

تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی به روش المان محدود*

محمد حسین امین‌فر^(۱) بهمن فرهمند آذر^(۲) هادی صفری^(۳) مرتضی بیک لریان^(۴)

چکیده در عمل، سازه بر لایه‌های خاک انعطاف‌پذیر واقع شده است. بنابراین خاک نیز باید بمانند سازه مدل شود. یک سازه با تکیه‌گاه صلب، و یک سازه با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر از این لحاظ با یکدیگر اختلاف دارند که ممکن است قسمت اصلی انرژی ارتعاشی به‌وسیله‌ی تشعشع امواج و نیز توسط عمل هیستریزس در خاک مستهلک شود. در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ خاک زیر سازه صلب فرض شده است و از اثرات اندرکنش خاک - سازه صرف نظر شده است. در این تحقیق سعی شده تا تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر پاسخ‌های ارتعاشی برای قاب‌های خمشی بتنی بررسی شود و روشی بر پایه‌ی المان‌های محدود مطابق با ضوابط و پارامترهای آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ارائه شود. دقت روش ارائه شده با چهار روش دیگر مراجع مقایسه شده است. نتایج حاصل از تاریخچه‌ی زمانی و تحلیل مودال بر روی سیستم‌های معرفی شده در نمودارها و جداول ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی اندرکنش خاک-سازه، تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، تکیه‌گاه صلب، پاسخ ارتعاشی سازه، روش المان محدود.

Dynamic Soil – Structure Interaction Analysis of Concrete Structures by Using Finite Elements Method

M. H. Aminfar B. Farahmand H. Safari M. Biklaryan

Abstract In practice, foundations are settled on the soft layers of soil, so the ground must be designed as well as the structure. Wave propagation and hysteresis damping of soil layers may alter the seismic response of flexible-base design in comparison to controversial fixed-base. Lots of uncertainties about this issue, necessitate most of seismic design standards including Iranian standard No. 2800 to neglect the soil – structure interaction (SSI) effects on seismic response of structures. A simplified finite elements method is proposed in this research and applied according to the Standard No. 2800 criteria on reinforced concrete structures. The accuracy and efficiency of this method is compared with four other similar researches, and the results of time history and modal analyses for descriptive reinforced concrete systems are illustrated in the form of figures and charts.

Key Words Soil-Structure Interaction, Flexible-Base, Fixed-Base, Seismic Responses, Finite Elements Method

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۲/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۷/۱۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

(۲) دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

(۳) دانشجوی دکتری عمران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه محقق اردبیلی.

(۴) دانشجوی دکتری عمران، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

مقدمه

اندرکنش خاک و سازه مسأله‌ی بسیار مهمی است خصوصاً برای سازه‌های سنگین و سخت که بر زمین‌های انعطاف پذیر ساخته شده‌اند. این مسأله پاسخ‌های سازه را تا حد قابل توجهی تغییر می‌دهد. بنابراین تأثیرات این اندرکنش باید در پاسخ‌های دینامیکی سازه در نظر گرفته شود [1]. موضوع تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله در مطالعات زیادی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. در هنگام وقوع زلزله رفتار خاک زیر سازه نقش مهمی در پاسخ سازه ایفا می‌کند. در اغلب موارد، خاک مدل نمی‌شود و از تأثیرات مهم آن صرف نظر می‌شود. به علت نامحدود بودن محیط خاک، مدل‌سازی آن پیچیدگی بیش‌تری نسبت به مدل‌سازی سازه دارد. در سازه‌هایی که تحت تأثیر زلزله قرار گرفته‌اند علاوه بر نیروهای دینامیکی وارد و تنش‌های ناشی از آن در سازه، پارامتر زمین و خاک به عبارت بهتر رفتار متقابل خاک و سازه، نقش انکارناپذیری بر عهده دارد و رفتار سیستم را به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر باعث گردیده که این موضوع در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گیرد. در سال ۱۹۶۷ میلادی، وایتمن و ریچاردنیم فضای الاستیک زیر سازه را به‌صورت یک جرم متمرکز و فنر مدل کردند و در این مدل، فنرها و میراگرهای در نظر گرفته‌شده، مستقل از محتوای فرکانسی بار بودند [2]. در سال ۱۹۷۵ میلادی، کاسل و روزتروشی بر پایه‌ی المان محدود بود را بیان کردند [4]. این روش در سال ۱۹۷۵ میلادی، توسط سید و لایسمر مورد مطالعه بیشتر قرار گرفت و المان‌های مرزی مختلفی برای این روش بیان کردند [5]. در سال ۲۰۰۰ میلادی، رودریگوز و مونتز با تعیین پارامترهای موجود در سیستم یک درجه آزادی ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی ATC3-06 برای سازه‌های متداول در مکزیک و با در نظر گرفتن شرایط خاک منطقه، اثر اندرکنش را بر رفتار غیر خطی سازه بررسی

نمودند و به این نتیجه رسیدند که با اصلاح پریود سازه می‌توان اثرات اندرکنش خاک-سازه را در نظر گرفت [9]. در سال ۲۰۰۷ میلادی، هونگ و همکارانش در ادامه‌ی تحقیقات در زمینه‌ی مدل‌های المان محدود به‌منظور مدل کردن ناحیه‌ی دور خاک از المان‌های ویسکوز استفاده کردند و تلاش کردند تا خصوصیات غیر خطی خاک را در مدل خود اعمال کنند [18]. مطالعات در زمینه‌ی المان‌های مرزی در روش المان‌های محدود مورد توجه محققان بسیاری می‌باشد. در سال ۲۰۰۱ میلادی، یرلی و تانریکولو روش مختلط المان‌های محدود و المان‌های نامحدود و روش المان‌های مرزی را ارائه کردند که در این تحقیق برای بررسی دقت مدل خاک پیشنهادی بکار رفته است [10,11,14]. در سال ۲۰۰۴ ولف مدل مخروطی یا Cone را برای مدل کردن خاک زیر سازه استفاده کرد در این تحقیق برای بررسی میزان دقت مدل خاک ارائه شده به‌همراه سازه از آن استفاده شده است [15,20]. در سال ۲۰۰۴ میلادی، حسین‌زاده و ناطقی مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر مدل آزمایشگاهی خود انجام دادند که در این تحقیق سعی شده است از نتایج و پارامترهای به‌کار گرفته‌شده در آن استفاده شود [16]. در سال ۲۰۰۹ میلادی، ناصر مطالعات خود را در زمینه‌ی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر قاب‌های بتن‌آرمه انجام داده است [20].

در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از المان‌های فنر و میراگر وایتمن و ریچارد که به‌صورت یک جرم متمرکز و فنر در زیر سازه مدل می‌شود و با استفاده از روش المان‌های محدود که مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد مدل ترکیبی اصلاح شده‌ای برای بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه ارائه شود. در ادامه تلاش شده‌است میزان تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر سازه‌های بتنی واقع بر روی پی‌های سطحی مطابق با ضوابط و پارامترهای

آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ بررسی شود.

تماس در میدان دور محاسبه می‌شوند، سپس به صورت نیرو در تحلیل اجزای محدود میدان نزدیک اعمال می‌شوند. عدم کارایی این روش، یافتن راه حلی برای مسأله‌ی پراکنندگی امواج در میدان نزدیک و دور می‌باشد [12].

