آناليز لرزهاي ساختمانهاي بنايي - آجري با در نظر گرفتن اندركنش ديناميكي خاك و سازه

مهرداد حجازی — استادیار گروه نقشه برداری، دانشکدة فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

افشین سالاری — مربی دانشکدة عمران، دانشگاه آزاد اسلامی یاسوج

چكيده

اندركنش ديناميكي خاك و سازه در هنگام وقوع زلزله مسئلة بسيار مهمي در آناليز رفتار ديناميكي سازههاي مهندسي عمران است. استفادة مشترك از المانهاي محدود و المانهاي نامحدود يك روش مناسب براي حل مسائل اندركنش ديناميكي خاك و سازه مي باشد. در اين روش امواج زلزلة منتشر شده از ميدان دور (مركز زلزله) به بارهاي ديناميكي گرهاي بر روي مرز مشترك المانهاي محدود و المانهاي نامحدود منتقل مي شوند و از طريق اين گرهها امواج منعكس شده از سطح پي و سازه ميتوانند توسط سيستم مشترك المانهاي محدود و المانهاي نامحدود به ميدان دور منتقل گردند. در اين مقاله چگونگي و نتايج حاصل از تحليل روند خرابي سازههاي بنايي - آجري در هنگام وقوع زلزله ارائه ميشود. در اين بررسي تمامي پيكره يك ساختمان آجري بهوسيله شبكهاي از المانهاي محدود المان بندي و مدل ميشود. المانهاي فوق بههمراه المان هاي نامحدود كه براي المانبندي خاك بستر ساختمان كه يك پهنه پيوسته تا بيكران ميباشد استفاده ميگردند، در تحليل بهكار ميروند. مثالهاي ارائه شده بر مفيد بودن روش مورد استفاده در مسائل عملي مهندسي دلالت دارند.

كلمات كليدی: آناليز،لرزهاي، ديناميكي، خاك، سازه، اندركنش، مصالح بنايي – آجري.

Seismic Analysis of Masonry Structures Including Dynamic Soil-Structure Interaction

M. Hejazi — Surveying Engineering Division, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

A. Salari — Department of Civil Engineering, Azad University of Yasooj, Yasooj, Iran

Abstract

Dynamic soil-structure interaction problem during earthquakes is a very important topic in the analysis of the dynamic behaviour of civil engineering structures. A suitable method is the finite and infinite elements coupled model. In this method, the seismic waves propagating from far field (epicenter) are transformed into nodal dynamic loads acting on the common boundary between finite and infinite elements where the reflected waves from foundation surface and structure can be transmitted back into the far field through the finite and infinite elements coupled system. In this paper the method of damage analysis of masonry structures during earthquakes and obtained results are presented. In this investigation the masonry structure is discretised into finite elements. These elements are coupled with infinite elements that are used to model the infinite soil medium. The examples presented indicate the usefulness of the present method in engineering practice.

Key words: Analysis, Seismic, Dynamic, Soil, Structure, Interaction, Masonry.

۱- مقدمه

با توجه به پيشينهٔ زمين‌لرزه‌ها در ايران و نيز تعهد مهندسان و محققان، روشن است كه تلاش جديدي براي انجام يك مطالعه فشرده در مورد زمين‌لرزه‌هاي گذشته بايد انجام گيرد. آموزه‌هايي از زمين‌لرزه‌هاي سابق بر اين دلالت مي‌كنند كه تحليلهاي رياضي و آزمايشي براي اينكه نتايج آنها در ساخت آينده ساختمانها براي جلوگيري از خسارت جاني ومالي مورد استفاده قرار گيرند، بايد انجام شود. تحليلهاي ديناميكي پيچيده زيادي در زمينه مهندسي لرزه‌اي براي مدلسازي و پيشگويي رفتار سازه‌ها و ساختمانها در طي فواصل زماني كوتاه زمين‌لرزه انجام شده‌اند. بهخوبي تشخيص داده مي‌شود كه خاك زير ساختمان اثر مهمي بر روي رفتار ساختمان در حين وقوع زمين‌لرزه‌ها دارد، بنابراين وقتي تحليل ها اثر خاك را در نظر داشته باشند، پاسخهاي كلي ساختمان مانند تغييرشكلها و تنشها مي‌توانند بهطور واقعي معين شوند. هدف از بررسي فعلي مطالعهٔ فرآيندهاي خرابي و پاسخ ساختمانهاي بنايي - آجري در حين وقوع زمين‌لرزه است. اين مطالعه شامل ساختمانهاي يك و دو طبقه بهعنوان نمونه براساس يك تحليل تقريبي حوزه فركانسي با در نظرگرفتن تأثير باقيماندههاي خاك در زير ساختمان است. اين روش اجازه مي‌دهد كه اثر تمام اجزا ساختمان نظير نرمي يا سختي پي، نوع خاك زيرساختمان، ابعاد بازشوها و غيره كه به يكباره در مدل قرار گرفته‌اند قابل مطالعه و تفسير باشند. بايد خاطرنشان كرد كه مشكلات و پيچيدگيهاي فراواني براي انجام يك تحليل المانهاي محدود ديناميكي در مهندسي ژئوتكنيك نه فقط به خاطر رفتار خاك، بلكه به خاطر بعضي ديگر از محدوديتها مانند تعريف يك مرز براي ناحية جدا شده در محيط نامحدود وجود دارد كه بايد در نظر گرفته شود. بههمين دليل در اين بررسي سعي ميگردد كه از يك برنامهٔ المانهاي محدود ديناميكي مخصوص كه در آن پيوستگي المانهاي نامحدود با المانهاي محدود در مرز اعمال مي‌شود استفاده گردد.

در اين مقاله، ابتدا روش كلي آناليز انتخاب شده و فرمولبنديهاي لازم بهصورت خلاصه تشريح مي‌گردد و سپس نتايج بدست آمده در تحليل لرزه‌اي دو ساختمان بنايي - آجري معمولي يك و دو طبقه بررسي مي‌شود.

۲- معادلات حاكم در روش المانهاي محدود ديناميكي

معادلهٔ اصلي حركت در روش المانهاي محدود ديناميكي بهصورت زير نوشته مي‌شود:

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{f(t)\} \qquad (۱)$$

كه در اين معادله $[k]$، $[m]$ و $[c]$ بهترتيب ماتريسهاي سختي، جرم و ميرايي و $\{u\}$، $\{\dot{u}\}$ و $\{\ddot{u}\}$ بردارهايي جابجايي، سرعت و شتاب و $\{f(t)\}$ بردار نيرو مي‌باشد.

در روش حالت پايدار براي حل معادلهٔ حركت، تابع جابجايي موهومي كه تابعي از فركانس بار ω_i است انتخاب مي‌شود و آن يك تحليل در حوزه فركانس است كه نياز به تعريف فركانس معيني دارد. راهحل مسئلهٔ حالت پايدار توسط روش پاسخ موهومي بهصورت زير بهدست ميآيد.

$$\{f(t)\}=\{f_0\}e^{i\omega t}\ ,\ \{u\}=\{u_0\}e^{i\omega t}\ ,$$
$$\{\dot{u}\}=i\omega\{u_0\}e^{i\omega t}\ ,\{\ddot{u}\}=-\omega^2\{u_0\}e^{i\omega t} \qquad (۲)$$

كه در آنها $\{u\}$ يك بردار جابجايي موهومي ثابت است.

