

استفاده از ماتریس سختی دینامیکی در تحلیل دینامیکی و مطالعه توزیع نرخ کرنش در قابها

محمدجواد جبارزاده، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله
محمود حسینی، استادیار و مدیر گروه شریانهای حیاتی پژوهشگاه
منصور ضیائی فر، استادیار و مدیر گروه دینامیک سازه پژوهشگاه

۱- چکیده

در تحلیلهای دینامیکی متداول که اثر جرم به طور گسسته (به صورت ماتریس جرم متمرکز یا ماتریس جرم سازگار) در معادلات حرکت سیستم وارد می شود، به علت تقریبی بودن توزیع جرم در تعیین پاسخ جا به جایی ها و بخصوص کرنشها که از مشتقات بالاتر معادلات حرکت به دست می آیند خطا به وجود می آید. از سوی دیگر، حساسیت فولاد به تغییرات زمانی کرنش که به سرعت بارگذاری یا محتوای فرکانسی آن مربوط است در آزمایشهای متعدد به اثبات رسیده است؛ به طوری که با افزایش سرعت اعمال بارگذاری، رفتار فولاد از حالت نرم به ترد تغییر کرده و شکست ترد را امکان پذیر می سازد. نمونه هایی از این پدیده در زلزله های نورث ریج و کوبه مشاهده شده است.

در این مقاله با استفاده از برنامه ای تحت عنوان *WPS (Wave Propagation in Structures)* که بر اساس فرمول بندی ماتریس سختی دینامیکی و با استفاده از تبدیل فوریه سریع برای تحلیل دینامیکی قابهای دو بعدی و تعیین پاسخ دقیق آنها توسط نگارندگان تدوین شده است چند نمونه قاب مورد مطالعه قرار گرفته و خطای تحلیلهای متداول دینامیکی در سرعتهای بالای بارگذاری بویژه در تعیین مقادیر کرنش سازه و نتیجتاً نرخهای کرنش ایجاد شده نشان داده شده- است. علاوه بر آن، پتانسیل آسیب دیدگی سازه ناشی از شکست ترد به کمک مقادیر نرخ کرنش به دست آمده از نرم افزار *WPS* بررسی گردیده است. **کلیدواژه ها:** شکست ترد فولاد، ماتریس سختی دینامیکی، نرخ کرنش.

۲- مقدمه

امروزه روشهای تحلیلی متداول در تحلیل دینامیکی سازه ها بر اساس استفاده از اعضای می باشند که اعضای سازه را به اجزای کوچکتر تقسیم می کنند. فرمول بندی سختی این اجزاء، بر اساس معادلات تعادل استاتیکی است و ماتریس جرم سازگار (*Consistant Mass Matrix*) و یا ماتریس جرم متمرکز (*Lumped Mass Matrix*) به طور جداگانه برای این اجزاء به دست می آید و در نهایت هر دو مشخصه در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار می گیرند. به این ترتیب، توزیع جرم استفاده شده، یک توزیع تقریبی و پاسخهای دینامیکی به دست آمده دارای خطا می باشند؛ اما استفاده از ماتریس سختی دینامیکی (*Dynamic Stiffness Matrix*) محدودیتهای کاربرد روشهای متداول را ندارد و امکان محاسبه دقیق پاسخ دینامیکی سازه را ممکن می سازد. در این روش، به دلیل استفاده از توزیع پیوسته جرم روی اعضا، خطای ناشی از توزیع گسسته جرم از بین می رود و در نتیجه حساسیت دقت پاسخها نسبت به طول اعضا و فرکانس تحریک ورودی حذف می شود.

روش سختی دینامیکی در ابتدا توسط کولوسک در اوایل دهه ۱۹۴۰ بسط داده شد [۱] و سپس به طور گسترده ای در تحلیلهای ارتعاشی سازه های تیری مورد- استفاده قرار گرفت. پس از آن، مطالعات زیادی برای بهبود و توسعه این روش صورت گرفت و چندین مدل ریاضی برای اعضای مختلف سازه ای توسط محققان ارائه شد [۱ الی ۹]. دوئل و همکاران [۴، ۵ و ۶] به کمک جوابهای دقیق انتشار

منظور، می توان از روشهای متعددی مانند قوانین نیوتن، اصل دالامبر، اصل کار مجازی، معادلات لاگرانژ یا اصل همیلتون که در مقالات متعددی مطرح شده اند استفاده- کرد [۱۳].

روشهای مورد استفاده در استخراج ماتریس سختی دینامیکی همانند روش تعیین ماتریس سختی استاتیکی است و تنها تفاوت موجود، در معادله دیفرانسیلی است که از ابتدا در نظر گرفته می شود. مراحل دیگر شامل به دست آوردن و سرهم بندی ماتریس سختی دینامیکی کل سازه همانند روش اجزای محدود است. به عنوان مثال، ماتریس سختی دینامیکی یک عضو محوری که معادله دیفرانسیل حاکم بر آن به صورت رابطه (۱) است، به صورت رابطه (۲) نتیجه می شود [۱۴]:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \frac{kL}{\sin(kL)} \begin{bmatrix} \cos(kL) & -1 \\ -1 & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$K_D = \frac{EA}{L} \frac{(kL)}{\sin(kL)} \begin{bmatrix} \cos(kL) & -1 \\ -1 & \cos(kL) \end{bmatrix}, k = \omega \sqrt{\frac{\rho A}{EA}}$$

در رابطه های (۱) و (۲)، L, A, E, ρ و u به ترتیب چگالی جرمی، ضریب الاستیسیته، سطح مقطع میله، طول میله و جابه جایی محوری میله، F_1 و F_2 نیروهای گرهی (شکل ۱، الف)، u_1 و u_2 جابه جایی محوری گرهی و k عدد موج است.

