

ارزیابی المان‌های تماس در تعیین ضربه بین ساختمان‌های فولادی

جواد وثقی امیری^۱، سید قاسم جلالی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: ضربه بین ساختمان‌ها، المان تماس الاستیک خطی، المان تماس ویسکوالاستیک خطی، المان تماس الاستیک غیرخطی، المان تماس هرتز-میراگر، المان تماس ویسکوالاستیک غیرخطی.</p>	<p>معمولاً ضربه بین ساختمان‌های مجاور در زلزله‌های متوسط و قوی روی داده است. روش‌های مختلفی در مدل کردن ضربه وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از المان تماس می‌باشد. المان‌های تماس شامل المان‌های الاستیک و ویسکوالاستیک خطی، الاستیک و ویسکوالاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر می‌باشند. تاکنون محققین به مقایسه المان‌های تماس در سازه‌های الاستیک و یک درجه آزادی پرداختند. در این مقاله، ابتدا قابلیت مدل‌سازی المان‌های مختلف تماس به نرم‌افزار OpenSees اضافه گردید. از مقایسه با نتایج مدل‌سازی عددی دیگران صحت مدل‌سازی‌های این تحقیق مشخص شد. سپس با توجه نتایج مدل‌سازی عددی این تحقیق و مقایسه با کارهای آزمایشگاهی مشخص شد که در تعیین پاسخ تغییر مکان، نتایج المان‌های تماس مختلف تفاوت چندانی ندارند. اما در تعیین پاسخ سرعت، نتایج المان‌های تماس بدون میرایی و در تعیین نیروی ضربه، نتایج المان‌های تماس با میرایی دارای دقت بیشتری می‌باشند. در نهایت، این المان‌ها در مدل‌سازی ضربه بین سازه‌های ۵ طبقه تحت ۶ رکورد در دو حالت راست به چپ و چپ به راست و در فواصل مختلف بین ساختمان‌ها استفاده گردیدند. از آنجا که در مدل‌سازی، المان هرتز-میراگر کمترین عدم قطعیت را دارد، لذا نتایج دیگر المان‌ها با نتایج این المان بررسی شدند. نتایج نشان داد که دقت المان‌های غیرخطی به مراتب از المان‌های خطی بیشتر است و این در نیروی ضربه مشهودتر می‌باشد.</p>

۱- مقدمه

شد. در این روش، معادلات تعادل یا توجه به تابع پتانسیل بدون شرایط نفوذ هندسی ایجاد می‌شود که منجر به یک مسئله بهینه‌سازی نامتعیین از تابعی لاگرانژین خواهد شد [۲]. به این علت که روش‌های فوق نمی‌توانند در قالب روش‌های اجزای محدود قرار بگیرند، گسترش کمتری یافتند. از روش‌های گسترش یافته دیگر در مدل‌سازی ضربه، می‌توان به روش المان‌های تماس اشاره کرد. از انواع المان‌های تماس می‌توان المان‌های الاستیک و

از جمله روش‌های مدل‌سازی ضربه می‌توان به روش‌های استریومکانیک، ضرایب لاگرانژ و المان‌های تماس اشاره کرد. روش استریومکانیک بر پایه اصل مومنتم بوده و به ضریب ارتجاع و سرعت قبل از برخورد بستگی دارد [۱]. روش ضرایب لاگرانژ براساس فرمول‌نویسی تغییراتی ایجاد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sg.jalali@stu.nit.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