با جايگذاري معادلات (۲) در (۱) اولين معادله مستقل از زمان مي‌شود و شكل زير را بهخود مي‌گيرد.

$$[\bar{k}]\{u_0\}=\{f_0\} \qquad (۳)$$

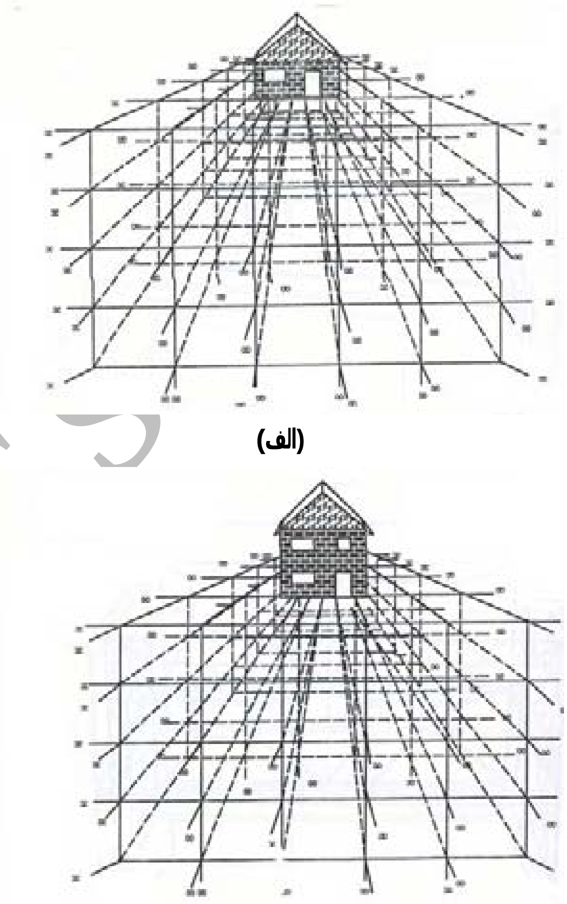
كه $[\bar{k}]$ يك ماتريس سختي تغيير يافته موهومي است و بهصورت زير تعريف مي‌شود .

$$[\bar{k}]=[k]+i\omega[c]-\omega^2[m] \qquad (۴)$$

معادلهٔ (۳) شامل يك سيستم معادله خطي از متغيرهاي موهومي است و مي‌تواند براي جابجاييهاي موهومي مجهول $\{u_0\}$ با روشهاي استاندارد حل شود. روش بهكار رفته در تحليل ديناميكي ساختمانهاي آجري در اين مقاله بدين صورت است كه واكنشهاي جزئي سيستم مورد مطالعه در يك حوزه فركانس و براي چندين فركانس غالب يك زلزله بهدست آمده و سپس برآيند تمام اين واكنشهاي جزئي محاسبه و بهعنوان واكنش خطي ارتجاعي سيستم قلمداد مي‌گردد. معذالك تعيين واكنشهاي غيرخطي سيستم مورد مطالعه با تعميم روش بهكار رفته و با بهكارگيري روش نويني موسوم بهروش پيوندي يا دوگانه از حوزههاي فركانس ـ زمان [۱] امكان پذير است.

۳- هندسة مسئله

شكل (۱) يك تصوير سه بعدي از ساختمانهاي نمونه يك و دو طبقه را نشان مي‌دهد كه بر يك مقدار نامحدودي از خاك قرار دارند و براي مطالعه كنوني مورد تحليل قرار گرفته‌اند.



(الف)

(ب)

شكل ۱- مش المان هاي محدود پيشنهاد شده كه بر روي قسمت نامحدودي از خاك قرار دارد: (الف) ساختمان يك طبقه؛ (ب) ساختمان دو طبقه.

با در نظر داشتن اندركنش خاك - سازه لازم است يك مقدار منطقي از مواد پي در نظر گرفته شود. در اين بررسي، المانهاي پيوسته محدود و نامحدود براي مدلسازي اين محيط گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ساختمانها به المانهاي محدود مناسبي تقسيم مي‌شوند و با مش المانهاي محدود خاك بطور مستقيم در سطح زمين پيوستهاند. مش المانهاي محدود مربوط به ساختمانهاي يك و دو طبقه مطالعه شده در شكل (۱) نشان داده شدهاند.

۴- توسعة حوزه فركانس از روي گزارش زمين لرزه

همانطوري كه قبلاً اشاره شد نرم افزار المانهاي محدود كه در اين تحليلهاي المانهاي محدود ديناميكي مورد استفاده قرار ميگيرد مبتني بر حل موهومي معادلات حركت است. معادلة حركت بهعنوان يك مسئلة نمونه استاتيكي حل مي شود.

اين كار با استفاده از تابع جابجايي موهومي و همچنين تابع موهومي براي باري مانند $f = f_0 e^{i\omega t}$ انجام مي‌شود [۳-۱]. نتايج بهشكل دامنة جابجاييهاي گره‌اي بهدست مي‌آيند. تحليل در يك حوزه فركانس صورت مي‌گيرد. هر تحليل تنها يك فركانس داده شده را شامل مي‌شود كه از حوزة فركانسي كه قبلاً توسعه يافته نشأت گرفته است. بنابراين، براي دستيابي به پاسخ كامل سازه در طول كل زمان زمين‌لرزه لازم است كه بعضي از انواع پاسخ هاي جمع شده از هر فركانس در نظر گرفته شوند.

۵- برآورد نيروهاي زلزله وارد بر سيستم ديناميكي ساختمان - پي

مسائل انتشار موج مي توانند به دو گروه بزرگ تقسيم شوند: ۱- انتشار از ميدان نزديك ۲- انتشار از ميدان دور.

بر مبناي اصول فيزيك، وقتي كه يك منبع انرژي امواج را در يك حد نامحدود منتشر مي‌كند، امواج با دور شدن از منبع تضعيف مي‌شوند و انرژي منتشره توسط اين امواج نيز از بين مي‌رود. بهعلاوه وقتي كه يك موج منتشر شونده بهيك مرز برخورد مي‌كند قسمتي يا تمام آن منعكس مي‌شود.

براي غلبه بر اين مشكل در ژئوتكنيك، بعضي جايگزينها بايد مورد توجه قرار گيرد. روشي كه در اينجا مورد مطالعه قرار گرفته است استفاده از شرايط مرزي خاصي است كه بهصورت تضعيف كننده‌هاي ميراگر عمل مي‌كنند. هدف از قبول اين مرزها روي يك حوزه (ميدان نزديك) هرمي محدود، جذب امواج منعكس شده بر اين مرزهاي مصنوعي و مدلسازي رفتار فيزيكي مسئله مي‌باشد [۳ و ۴]. فرمولسازي اساسي براي اين مرز بهانتشار موج صفحه در يك محيط ارتجاعي برمي‌گردد. در اين مقاله فقط جنبههاي فرمولسازي اساسي عناصر نامحدود خلاصـه ميشود.

بردار بار گرهي معادل روي مرز موج ورودي از برخورد امواج برشي بهدست مي‌آيد. بار هارمانيك ناشي از امواج عرضي بهصورت زير بيان ميشود:

$$P_{sv} = \frac{-2G.\omega}{C_s} \qquad (۵)$$

که در آن P_{sv} بار برشي يكنواخت بر روي سطح، G مدول برشي ديناميكي خاك و C_s سرعت موج برشي است كه جهت آن عمود بر مرز است. اين بار يكنواخت بايد به بار گرهي معادل تبديل شود. بردار نيروهاي برشي ديناميكي حاصل بهصورت زير بيان ميشود:

$$\{P\}^e = \int_s [N]^T \{T\} ds \qquad (۶)$$

که در آن $[N]$ ، $\{T\}$ و $\{P\}^e$ به ترتيب ماتريس تابع شكل، بردار بار يكنواخت و بردار بار گرهي معادل هستند.