ماتریس سختی دینامیکی تیر خمشی با معادله دیفرانسیل اولر به شکل رابطه (۳) نیز به صورت رابطه (۴) به دست می آید [۹]:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ M_1 \\ F_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} a & \bar{\gamma}L & -\bar{a} & \bar{\gamma}L \\ & \beta L^2 & -\bar{\gamma}L & \beta L^2 \\ & & a & -\bar{\gamma}L \\ S_{ym} & & & \beta L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{Bmatrix}, k = \sqrt{\omega^4} \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \quad (4)$$

که:

$$\alpha = (CSh + SCh)(kL)^3 / \det, \quad \bar{\alpha} = (S + Sh)(kL)^3 / \det$$

$$\beta = (-CSh + SCh)(kL) / \det, \quad \bar{\beta} = (-S + Sh)(kL) / \det$$

$$\gamma = (-C + Ch)(kL)^2 / \det, \quad \bar{\gamma} = (S.Sh)(kL)^2 / \det$$

موج، معادلات حاکم بر حرکت را فرمول بندی کردند و با تبدیل این معادلات به معادلات ماتریسی حاکم بر ارتعاش اعضا و استفاده از تبدیل فوریه سریع، امکان مدل سازی قابها را به روش تحلیل ماتریسی فراهم نمودند. این تحقیقات مقارن با افزایش توانایی رایانه ها در انجام محاسبات با حجم بالاتر بود.

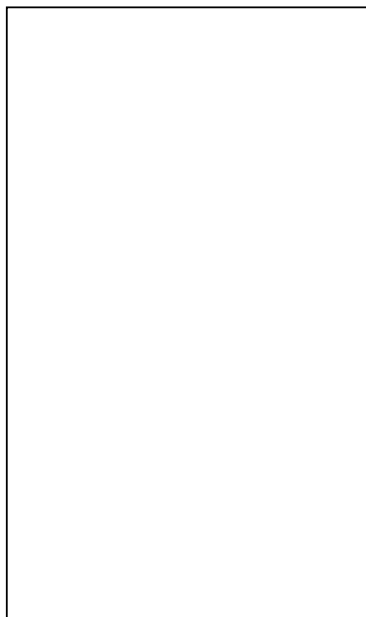
در تحقیق حاضر، بر اساس فرمول بندی ماتریس سختی دینامیکی برنامه ای تحت نرم افزار Matlab 5.3 به نام WPS تهیه شده است که قابلیت تحلیل دینامیکی خطی قابهای دو بعدی تحت بارگذاربهای چند تکبیه گاهی متفاوت را داراست. الگوریتم این برنامه در مرجع [۱۰] موجود است. با استفاده از این نرم افزار، علاوه بر کنترل دقت پاسخ تحلیلهای دینامیکی متداول، محاسبه دقیق مقادیر نرخ کرنش در هر نقطه سازه امکان پذیر می گردد. با توجه به تغییر رفتار فولاد در نرخهای کرنش بالا از حالت نرم به ترد، مطالعه توزیع مقادیر نرخ کرنش روی سازه ها برای آشنایی با الگوی احتمالی شکست ترد ناشی از بارگذاری سریع می تواند حائز اهمیت باشد.

در این مقاله پس از معرفی دو عضو میله و تیر با فرمول بندی سختی دینامیکی و آشنایی با تغییر رفتار فولاد در بارگذاربهای سریع، چند قاب نمونه مورد بررسی قرار گرفته اند. نمونه اول یک قاب سه طبقه و یک دهانه است که تحت تحریک یک پالس مثلثی شبه سینوسی جا به جایی قرار گرفته و نتایج به دست آمده از نرم افزار WPS با مدل های ساخته شده توسط نرم افزار ANSYS 5.4 با یکدیگر مقایسه گردیده اند. سپس به مطالعه توزیع نرخ کرنش در چند قاب نمونه مشتمل بر یک قاب هشت طبقه و سه قاب چهار طبقه تحت نگاشت زلزله نورث ریج که نمونه هایی از شکست ترد در آن مشاهده شده است [۱۱ و ۱۲] پرداخته و الگوی احتمالی شکست ترد ناشی از سرعت بالای بارگذاری در این قابها نشان داده شده است.

۳- فرمول بندی سختی دینامیکی

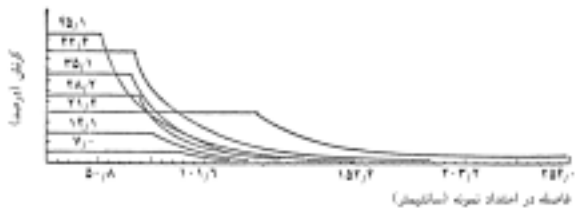
مرحله اول در به دست آوردن ماتریس سختی دینامیکی یک عضو سازه ای، فرمول بندی معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت ارتعاش آزاد آن است. برای این

در این حالت، علی رغم افزایش استحکام کششی، هنگامی که تنش تسلیم به سطح بالایی برسد، رفتار فولاد تغییر کرده و تمایل به شکست ترد پیدا می کند.



تصویر (۱): امتداد یافتن ترک خوردگی بال ستون به سمت جان مقطع [۱۱ و ۱۲]

کارمن و داوز [۱۸] بارگذاری سریع فلزات را به طور تئوری مطالعه کرده و به صورت آزمایشگاهی روی نمونه های مسی مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه های تحت کشش با سرعت های مختلف بارگذاری در شکل (۲) دیده می شود. شکل مذکور نشان می دهد که با افزایش سرعت، محدوده تغییرشکل های خمیری کاهش یافته و مقدار کرنش پلاستیک زیادتر شده است.



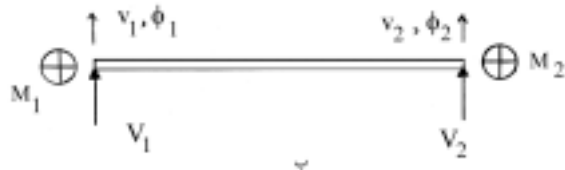
شکل (۲): نمودارهای توزیع کرنش در نمونه های مسی در معرض سرعت های مختلف ضربه (متر بر ثانیه) [۱۸]

هر قدر سرعت ضربه بیشتر می شود تغییرشکل های پلاستیک فرصت کمتری برای انتشار داشته و محدوده کوچکتری را در بر می گیرند. در نتیجه، انرژی جذب شده در سیستم کاهش یافته و فولاد رفتار ترد از خود نشان می دهد (همان اثری که با کاهش دما حادث می شود).

$$det = 1 - C.Ch, \quad C = \cos(kL), \quad S = \sin(kL), \quad Ch = \cos(kL) \quad (5)$$

$$Sh = \sin h(kL)$$

در رابطه (۴)، گشتاور اینرسی مقطع، M_1 و M_2 لنگرهای گرهی، v_1 و v_2 تغییرمکان های جانبی گرهی و ϕ_1 و ϕ_2 چرخش های گرهی و V_1 و V_2 نیروهای برشی گرهی می باشند (شکل ۱، ب). سایر متغیرها همانند حالت میله تعریف می شوند. با ترکیب این دو ماتریس، سختی دینامیکی یک عضو تیر با قابلیت انتشار موج محوری حاصل می شود.



