طبق جدول (۵) با فراکانس‌های طبیعی ارتعاش نهشته‌های خاکی که با استفاده از رابطه (۱) [۶] تعیین می‌گردند. برای η برابر صفر، نخستین فرکانس طبیعی یا فرکانس غالب خاک طبق رابطه (۲) [۶] محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که ارتباط بین ضخامت خاک و فرکانس غالب در گستره شهر مشهد به صورت رابطه (۳) [۷] پیشنهاد گردیده است. با استفاده از رابطه (۱) فرکانس غالب $1/739$ هرتز بدست می‌آید و در ادامه در جدول (۵) مدهای دوم و سوم خاک ذکر شده است.

$$f_n = \frac{v_s}{4H} (1 + 2n) \quad (1)$$

$$f_1 = f = \frac{v_s}{4H} \quad (2)$$

$$H = 82f^{-0.6} \quad (3)$$

در این روابط

$$\eta = \text{فرکانس طبیعی لایه خاک}$$

$$f_1 = \text{فراکانس غالب}$$

$$v_s = \text{متوسط سرعت موج برشی}$$

$$H = \text{ضخامت لایه}$$

جدول ۴- مشخصات لایه خاک در مدل

نوع خاک	مدل رفتاری خاک	وزن مخصوص (Kg/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	مدول الاستیسیته (pa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (KN/m ²)
SM-SC	موهر کولمب - پلاستیسیته	1986	417	8.9E+08	0.3	30.9	7.3

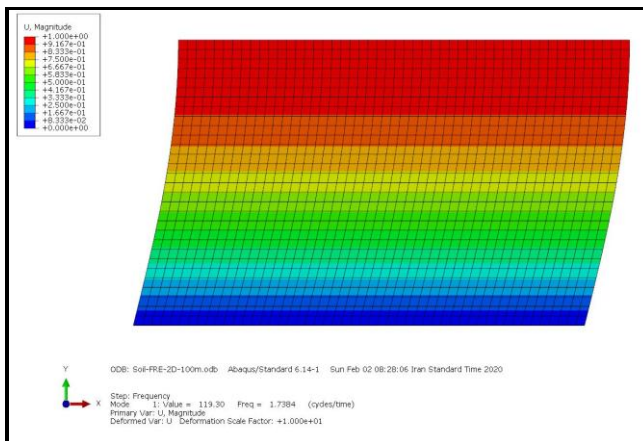
جدول ۵- مقادیر فرکانس طبیعی خاک

نحوه بدست آوردن فرکانس طبیعی	مد اول (Hz)	مد دوم (Hz)	مد سوم (Hz)
با استفاده از رابطه (۱)	1.739	5.216	8.963
با استفاده از نرم افزار Abaqus	1.738	5.2103	8.668

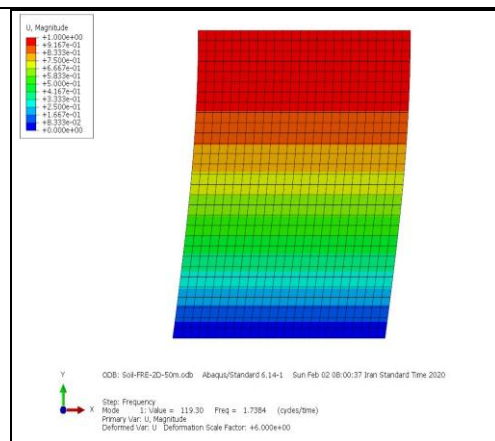
در تحلیل مدها، باید مجموع جرم‌های موثر تمام مدهای نوسان بیشتر از ۹۰ درصد جرم کل سازه باشد که در تحلیل فرکانسی در نرم افزار Abaqus طبق جدول (۶) این شرط برقرار می‌باشد. نکته دیگر در بررسی نتایج تحلیل فرکانسی شکل مدهای غالب می‌باشد که با شکل (۷) مورد مقایسه قرار گرفته است. بر این اساس مشاهده می‌شود که شکل مدهای غالب نرم افزار (شکل ۸) با محاسبات تئوری تطابق مناسبی دارد و موید این مطلب می‌باشد که نتایج نرم افزار می‌تواند مورد اتکا قرار بگیرد.