در مواردی که لایه بندی خاک در جهات افقی و عمودی قرار گرفته و بررسی رفتار غیر خطی خاک در تحلیل اندر کنش ضروری باشد، استفاده از مدل نیم بی‌نهایت ارتجاعی امکان‌پذیر نیست و باید از روش عناصر محدود استفاده شود. در این روش می‌توان علاوه بر در نظر گرفتن میرایی هندسی، مشابه مدل نیم بی‌نهایت ارتجاعی، مدفون‌شدگی پی و لایه‌بندی خاک در جهات افقی و عمودی را به راحتی در تحلیل دخالت داد. گرچه امکان تحلیل سه‌بعدی نیز در این روش امکان پذیر است، لیکن به علت حجم بالای محاسباتی این روش، آن را به صورت مدل دوبعدی معادل شبیه‌سازی می‌کنند شکل (۱). خصوصیات گره‌ها روی این مرزها که مرز اندر کنش نامیده می‌شوند نمایانگر خصوصیات مهم دامنه‌ی نامحدود خاک در خارج از این مرزها می‌باشند. برای مثال در یک تحلیل دامنه‌ی فرکانس، خصوصیات سختی دینامیکی مربوط به گره‌های این مرز اندر کنش، بیانگر رفتار خاک نامحدود می‌باشد. رفتار خاک نامحدود همیشه خطی فرض می‌شود. موقعیت این مرز اختیاری است که می‌تواند نزدیک و یا دور در نظر گرفته شود. اگر مرز اندر کنش برای مدل کردن خاک به اندازه‌ی کافی دور از سازه انتخاب شود به آن مرز مصنوعی می‌گویند. این مرزهای مصنوعی باید طوری انتخاب شوند که انعکاس موج نداشته و به اندازه‌ی کافی دور از سازه باشند تا اثرات خاک در تحلیل دینامیکی مد نظر قرار گیرند. به این روش مدل کردن خاک روش مستقیم می‌گویند. اگر این مرز در نزدیک سازه انتخاب شود می‌توان از روش زیر سازه که یکی از مدل‌های مختلط است استفاده کرد.

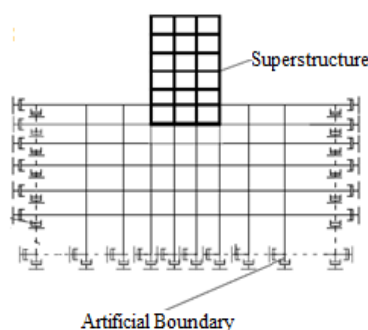
مدل خاک و سازه برای در نظر گرفتن اندر کنش خاک-سازه

یک مدل خاک در صورتی به شرایط طبیعی نزدیک می‌باشد که در آن سختی‌های خاک، میرایی ماده، میرایی تشعشعی، کرنش‌های غیرخطی و تغییرات خواص خاک در نظر گرفته شود. روش‌های تحلیل اندرکنش خاک-سازه به سه دسته‌ی روش مستقیم، روش زیرسازه و روش مختلط تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم، پاسخ سیستم خاک - سازه به‌طور هم‌زمان با تحلیل سیستم خاک - سازه در یک گام به دست می‌آید. روش المان محدود نمونه‌ای از این روش می‌باشد. در حالتی که امکان مدل کردن خاک زیر سازه به صورت المان محدود وجود نداشته باشد روش زیر سازه به کار می‌رود. در این روش اثر خاک بر سازه به وسیله‌ی یک سری فنر و میراگر تعریف می‌گردد که مشخصات آن‌ها به صورت تابعی از فرکانس ارتعاشی معرفی می‌گردد. مهم‌ترین مزیت این روش، عدم مدل کردن لایه‌های خاک می‌باشد که حجم عملیات را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد، اما این روش دارای محدودیت‌هایی است که کارایی آن را کاهش می‌دهد. فرض اصلی این روش، برقراری اصل برهم‌نهی است که متضمن رفتار خطی است. در این روش مجموعه‌ی خاک-سازه به دو بخش خاک به‌علاوه‌ی سازه تقسیم می‌گردد که هر کدام به صورت جداگانه حل می‌شود و در مرحله‌ی نهایی تحلیل، بر اساس اصل برهم‌نهی، نتایج تحلیل‌ها با همدیگر ترکیب می‌شوند. این روش به‌خصوص در مواقعی که سیستم دارای هندسه‌ی پیچیده می‌باشد کاربرد کم‌تری دارد. در روش مختلط محیط به دو زیر سازه موسوم به میدان نزدیک، که سازه و محدوده‌ی مشخصی از خاک اطراف آن را در بر می‌گیرد و میدان دور، که باقیمانده‌ی محیط خاک نیمه‌بی‌نهایت را شامل می‌شود، تقسیم می‌گردد. در این روش مقادیر تنش و تغییر مکان ابتدا در موقعیت سطح

است، سازه های مورد مطالعه شامل ۵ مدل می باشند که این مدل ها دارای تعداد طبقات ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ می باشند. قاب ها به صورت دو بعدی مدل سازی و مورد مطالعه قرار گرفته اند. ارتفاع طبقات این سازه ها ۳ متر می باشد و این مدل ها به صورت قاب بتن آرمه با سیستم قاب خمشی متوسط آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران طراحی شده اند. دهانه ی قاب ها ۵ متر انتخاب شده است و در جهت عرضی، قاب ها به اندازه ی ۵ متر از هم فاصله دارند. سیستم سقف به صورت تیرچه بلوک است و جهت تیرریزی سقف ها به صورت شکل (۳) می باشد. بار مرده ی گسترده ی کف را 600 kg/m^2 و بار زنده ی طبقات و بام طبق آیین نامه ایران 200 kg/m^2 در نظر گرفته شده است. به علاوه وزن خود تیرها و ستون ها با توجه به وزن مخصوص مصالح به کار رفته (بتن و آرماتور) در نرم افزارهای مورد استفاده قابل محاسبه می باشند که به صورت بار مرده به بارهای فوق اضافه می شوند.

مشخصات سیستم خاک مورد بررسی

در جدول (۲) مشخصات چهار نوع خاک مورد مطالعه در این تحقیق برای چهار گروه مختلف خاک در آیین نامه ی ایران ارائه شده است [17].



شکل ۱ مدل دو بعدی خاک در روش المان محدود

جدول ۱ مشخصات مصالح فولادی و بتنی قاب های بتنی مورد بررسی

نوع مصالح	تنش تسلیم kg/cm^2	مدول الاستیسیته kg/cm^2	ضریب پواسون
فولاد	۲۸۰۰	2.01×10^6	۰/۳
بتن	۲۱۰	2.01×10^9	۰/۲

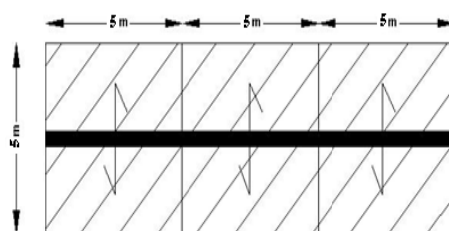
مشخصات سازه های مورد بررسی

برای طراحی قاب های بتنی مسطح، مشخصات مصالح برابر مقادیر جدول (۱) فرض شده است:

در این مطالعه به بررسی سازه های بتنی با قاب خمشی متوسط پرداخته شده است و سعی شده از سازه های با ارتفاع کم، متوسط و زیاد در مدل ها استفاده شود. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده



شکل ۲ مدل سازه های منظم



شکل ۳ پلان تپ سقف طبقات

جدول ۲ مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

خاک	Vs(m/s)	توصیف آیین‌نامه	ν	G(N/m ²)	r(Kg/m ³)	(N/m ²)
I	۱۴۰۰	سنگ‌های رسوبی سخت و مقاوم، سنگ‌های آذرین	۰/۳	۴۳۱۲×۱۰ ^۶	۲۲۰۰	۱/۱۲۱×۱۰ ^{۱۰}
II	۶۰۰	سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست رسوبی و سنگ‌های دگرگونی متورق	۰/۳۵	۷۹۲×۱۰ ^۶	۲۲۰۰	۲/۱۸۴×۱۰ ^۹
III	۳۰۰	سنگ‌های متلاشی شده بر اثر هوازدگی، خاک‌های با تراکم متوسط	۰/۳۵	۱۹۸×۱۰ ^۶	۲۲۰۰	۵/۳۴۶×۱۰ ^۸
IV	۱۵۰	نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد	۰/۴	۴۹/۵×۱۰ ^۶	۲۲۰۰	۱/۳۸۶×۱۰ ^۸