شکل (۱): نیروهای گرهی و درجات آزادی [۱]

از ویژگی های کاربرد ماتریس سختی دینامیکی استفاده از توابع شکل دقیق، قابلیت محاسبه بی نهایت فرکانس و شکل مدی سازه با تعداد محدودی از مجهولات، محاسبه پاسخ دینامیکی دقیق سازه به خاطر استفاده از توزیع جرم گسترده و کاهش قابل توجه تعداد اعضا در مدل سازی سازه است.

۴- تغییر رفتار فولاد در سرعت های بالای بارگذاری

آزمایشها و مطالعات بسیاری نشان داده اند که رفتار فولاد تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دما، درجه خلوص، درشتی یاریزی دانه ها، سرعت بارگذاری و نوع توزیع تنش های سه بعدی قرار داشته و می تواند از شکل پذیر به ترد تغییر یابد. از نمونه های بارز شکست ترد در ساختمانها در زلزله نورث ریج آمریکا اتفاق افتاده است. تصویر (۱) شکست ترد را بدون تغییرشکل های خمیری نشان می دهد [۱۱ و ۱۲].

مطالعات آزمایشگاهی متعددی نشان داده اند که با افزایش سرعت بارگذاری، منحنی تنش-کرنش، رشد می کند و مشخصه های استحکامی ماده بیشتر می شود [۱۵، ۱۶ و ۱۷].

۵- نتایج تحلیلها

اولین تحلیل بر روی یک قاب سه طبقه و یک دهانه به کمک نرم افزار WPS تحت یک پالس مثلثی شبه سینوسی جا به جایی صورت گرفته و نتایج آن با مدل‌های ساخته شده توسط نرم افزار ANSYS 5.4 مقایسه شده اند. در این قسمت به کمک این تحلیلها علاوه بر تأیید صحت اجرای برنامه WPS تأثیر سرعت بارگذاری بر پاسخها بویژه پاسخ کرنش سازه نشان داده شده است.

دومین تحلیل به منظور مطالعه توزیع نرخ کرنش در اعضای قابهای نمونه هشت طبقه و سه قاب چهار طبقه تحت نگاشت زلزله نورث ریج انجام گرفته است. در این تحلیلها اثر طول اعضا و ریزتر شدن بازه زمانی نگاشت ورودی بر مقادیر نرخهای کرنش ایجاد شده بررسی شده است.

۵-۱- مقایسه نتایج نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4 در

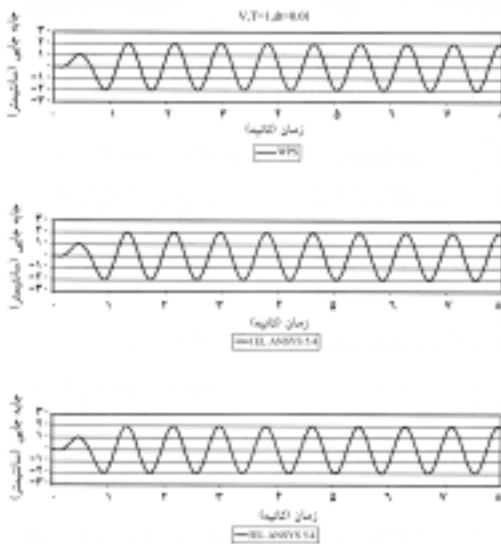
قاب خمشی سه طبقه یک دهانه

قاب سه طبقه و یک دهانه *fr3-1* (شکل ۳، الف) تحت جا به جایی مثلثی شبه سینوسی (شکل ۳، ب) قرار گرفته است.

سوم در سه پرپود جا به جایی ۱، ۰/۱ و ۰/۰۲ ثانیه (۱، ۱۰ و ۵۰ هرتز) توسط نرم افزار WPS و نرم افزار ANSYS 5.4 (هر تیر و ستون به یک و پنج عضو تقسیم شده اند) مقایسه گردیده است (شکل ۳، پ).

در تحلیل به روش اجزای محدود دو پارامتر طول عضو و بازه زمانی نگاشت ورودی در دقت پاسخ دینامیکی سازه تأثیر می گذارند؛ به طوری که بر اساس سرعت حرکت موج عبوری از سازه مقادیر این پارامترها باید نسبت ویژه ای داشته باشند؛ اما در استفاده از نرم افزار WPS تنها پارامتر بازه زمانی تأثیر گذار است و به دلیل محدودیت طول اعضا مشکلی از نظر حذف فرکانس های بالا (در جا به جایی و کرنش) وجود نخواهد داشت.

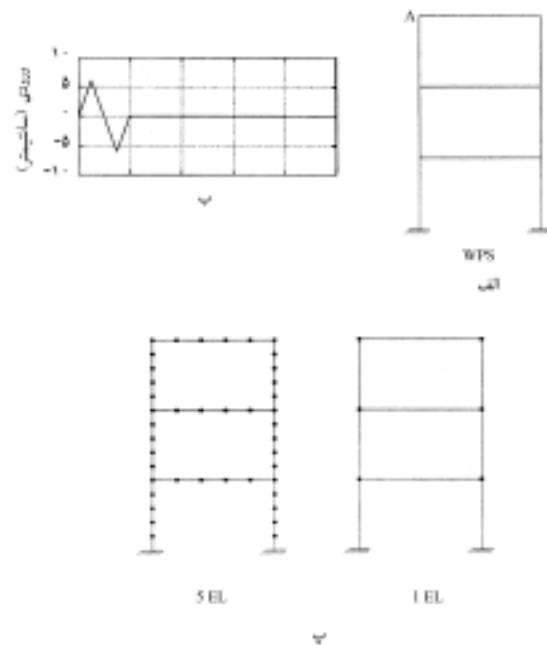
نتایج تحلیلی دو نرم افزار WPS و ANSYS 5.4 برای جا به جایی جانبی نقطه A در قاب *fr3-1* در شکل‌های (۴ تا ۶) با یکدیگر مقایسه شده اند. مشاهده می شود که تطابق خوبی در پاسخهای جا به جایی بین مدل‌های WPS و مدل‌های یک و پنج عضوی ANSYS تا پرپود ۰/۱ ثانیه وجود دارد؛ اما، با