و گلداسمیت نشان داد که در ضربه دینامیکی بین دو جسم، پاسخ این المان تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [۱]. دیویس [۱۱] با استفاده از مدل بیان شده به بررسی ضربه یک سازه یک درجه آزادی با یک تکیه‌گاه صلب پرداخت و طیف سرعت سازه برخورد کننده را ایجاد کرد. چائو و همکاران [۱۲] برخورد دو سازه یک درجه آزادی را در آزمایشگاه بررسی کرده و سپس توسط المان الاستیک غیرخطی به مدل‌سازی عددی ضربه بین دو سازه پرداختند و بیان نمودند که پیش‌بینی‌های عددی توسط این المان می‌تواند با نتایج آزمایشگاهی قابل قیاس باشد. لنکرانی و نیک روش مدلی را ارائه کردند که در آن المان الاستیک غیرخطی با یک میراگر غیرخطی همراه شده است. موتوکومار و دسروش [۱۳] پاسخ ضربه دو سازه یک درجه آزادی الاستیک را برای ۲۷ زلزله با PGA های متفاوت و با در نظر گرفتن المان‌های تماس مختلف بررسی کردند. از بررسی‌های آن‌ها این نتیجه حاصل شد که در PGA های کم، پاسخ المان‌های مختلف تفاوتی ندارند. اما در PGA های بیشتر، پاسخ المان بدون میرایی از المان‌های با میرایی بیشتر است و پاسخ المان هرتز-میراگر از المان ویسکوالاستیک خطی بیشتر است. لذا برای PGA های متوسط و زیاد، استفاده از المان هرتز-میراگر توصیه شد. همچنین تأثیر ضربه در نسبت‌های پرپود بیشتر از ۰/۷ ناچیز است. یانکووسکی [۱۴] المان ویسکوالاستیک غیرخطی را معرفی کرد. این المان در تطابق با نتایج آزمایشگاهی پاسخ‌های بسیار مناسبی در مقایسه با المان‌های بدون میرایی داده است. یانکووسکی [۱۵] با استفاده از این المان طیف‌های نیروی ضربه را برای جرم، زمان تناوب، میرایی و شکل‌پذیری‌های متفاوت تحت زلزله‌های مختلف به دست آورد. یانکووسکی [۱۶] از المان ویسکوالاستیک غیرخطی در مدل‌سازی ضربه دو سازه ۳ طبقه استفاده نمود. بررسی‌های او نشان داد که نیروی ضربه باید حتماً در طراحی سازه سبکتر لحاظ گردد. محمود و همکاران [۱۷] به مقایسه المان‌های ویسکوالاستیک غیرخطی و

ویسکوالاستیک خطی، الاستیک و ویسکوالاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر را نام برد.

استویکوویچ [۳] المان الاستیک خطی را در تحلیل دینامیکی و طراحی اجزای نیروگاه‌های اتمی استفاده کرد. میسون و کاسائی [۴] با استفاده از این المان به بررسی برخورد دو سازه ۸ و ۱۵ طبقه پرداختند. با بررسی دینامیکی خطی سازه‌ها مشخص شد که اگر نیروی ضربه در طراحی‌ها وارد نگردد، طراحی سازه‌ها غیر محافظه کارانه خواهد بود. کارایانیس و فاواتا [۵] نیز با استفاده از المان تماس الاستیک خطی، ضربه ساختمان‌های مجاور با ارتفاع‌های نامساوی را بررسی کردند. آن‌ها با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بیان کردند که طبقات بالاتر از محل برخورد دو سازه دارای نیاز شکل‌پذیری بالاتری خواهند بود که علت آن می‌تواند اثر شلاقی شدن طبقات بالاتر باشد.

شاتوف [۶] از المان ویسکوالاستیک خطی در تحلیل دینامیکی غیرخطی اجزا با دمای زیاد در هسته راکتورهای گاز سرد استفاده کرد. آناگنوستوپولوس [۷] با استفاده از این المان به بررسی ضربه چندین ساختمان مجاور پرداخت. نتایج تحقیق او نشان داد که ساختمان‌های خارجی نسبت به ساختمان‌های داخلی دارای پاسخ‌های بزرگتری می‌باشند. ژو و همکاران [۸] به بررسی اثر ضربه در پل‌ها پرداختند و از المان ویسکوالاستیک خطی در مدل کردن ضربه در حالت دو بعدی استفاده کردند و تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آوردند. آناگنوستوپولوس [۹] به بیان تفصیلی رابطه میرایی المان ویسکوالاستیک خطی پرداخت. آناگنوستوپولوس و کارامانیس [۱۰] با استفاده از دیوار برشی به کم کردن فاصله مورد نیاز بین دو ساختمان پرداختند. آن‌ها در مدل سازی ضربه از المان ویسکوالاستیک خطی استفاده کردند و این نتیجه حاصل شد که با استفاده از دیوار برشی در داخل سازه‌ها می‌توان فاصله بین دو ساختمان را به شدت کم و یا حذف نمود. هرتز رابطه المان تماس الاستیک غیر خطی را بیان نمود.