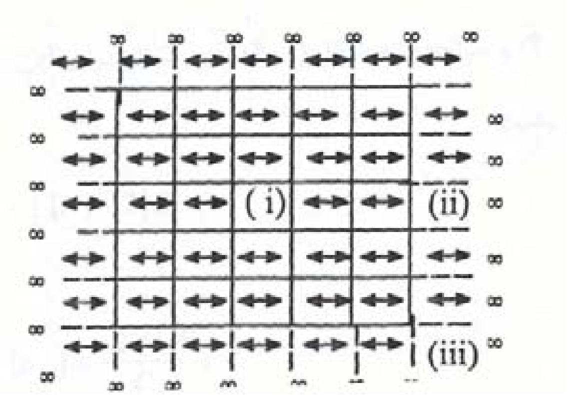
با توجه به مختصات محلي ξ و η متعلق به يك المان كامل محدود (ناحيـة i در شكل (۲) (الف)) و مراجعـه بـه شكل (۲) (ب) معادلات زير به ترتيب براي نواحي سه گانه i و ii و iii در شكل (۲) براي محاسبة بردار بارگرهي المانهاي واقع در اين سه ناحيه بهصورت زير تعريف ميشوند.

$$\{P\}^e = \int_{-l/2}^{+l/2}\int_{-l'/2}^{l'/2} -2.G.\beta.i.[N]^T d\xi d\eta = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{Bmatrix},$$

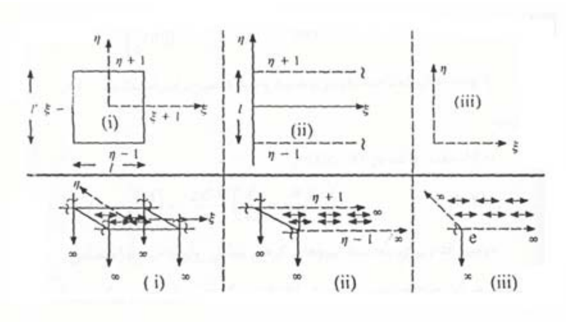
$$P_i = \frac{1}{2} G.\beta.A \qquad i=1,2,3,4 \qquad (۷)$$

$$\{P\}^e = \int_s [N]^T \{P_{sv}\} ds = P_{sv}\left[\int_0^\infty e^{-(\alpha+i\beta)\xi} d\xi\right] \times$$

$$\left[\int_{-l/2}^{+l/2} \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}(1-\frac{2\eta}{l}) \\ \frac{1}{2}(1+\frac{2\eta}{l}) \end{Bmatrix} d\eta\right] = \begin{Bmatrix} -\frac{P_{SV}\frac{l}{2}}{\beta} i \\ -\frac{P_{SV}\frac{l}{2}}{\beta} i \end{Bmatrix} \qquad (۸)$$



(الف)



(ب)

شكل ۲- (الف) بخشي كه كاربرد بارگذاري زمينلرزه را در پايه نشان ميدهد؛ (ب) دستهبندي سطوح مختلف براي محاسبه نيروهاي گرهي معادل[۵].

$$\{P\}^e = P_{sv}\int_0^\infty e^{-(\alpha+i\beta)\xi} d\xi \int_0^\infty e^{-(\alpha+i\beta)\eta} d\eta = P_{sv}\frac{1}{\beta^2} \qquad (۹)$$

كه $\beta = \frac{\omega}{C_S}$ ، $i^2 = -1$ ، l و l' ابعاد المان، و A مساحت همان وجه از المان سه بعدي است كه بارگذاري شده است. تابع شكل $[N]$ در ادامه معرفي خواهد شد.

۶- المانهاي نامحدود

آناليز المانهاي محدود براي محيطهاي پيوسته و گسترده تا بينهايت مانند خاك بستر سازهها نيازمند تعريف نمودن مشهاي بسيار بزرگ از المانهاي محدود ميباشد. يكي از روشهاي قدرتمند براي محدود نمودن مش المانهاي محدود استفاده از المانهاي نامحدود است. اين المانها را ميتوان در صورت داشتن انطباق درجات آزادي به المانهاي محدود كوپل نمود و بـا اين كار نياز بـه گسترش مش المانهاي محـدود نخواهد بود [۹-۵].

۷- المانهاي نامحدود برحسب المانهاي محدود

در برنامة المانهاي محدودي كه بهعنوان ابزار اصلي در تحليل فعلي مورد استفاده قرار گرفته است، از المانهاي نامحدودي كه با المانهاي محدود پيوند خوردهاند استفاده ميشود. بنابراين مفهوم اصلي در فرمولسازي دوبعدي در زير ارائه ميشود.

توابـع شكل بـراي المان محدود نشان داده شـده در شـكل (۳) (الف) بهصورت زير ميباشد.

$$N_1=\frac{1}{4}\eta\xi(\eta-1)(\xi+1),\ N_2=\frac{1}{2}\eta(\eta-1)(1-\xi^2)$$

$$N_3=\frac{1}{4}\xi\eta(\eta-1)(\xi-1)$$

$$N_4=\frac{1}{2}\xi(\xi-1)(\xi-1)(1-\eta^2)$$

$$N_5=\frac{1}{4}\xi(\eta+1)(\xi-1),\ N_6=\frac{1}{4}\xi\eta(\xi+1)(\eta+1)$$

$$N_7=\frac{1}{4}\xi\eta(\xi+1)(\eta+1),\ N_8=\frac{1}{8}\xi(\xi+1)(1-\eta^2)$$

(۱۰)

اين توابع شكل توابع انترپولاسيون در مختصات محلي يك المان (ξ,η) هستند و در حالت نامحدود توابع شكل بهصورت زير نوشته ميشوند شكل (۳) (ب).

$$x=\sum_{i=1}^{5}M_i x_i\ ,\qquad y=\sum_{i=1}^{5}M_i y_i \qquad (۱۱)$$

كه در آن M_i $(i=1,2,3,4,5)$ تابع شكل جابجايي براي المان نامحدود است و بهصورت زير بيان ميشود:

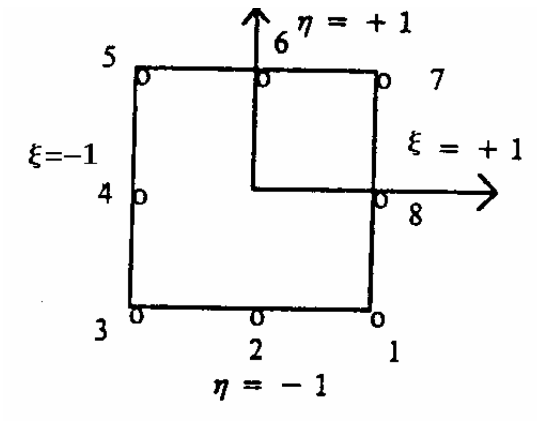
$$M_1=\frac{1}{2}(\xi-1)(\eta-1),\ M_2=0$$

$$M_3=-\frac{1}{2}(\xi-1)(\eta+1)$$

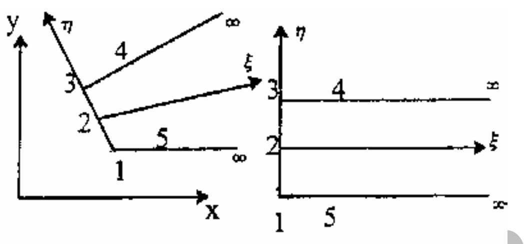
$$M_4=-\frac{1}{2}\xi(\eta+1),\ M_5=-\frac{1}{2}\xi(\eta-1) \qquad (۱۲)$$

جابجاييها در المان نامحدود برحسب تابع شكل بهصورت زير نوشته ميشوند:

$$u=\sum_{i=1}^{3}N_i u_i,\qquad v=\sum_{i=1}^{3}N_i v_i \qquad (۱۳)$$



(الف)



(ب)

شكل ۳- (الف) المان با ۸ گره و مختصات محلي؛ (ب) انتقال مختصات براي المان هاي نامحدود.