شکل (۴): مقایسه پاسخ جا به جایی برای پرپود یک ثانیه پالس ورودی تحت

نرم افزارهای WPS و ANSYS

کاهش پرپود به ۰/۰۲ ثانیه اختلاف مدل یک و پنج عضوی با مدل WPS خود را نشان می دهد. البته بروز پالس های جا به جایی با این پرپود در زلزله ها دور از ذهن است و هدف از این مقایسه تنها نمایش صحت نرم افزار WPS و

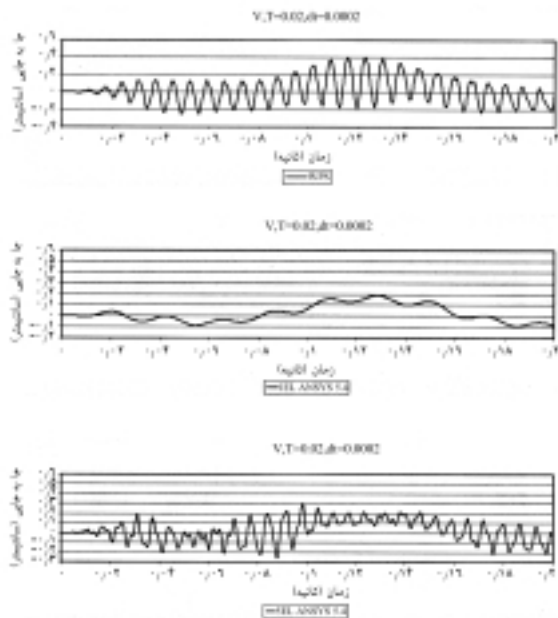


شکل (۳): قاب سه طبقه یک دهانه تحت تحریک پالس مثلثی

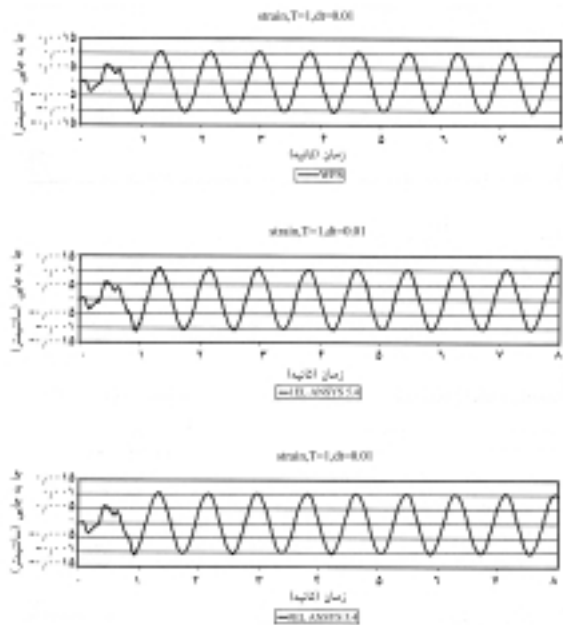
پرپود جا به جایی ورودی با تغییر dt بازه زمانی جا به جایی تنظیم می شود. هر پالس به ۱۰۰ بازه زمانی تقسیم شده است. برای کنترل جوابها پاسخ جانبی نقطه A در طبقه

نمایش عدم توانایی مدل یک عضوی و حتی پنج عضوی در انتقال پالس‌هایی با فرکانس‌های بالاتر است؛ اما مقایسه کرنش‌های به دست آمده از این تحریکات در (نقطه A) بالای ستون طبقه سوم (شکل‌های ۷ تا ۹) نشان می‌دهد که علی‌رغم تطابق پاسخ‌ها به جایی این نقطه تا پریود ۰/۱ ثانیه، پاسخی بین دو مدل WPS و مدلهای یک و پنج عضوی ANSYS در پریود ۰/۱ ثانیه (فرکانس ۱۰ هرتز) و بالاتر اختلاف فاحشی را نشان می‌دهند.

یک مؤلفه فرکانس بالای موج در پاسخ WPS وجود دارد که در مدلهای یک و پنج عضوی دیده نمی‌شود. وجود چنین مؤلفه‌هایی، باعث می‌شود که بر روی پاسخ کرنش فرکانس پایین سازه (رفتار کلی کرنش با پریود بالا) یک موج فرکانس بالا قرار گیرد و باعث شود که نرخ کرنش ایجاد شده نسبت به پاسخ مدلهای یک و پنج عضوی رشد زیادی از خود نشان دهد؛ به طوری که با تحلیل‌های متداول نمی‌توان چنین مؤلفه‌هایی را نمایش داد. این اختلاف، لزوم استفاده از تحلیل‌های دقیقتر را توجیه می‌کند؛ زیرا، احتمال این خطر وجود دارد که در نرخهای کرنش بالای به وجود آمده، رفتار فولاد از نرم به ترد تغییر کند.