بسته شدن المان به کار می‌افتد و k_I سختی المان تماس است. محققین سختی المان را ۲۰ برابر سختی طبقه یا سختی درون صفحه سازه‌های برخورد کننده در نظر می‌گیرند [۷].

۲-۲- المان ویسکوالاستیک خطی

این المان به صورت یک المان الاستیک خطی می‌باشد که به همراه یک میراگر موازی معرفی شده است. در این المان ضریب میرایی (C_k) متناسب با ضریب جبران (e) می‌باشد که از محاسبه اتلاف انرژی در هنگام ضربه به دست می‌آید.

$$F_I = 0 \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p \leq 0 \quad (2)$$

$$F_I = k_I(u_1 - u_2 - g_p) + c_k(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p > 0$$

$$C_k = 2\xi \sqrt{k_i \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (3)$$

$$\xi = - \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (4)$$

در این روابط $m_1, m_2, \dot{u}_1, \dot{u}_2$ به ترتیب جرم‌ها و سرعت‌های سازه اول و دوم و e ضریب ارتجاع است [۷]. گلداسمیت [۱] براساس نتایج آزمایش‌های ضربات دینامیکی، ضریب ارتجاع بتن را ۰/۶۵ بیان کرد.

۲-۳- المان الاستیک غیرخطی

این المان بعد از به کار افتادن به صورت یک فنر غیرخطی عمل می‌کند. روابط حاکم بر آن به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$F_I = 0 \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p \leq 0 \quad (5)$$

$$F_I = k_h(u_1 - u_2 - g_p)^{3/2} \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p > 0$$

در این رابطه k_h سختی المان تماس الاستیک غیرخطی است:

$$k_h = \frac{4}{3\pi(h_1 + h_2)} \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (6)$$

$$R_i = \sqrt[3]{\frac{3m_i}{4\pi\rho}} \quad (7)$$

$$h_i = \frac{1 - \gamma_i}{\pi E_i} \quad (8)$$

هرتز- میراگر پرداختند. از مقایسه مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی این نتیجه حاصل شد که المان هرتز- میراگر خطای کمتری در سرعت و المان ویسکوالاستیک غیرخطی خطای کمتری در شتاب و تغییر مکان دارند.

در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است، مقایسه بین تمام المان‌های تماس انجام نشده و خصوصاً همه تحقیقات گذشته روی ضربه سازه‌های یک درجه آزادی بوده است.

جهت ارزیابی المان‌های تماس در مدل کردن ضربه بین دو ساختمان از قابلیت برنامه Opensees استفاده شده است. به جهت اینکه این برنامه و اکثر نرم‌افزارهای موجود، به جز المان‌های تماس خطی قادر به مدل کردن المان‌های مختلف تماس نمی‌باشند، لذا در این تحقیق ابتدا المان‌های مختلف تماس بیان شده، توسط Visual C++ مدل شد و به قابلیت‌های مدل‌سازی نرم‌افزار Opensees اضافه گردید. سپس در ادامه، به بررسی ضربه بین دو سازه ۵ طبقه با ۳ و ۵ دهانه در فواصل مختلف پرداخته می‌شود. تحلیل‌ها به صورت دینامیکی غیرخطی است. این تحلیل‌ها تحت شش شتاب‌نگاشت انجام گردیدند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل تغییر مکان، دریفت، برش پایه، برش طبقه پنجم و نیروی ضربه می‌باشد.