كه در آنها N_i $(i=1,2,3)$ تابع شكل جابجايي براي المان نامحدود است و ميتواند بهصورت زير بيان شود.

$$N_1=P(\xi)\xi\frac{\eta(\eta-1)}{2},\ N_2=-P(\xi)(\eta-1)(\eta+1)$$

$$N_3=P(\xi)\frac{\eta(\eta+1)}{2} \qquad (۱۴)$$

ديده ميشود كه فرمول تابع شكل براي جهت بينهايت يعني ξ در شكل (۳) (ب) ضريب تابع نمايي دارد. $P(\xi)$ ميتواند بهصورت زير دوباره نويسي شود:

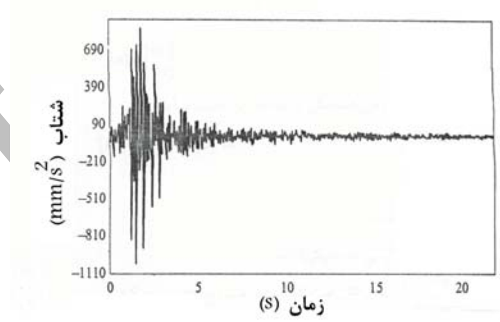
$$P(\xi)=e^{-\alpha\xi}e^{i\beta\xi} \qquad (۱۵)$$

اولين جمله $e^{-\alpha\xi}$ تضعيف دامنه موج ها را بيان ميكند و جمله دوم $e^{-i\beta\xi}$ تضعيف فاز مربوط به انتشار موج در سيستم مختصات محلي را مشخص مينمايد. مهمتر از آن وجود تابع نمايي دلالت ميكند كه تضعيف كوچكي در ميدان نزديك و

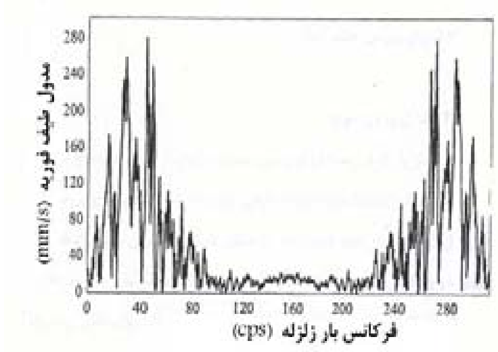
انتشار انرژي امواج در ميدان دور به سيستم تحميل مي‌شوند و اين چيزي است كه در بيشتر حالات مسائل ژئوتكنيكي مطلوب است.

۸-بررسي واكنش لرزهاي ساختمانهاي آجري - بناهاي نمونه

در اين تحقيق دو نمونه ساختمان آجري يك و دو طبقه براي بررسي انتخاب گرديده‌اند، كه نگاشت پايه زلزله ۲۲ مارس ۱۹۵۷ پاسادنا سانفرانسيسكو مؤلفة S80E [۸] با مشخصه ماكزيمم شتاب ۱۰۲/۸ cm/s^2 مورد استفاده قرار گرفته است. نگاشت تبديل يافته اين زلزله در حوزه فركانس با استفاده از تبديل سريع فوريه بهدست مي‌آيد شكل (۴).



(الف)



(ب)

شكل ۴- (الف) دوباره سازي پيشينه زماني زمين‌لرزه پاسادنا سانفرانسيسكو ۲۲ مارس ۱۹۵۷ مولفة S80E [۸]؛ (ب) توسعة يك حوزه فركانس بر اساس تبديل سريع سري فوريه، براي بررسي حاضر.

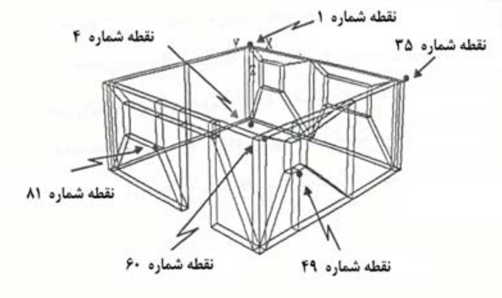
مشخصات مصالح ساختماني و خاك بستر كه در آناليز المانهاي محدود بهكار رفتهاند مطابق جدول (۱) است.

جدول ۱- مشخصات مصالح ساختماني و خاك بستر.

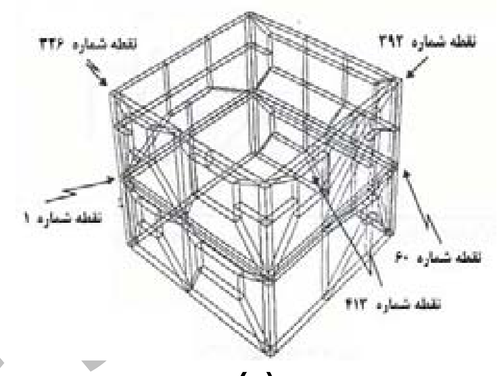
نوع مصالح	آجر	پي	رس نرم
مدول الاستيسيته E (kPa)	۱/۹۶۲×۱۰^۷	۱/۳۷۳×۱۰^۷	۱/۴۷۲×۱۰^۴
وزن حجمي γ (kN /m ۳)	۲۰	۲۰	۱۷/۱۷
ضريب پواسون ν	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
سرعت انتشار موج برشي (m/s) C_s	۱۸۸۰	۱۵۰۰	۵۸

۹- تغيير مكانها

بهمنظور بررسي تغيير مكانها، تعدادي نقاط مهم بر روي ساختمانها در نظر گرفته شده است كه در شكل (۵) نشان داده شده است. نتايج بهدست آمده نشان ميدهد كه تغيير مكانها در ميان و بالاي ديوارهاي عرضي كه بهصورت برشي عمل نميكنند، بسيار زياد و از حد الاستيك فراتر رفته است و اين بهدليل خمشهاي خارج از صفحه در طول فاصلة زمين تا سقف مي‌باشد. ولي در گوشة همين ديوارها جابجاييها بهطور نسبي كمتر و نشانة مهار نسبي جابجايي ها توسط ديوار متعامد مجاور است. حالات بحرانيتر نيز براي ديوارهاي عرضي كه داراي بازشوهاي بزرگ و مخصوصاً امتداد يافته در جهت قائم (نظير بازشو ورودي ساختمان) ميباشد اتفاق مي‌افتد.



(الف)

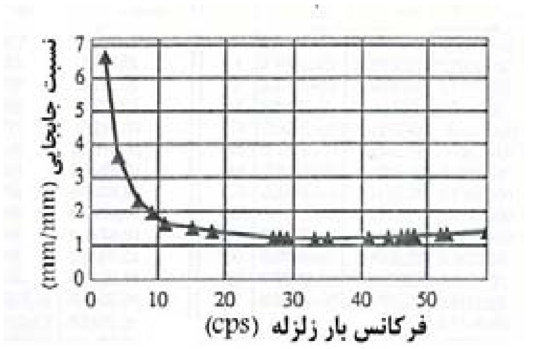


(ب)

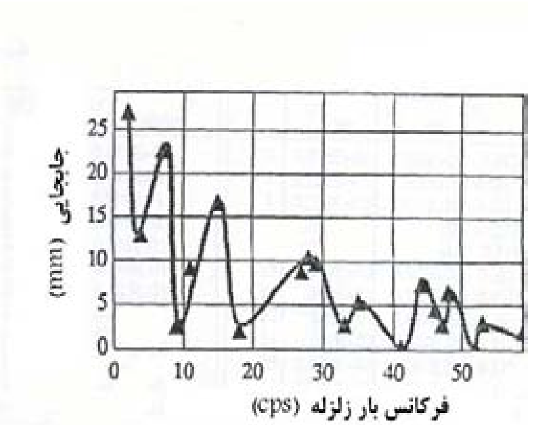
شكل ۵- موقعيت نقاط انتخابي براي بررسي تغيير مكان ها: (الف) ساختمان يك طبقه؛ (ب) ساختمان دو طبقه.

بحرانيتر آنكه بازشوها در گوشه ديوارها كه محل اتصال ديوارهاي عرضي و برشي مي‌باشند قرار گيرند و مهار نسبي را تضعيف كنند. اين قسمتها بهعلت عدم يكپارچگي جابجايي ها در قسمتهاي مختلف بسيار متفاوت و مستقل از هم مي‌باشند كه بعضاً نشانگر اين است كه بعضي قسمت‌هاي ديوار بهصورت پايههاي باريك و خمشي عمل مي‌كنند كه ناشي از عدم وجود يك مهار مناسب در بالاي ديوار مي‌باشد. همچنين ديده مي‌شود كه حداكثرجابجايي در رأس ساختمان اتفاق مي‌افتد. بخش قابل توجهي از جابجايي انباشته در هر نقطه مربوط به اثر فركانس‌هاي كم مي‌باشند.

در شكل (۶) مؤلفة جابجايي در جهت زلزله در نقطة نمونة شماره ۳۲۶ ساختمان دوطبقه برحسب فركانس بهخاطر اهميت اين مؤلفه ترسيم شده است. جابجايي‌هايي كه بهدامنه واحد بار (شكل (۶) (الف)) مربوط مي‌شوند تأثير مهم فركانس هاي پائين‌تر را در مقايسه با فركانس هاي بالاتر نشان مي‌دهند. شكل ۶ (ب) نشان مي‌دهد كه جابجاييهاي واقعي بهميزان زياد و توسط مقادير دامنة مربوطه تحت تأثير قرار ميگيرند.