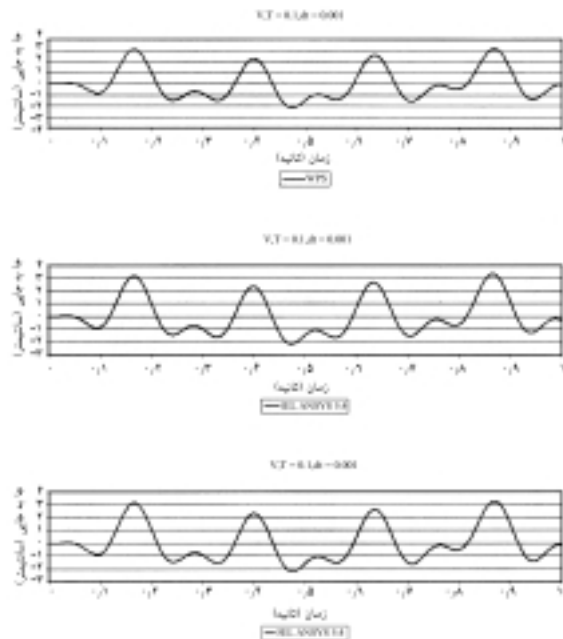


شکل (۶): مقایسه پاسخ‌ها به جایی برای پریود ۰/۲ ثانیه پالس ورودی تحت نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4



شکل (۷): مقایسه پاسخ کرنش بالای ستون طبقه سوم برای پریود یک ثانیه پالس ورودی تحت نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4

با توجه به اینکه حداکثر محتوای فرکانسی نگاشته‌های جا به جایی زلزله‌ها به ۵ تا ۱۰ هرتز (پریود ۰/۲ تا ۰/۱ ثانیه) محدود می‌شود، به نظر می‌رسد که استفاده از مدل یک عضوی در تحلیل دینامیکی سازه‌ها می‌تواند تقریب کافی در جوابهای جا به جایی سیستم را نتیجه دهد. این



شکل (۸): مقایسه پاسخ‌ها به جایی برای پریود ۰/۱ ثانیه پالس ورودی تحت نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4

۵-۲- مطالعه توزیع نرخ کرنش در یک قاب خمشی

هشت طبقه سه دهانه

استفاده از نرم افزار WPS به عنوان ابزاری دقیق در تحلیل دینامیکی سازه ها بویژه در سرعت های بالای بارگذاری بسیار کارآمد است. به این ترتیب می توان الگوی توزیع مقادیر نرخ کرنش قابها را با دقت در بارگذاریهای سریع مطالعه نمود و نقاطی که احتمال بروز شکست ترد در آنها وجود دارد شناسایی کرد. بر اساس تحلیلهایی که با استفاده از نرم افزار WPS بر روی سازه های متداول انجام گرفت مشخص شد که نرخهای کرنش حداکثر در ابتدا و انتهای اعضا (تیر یا ستون) مقادیر حداکثر را دارا می باشند؛ بنابراین نرخهای کرنش در محل اتصال اعضا به یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل نرم افزار WPS برای یک قاب خمشی هشت طبقه سه دهانه تحت تحریک جا به جایی زلزله نورث ریچ در شکل (۱۰) دیده می شود.

پاسخ نرخهای کرنش نسبت به خط وسط قاب مقارن می باشند. به این دلیل نتایج تنها برای یک نیمه در انتهای تیرها و ستونها مشخص شده اند. اهم نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- نرخ کرنش در تیرهای طبقه اول و ماقبل آخر مقادیر حداکثر را داراست. علت افزایش نرخ کرنش در طبقه بالا را می توان انعکاس موج عبوری از انتهای آزاد قاب توجیه کرد که سازه قاب مانند یک تیر یکسر گیردار قائم عمل می کند.

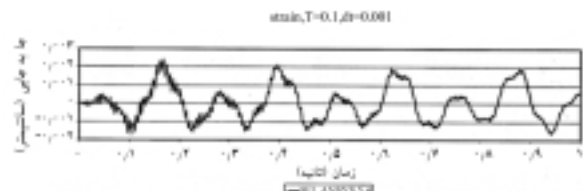
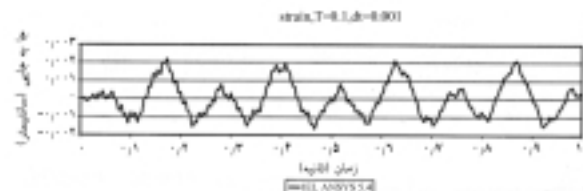
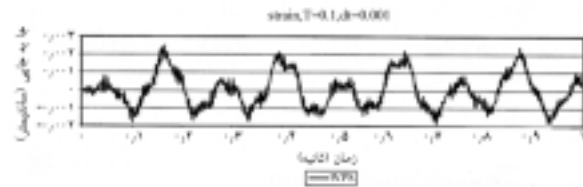
- نرخ کرنش در ستونهای طبقه اول، بالا و در طبقه ماقبل آخر حداکثر است.

- در ارتفاع سازه نرخ کرنش در نقاطی که تغییر مقطع وجود دارد به طور ناگهانی افزایش می یابد (در این نمونه چهار طبقه اول یک نوع مقطع و پس از آن هر دو طبقه یک نوع مقطع تیر و ستون است).

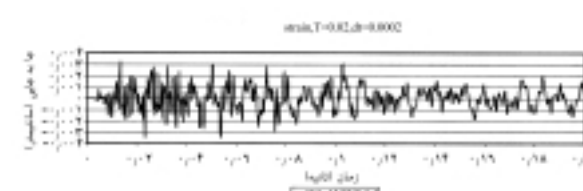
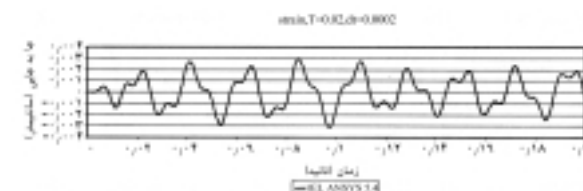
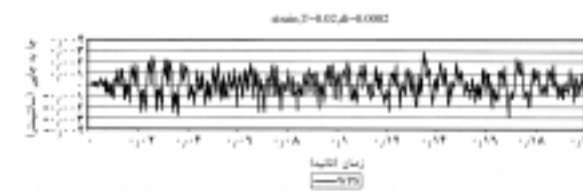
۶- مطالعه نرخ کرنش در قابهای چهار طبقه

با توجه به نتایج به دست آمده این سؤال مطرح می شود که مقادیر نرخ کرنش به چه عواملی وابسته می باشند. آیا بزرگ بودن یا کوچک بودن اعضا و فرکانس های طبیعی مدهای بالای سازه و یا سیستم سازه ای قاب و یا

فرضیه در مورد پاسخهای جا به جایی صادق است؛ اما همان گونه که مشاهده شد در مورد کرنشهای سازه که از مشتقات جا به جایی حاصل می شوند و به تغییرات ناچیز جا به جایی حساس هستند صحت نخواهد داشت؛ بویژه اینکه با ریزتر شدن بازه زمانی ورودی این اختلاف تشدید می شود.