۲- مشخصات المان‌های تماس

۲-۱- المان الاستیک خطی

این المان بعد از حذف فاصله به صورت یک فنر خطی شروع به کار می‌کند. رابطه حاکم بر المان به صورت زیر می‌باشد:

$$F_I = 0 \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p \leq 0 \quad (1)$$

$$F_I = k_I(u_1 - u_2 - g_p) \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p > 0$$

در روابط بالا، u_1 و u_2 به ترتیب تغییر مکان دو نقطه انتهایی المان می‌باشد، g_p فاصله‌ای است که در صورت

در رابطه بالا v سرعت نسبی بین دو جسم برخورد کننده می‌باشد.

بجز المان تماس خطی بقیه المان‌ها در اکثر نرم‌افزارهای حاضر مستقیماً قابل مدل‌سازی نمی‌باشند.

در این تحقیق، المان‌های فوق با استفاده از Visual C++ ساخته شد و به نرم‌افزار Opensees اضافه گردید. همچنین در مدل ضربه بین ساختمان‌های فولادی چند درجه آزادی، در المان‌هایی که میرایی لحاظ می‌گردد، ضریب ارتجاع از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود و در بررسی ضربات بین دو سازه اتلاف انرژی فولاد به فولاد لحاظ می‌شود.

۳- اعتبارسنجی المان‌های مدل شده

به منظور صحت برنامه نوشته شده در این تحقیق که به قابلیت Opensees اضافه گردید، از نتایج عددی و آزمایشگاهی محققین استفاده می‌شود.

به منظور اعتبارسنجی برنامه‌نویسی المان ویسکوالاستیک غیرخطی از نتایج مربوط به طیف‌های نیروی ضربه این المان استفاده می‌شود. یانکووسکی با در نظر گرفتن ضربه دو سازه یک درجه آزادی مجاور الاستیک تحت مؤلفه NS زلزله ElCentro (۱۸ May ۱۹۴۰) اقدام به ساختن این طیف‌ها نمود. در شکل ۱ نمونه‌ای از این طیف‌ها دیده می‌شود. در این طیف، جرم و میرایی سازه‌ها به ترتیب $1 \times 10^6 \text{ kg}$ ، 0.05 و فاصله دو سازه صفر می‌باشد. سختی المان تماس $2.75 \times 10^9 \text{ N/m}^{1.5}$ و ضریب ارتجاع 0.65 می‌باشد [۱۵].

مدل المان ویسکوالاستیک غیرخطی نوشته شده در این تحقیق با ۳ نقطه در طیف بررسی می‌گردد. جرم و میرایی دو سازه، سختی و ضریب ارتجاع بیان شده در نرم‌افزار Opensees مدل گردید. برای پیوندهای مختلف مقدار سختی از روابط دینامیک سازه‌ها به دست می‌آید.

در این روابط، R_i شعاع معادل جسم برخورد کننده، E_i مدول الاستیسیته، γ_i ضریب پواسون و ρ چگالی می‌باشد [۱].

۲-۴ المان هرتز- میراگر

در این المان، اثر میرایی در کنار المان تماس غیرخطی معرفی شده است. روابط حاکم بر این المان به صورت زیر می‌باشد [۱۳]:

$$F_I = 0 \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p \leq 0$$

$$F_I = k_h \delta^{3/2} \left[1 + \frac{3(1-e^2)}{4(v_1 - v_2)} \delta(t) \right] \quad \text{if } \delta(t) = u_1 - u_2 - g_p > 0 \quad (9)$$

در روابط بالا v_1 و v_2 سرعت دو نقطه انتهایی المان قبل از برخورد هستند.

۲-۵ المان ویسکوالاستیک غیرخطی

این المان علاوه بر دارا بودن رفتار وابسته به تغییر مکان، وابسته به سرعت بوده و حذف نیروی وابسته به سرعت را در سرعت‌های منفی لحاظ می‌کند. روابط حاکم بر المان ویسکوالاستیک غیر خطی به صورت زیر است [۱۴]:

$$F(t) = \bar{\beta} \delta^{3/2}(t) + \bar{c}(t) \dot{\delta}(t) \quad \text{if } \delta(t) > 0, \dot{\delta} > 0$$