به گره‌های المان‌های مرزی وصل می‌شود. این کار با تعبیه کمک فنرها و فنرهایی در گره‌های دو مرز جانبی ناحیه‌ی نزدیک خاک انجام می‌گیرد. برای محاسبه‌ی سختی فنرها و میرایی کمک فنرها که در مرز ناحیه‌ی دور و نزدیک خاک قرار گرفته‌اند از روابط ارائه‌شده توسط وایتمن و ریچارد استفاده می‌شود [2].

$$K_x = \frac{G\beta_z\sqrt{BL}\eta_v}{1-\theta} \quad (1)$$

$$K_y = 2(1 + \theta)G\beta_x\sqrt{BL}\eta_h \quad (2)$$

$$K_\theta = G\beta_\phi BL^2\eta_f/(1 - \theta) \quad (3)$$

که در آن‌ها، θ ضریب پواسون، G مدول برشی خاک، L, B ابعاد مقطع مستطیل شکل پی، ضرایب $\beta_\phi, \beta_z, \beta_x$ و ضرایب η_h, η_v, η_f که متأثر از عمق پی می‌باشند از منحنی‌ها و جداول مرجع به دست می‌آیند.

وایتمن با توجه به تأثیر میرایی هندسی و میرایی داخلی، روابط زیر را برای تعیین ضرایب میرایی کل معادل پیشنهاد می‌نماید. رابطه‌ی (۴) برای درجه‌ی آزادی انتقال قائم، رابطه‌ی (۵) برای درجه‌ی آزادی انتقال افقی و رابطه‌ی (۶) برای درجه‌ی آزادی خمشی:

$$\zeta_t = 0.49 \left(\frac{M}{\rho T_0^3} \right)^{-0.5} \quad (4)$$

به‌منظور مدل کردن سیستم خاک زیر سازه از روش المان محدود که یکی از روش‌های دقیق و پیچیده نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد استفاده شده است. بدین منظور خاک زیر سازه به دو قسمت میدان نزدیک و میدان دور تقسیم شده است. ناحیه‌ی نزدیک شامل ناحیه‌ی محدود خاک زیر سازه و میدان دور شامل یک صفحه نیمه بی‌نهایت می‌باشد. ناحیه‌ی نزدیک خاک به‌صورت المان محدود مدل شده است که شامل خاک زیر سازه به عمق ۳۰ متر و به عرض ۶۵ متر از هر طرف سازه که مانند قاب به‌صورت دوبعدی مدل می‌شود و چون خاک در خارج از صفحه نامحدود می‌باشد، ناحیه‌ی نزدیک خاک به‌صورت کرنش مسطح مدل می‌شود [8]. هر کدام از المان‌های کرنش مسطح در نظر گرفته‌شده در مدل دارای ۴ گره در گوشه‌ها و هر گره شامل دو درجه‌ی آزادی انتقالی می‌باشد. پی ساختمان به‌صورت گسترده و صلب در نظر گرفته شده‌است و به‌صورت المان تیر صلب در محل اتصال خاک به زیر سازه مدل می‌شود و در محل اتصال این المان‌ها به خاک به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک در تماس با سازه از المان‌های فقط فشاری استفاده شده است که از انتقال نیروی کششی سازه به خاک جلوگیری می‌کنند. برای مدل کردن ناحیه‌ی دور که به صورت نیمه بی‌نهایت است در طرفین ناحیه‌ی نزدیک خاک از مدل فنر و کمک‌فنر استفاده می‌شود که

شده توسط Yerli و Tanrikulu برای مدل نشان داده شده در شکل (۴) با مشخصات ذکر شده در جدول (۳)، با نتایج حاصل از روش FEM پیشنهاد شده در این تحقیق، مقایسه گردید. یرلی از روش ترکیبی المان محدود و المان های نامحدود و تانریکولو از روش المان های مرزی برای مدل سازی این سیستم استفاده کردند [10,11]. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، پی واقع بر یک نیم فضای خاک به صورت صلب فرض شده است و در اشکال (۶ و ۵) تغییر مکان های قائم نقاط B و C به دست آمده از روش های ذکر شده ارائه گردید و مشاهده شد که مدل پیشنهادی این تحقیق FEM با دیگر مدل ها مطابقت خوبی دارد.

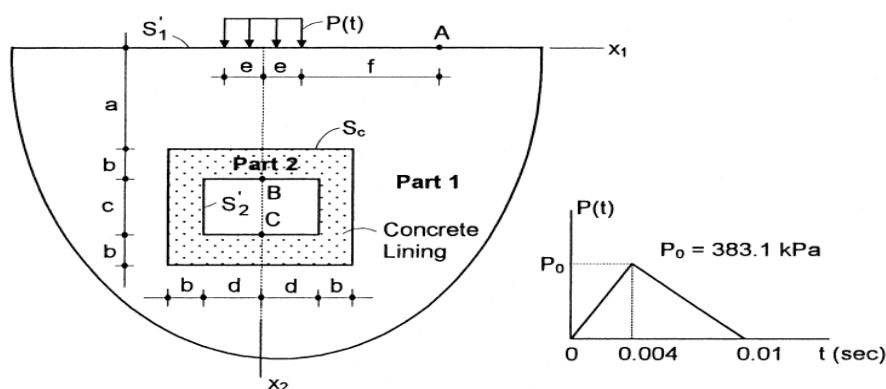
$$\zeta_t = 0.31(M/\rho r_0^3)^{-0.5} \quad (5)$$

$$\zeta_t = 0.05 + 0.1(I_\phi/\rho r_0^5)^{0.5}[1 + (I_\phi/4\rho r_0^5)]^{-1} \quad (6)$$

در این روابط ρ چگالی خاک، r_0 شعاع مؤثر پی، M جرم کل سازه و I_ϕ ممان اینرسی کل سازه می باشد. برای محاسبه ی سختی و میرایی المان های مرزی، طبق روابط ارائه شده ی فوق، ناحیه ی مرزی سهم هر گره به صورت یک پی مستطیلی در نظر گرفته می شود که فنرها و کمک فنرهای تعبیه شده در هر گره بر آن عمود هستند.

بررسی صحت مدل خاک در نظر گرفته شده در زیر سازه

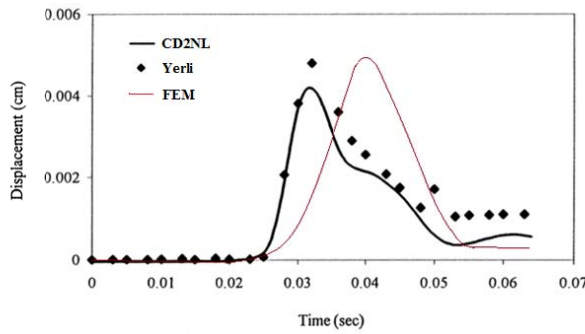
در این مرحله نتایج به دست آمده از روش های ارائه



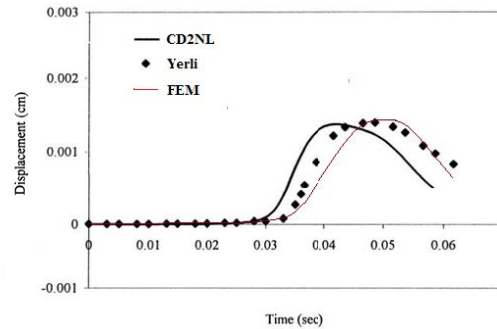
شکل ۴ نیم فضای خاک مورد بررسی و نمودار توزیع بار