(الف)



(ب)

شكل ۶- جابجايي هاي در جهت زلزله مربوط به نقطه ۳۲۶ بر روي رأس ساختمان دوطبقه بر حسب فركانس‌هاي غالب بار زمين‌لرزه: (الف) مربوط به دامنه واحد بار؛ (ب) جابجايي هاي واقعي.

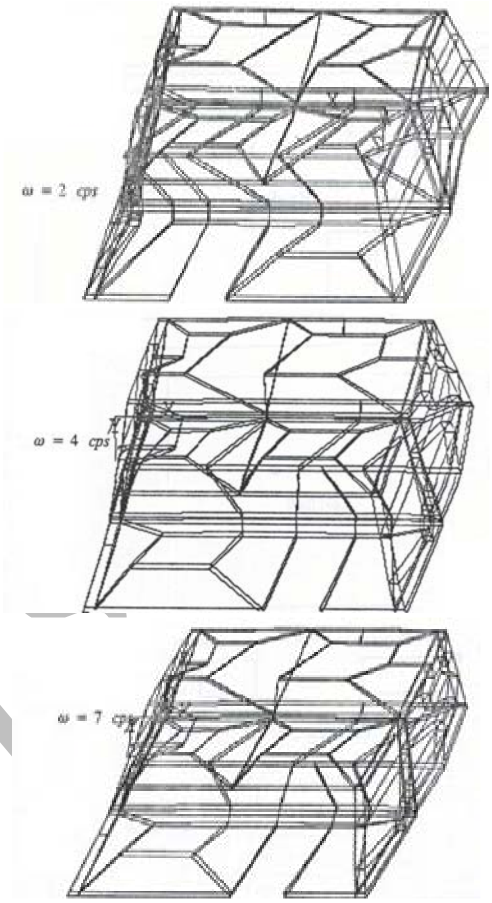
در شكل (۷) شكل تغيير يافتة ساختمان در فركانسهاي مختلف نشان داده شده است.

۱۰- تنش ها

بهمنظور بررسي تنش ها، تعدادي نقاط مهم بر روي ساختمانها در نظر گرفته شده است كه در شكل (۸) نشان داده شده است.

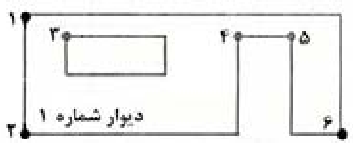
۱-۱۰- ساختمان يك طبقه

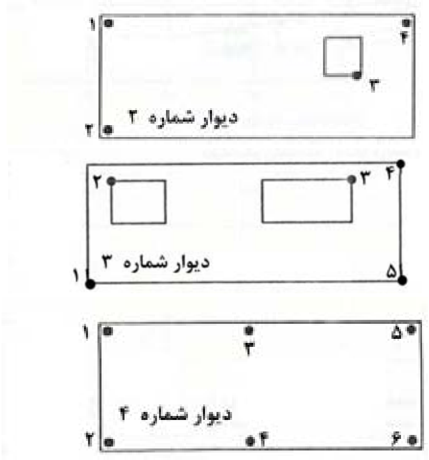
بـررسي دقيق نقاط گوشهاي پائين در ديوارهاي شماره ۱ تا ۴ ساختمان يك طبقه كه در شكل (۸) (الف) نشان داده شده است تمركز تنش‌ها را در اطراف اين نواحـي نشان مي‌دهد. هر دو نمودارهاي تنش برحسب فركانس و نقشه‌هاي هم تراز تنش‌ها اين اهميت را نشان مـي‌دهند. بـه دنبال آن، اين ديوارها قسمتهاي ترك خورده و خراب گسترده‌اي دارند.



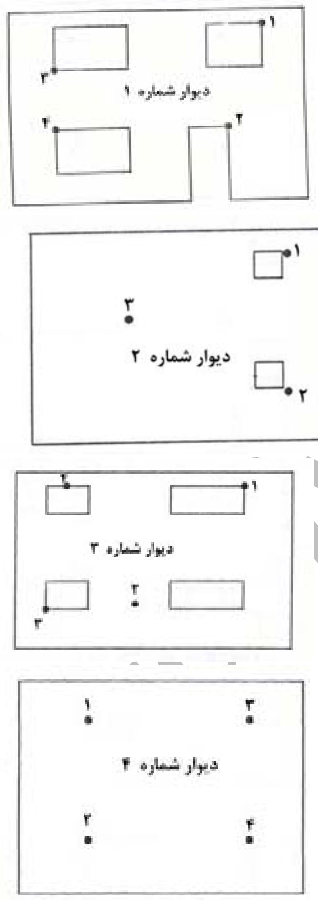
شکل ۷- شکل تغيير يافته ساختمان دو طبقه در فرکانس هاي ۲، ۴ و ۷.

وقتي كه پاسخ نقاط نمونه بهطور ناگهاني با افزايش فركانس كم مي‌شود، بعضي نقاط نزديكتر به قسمتهاي باز تنش‌هاي بزرگي را حتي در فركانس‌هاي بالاتر نشان مي‌دهند، مخصوصاً نقاطي در ديوارها كه بهطور عمود بر جهت زمين لرزه (ديوار شماره ۲) قرار دارند. اين موضوع ممكن است به عكس‌العمل جداگانه‌اي از عناصر مجزا از واكنش كل ساختمان تعبير شود. مثلاً مقايسة نوسان تنش بين نقاط ۴ و ۵ ديوار شماره ۱ در شكل(۹) (الف) نشان مـي‌دهد كه نقطه ۵ داراي نوسان شـديـدي در تنش‌ها هم در قسمتهاي پائينی و هم بالايي حوزه فركانس مي‌باشد. مي‌توان ديد كه در نقشه همتراز مربوطه (شكل (۹) (ب)) نقطه ۵ در ناحيه ترك‌خورده قرار مي‌گيرد.



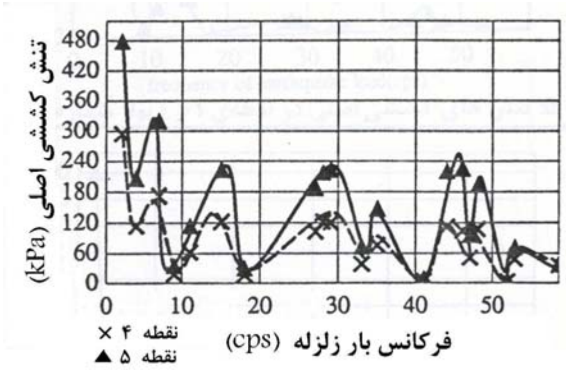


(الف)

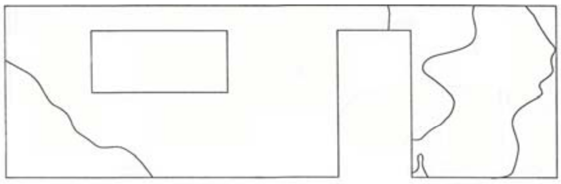


(ب)

شكل ۸- بخش هايي از ديوارهاي آجري كه نقاط نمونه را براي بررسي تنش ها نشان مي‌دهد: (الف) ساختمان يك طبقه؛ (ب) ساختمان دوطبقه.



(الف)



(ب)

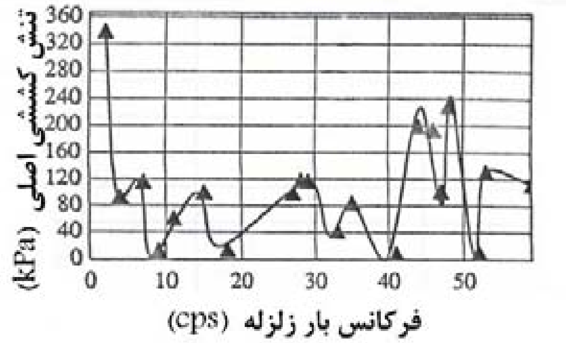
شكل ۹- ديوار شماره ۱ ساختمان يك طبقه: (الف) تنش هاي كششي اصلي در نقاط ۴ و ۵؛ (ب) نواحي ترك خورده در اثرتنش هاي كششي ايجاد شده.