جدول ۶- درصد مشارکت جرم موثر به جرم کل

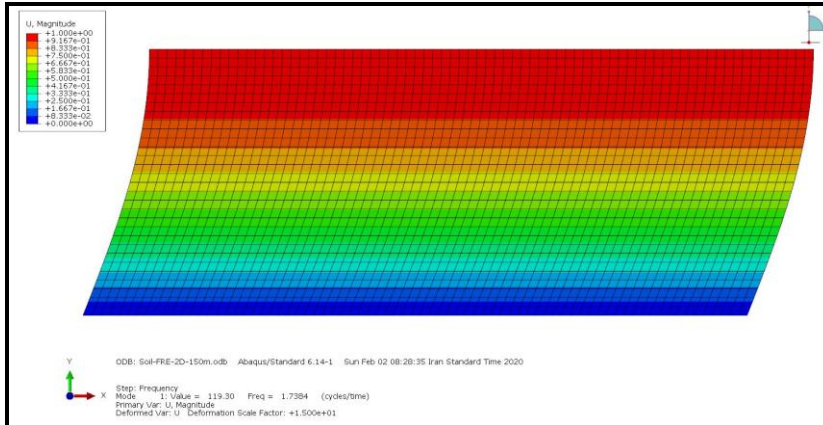
جرم کل (kg)	جرم موثر (kg)	نسبت جرم موثر به جرم کل (درصد)
5958000	5706230	95.7



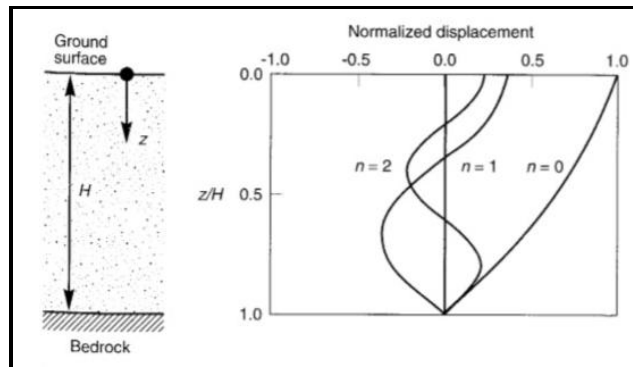
شکل ۵- مد اول خاک به ابعاد ۱۰۰ متر



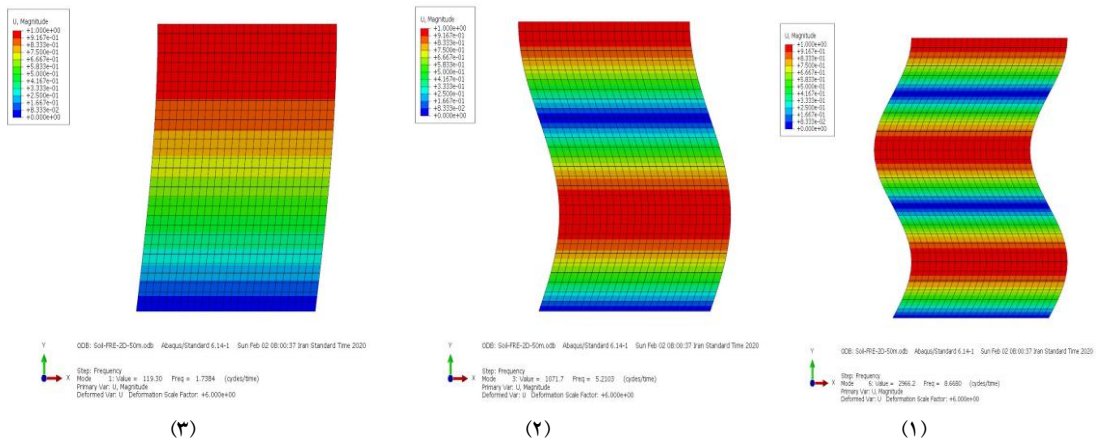
شکل ۴- مد اول خاک به ابعاد ۵۰ متر



شکل ۶- مد اول خاک به ابعاد ۱۵۰ متر



شکل ۷- شکل مدها بر اساس رابطه (۱) برای مقادیر $n=0,1,2$ برای خاک یک لایه با در نظر گرفتن میرایی ۵٪ [۶]



شکل ۸- مدهای خروجی نرم افزار Abaqus

۴. مدل سازی

برای مدل سازی سیستم اندرکنش خاک و سازه، از روش مدل سازی مستقیم در نرم افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۷) توضیح داده شده و برای مدل سازی سیستم سازه با تکیه گاه صلب از نرم افزار ETABS استفاده شده است (شکل ۱۰).