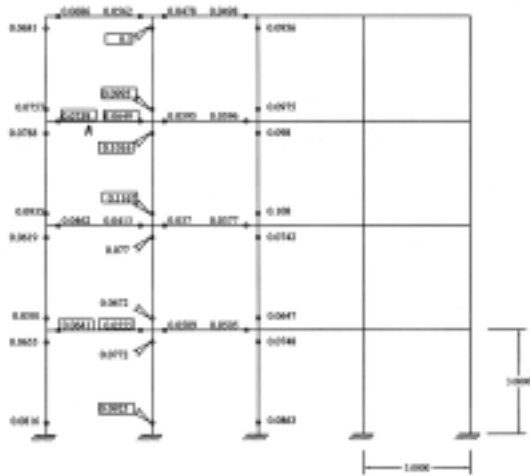


شکل (۸): مقایسه پاسخ کرنش بالای ستون طبقه سوم برای پرود ۰/۱ ثانیه پالس ورودی تحت نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4

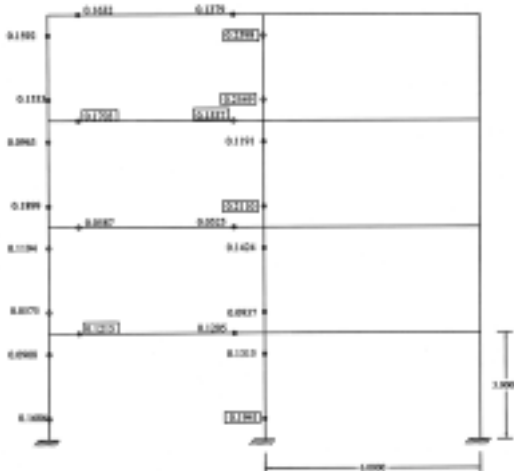


شکل (۹): مقایسه پاسخ کرنش بالای ستون طبقه سوم برای پرود ۰/۰۲ ثانیه پالس ورودی تحت نرم افزارهای WPS و ANSYS 5.4

حداکثر است و در محل تغییر مقطع (بالای کف طبقه دوم)



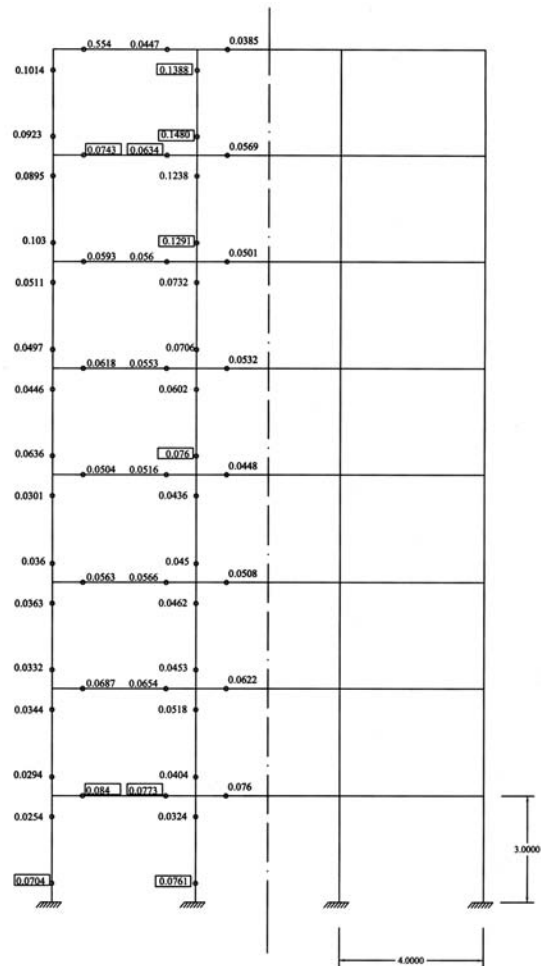
شکل (۱۱): مقادیر نرخ کرنش قاب خمشی چهار دهانه (fir4-4)



شکل (۱۲): مقادیر نرخ کرنش قاب خمشی دو دهانه (fir4-2)

یک جهش در مقادیر نرخ کرنش دیده می شود. چنین الگویی از توزیع نرخهای کرنش حداکثر و در نتیجه شکست ترد برای یک قاب چهار طبقه سه دهانه در مرجع [۱۱] نیز مشاهده شده است. شکل (۱۴) الگوی توزیع شکست بال تیر را در محل اتصال به ستون برای این قاب نشان- می دهد. علامت توپر سیاه، نمایش ترک خوردگی در محل بال تیر به ستون است.

مشاهده می شود که توزیع این شکستها در طبقه سوم و اول بیشتر از سایر نقاط است؛ مشابه نتایجی که در تحلیل قاب fir4-2 و fir4-4 دیده می شود.

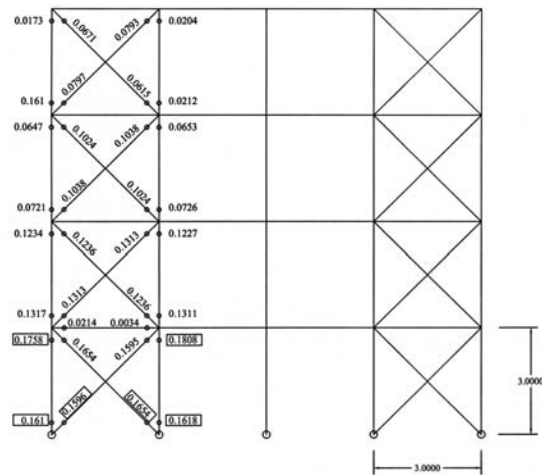


شکل (۱۰): مقادیر نرخ کرنش برای قاب خمشی هشت طبقه سه دهانه

حتی بازه زمانی نگاشت ورودی می توانند بر این پارامتر مؤثر باشند. برای مطالعه این آثار نتایج تحلیل سه قاب چهار طبقه فولادی را که به صورت یک قاب خمشی چهار دهانه (شکل ۱۱)، یک قاب خمشی دو دهانه (شکل ۱۲) و یک قاب بادبندی چهار دهانه (شکل ۱۳) با استفاده از WPS مدل- شده اند تحت نگاشت جا به جایی زلزله نورت ریج با بازه زمانی ۰/۰۲ ثانیه بررسی شده اند.