اين ممكن است بهاين صورت تفسير شود كه قسمت سمت راست ديوار شماره ۱ كه در جهت فعاليت زمين‌لرزه بهصورت يك تير طره‌اي باريك عمل مي‌كند، بهخاطر اينكه هيچ شناژ مناسبي براي انتقال بار بهقسمت باقيمانده ديوار وجود ندارد، بهصورت تكي عكس‌العمل نشان مي‌دهد و بنابراين تنش‌هاي بزرگ حتي در فركانس‌هاي بالاتر در بعضي نقاط مانند نقطه ۵ در بالاي ورودي ايجاد مي‌شوند.

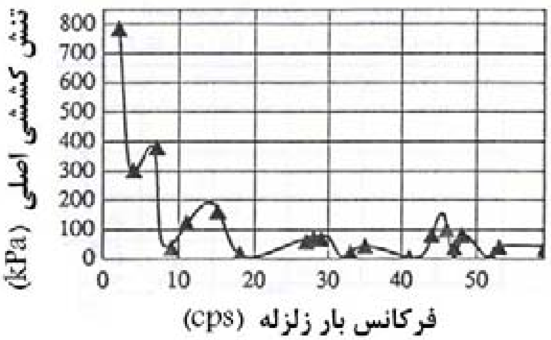
بهعنوان مثال ديگر، نقطه شماره ۳ در ديوار ۲ نيز در معرض تنش‌هاي بزرگي در فركانس‌هاي بالاتر در مقايسه با نقطه ۴ در قسمت بالاي راست آن كه هيچ تنش مهمي در فركانسهاي بالاتر ندارد، مي‌باشد (شكل (۱۰)).

۲-۱۰- ساختمان دوطبقه

همان طوري كه انتظار مي‌رود، تنشهاي بزرگي در نقاط ۱ تا ۴ ديوار شماره ۱ (شكل (۸) (ب)) وجود دارند. اين ديوار در امتداد جهت بار زمين‌لرزه است. تمامي نقاط منتخب به قسمت هاي باز نزديك هستند. چنانچه در شكل (۱۱) نشان داده شده است از ميان اينها نقاط ۱، ۲ و۳ از واكنش‌هاي بزرگتري پيروي مي‌كنند.



(الف)

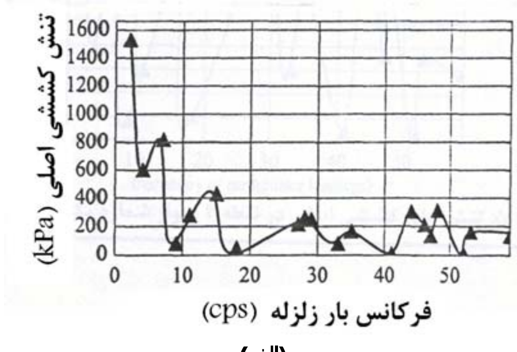


(ب)

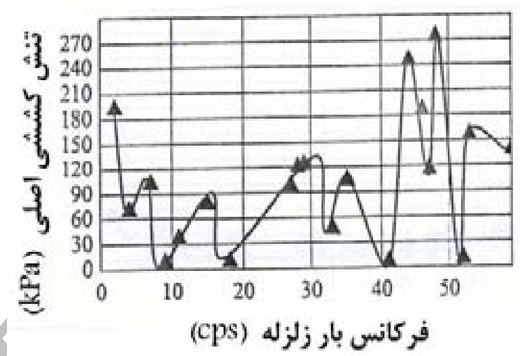
شكل ۱۰- تنش هاي كششي اصلي ديوار شماره ۲ ساختمان يك طبقه: (الف) نقطه ۳؛ (ب) نقطه ۴.

تنش انباشته منتجه مربوط به تمام فركانس‌هاي غالب اين نقاط نشان مي‌دهد كه اين نقاط درون ناحيه ترك خورده قرار ميگيرند. اين در شكل (۱۲) (الف) بهوسيلة هم ترازهاي تنش‌هاي كششي اصلي نشان داده مي‌شود. شكل (۱۲) (ب) مناطق تركخورده را روي اين ديوار نشان مي‌دهد. ممكن است كه الگوي ترك‌ها در اين شكل را با همان ديوار در ساختمان يك طبقه نشان داده شده در شكل (۹) (ب) مقايسه نمود. مقايسه نشان ميدهد كه ناحية تركخورده روي رأس طرف راست ورودي تا اندازه‌اي كاهش يافته است. بهعبارت ديگر ناحيه تركخورده روي طرف چپ اين ديوار امتداد يافته است.

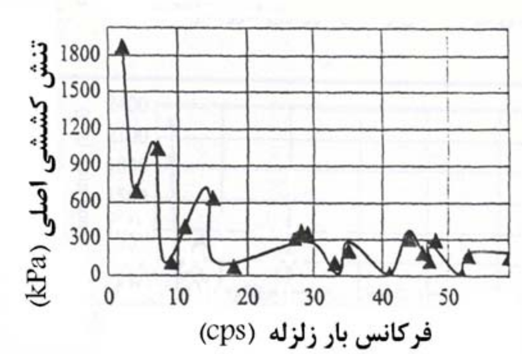
در ديوار شماره ۲ كه عمود بر ديوار شماره ۱ و عمود بر جهت زلزله است، نقاط ۱ و ۲ تنش‌هاي بزرگتري را نسبت بهنقطه ۳، بيشتر در فركانس‌هاي پائين‌تر حوزه، تحمل مي‌كنند (شكل(۱۳)). مفيد است يادآوري شود اين نقاط نيز بهقسمتهاي باز نزديكتر هستند. با توجه به نقشههاي همتراز مربوطه در شكل (۱۴) ديده مي‌شود كه ناحيه اطراف دو پنجره قبلاً ترك خورده است.



(الف)



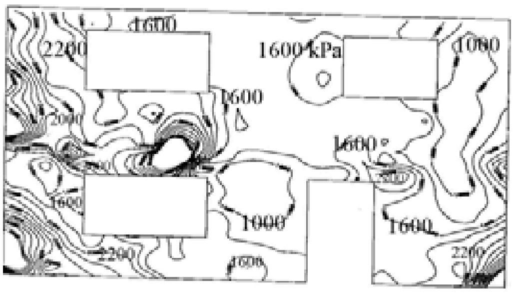
(ب)



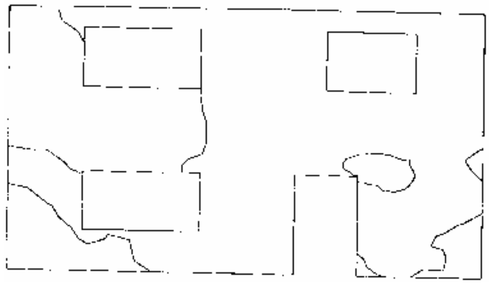
(ج)

شکل ۱۱- تنش هاي کششي اصلي ديوار شماره ۱ ساختمان دوطبقه: (الف) نقطه ۱؛ (ب) نقطه ۲؛ (ج) نقطه ۳.