جدول ۳ مشخصات خاک نیم فضا و بتن مصرفی

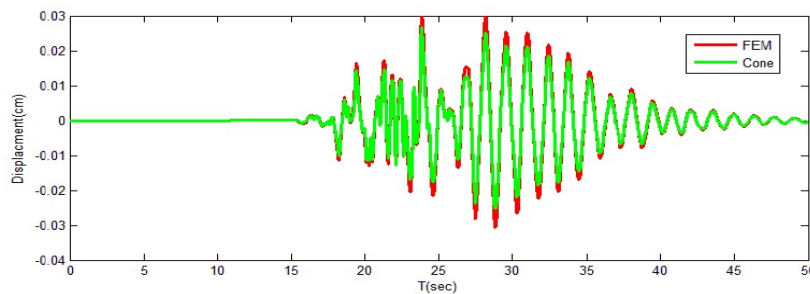
مشخصات	بتن	نیم فضا
مدول برشی	$G = 1.0622 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	$G = 47.024 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
نسبت پواسون	$\nu = 0.17$	$\nu = 0.1$
چگالی	2263 Kg/m^3	2048 Kg/m^3
نسبت میرایی هندسی	$\zeta = 0.05$	$\zeta = 0.05$
مدول الاستیسیته	$E = 2.485 \times 10^{10}$	$E = 1.0345 \times 10^{10}$



شکل ۶ تغییر مکان قائم در نقطه‌ی B



شکل ۵ تغییر مکان قائم در نقطه‌ی C



شکل ۷ نمودار تغییر مکان بام برای دو مدل Cone و FEM پیشنهادی در تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه‌ی ۱۰ طبقه

جدول ۴ مشخصات خاک تعریف شده

ξ	ν	$E(N/m^2)$	$G(N/m^2)$	$r(Kg/m^3)$
۰/۰۵	۰/۳۵	$۲/۱۳۸ \times ۱۰^۶$	۷۹۲×۱۰^۶	۲۲۰۰

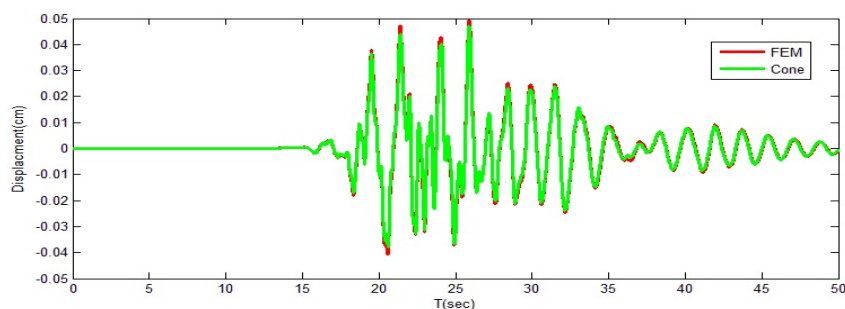
نتایج حاصل از تحلیل مودال و تحلیل تاریخچه زمانی بر این دو مدل در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج پاسخ سازه در دو نوع مدل Cone و FEM

تعداد طبقه	مدل	پریود اصلی سازه (Sec)	تغییر مکان ماکزیمم بام (cm)	برش ماکزیمم پایه (N)
۱۰	FEM	۱/۳۹۳	۳/۰۱	۵۲۹۷۷۷
	Cone	۱/۳۹۶	۲/۶۸	۵۳۸۴۳۷
۱۵	FEM	۱/۶۹۳	۴/۹۲	۵۹۲۳۵۴
	Cone	۱/۷۰۳	۴/۷۱	۶۱۱۳۴۸

نمودار تغییر مکان بام برای دو مدل Cone و FEM پیشنهادی، برای قباب ده طبقه در شکل (۷) و برای قباب پانزده طبقه در شکل (۸) ارائه شده است.

در ادامه، مدل المان محدود ارائه شده با مدل Cone که توسط ولف برای اعمال تأثیر اندر کنش خاک و سازه ارائه شده است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد [15,20]. با استفاده از مدل ولف سختی‌ها و میرایی‌های فنرها و کمک‌فنرهای قائم، افقی، دورانی و پیچشی را در فرکانس‌های مختلف پیدا می‌کنیم. از آن‌جا که تحلیل مورد بررسی ما در حوزه‌ی زمان می‌باشد، بنابراین سختی و میرایی را فقط در فرکانس اصلی سازه که بیش‌ترین نقش را در اندر کنش خاک و سازه دارد انتخاب می‌کنیم. نوع تحلیل، تحلیل هایمودال و دینامیکی تاریخچه زمانی است که تحت بار زلزله نورتریج می‌باشد. سازه‌های انتخابی، سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه، قاب خمشی بتنی متوسط با مشخصات سازه‌ای و بارگذاری معرفی شده در بخش قبل می‌باشند. مشخصات خاک تعریف شده در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۸ نمودار تغییر مکان بام برای دو مدل Cone و FEM پیشنهادی در تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه‌ی ۱۵ طبقه

جدول ۶ پریود اصلی سازه‌ها در دو حالت با تأثیر اندرکنش خاک - سازه و بدون آن

تعداد طبقات	زمان تناوب اصلی پایه انعطاف پذیر \bar{T}				تناوب اصلی پایه صلب T
	نوع خاک				
	I	II	III	IV	
۴	۰/۵۵۵	۰/۵۵۶	۰/۵۶۳	۰/۵۸۶	۰/۵۵۶
۱۰	۱/۳۸۹	۱/۳۹۳	۱/۴۱۲	۱/۴۷۸	۱/۳۸۸
۱۵	۱/۶۸۰	۱/۶۹۳	۱/۷۳۹	۱/۸۹۷	۱/۶۸۴
۲۰	۲/۳۴۱	۱/۳۶۱	۲/۴۳۴	۲/۶۷۹	۲/۳۴۳
۲۵	۲/۹۷۳	۳/۰۰۲	۳/۱۱۰	۳/۴۶۹	۲/۹۷۱

مکان سیستم‌های با تأثیر اندرکنش خاک-سازه به مقادیر متناظر سیستم‌های بدون تأثیر اندرکنش خاک-سازه محاسبه و منحنی‌های مربوط به آن‌ها رسم گردید.

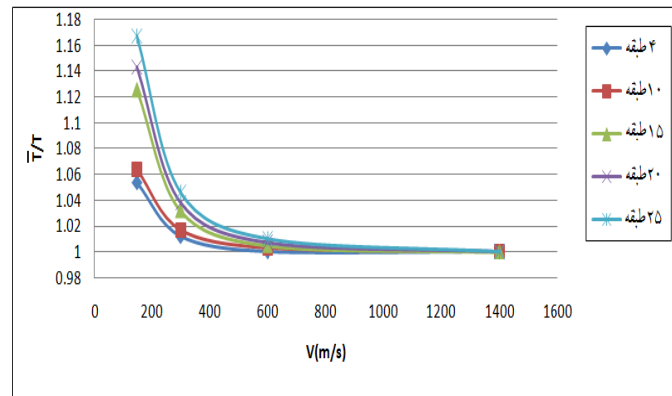
بررسی زمان تناوب اصلی سازه‌ها

به منظور مقایسه‌ی زمان تناوب اصلی سیستم‌های با تأثیر اندرکنش خاک-سازه و بدون آن، قاب‌های معرفی شده با فرض خاک صلب و خاک انعطاف‌پذیر برای چهار نوع خاک معرفی شده تحت آنالیز مودال قرار گرفتند. نسبت زمان تناوب سیستم خاک-سازه در هر نوع خاک به زمان تناوب سازه‌ی متناظر با پایه‌ی صلب محاسبه شد. نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ برای هر نوع قاب و هر نوع خاک مطابق جدول (۶) محاسبه شد که در آن \bar{T} ، زمان تناوب اصلی سیستم با تأثیر اندرکنش خاک-سازه و T، زمان تناوب اصلی سیستم بدون تأثیر اندرکنش خاک-سازه می‌باشد.