جهت مدل سازی خاک باید ابعاد به صورت مناسب انتخاب شود به این دلیل که اثرات ارتعاش سازه و ساختگاه بطور مستقیم در معادلات دیده شود. منابع مختلف پیشنهاد می کنند عرض مدل در محدوده ۳ تا ۵ برابر بعد سازه در هر طرف و عمق محیط خاک حداقل ۳۰ متر در نظر گرفته شود. با توجه به مطالب گفته شده ابعاد مدل ۲۵۰ متر و ارتفاع آن ۶۰ متر در نظر گرفته می شود (شکل ۹).

جدول ۷- نوع المان ها 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
دیوار برشی	Shell	S4R	فونداسیون	Shell	S4R

در ادامه برای تعیین پارامترهای مهندسی خاک علاوه بر نتایج آزمون های آزمایشگاهی، از نتایج آزمون های صحرائی نیز جهت تکمیل محاسبات استفاده شده است. با توجه به ارتباط بیشتر پارامترهای ژئوتکنیکی با عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده، روابط تجربی برای تعیین پارامترهای اصطکاک داخلی و چگالی خاک نیز برای این مورد ارائه شده که در جدول (۸) نمایش داده شده است. مقدار اصطکاک داخلی با توجه به درشت یا ریزدانه بودن خاک تعیین گردیده. همچنین با توجه به سرعت موج برشی در جدول (۸) و طبق آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله، خاک از نوع II می باشد [۸]. نتایج ارزیابی نوع لایه ها در جدول (۸) ارائه شده است. در ادامه در جدول (۹) مشخصات فولاد و بتن ارائه شده.

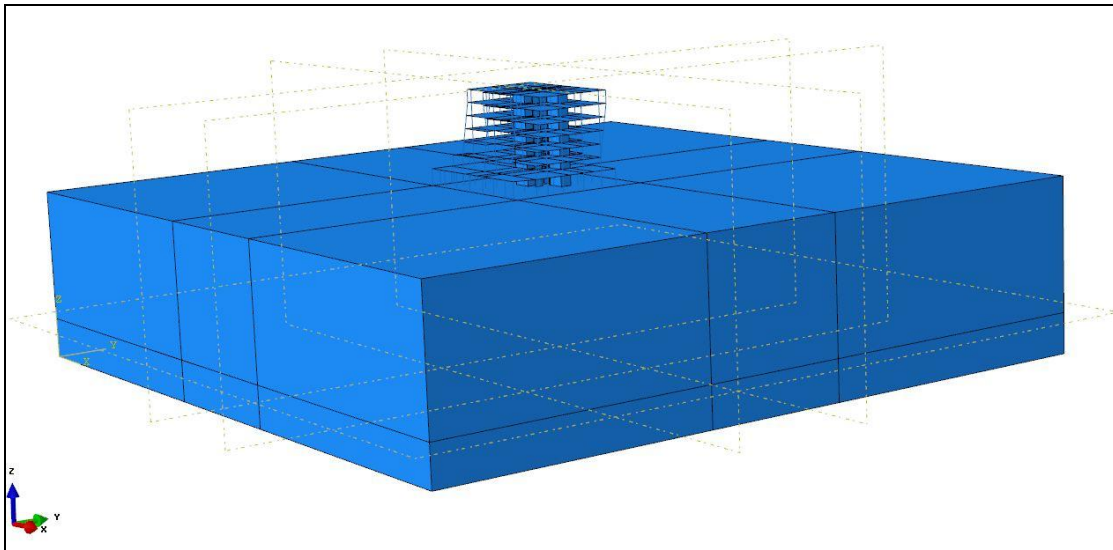
به دلیل عدم دسترس بودن کامل نتایج آزمایش سه محوری و به خصوص نمودارهای آن، امکان تعیین دقیق پارامترهای مدل های رفتاری پیچیده وجود ندارد و عملاً استفاده از آنها با این شرایط نه تنها پاسخ دقیق تری را ارائه نمی دهد بلکه موجب گمراهی در تفسیر نتایج نیز خواهد شد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق از مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک استفاده می شود. لازم به ذکر است که این مدل رفتاری بطور گسترده توسط محققین مختلف برای شبیه سازی رفتار خاک در سیستم اندرکنش خاک و سازه مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۸- مشخصات لایه های خاک در مدل