$$F(t) = \bar{\beta} \delta^{3/2}(t) \quad \text{if } \delta(t) > 0, \dot{\delta} \leq 0$$

$$F(t) = 0; \quad \text{if } \delta(t) \leq 0 \quad (10)$$

$$\bar{c}(t) = 2\bar{\xi} \sqrt{\bar{\beta} \delta(t)} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (11)$$

$$\bar{\xi} = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1-e^2}{e(e(9\pi-16)+16)} \quad (12)$$

$$\delta = u_1 - u_2 - g_p \quad (13)$$

$$\dot{\delta} = \dot{u}_1 - \dot{u}_2 \quad (14)$$

در این روابط، $\bar{\xi}$ ، \bar{c} و $\bar{\beta}$ به ترتیب نسبت میرایی، میرایی و سختی المان می‌باشند.

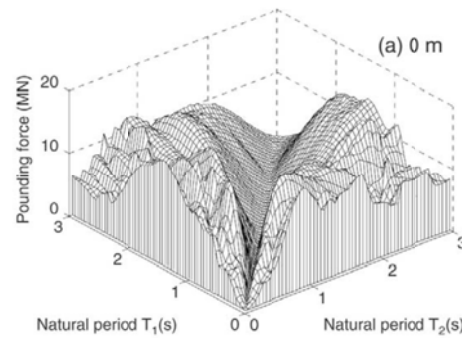
یانکووسکی [۱۸] با انجام یک سری آزمایش، ضریب ارتجاع را برای سرعت‌ها و مصالح مختلف تعیین کرد که می‌توان از آن‌ها در مدل‌سازی‌ها استفاده نمود. آزمایش‌های او به صورت سقوط یک توپ روی یک صفحه بوده است. او رابطه ضریب ارتجاع فولاد را به صورت زیر بیان کرد:

$$e = -0.0039v^3 + 0.0440v^2 - 0.1867v + 0.7299 \quad (15)$$

۲۵۰۰۰kip/in و سختی المان‌های غیرخطی $25000 \text{ kip/in}^{3/2}$ است. ضریب ارتجاع $0/6$ و میراگر معادل المان ویسکوالاستیک خطی 68 kip-s/in می‌باشد. سازه‌ها تحت مؤلفه NS زلزله ElCentro (May ۱۹۴۰) (۱۸ تحلیل می‌شوند. نتایج نیروی ضربه بر اساس تحلیل‌های موتوکومار و دسروشس برای مدل‌سازی فوق توسط نرم‌افزار Matlab در جدول ۲ آورده شده است. همچنین آن‌ها پاسخ ماکزیمم سازه‌ها را بدون ضربه به ترتیب $0/58$ و $2/04 \text{ in}$ به دست آوردند و پاسخ ماکزیمم سازه‌ها در هنگام ضربه را برای مدل هرتز-میراگر به ترتیب $0/71$ و $1/65 \text{ in}$ محاسبه نمودند [۱۹]. در این تحقیق، دو سازه با مشخصات فوق و المان‌های تماس مختلف در نرم‌افزار Opensees مدل شدند و تحت شتاب نگاشت بیان شده تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند. نتایج نیروی ضربه به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین با توجه به نتایج تحلیل‌های این تحقیق، پاسخ ماکزیمم سازه‌ها، بدون ضربه به ترتیب $0/57$ و $2/04 \text{ in}$ به دست آمد و پاسخ ماکزیمم سازه‌ها در هنگام ضربه برای مدل هرتز-میراگر به ترتیب $0/71$ و $1/69 \text{ in}$ محاسبه شد که خطای آن با نتایج موتوکومار و دسروشس کمتر از $2/4\%$ است. با توجه به نتایج جدول مشخص است که خطای مدل‌سازی‌های عددی نیروی ضربه در این تحقیق کمتر از $5/7\%$ در مقایسه با نتایج موتوکومار و دسروشس است.