ديوار شماره ۳ پنجره‌هاي بيشتري نسبت به ديوارهاي ديگر دارد. اين ديوار با ديوار شماره ۱ موازي و بنابراين در جهت زمين‌لرزه است. در نتيجة افزايش تنش‌هاي کلي، نقطه ۱ بيشترين تنش را بين تمام نقاط دارد (شکل (۱۵)). در نتيجة افزايش تنش‌هاي کلي نقطه ۱ درون ناحيه ترک‌خورده قرار مي‌گيرد، جائی که نقطه ۳ خيلي به منطقة ترک خورده نزديک است. هم ترازهاي مربوطه به تنش‌ها و نواحي ترک‌خورده در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

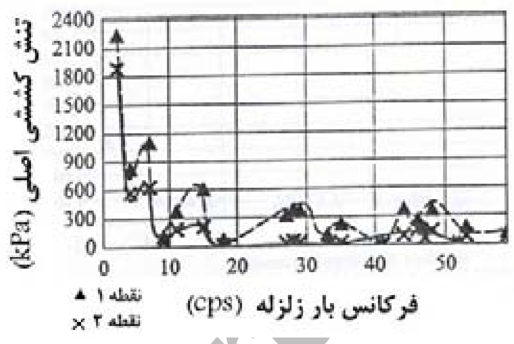


(الف)

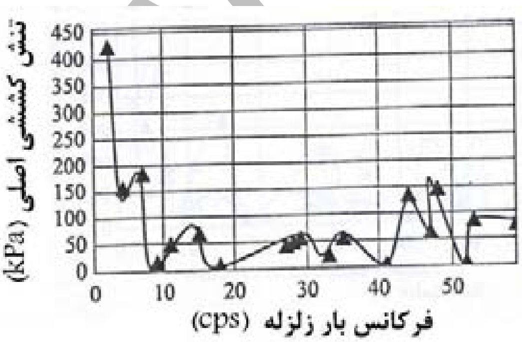


(ب)

شکل ۱۲- ديوار آجري شماره ۱ ساختمان دو طبقه: (الف) نقشه‌هاي هم تراز تنش کششي اصلي؛ (ب) نواحي ترکخورده بر اثر تنش هاي کششي ايجاد شده.

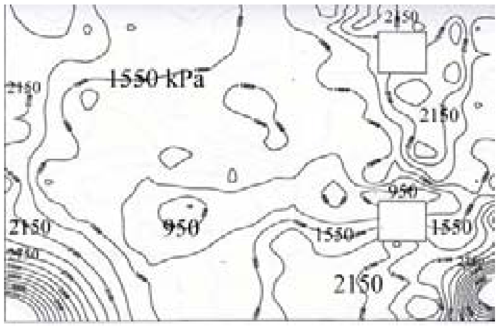


(الف)

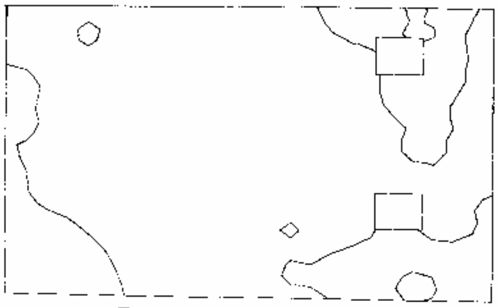


(ب)

شکل ۱۳- تنش هاي کششي اصلي ديوار شماره ۲ ساختمان دو طبقه: (الف) نقاط ۱ و ۲؛ (ب) نقطه ۳

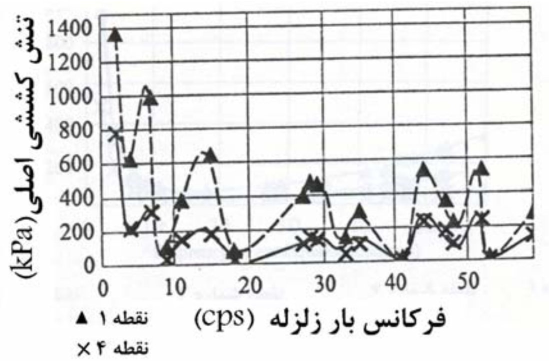


(الف)

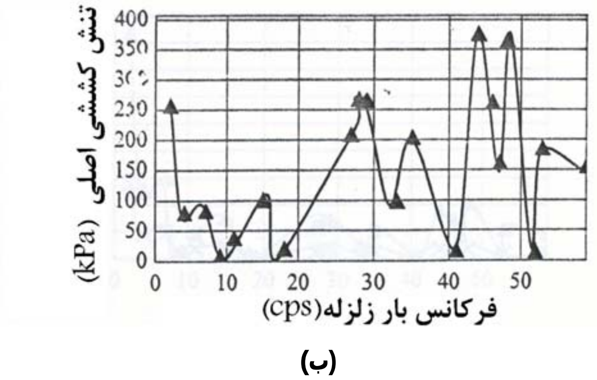


(ب)

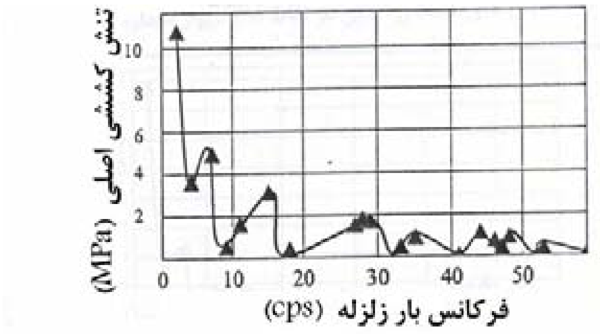
شکل ۱۴- دیوار آجري شماره ۲ ساختمان دوطبقه: (الف) نقشه‌هاي هم‌تراز تنش کششي اصلي؛ (ب) نواحي ترك خورده بر اثر تنش‌هاي کششي ایجاد شده.



(الف)

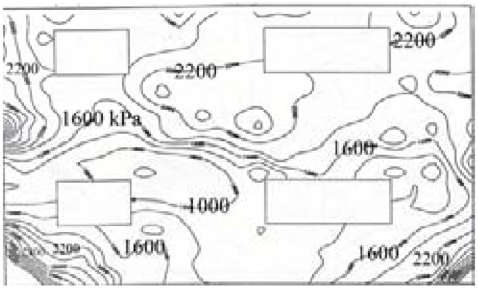


(ب)

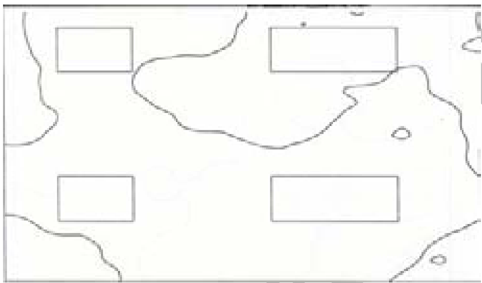


(ج)

شکل ۱۵- تنش هاي کششي اصلي در دیوار شماره ۳ ساختمان دوطبقه: (الف) نقاط ۱ و ۴؛ (ب) نقطه ۲؛ (ج) نقطه ۳.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- دیوار آجري شماره ۳ ساختمان دوطبقه: (الف) نقشههاي هم‌تراز تنش کششي اصلي؛ (ب) نواحي ترکخورده بر اثر تنش‌هاي کششي ایجاد شده.

در دیوار شماره ۴ که هیچ قسمت بازي ندارد و عمود بر جهت زمین‌لرزه واقع شده است، تمامي نقاط نمونه مورد نظر آن تنش‌هاي مهمي را بهخصوص در فرکانس‌هاي پائین‌تر نشان مي‌دهند. این موضوع همچنین از نقشه‌هاي هم تراز مربوطه دیده مي‌شود (شکل (۱۷)).

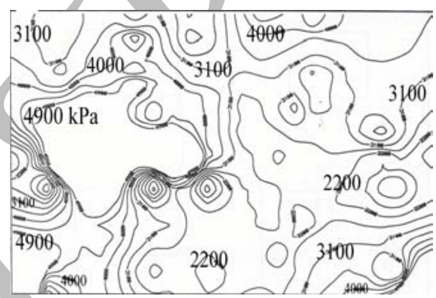
۱۱- بررسي اثرات خاك اطراف ساختمان

چنانچه قبلا" اشاره شد در ساختمانهاي مورد مطالعه فرکانسهاي پائینتر غالب هستند. براساس تئوري دینامیك

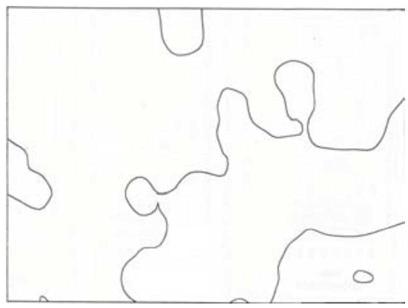
سازهها پريود طبيعـي ساختمان T، بر اساس جرم m و سختي k، از رابطة زير تخمين زده ميشود كه نسبتا" كوچك است.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (۱۶)$$

از آنجايي كه جرم ساختمان يك طبقه زياد نيست، اگر يك تحليل لرزهاي بدون دخالت محيط اطراف پي انجام شود، انتظار ميرود فركانس هاي بالاتر پاسخ بيشتري نسبت به فركانسهاي پائينتر توليد كنند.