همانگونه که در شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌گردد با توجه به نتایج حاصل از دو مدل و نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده در مثال قبل مدل المان محدود پیشنهاد شده نتایج خوبی از اعمال تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ‌های ارتعاشی سازه ارائه می‌دهد.

تحلیل مودال و دینامیکی تاریخچه زمانی سازه‌های معرفی شده

در این قسمت، ابتدا به بررسی تأثیرات اندرکنش خاک-سازه در زمان تناوب و شکل مودی سیستم‌های مورد مطالعه پرداخته شد و سپس مقادیر زمان تناوب سیستم‌ها با مقادیر به دست آمده طبق آیین‌نامه‌ی NEHRP مقایسه گردید [13]. همچنین این سیستم‌ها، به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت ۳ شتاب نگاشت معرفی شده در جدول (۹) تحلیل شدند. سپس نسبت زمان تناوب اصلی، برش پایه و تغییر



شکل ۹ نمودار نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ برای خاک‌های معرفی شده در سرعت‌های موج برشی مختلف

در جدول (۷) مقادیر \bar{T} زمان تناوب سیستم‌ها بادر نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه براساس رابطه‌ی پیشنهادی آیین نامه‌ی NHERP و T زمان تناوب متناظر بدون در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک-سازه ارائه گردید. نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ نسبت به سرعت موج برشی خاک‌های مختلف برای تعداد طبقات مختلف در شکل (۱۰) ارائه شد.

با توجه به جدول (۷) و شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود که مطابق آیین‌نامه‌ی NHERP با افزایش نرمی خاک و نیز با افزایش تعداد طبقات، مقدار $\frac{\bar{T}}{T}$ افزایش می‌یابد. با توجه به اشکال (۹ و ۱۰) مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از آنالیز مودال و آیین‌نامه‌ی NHERP برای این نسبت وجود دارد.

به‌منظور بررسی میزان تأثیرات اندرکنش خاک-سازه بر مودهای ارتعاشی بالاتر سازه آنالیز مودال انجام شد و مقادیر \bar{T} و T محاسبه شد و به‌عنوان نمونه برای سازه‌ی ۱۵ طبقه در ۱۲ پی‌ریز اول در جدول (۸) ارائه گردید.

با توجه به نتایج جدول (۸) مشاهده می‌شود که تأثیرات اندرکنش خاک-سازه در برخی از مودهای بالاتر سازه قابل توجه می‌باشد. به‌طور مثال برای خاک نوع IV پی‌ریز سازه در مودهای ارتعاشی ۹ به بالا در حدود سه برابر افزایش پیدا کرده است ولی این افزایش برای مود اول همان خاک در حدود ۰/۱۲ می‌باشد و

نمودار نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ برای خاک‌های مختلف نسبت به سرعت موج برشی آن‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. با مطالعه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مودال ۲۰ سیستم معرفی شده در دو حالت با و بدون تأثیر اندرکنش خاک-سازه مشاهده می‌شود که با افزایش نرمی خاک و نیز با افزایش تعداد طبقات سازه (کاهش سختی سازه) تأثیرات اندرکنش خاک-سازه در پی‌ریز ارتعاشی سازه‌ها افزایش می‌یابد.

محاسبه‌ی پی‌ریز سازه در دو حالت با اندرکنش خاک و سازه و بدون آن به روش آیین‌نامه‌ی NHERP

مطابق با روابط آیین‌نامه‌ی NHERP به‌منظور اصلاح زمان تناوب سازه از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$\bar{T} = T \sqrt{1 + \frac{K}{K_y} \left[1 + \frac{K_y \bar{h}^2}{K_\theta} \right]} \quad (۷)$$

که در آن K_y سختی جانبی فونداسیون، K_θ سختی خمشی فونداسیون و \bar{K} سختی مؤثر سازه در حالت پایه صلب برای سازه‌های مورد مطالعه می‌باشند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند.

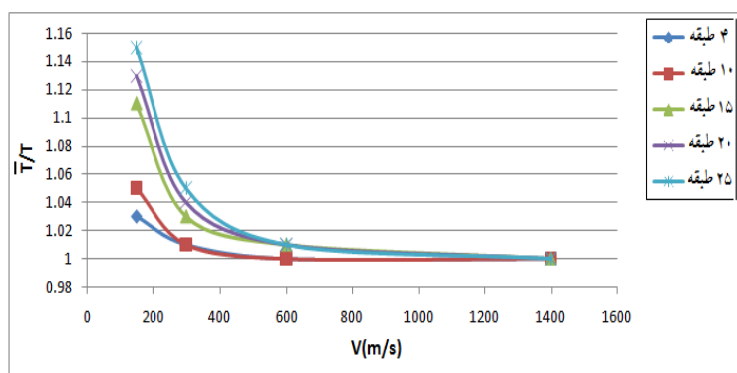
$$\bar{K} = 4\pi^2 \left[\frac{W}{gT^2} \right] = \omega^2 \bar{M} \quad (۸)$$

که در آن $\bar{M} = 0.7M$ جرم مؤثر سازه و $\bar{h} = 0.7h$ ارتفاع مؤثر سازه می‌باشد [2,13].

این، اهمیت در نظر گرفتن مودهای بالای سازه در اندرکنش خاک-سازه را نشان می‌دهد. ولی در این تحقیق به دلیل این‌که از روش المان محدود استفاده شده است، مودهای ارتعاشی بالاتر نیز در نظر گرفته شده تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود.

جدول ۷ پریرودهای ناشی از دو حالت با اندرکنش خاک-سازه و بدون آن بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی NHERP

تعداد طبقات	زمان تناوب اصلی پایه‌ی انعطاف‌پذیر \bar{T}				تناوب اصلی پایه صلب T
	نوع خاک				
	I	II	III	IV	
۴	۰/۵۵۶	۰/۵۵۷	۰/۵۶۰	۰/۵۷۰	۰/۵۵۶
۱۰	۱/۳۹۰	۱/۳۹۲	۱/۴۱۳	۱/۴۵۴	۱/۳۸۸
۱۵	۱/۶۱۹	۱/۶۹۳	۱/۷۴۲	۱/۸۶۲	۱/۶۸۴
۲۰	۲/۳۵۱	۲/۳۶۳	۲/۴۴۲	۲/۶۴۷	۲/۳۴۳
۲۵	۲/۹۸۱	۲/۹۹۴	۳/۱۲۴	۳/۴۶۲	۲/۹۷۱



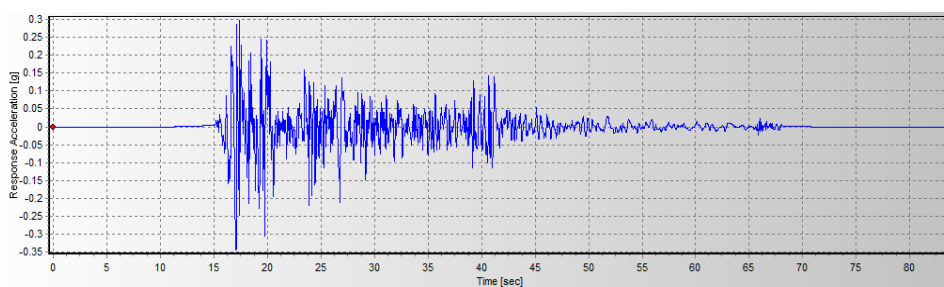
شکل ۱۰ نمودار نسبت‌های \bar{T}/T برای خاک‌های معرفی‌شده در سرعت‌های موج برشی مختلف بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی NHERP