قابهای خمشی از دو نوع مقطع ستون و دو نوع مقطع تیر (هر دو طبقه یک نوع تیر و ستون) تشکیل شده و مقاطع قاب بادبندی در طبقات تغییر نکرده است. در قابهای خمشی مکرراً نتایج قاب هشت طبقه بخش قبل دیده می شوند. مقادیر نرخ کرنش در پایین سازه، بالا و در طبقات بالا بویژه تیرهای طبقه سوم و ستونهای طبقات آخر

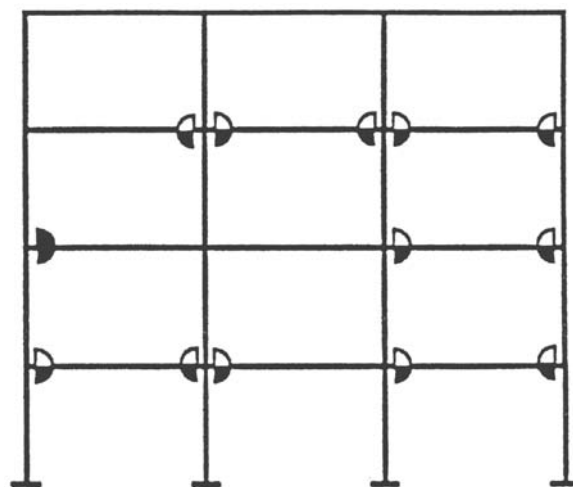
ستونهای طبقه اول که تنها نرخ کرنش محوری هستند). نکته جالب توجه در این شکل مقادیر بالای نرخ کرنش محوری در بادبندهای طبقه پایین نسبت به مقادیر نرخ کرنش در ستونهاست (تقریباً معادل). به عبارت دیگر، در هنگام زلزله نیروهای محوری با سرعت بالایی به بادبندها وارد می شوند و می توانند نقاط حساسی را از نظر شکست ترد و یا گسستگی در محل اتصال بادبند ایجاد کنند. پدیده ای که در زلزله نورث ریج نیز مشاهده شده است (تصویر ۲).



شکل (۱۳): مقادیر نرخ کرنش قاب بادبندی چهار دهانه (fr4-B)

جدول (۱): مقادیر فرکانس های دو قاب fr4-2 و fr4-4

فرکانس (Hz)		شماره مد
fr4-4	fr4-2	
۱/۴۵	۱/۸۵	۱
۳/۹۰	۴/۷۸	۲
۶/۰۲	۷/۰۷	۳
۷/۶۹	۷/۱۳	۴
۱۳/۲۵	۷/۶۲	۵
۱۵/۱۹	۷/۸۸	۶
۱۹/۶۹	۷/۹۳	۷
۲۰/۲۷	۹/۰۹	۸
۲۰/۶۰	۹/۳۱	۹
۲۰/۸۳	۹/۴۱	۱۰



شکل (۱۴): الگوی توزیع شکست بال تیرهای قاب چهار طبقه [۱۱]

کلیه تحلیل‌های مذکور بر اساس نگاشتی صورت گرفت که بازه زمانی آن برابر با ۰/۰۲ ثانیه بود؛ حال این سؤال پیش می آید که اگر مؤلفه هایی از هارمونیک های تشکیل دهنده نگاشت ورودی توسط مدهای بالای سازه تقویت یا تشدید شوند، آیا قابلیت نمایش چنین مؤلفه هایی در پاسخ خروجی امکان پذیر است؟ در صورتی که هر پالس کامل از چهار گام زمانی تشکیل شده باشد حداکثر فرکانسی که ممکن است تقویت شود ۱۲/۵ هرتز خواهد بود. به این ترتیب آیا با کوچک کردن بازه زمانی ورودی، تغییری در پاسخها به وجود خواهد آمد؟ در جدول (۲) مقادیر نرخ کرنش برای دو تحلیل با بازه های زمانی ۰/۰۲ و ۰/۰۰۲ برای عضو A در قاب fr4-4 نشان داده شده است (شکل ۱۱). مشاهده می شود مقادیر نرخها تا ۲۰٪ افزایش یافته اند.

نکته جالب توجه در مورد دو قاب fr4-2 و fr4-4 رشد مقادیر نرخهای کرنش در قاب fr4-2 نسبت به fr4-4 است. دلیل این امر را می توان افزایش طول اعضای سازه دانست که باعث می شوند فرکانس های مدهای بالاتر سازه کاهش یافته و بیشتر در محدوده فرکانسی زلزله ورودی قرار گیرند. به این ترتیب، امکان تحریک این مدهای بالاتر نسبت به قاب fr4-4 افزایش می یابد. مقادیر فرکانس های دو قاب fr4-2 و fr4-4 در جدول (۱) دیده می شوند.

مقادیری که در شکل (۱۴) برای قاب fr4-B نشان داده شده اند در بادبندها نرخ کرنش محوری و در ستونها نرخ کرنش محوری به علاوه نرخ کرنش خمشی می باشند (بجز

به کمک این ابزار دقیق نحوه توزیع نرخهای کرنش در اعضای چند قاب نمونه مطالعه شد و نقاطی را که پتانسیل خطر آسیب دیدگی به شکل ترد در سازه وجود داشت شناسایی و نشان داده شد که طول اعضای سازه و بازه زمانی نگاشت ورودی می‌توانند باعث تغییر مقادیر نرخ کرنش در سازه شوند. با توجه به نتایج به دست آمده نکات زیر حائز اهمیت می‌باشند:

- با توجه به تقریبهایی که در تحلیلهای متداول دینامیکی به دلیل استفاده از تعداد محدودی عضو به- وجود می‌آیند، باید تعداد اعضای که در مدلسازی هر عضو از سازه در این نوع تحلیلها استفاده- می‌شود با توجه به فرکانس تحریک ورودی و مشخصات فیزیکی سازهٔ مفروض تعیین شوند.