جدول ۲- پاسخ‌های به دست آمده برای مدل تماس‌های مختلف در این تحقیق در مقایسه با پاسخ‌های عددی [۱۹]

المان‌ها	نتایج عددی	نتایج عددی [۱۹]	خطا (%)
المان الاستیک خطی	۴۰۷۰	۳۸۵۰	۵/۷
المان ویسکو-الاستیک خطی	۳۵۴۲	۳۶۰۰	-۱/۶
المان الاستیک غیرخطی	۳۲۸۳	۳۴۵۰	-۴/۸
المان هرتز-میراگر	۲۶۲۷	۲۷۰۰	-۲/۷



شکل ۱- طیف نیروی ضربه برای فاصله صفر، میرایی $0/05$ و جرم $1 \times 10^6 \text{ kg}$ [۱۵]

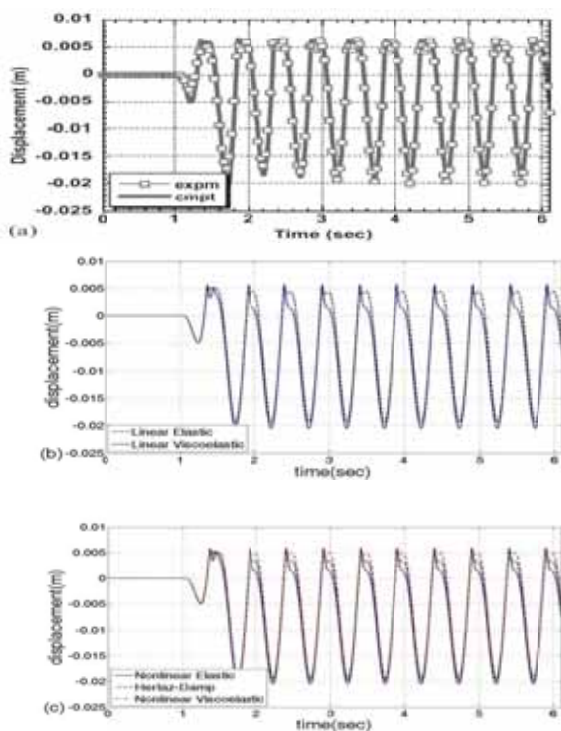
مشخصات ۳ نقطه و پاسخ نیروی ضربه با توجه به مدل‌سازی در Opensees تحت شتاب‌نگاشت بیان شده به همراه پاسخ‌های خوانده شده از طیف نیروی ضربه شکل ۱ در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به اعداد جدول مشخص می‌شود که نتایج برنامه‌نویسی المان ویسکوالاستیک غیرخطی قابل مقایسه با مقادیر طیف می‌باشد.

جدول ۱- پاسخ‌های به دست آمده برای مدل تماس ویسکوالاستیک غیر خطی در این تحقیق در مقایسه با پاسخ‌های طیف ساخته شده توسط یانکوسکی [۱۵]

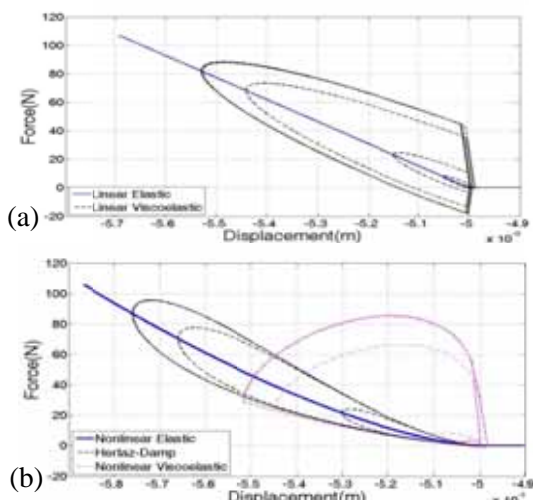
Case(3)	Case(2)	Case(1)	
۰/۰	۰/۹	۰/۰	پریود سازه اول (s)
∞	$48/75 \times 10^6$	∞	سختی سازه اول (N/m)
۳/۰	۳/۰	۱/۸	پریود سازه دوم (s)
$4/39 \times 10^6$	$4/39 \times 10^6$	$9/87 \times 10^6$	سختی سازه دوم (N/m)
۸/۰۱	۱۱/۵۷	۱۰/۹۷	نیروی ضربه (MN)
۸/۱	۱۱/۶	۱۰/۹	نیروی ضربه (MN) [15]Jankowski