جدول ۸ مقایسه‌ی ۱۲ پریرود اول سازه‌ی ۱۵ طبقه در دو حالت با تأثیر اندرکنش خاک-سازه و بدون آن

مود	نوع خاک در حالت پایه انعطاف‌پذیر				در حالت پایه گیردار
	I	II	III	IV	
۱	۱/۶۸۰۵۸۷	۱/۶۹۳۱۳۶	۱/۷۳۹۶۱۲	۱/۸۹۷۸۳۷	۱/۶۸۴۴۳۷
۲	۰/۶۲۶۲۱۳	۰/۶۲۶۶۸۶	۰/۶۲۸۷۳	۰/۶۷۱۴۱۶	۰/۶۲۹۱۴۳
۳	۰/۳۵۱۳۳۱	۰/۳۵۱۷۲۳	۰/۳۵۵۸۹۵	۰/۶۰۵۷۶۷	۰/۳۵۳۰۰۶
۴	۰/۲۴۴۳۰۷	۰/۲۴۴۶۲۹	۰/۳۲۳۸۲۹	۰/۴۷۶۳۹۵	۰/۲۴۵۵۴۲
۵	۰/۱۸۰۰۵	۰/۱۸۰۷۳۴	۰/۲۴۶۷۷۵	۰/۳۹۵۰۹۴	۰/۱۸۰۹۴۷
۶	۰/۱۵۳۰۶۸	۰/۱۶۲۹۳۱	۰/۲۴۴۵۹۸	۰/۳۸۱۵۰۲	۰/۱۵۱۳۷۲
۷	۰/۱۳۹۸۰۵	۰/۱۶۲۷۶	۰/۲۱۱۲۰۹	۰/۳۵۷۶۰۷	۰/۱۴۰۶۳۴
۸	۰/۱۲۸۰۱۵	۰/۱۳۹۶۹	۰/۲۰۶۷۴۷	۰/۳۵۰۵۳۷	۰/۱۲۷۵۲۵
۹	۰/۱۱۰۷۶۶	۰/۱۳۰۸۹۲	۰/۱۹۴۴۲۶	۰/۳۴۳۹۲۹	۰/۱۱۱۳۶۲
۱۰	۰/۱۰۷۷۱۴	۰/۱۱۶۱۱۴	۰/۱۸۸۳۹	۰/۳۳۴۶۵	۰/۱۰۷۳۰۴
۱۱	۰/۱۰۵۱۲۵	۰/۱۱۰۹۴۶	۰/۱۸۱۴۶۳	۰/۳۰۶۶۵۵	۰/۱۰۴۸۴۸
۱۲	۰/۰۹۱۰۲۵	۰/۱۰۸۶۸۴	۰/۱۷۶۷۱۵	۰/۳۰۰۸۰۶	۰/۰۹۱۵۳۱

جدول ۹ مشخصات شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی

شتاب حداکثر	ایستگاه	نوع خاک (USGS)	بزرگا	سال	زلزله
۰/۳۴۳۵	El Centro-Imp Vall	A	۷	۱۹۴۰	El Centro
۰/۳۲۸۶	Topanga	A	۶/۷	۱۹۹۴	Northridge
۰/۱۸۵۲	Taft	A	۷/۲	۱۹۵۲	Taft

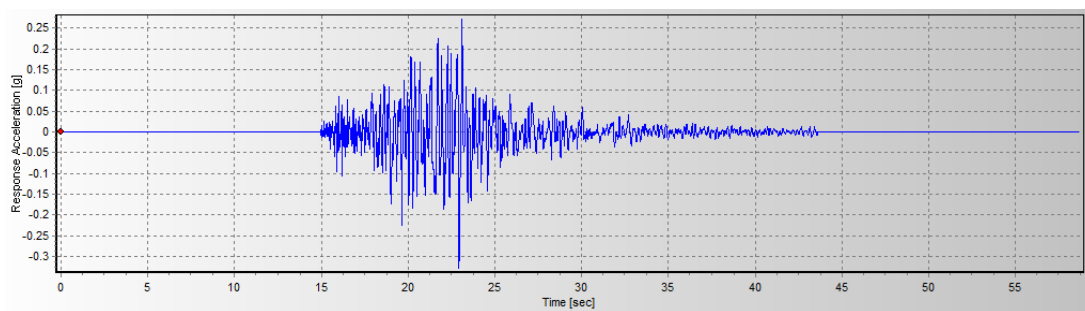


شکل ۱۱ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی El Centro در خاک نوع I

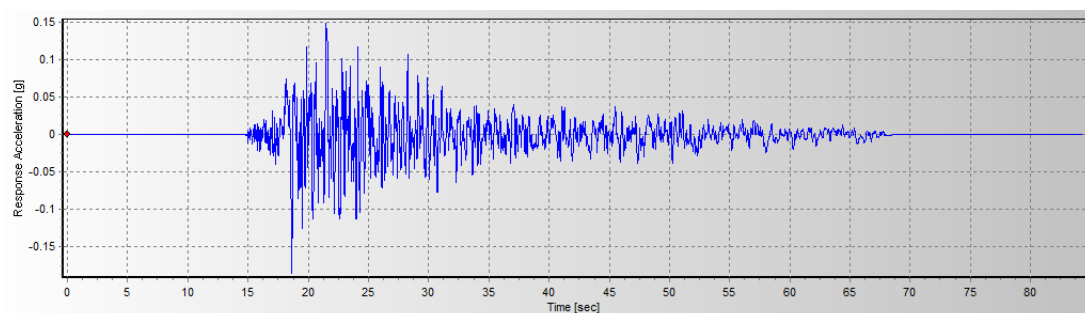
تحلیل سیستم‌های خاک-سازه شتاب نگاشت‌ها به بستر سنگی اعمال می‌شود و سنگ بستر نیز در واقع از جنس خاک نوع یک می‌باشد. این شتاب نگاشت‌ها هنگام عبور از خاک زیر سازه، بر حسب نوع خاک فیلتر می‌شود و به پایه‌ی سازه اعمال می‌شود. برای قاب‌های پایه صلب واقع بر خاک‌های مورد بررسی شتاب نگاشت‌های فیلتر شده که در میدان آزاد زمین ثبت شده است، استفاده می‌شود. عمل فیلترینگ شتاب نگاشت‌ها توسط نرم‌افزار Shake انجام شد [3]. ضریب اصلاح برای تمامی سیستم‌های اندرکنش خاک-سازه بر اساس طیف طرح استاندارد خاک نوع یک آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و زمان تناوب اصلی سیستم خاک-سازه محاسبه شد. اشکال (۱۱-۱۳) شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های معرفی شده در جدول ۹ می‌باشند و اشکال (۱۴-۱۶) نمونه‌ای از شتاب نگاشت‌های فیلتر شده‌ی زلزله‌ی El Centro برای خاک‌های نوع ۲ تا ۴ می‌باشند.