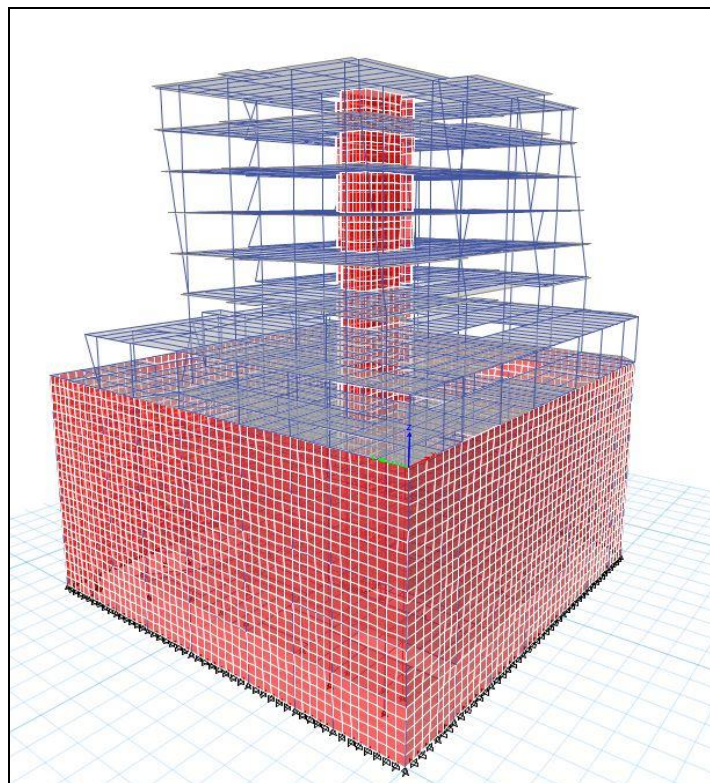
نوع خاک	مدل رفتاری خاک	وزن مخصوص (Kg/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	مدول الاستیسیته (pa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (KN/m ²)
SM-SC	موهر کولمب - پلاستیسیته	1986	557	17.2 E+07	0.25	30.9	7.3
CL	موهر کولمب - پلاستیسیته	2040	604	30.8 E+07	0.3	29	19.6

جدول ۹- مشخصات فولاد و بتن

نوع مصالح	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (pa)	ضریب پواسون
بتن	2500	2.9 E+10	0.15
فولاد	7850	2.059E+11	0.3



شکل ۹- مدل سازه با محیط خاک در نرم افزار Abaqus



شکل ۱۰- مدل سازه با تکیه گاه صلب در نرم افزار ETABS

۴. تحلیل نتایج

همانطور که ملاحظه می شود در جدول (۱۰)، برای سازه نیمه بلند مرتبه فلزی مفصلی با سیستم سازه دیوار برشی در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش مقدار زمان تناوب یا کاهش فرکانس طبیعی سازه نسبت به حالتی که تحلیل فرکانسی با تکیه گاه صلب در نظر گرفته شده باشد می شود. در ادامه شکل (۱۱) مد اول که بیشترین جرم را جذب کرده در نرم افزار Abaqus نشان داده شده است.

طبق بند ۴-۶-۲ (تعیین دوره تناوب سازه) آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، برای محاسبه زمان تناوب تجربی ساختمان‌های با سیستم سازه‌ای دیوار برشی، با یا بدون وجود جداگرهای میانقابی از رابطه (۴) می‌توان استفاده کرد و مقدار آن طبق تبصره گفته شده در این بند ۱/۲۵ برابر کرد که در صورت مقایسه با زمان تناوب در حالتی که اثر اندرکنش دیده می‌شود این مقدار نیز کمتر است (جدول ۱۱) [۸]. می‌توان نتیجه گرفت در صورت در نظر گرفتن اثر اندرکنش در خاک‌های نوع II باعث افزایش پریود سازه می‌شود.