به منظور صحت برنامه‌نویسی المان الاستیک و ویسکوالاستیک خطی، الاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر، نتایج مدل‌سازی این تحقیق با نتایج عددی مدل‌سازی موتوکومار و دسروشس مقایسه می‌شود. آن‌ها برخورد دو سازه ۱ درجه آزادی الاستیک را بررسی کردند. جرم سازه‌ها $3/6 \text{ kip-s}^2/\text{in}$ ، زمان تناوب اصلی $0/25$ و $0/5$ ثانیه و میرایی 5% می‌باشند. سختی المان‌های خطی

است. خطای المان‌های الاستیک و ویسکوالاستیک غیرخطی، هرترز- میراگر، الاستیک و ویسکوالاستیک خطی به ترتیب ۲/۴، ۳/۳۵، ۱/۱، ۲/۳ و ۲/۹- درصد می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود، بیشترین و کمترین خطا به ترتیب مربوط به المان ویسکوالاستیک غیرخطی و هرترز- میراگر می‌باشد.



شکل ۲- (a) پاسخ آزمایشگاهی تغییرمکان [۸]، (b) پاسخ مدل‌سازی عددی المان‌های خطی و (c) پاسخ مدل‌سازی عددی المان‌های غیرخطی



شکل ۳- (a) منحنی نیرو- تغییر شکل المان‌های خطی و (b) منحنی نیرو- تغییر شکل المان‌های غیر خطی

بعد از اضافه کردن برنامه المان‌های نوشته شده به قابلیت Opensees و صحت‌سنجی آن با تحقیقات عددی دیگران، به بررسی پاسخ‌های مدل‌سازی المان‌ها و مقایسه آن‌ها با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. به منظور اولین بررسی، نتایج تحقیق آزمایشگاهی ژو و همکاران [۸] بررسی می‌گردد.

آنها برخورد یک سازه یک درجه آزادی را به یک تکیه‌گاه صلب بررسی کردند. در این آزمایش، قاب از جنس فولاد با وزن ۲ کیلوگرم و سختی $210/125 \text{ N/m}$ می‌باشد. میرایی قاب توسط میراگری با میرایی $4/1 \text{ kg/s}$ معادل گردید. فاصله قاب تا تکیه‌گاه ۵ میلی‌متر می‌باشد و تحت یک تحریک سینوسی با فرکانس 2 Hz و دامنه $4/25 \text{ m/s}^2$ قرار گرفت. ژو و همکاران پاسخ آزمایشگاهی را به صورت عددی مدل‌سازی کردند. طی آزمایش انجام شده ضریب ارتجاع $0/4$ بیان گردید. آن‌ها در مدل‌سازی ضربه از المان تماس ویسکوالاستیک خطی با سختی $1/548 \times 10^6 \text{ N/m}$ و میراگر $220/287 \text{ N/m}$ استفاده کردند. فنر و میراگر انتخاب شده در تحقیق آن‌ها براساس بهترین تطابق بین پاسخ عددی و آزمایشگاهی انتخاب گردید. پاسخ عددی در تطابق با نتیجه آزمایشگاهی در شکل ۲ دیده می‌شود. پاسخ ماکزیمم قاب 20 mm می‌باشد.