- استفاده از فرمول بندی ماتریس سختی دینامیکی محدودیت استفاده از اعضای بیشتر در مدلسازی اعضای سازه را از بین برده و تنها با استفاده از یک عضو بین هر دو گره یا ناپیوستگی در مدلسازی، پاسخ دینامیکی با دقت محاسبه می‌شود.

- با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که علاوه بر معیارهای کنترل کنندهٔ تنش، کرنش و جا به جایی در طراحی سازه‌ها، نرخ کرنش نیز می‌تواند به عنوان یک عامل کنترل کننده از اهمیت زیادی برخوردار باشد. به این ترتیب، به منظور برآورد دقیق تر آسیب دیدگی سازه‌های فولادی مطالعهٔ نرخها و تشخیص مقاطعی که بیشترین خطر قرارگیری در محدودهٔ رفتار ترد فولاد را دارند ضروری است.

- اگر فرکانس مدهای بالاتر سیستم کوچک باشند احتمال اینکه در محدودهٔ فرکانسی تحریک نگاشت ورودی قرار بگیرند، بیشتر شده و در نتیجه نرخهای کرنش ایجاد شده افزایش می‌یابند.

- چنانچه در نتایج دیده شد کوچک کردن بازه زمانی به بروز نرخهای کرنش بیشتری در سازه منجر- می‌شود؛ بنابراین، برای به دست آوردن دقت مناسب باید تا حد امکان از نکشتهایی که با بازهٔ زمانی ریزتری ثبت شده اند استفاده نمود.



تصویر (۲): گسیختگی اتصال جوشی بادبند [۱۰]

جدول (۲): مقادیر فرکانس های دو قاب $fr4-2$ و $fr4-4$

بازه زمانی	نرخ کرنش خمشی	نرخ کرنش محوری	حداکثر مجموع نرخها
۰/۰۲	۰/۱۱۶۳	۰/۰۰۶۴۱	۰/۱۱۶۷
۰/۰۰۲	۰/۱۳۳۸	۰/۰۱۵۹۷	۰/۱۳۹۵

اگرچه با ریزتر کردن بازه زمانی زلزله محتوای فرکانسی آن هیچ تغییری نمی‌کند، اما در تحلیل با $dt = 0.002$ مقادیر نرخها برای تمام اعضا افزایش می‌یابند که دو توجیه برای آن استنباط می‌شود:

- امکان ظهور مؤلفه های فرکانس بالا در پاسخ سیستم با ریز کردن بازهٔ زمانی؛
- تقریب دقیق تر از منحنی کرنش ها.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روش ماتریس سختی دینامیکی مدلی دقیق برای تحلیل دینامیکی سازه های دو بعدی ارائه شد. این مدل علاوه بر کنترل نتایج نرم افزارهای متداول، ضعف این مدلها را در تعیین پاسخ سازه برای بارگذاریهایی سریع نشان داد؛ به طوری که در این نرم افزارها لازم است برای تعیین پاسخ دینامیکی دقیق سازه ها نسبت ویژه ای بین طول عضو استفاده شده در مدلسازی و بازه زمانی ورودی برقرار باشد. علاوه بر آن،

سازه های دو بعدی با استفاده از ماتریس سختی

دینامیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه

بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۹.

11. "Northridge Earthquake Reconnaissance Report", Earthquake Spectra, Vol. 2, pp.25-47, 1996.

12. Bertro, V. V., Anderson, J. C. and Krawinkler, H., "Performance of Steel Building Structures During the Northridge Earthquake", UCB/EERC, 94-09.

13. Banerjee, J. R., "Dynamic Stiffness Formulation for Structural Elements: A General Approach", Computer & Structures, pp. 101-103, 1997.

14. Azimi, S., "Dynamic Analysis of Structures Using Finite Dynamic Element Formulation Methodology", Report of IIEES, 1996.

۱۵- آیزشتات، مالوین. "آشنایی با خواص مکانیکی مواد"،

ترجمه علی حائریان اردکانی، تهران: مرکز نشر

دانشگاهی، ۱۳۷۲.

16. Element of Material Science & Engineering, Vanlack, Addison-Wesley, 1980.

17. Francois, D., Pineau, A., and Zaoui, A., "Mechanical Behaviour of Materials", KAP, 1998.

18. Vonkarman, T., Duwez, P., "The Propagation of Plastic Deformation in Solids", J., Appl. Phys, pp. 987-994, 1950. ◀

1. Kolousek, V., Butter Worths, "Dynamic in Engineering", 1973.

2. Williams, F.W., Wittrick, W.H., "An Automatic Computational Procedure for Calculation of Natural Frequencies of Skeletal Structures", Int. J. Mech. Sci., pp. 781-791, 1970.

3. Richards, T.H., Leung, Y.T., "An Accurate Method in Structural Vibration Analysis", J. Sound and Vibration, pp. 363-376, 1977.

4. Doyle, J.F. "Wave Propagation in Structures", Springer-Verlag, 1989.

5. Martin, M., Gopalakrishnan, S., Doyle, J.F., "Wave Propagation in Multiply Connected Deep Waveguides", J. Sound and Vibration, pp. 521-538, 1994.

6. Gopalakrishnan, S. and Doyle, J. F., "Wave Propagation in Connected Waveguide", J. Sound and Vibration, pp. 347-363, 1994.

7. Banerjee, J. R., Guo, S. and Howson, W.P., "Exact Dynamic Stiffness Matrix of a Bending-Torsion Coupled Beam Including Warping", Computers & Structures, pp. 613-621, 1996.

8. Banerjee, J. R., Williams, F.W., "Coupled Bending-Torsional Dynamic Stiffness Matrix for Timoshenko Beam Elements", Computers & Structures, pp. 301-310, 1992.

9. Clough, R.W., Penzien, J., "Dynamic of Structures", Mc Grew-Hill, 1975.

۱۰- جبارزاده، محمدجواد. "بررسی پدیده انتشار موج در