تحلیل تاریخچه زمانی در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک-سازه

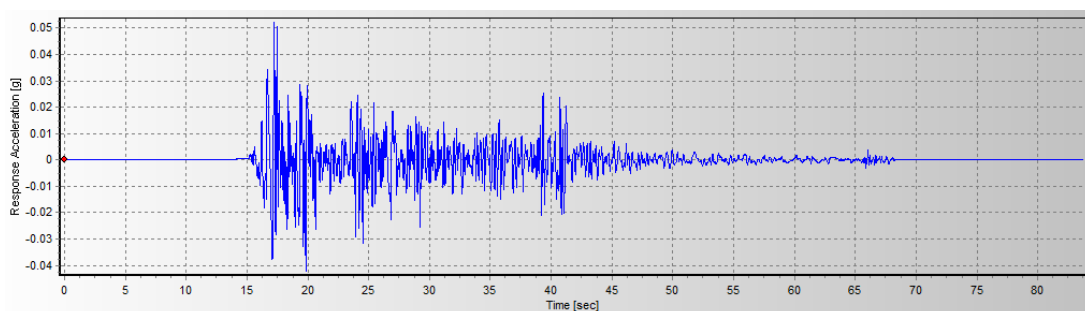
تحلیل دینامیکی سازه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه ساختمان و با بارگیری محاسبات متعارف دینامیک سازه انجام شد. شتاب زمین بر اساس شتاب نگاشت‌های ذکر شده در جدول (۹) تعیین گردید. این تحلیل برای تعیین بازتاب‌ها در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله در زمانی که سازه در تراز پایه تحت تأثیر شتاب‌های ناشی از حرکت زمین باشد، انجام می‌شود. در این روش بازتاب‌های دینامیکی سازه که تابعی از زمان است، به وسیله‌ی انتگرال‌گیری معادله‌ی حرکت سازه محاسبه می‌شود. شتاب نگاشته‌ای مورد استفاده بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ مقیاس گردید. برای تحلیل سیستم‌ها، از زلزله‌های مشخص شده در جدول (۹) که همگی مربوط به خاک نوع یک می‌باشد، استفاده شده است. علت انتخاب خاک نوع یک اینست که برای



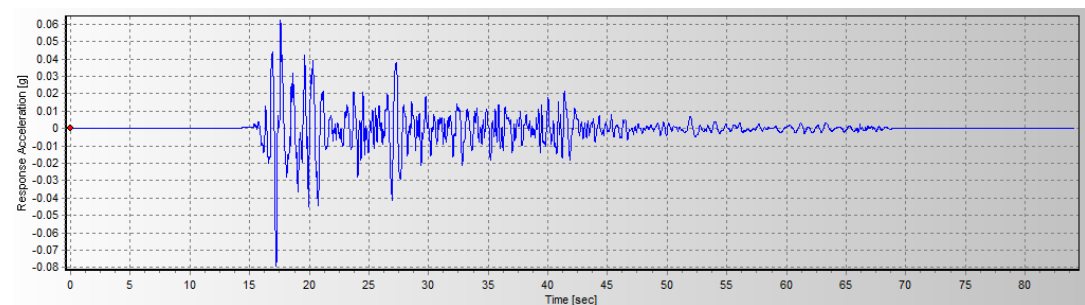
شکل ۱۲ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی Northridge در خاک نوع I



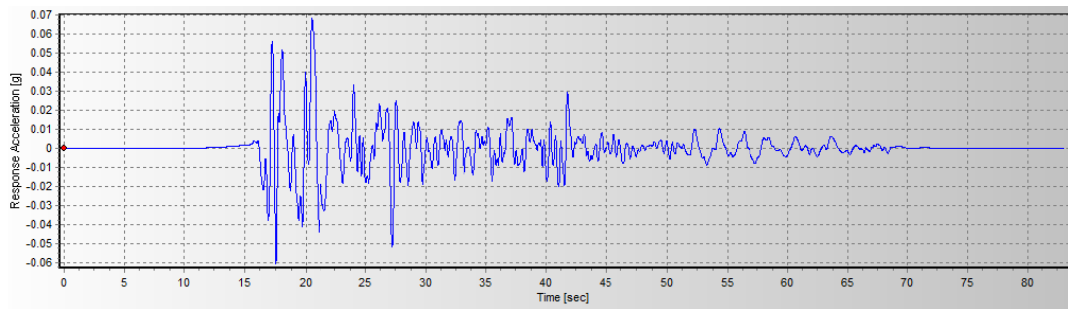
شکل ۱۳ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی Taft در خاک نوع I



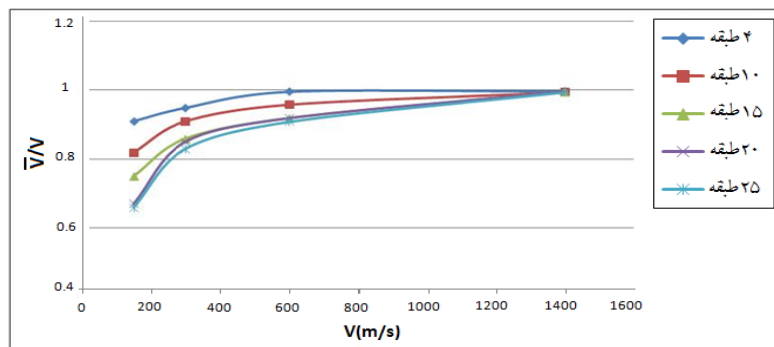
شکل ۱۴ شتاب‌نگاشت فیلترشده‌ی زلزله‌ی El Centro در خاک نوع II



شکل ۱۵ شتاب‌نگاشت فیلترشده‌ی زلزله‌ی El Centro در خاک نوع III



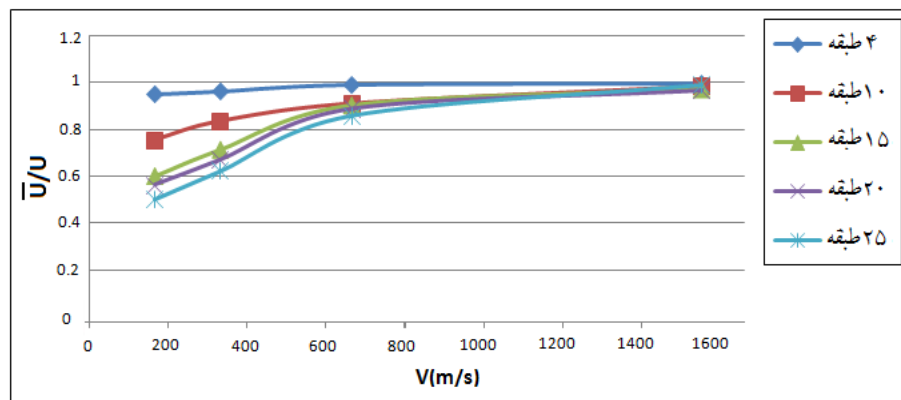
شکل ۱۶ شتاب نگاشت فیلترشده زلزله ی El Centro در خاک نوع IV



شکل ۱۷ نمودار نسبت های $\frac{\bar{V}}{V}$ (برش پایه سازه ها) برای خاک های معرفی شده در سرعت های موج برشی مختلف

V : برش پایه حداکثر بدون اندرکنش خاک-سازه همان طور که در شکل (۱۷) ملاحظه می شود، با افزایش ارتفاع سازه میزان تأثیر اندر کنش خاک-سازه افزایش پیدا می کند که البته افزایش وزن سازه نیز در افزایش تأثیر اندرکنش خاک-سازه تأثیر بسزایی دارد، به عبارت دیگر با افزایش وزن سازه میزان تأثیرات اندر کنش خاک-سازه در پاسخ سازه افزایش پیدا می کند. با توجه به مقادیر $\frac{\bar{V}}{V}$ دریافت می شود که اندرکنش خاک-سازه اثر کاهنده بر مقادیر برش پایه دارد و برای سیستم های با تعداد طبقات یکسان، با افزایش نرمی خاک، میزان کاهش برش پایه، یعنی اثر اندر کنش خاک-سازه، بیش تر خواهد شد. هم چنین مشاهده می شود که برای سیستم قرارگرفته بر خاکی با سرعت موج برشی یکسان، با افزایش ارتفاع سازه، تأثیر اندرکنش خاک-سازه بیشتر می شود و میزان کاهش برش پایه افزایش می شود.