جدول ۱۰- مقایسه زمان تناوب در صورت نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه با حالت تکیه‌گاه صلب

شماره مد	Abaqus (s)	ETABS (s)	درصد افزایش
1	1.25	1.11	12.6
2	1.23	0.91	35.1
3	1.09	0.53	105

$$T = 0.05H^{0.75} \quad (4)$$

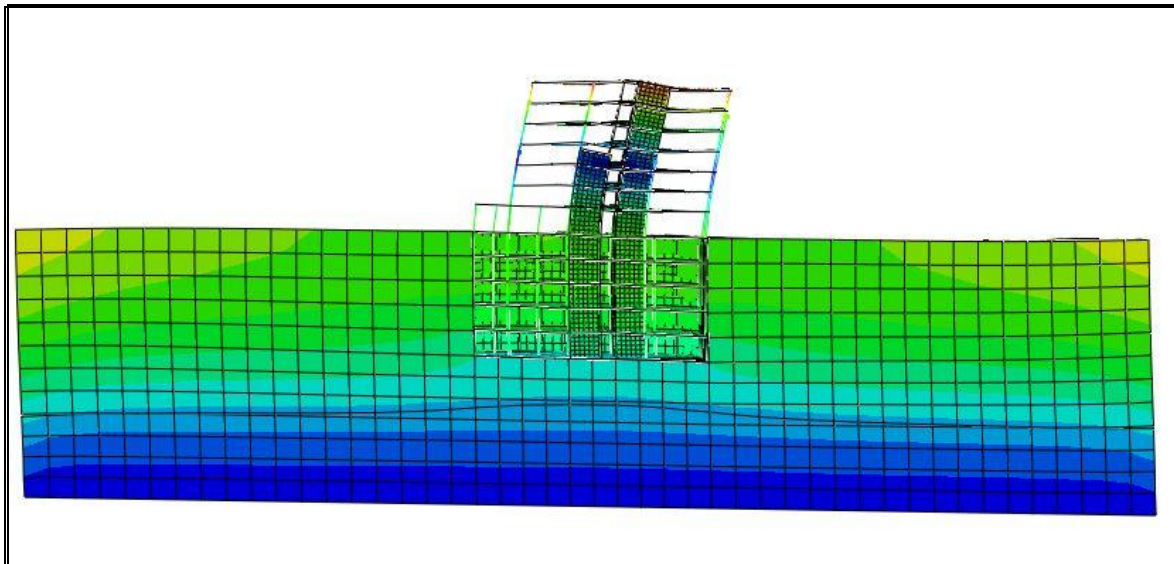
در این رابطه

T = زمان تناوب تجربی

H = ارتفاع ساختمان

جدول ۱۱- مقایسه زمان تناوب در صورت نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه با آیین‌نامه ۲۸۰۰

نحوه بدست آوردن زمان تناوب	مقدار زمان تناوب (s)	درصد افزایش
Abaqus	1.25	45
آیین‌نامه ۲۸۰۰	0.86	



شکل ۱۱- مد اول در نرم‌افزار Abaqus

طبق بند ۲-۳ آیین‌نامه ۲۸۰۰ ضریب بازتاب ساختمان بیانگر نحوه پاسخ ساختمان به حرکت زمین با توجه به نوع آن می‌باشد. این ضریب با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود. با استفاده از این رابطه نمودار (۱)، طیف طرح ساختگاه برای خاک نوع II رسم می‌شود [۸]. با توجه به نتایج بدست آمده از جدول (۱۰) اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش زمان تناوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت ضریب بازتاب ساختمان کاهش پیدا می‌کند که طبق بند ۱-۳-۳ باعث کاهش مقدار نیروی برشی می‌شود (جدول ۱۲).