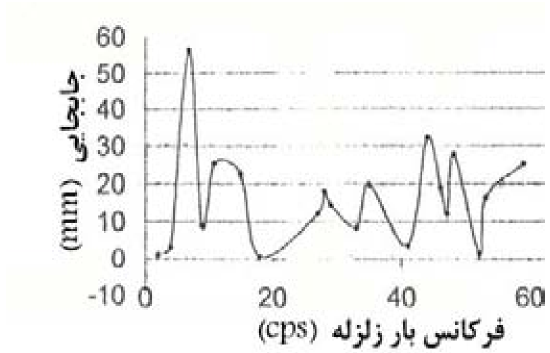
(الف)



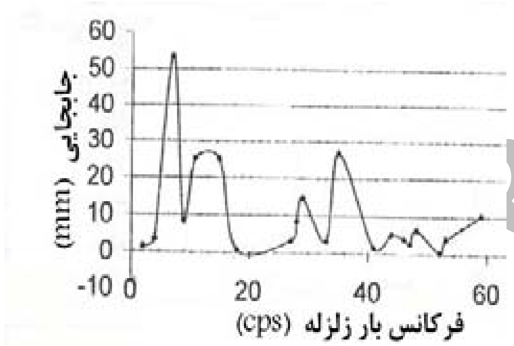
(ب)

شكل ۱۷- ديوار آجري شماره ۴ ساختمان دوطبقه: (الف) نقشههاي همتراز تنشي كششي اصلي؛ (ب) نواحي ترك خورده بر اثر تنش هاي كششي ايجاد شده.

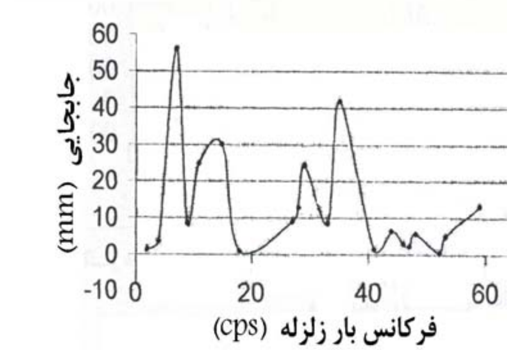
اين موضوع در شكلهاي (۱۸) و (۱۹) براي ساختمان يك طبقه نشان داده شده است. در اين تحليل خاك اطراف ساختمان در نظر گرفته نشده و تنها خاك زير ساختمان بهطور قائم تأثير داده شده است. از نتايج بهدست آمده ديده ميشود كه تغيير مكانها افزايش يافته و نيز تغيير مكان هاي حداكثر در فركانسهاي بالا غالب ميشوند. اين موضوع در نمودارهاي تنش نيز قابل مشاهده است كه نتيجتا" در اين نمودارها نيز تنش منتجه افزايش يافته است. از نمودارهاي تنش ديده ميشود كه بيشتر نقاط بهخصوص آنهايي كه به پائين ديوارها نزديكتر هستند اهميتشان را در فركانسهاي پائين تر نشان ميدهند در حالي كه بعضي از نقاط كه به قسمتهاي باز نزديكتر هستند هنوز نوسان شديدي در تنش در محدودة بالايي حوزة فركانس از خود نشان ميدهند. لازم بهذكر است كه جابجاييها بسته به اينكه ديوار در راستاي زمين لرزه قرار داشته باشد يا نه اثرات مختلفي بر روي ديوارها ميگذارند.



(الف)

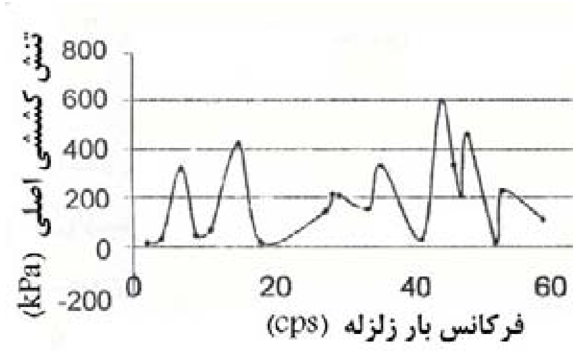


(ب)

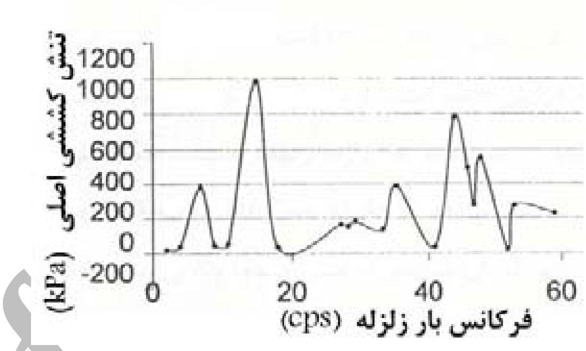


(ج)

شكل ۱۸- جابجايي نقاط بر حسب فركانس غالب نيروي زمين لرزه بدون در نظر گرفتن خاك اطراف در ساختمان يك طبقه: (الف) نقطه ۴۹؛ (ب) نقطه ۸۱؛ (ج) نقطه ۶۰.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹- تنش هاي کششي اصلي نقاط ديوار شماره ۱ بدون در نظر گرفتن خاك اطراف در ساختمان يك طبقه: (الف) نقطه ۱؛ (ب) نقطه ۲.

۱۲- نتيجهگيري

رفتار لرزهاي ساختمانهاي بنايي - آجري بهوسيلة روش المانهاي محدود ديناميكي در حوزه فركانس در اين مقاله مورد بحث قرار گرفت. روش پيشنهادي المانهاي محدود در اين مقاله امكان شامل نمودن بستر ساختمان را نيز فراهم ميكند و لذا مي‌توان تأثير خواص مكانيكي- ديناميكي خاك را در رفتار لرزهاي ساختمانهاي آجري مشاهده نمود. جمع‌بندي نتايج بهدست آمده در اين مقاله مي‌تواند به برآورد خسارت احتمالي به ساختمان آجري در جريان زلزله‌هاي نيرومند كمك كند.

مراجع

[1] Valliappan, S., and Zhao, C. “Numerical Simulation of Dynamic Soil- Structure Interaction Problems”, University Report, School of Civil Engineering, UNSW, Australia, 1991.

[2] Lysmer, J., and Kuhlemer, R. L. “Finite Dynamic Model for Infinite Media” Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877, 1969.

[3] Valliappan, S. “Short Course on Finite Element Analysis in Geomechanics” Vol. 1 & 2 , UNSW, Australia, 1978.

[4] White, W., Valliappan, S., and Lee , I. K. “Unified Boundary for Finite Element Dynamic Model” Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM5, pp. 949-963, No. EM5, 1977.

[5] Zhao, C., Valliappan, S., and Wang, Y. C. “A Numerical Model for Wave Scattering Problems in Infinite Media Due to P- and SV-wave Incidences” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, pp. 001-002, 1991.

[6] Zhao, C., Valliappan, S., and Wang, Y. C. “An Approximate Method for Simulating Infinite Media” Computers & Structures, Vol. 41, No. 5, pp. 1041-1049, 1991.

[7] Zhao C., and Zhang, C. “Analysis of 3-D Foundation Wave Problems by Mapped Dynamic Infinite Elements” Science in China, Vol. 32, No. 4, pp. 479-491, 1989.

[8] Zhang C., and Zhao, C. “Coupling Method of Finite and Infinite Elements for Strip Foundation Wave Problems” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, pp. 839-851, 1987.

[9] Zhao, C., and Wolf, J. P., “Applications of Infinite Elements to Dynamic Soil-Structure Interaction Problems”, International Publishers, New York, 2000.