به منظور مقایسه ی نیروهای برشی و تغییر مکان های طبقات، سازه های مورد بررسی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اندر کنش خاک-سازه و با در نظر گرفتن آن، تحت اثر زلزله های معرفی شده تحلیل تاریخیچه زمانی شدند و برش پایه ی ماکزیمم و تغییر مکان ماکزیمم طبقات برای هر سیستم به ترتیب در اشکال (۱۷ و ۱۸) نشان داده شده است. مقایسه ی نتایج بین هر سیستم خاک-سازه با تعداد طبقات یکسان و نوع خاک یکسان با سیستم پایه صلب واقع بر همان نوع خاک انجام می گیرد. در زیر نمودارهای مربوط به نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی بر سیستم های معرفی شده نمایش داده شده است. که در آن ها \bar{U} : تغییر مکان حداکثر طبقه فوقانی با اندرکنش خاک-سازه U : تغییر مکان حداکثر طبقه فوقانی بدون اندرکنش خاک-سازه \bar{V} : برش پایه حداکثر با اندرکنش خاک-سازه



شکل ۱۸ نمودار نسبت های $\frac{\bar{U}}{U}$ (تغییر مکان طبقات فوقانی) برای خاک های معرفی شده در سرعت های موج برشی مختلف

تعداد طبقات سازه، نوع سازه ی به کار رفته، نوع خاک زیر سازه، بارگذاری و نوع تحلیل به کار رفته با ضوابط و پارامترهای آیین نامه ی ۲۸۰۰ قابل استفاده می باشد.

تأثیرات شرایط مختلف خاک زیر سازه با سرعت های موج برشی متفاوت بر قاب های بتنی با ارتفاع و تعداد طبقات متفاوت تحت تأثیر سه زمین لرزه ی معرفی شده مطابق با پارامترها و ضوابط نامه ی ۲۸۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیرات در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در تغییر مکان های جانبی سازه، برش پایه و پیروید ارتعاشی سازه خصوصاً در مورد پیرویدهای ارتعاشی بالاتر سازه در جداول و نمودارها ارائه شد و در مورد این نتایج بحث شد.

نتایج به دست آمده از تحلیل مودال قاب های مورد بررسی برای مد ارتعاشی پایه سازه با نتایج به دست آمده از روش بیان شده در آیین نامه ی NEHRP مقایسه شد و همچنین ضرورت در نظر گرفتن مودهای ارتعاشی بالاتر سازه که از ویژگی های اساسی این روش می باشد بررسی شد.

به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهاد شده در زمینه ی تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی، این روش با سه روش المان های مرزی BEM، روش ترکیبی المان های محدود و المان های نامحدود و روش مخروطی Cone مقایسه شد و نتایج آن توسط نمودارها

با توجه به مقادیر $\frac{\bar{U}}{U}$ در شکل (۱۸) دریافت می شود که اندرکنش خاک-سازه، اثر کاهنده بر مقادیر تغییر مکان دارد و برای سیستم های با تعداد طبقات یکسان، با افزایش نرمی خاک (کاهش سرعت موج برشی) میزان این تأثیرات افزایش می یابد. این امر مربوط به کاهش نیروی برشی پایه ی ناشی از اندرکنش خاک-سازه در سیستم های فوق می باشد. همچنین مشاهده می شود که برای یک سیستم خاک با سرعت موج برشی یکسان با افزایش ارتفاع سازه و به طبع آن با افزایش وزن سازه تأثیر اندرکنش خاک-سازه بیش تر می شود و میزان کاهش تغییر مکان افزایش می شود.

با توجه به دو نمودار فوق مشاهده می شود که شدت روند کاهش نسبت های برش پایه و تغییر مکان طبقه ی فوقانی برای سازه های ۲۰ و ۲۵ طبقه کم تر از میزان آن برای سایر سازه ها می باشد که دلیل آن وجود حرکت گهواره ای زیاد در سازه های مرتفع می باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه تلاش شده است تا روشی بر پایه ی المان های محدود به منظور اعمال تأثیرات اندرکنش خاک و سازه برای سازه های متداول پیشنهاد شود. این مدل بدون هیچ گونه محدودیتی برای انواع سازه ها با خصوصیات سازه ای متفاوت از جمله ارتفاع سازه،

خاک‌های با سرعت موج برشی کم‌تر است. این افزایش به‌خاطر اثر حرکت گهواره‌ای و اثر حرکت انتقالی فونداسیون می‌باشد.

و جداول مربوطه ارائه شد که نشان‌دهنده دقت کافی مدل پیشنهاد شده می‌باشد. مشاهده می‌شود که نسبت‌های $\frac{\bar{U}}{U}$ برای سازه‌ی ۲۵ طبقه همواره بزرگ‌تر از نسبت‌های $\frac{\bar{V}}{V}$ به خصوص در

مراجع

1. Mihailo, D.T., Maria, I.T., Tzong-Ying, "Full-scale experimental studies of soil-structure interaction", the 2nd US- Japan workshop on soil-structure interaction, Tsukuba City, Japan, March 6-8, (2001).
2. Whitman, R.V., Richart, F.E., "Design procedures for dynamically loaded foundations", *ASCE Journal of Soil Mechanics*, pp. 169-193, (1967).
3. Lysmer, J., Seed, H.B., "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72-12, (1972).
4. Kasel, E., Roessel, J.M., "Dynamic stiffness and circular foundation", *ASCE Journal of Soil Mechanics*, pp. 771-785, (1975).
5. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., Seed, H.B., "Flush- a computer program for approximate 3D analysis of soil-structure interaction problems", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 75-30, (1975).
6. Gupta, S., Penzien, J., Lin, T.W., and Yeh, C.S., "Three-dimensional hybrid modeling of soil-structure interaction", *CS Earthquake Engineering structure Dynamic*, Vol 10, No 1, Jan-Feb, (1982).
7. Bazan, E., Bielak, J., "Three dimensional seismic response of building-foundation systems ", U.S. Geological Survey, Proceedings UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, California, September, (1998).
8. Wilson, E.L., "SAP2000 integrated finite element analysis and design of structures", Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (1997).
9. Rodrigues, M.E., Montes, R., "Seismic response and damage analysis of buildings supported on the flexible soil", *Earthquake Engineering structure Dynamic*, No. 29, (2000).
10. Yerli, H.R., Temel, B., Kiral, E., "Transient infinite elements for 2-dimensional soil-structure interaction analysis", *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 124(10): 976-88, (1998).
11. Tanrikulu, A.H., Yerli, H.R., Tanrikulu, A.K., "Application of multi-region boundary element method to dynamic soil structure-interaction analysis", *Journal of computer and geotechnics*,

- Elsevier, 9 Nov, (2001).
12. Jaya, K.P., Prasad, M.A., "Embedded foundation in layered soil under dynamic excitations", *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, (2002).
 13. Wolf, J.P., Song, C., "Some cornerstones of dynamic soil–structure interaction", *Engineering Structures*, Vol. 24, 13-28, (2002).
 14. "NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new building", Washington, Part I, Building seismic safety council (BSSC), (2003).
 15. Yerli, H.R., Kacin, S., "A parallel finite–infinite element model for two-dimensional soil–structure interaction problems", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, pp. 249–253, (2003),
 16. Wolf, J.P., Deeks, J., "Foundation vibration analysis: A strength-of-materials approach", Oxford, UK, Elsevier Science, Ltd., (2004),
 17. Hosseinzadeh, N.A., Nateghi, F., "Shake table study on soil-foundation-structure interaction effects", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), (2004).
 18. "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (3rd Edition), Standard No. 2800-05", Building and Housing Research Center of Iran (BHRC), (2005).
 19. Hong, J.L., Jian, L., "Analysis of Soil-Structure Interaction with Finite Element Method", *Journal of Key Engineering Materials*, pp. 340-341, (2007).
 20. Nasser, M., "Seismic response of RC frames considering dynamic soil-structure interaction", 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering ,Germany, 07–09 July,(2009).
 21. Mohasseb, S., Abdollahi, B., "Soil – structure interaction analysis using cone model", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, (2009).