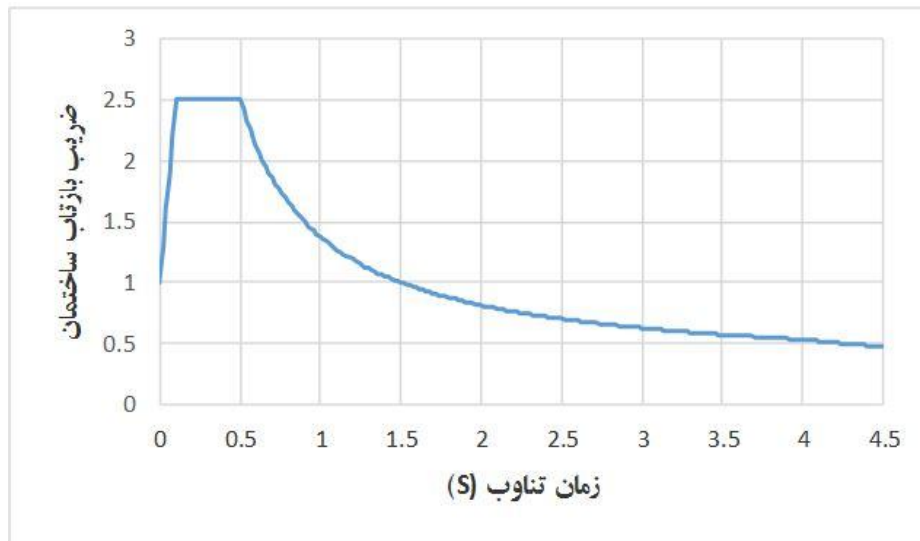
$$B = B_1 N \quad (5)$$

در این رابطه

B = ضریب بازتاب ساختمان

B_1 = ضریب شکل طیف

N = ضریب اصلاح طیف



نمودار ۱- ضریب شکل طیف طرح برای خاک نوع II با خطر زیاد و خیلی زیاد

جدول ۱۲- مقایسه ضریب بازتاب ساختمان در صورت نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه با حالت تکیه گاه صلب

نحوه بدست آوردن ضریب بازتاب ساختمان	مقدار زمان تناوب (s)	درصد کاهش
Abaqus	1.25	10
ETABS	1.14	

۶. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر اثر اندرکنش خاک و سازه بر سازه های نیمه بلند مرتبه با سیستم سازه ای دیوار برشی پرداخته شد که نتایج حاصل با مقایسه با منابع معتبر نشان می دهد:

۱- برای سازه نیمه بلند مرتبه فلزی مفصلی با سیستم سازه دیوار برشی در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش مقدار زمان تناوب یا کاهش فرکانس طبیعی سازه نسبت به حالتی که تحلیل فرکانسی با تکیه گاه صلب در نظر گرفته شده باشد می شود.

۲- با توجه به اینکه اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش زمان تناوب می شود، می توان نتیجه گرفت ضریب بازتاب ساختمان کاهش پیدا می کند که طبق بند ۱-۳-۳ باعث کاهش مقدار نیروی برشی می شود.



دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۱۳۹۹ خرداد ۵ تا ۷

دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران



۷. مراجع

1. Venanzi, I., Salciarini, D., and Tamagnini, C. (2014). "The effect of soil–foundation–structure interaction on the wind-induced response of tall buildings." *Engineering structures*, 79, 117-130.
۲. برگی، خ. (۱۳۹۲). اصول مهندسی زلزله، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
2. Reza Tabatabaiefar, S. H., Fatahi, B., and Samali, B. (2012). "Seismic behavior of building frames considering dynamic soil-structure interaction." *International Journal of Geomechanics*, 13(4), 409-420.
۴. مهید، ه. محمودی، ح. مظاهری، ش. (۱۳۹۶). "بررسی روش‌های لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و طراحی سازه‌ها." سومین کنفرانس سالانه پژوهش‌های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری، شیراز.
5. Far, H. (2017). "Advanced computation methods for soil-structure interaction analysis of structures resting on soft soils." *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-8.
6. Kramer S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey, 653p, 1996.
۷. حافظی مقدس ن، "گزارش ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (مدیریت منطقه شمال شرق)، مشهد، ۱۳۸۷.
۸. استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۲). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.