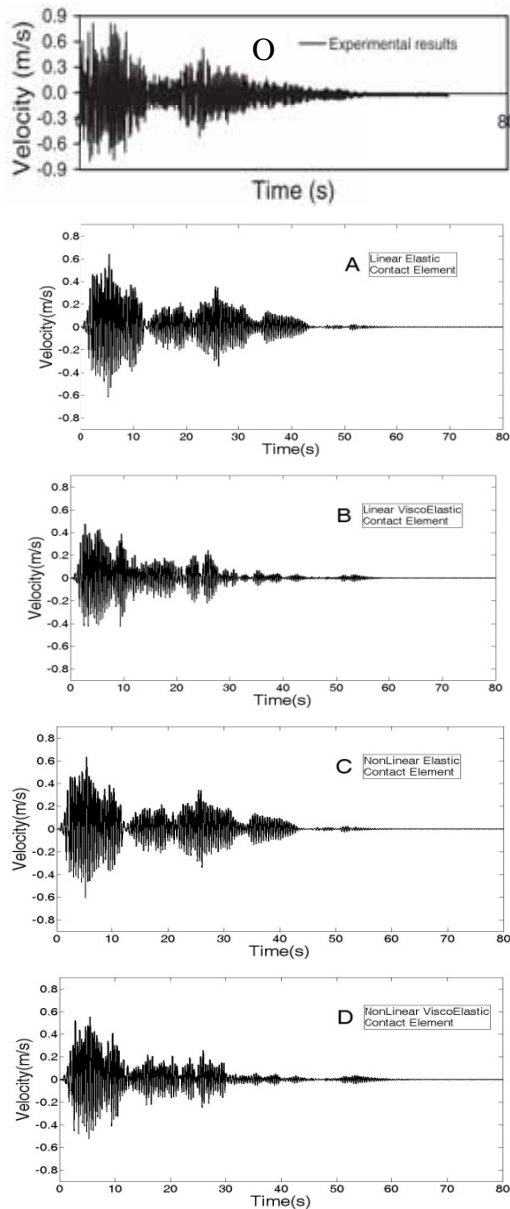
یانکووسکی [۱۴] برای تطابق بهترین جواب عددی و آزمایشگاهی مقدار سختی المان ویسکوالاستیک غیرخطی را $2/47 \times 10^6$ و سختی المان الاستیک غیرخطی را $4/15 \times 10^6 \text{ N/m}^{1.5}$ بیان کرد.

مدل‌سازی قاب و برخورد آن تحت تحریک سینوسی و با در نظر گرفتن المان‌های تماس مختلف مطابق مشخصات بالا در نرم‌افزار Opensees انجام گرفت. پاسخ برخورد قاب با المان‌های تماس مختلف در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز منحنی نیرو-تغییر شکل المان‌های مختلف ارائه شده است.

همانطور که از شکل‌های (۲b) و (۲c) مشخص است، پاسخ حداکثر تغییرمکان با توجه به مدل‌سازی ضربه برای همه المان‌ها به پاسخ آزمایشگاهی شکل (۲a) نزدیک‌تر

تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند و المان‌های مختلف تماس بررسی شدند.

در شکل ۴ پاسخ آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود. با توجه به این شکل، خطای به دست آمده برای سرعت حداکثر برای المان الاستیک خطی $۰.۲۱/۶\%$ ، ویسکوالاستیک خطی $۰.۴۱/۵\%$ ، الاستیک غیرخطی $۰.۲۲/۷\%$ ، ویسکوالاستیک غیرخطی $۰.۳۲/۵\%$ و المان هرتز-میراگر $۰.۳۶/۹\%$ می‌باشد. حداکثر نیروی ضربه برای المان‌های ذکر شده به ترتیب $۲۱۶/۸$ ، $۱۳۱/۹$ ، $۱۶۷/۱$ ، $۱۱۱/۷$ و $۸۵/۴$ kN به دست آمد.



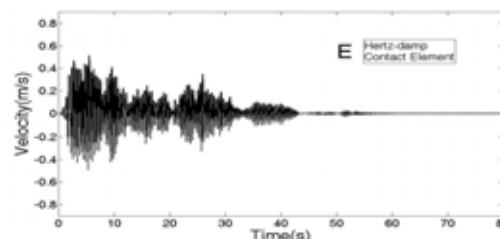
از شکل‌های ۳a و ۳b مشخص است که المان‌ها در زمانی که تغییرشکل المان منفی است، وارد عمل شده و در تغییرشکل مثبت عمل نمی‌کنند. این نشان دهنده صحت عملکرد المان‌ها در نیروهای فشاری می‌باشد. همچنین المان‌های الاستیک پاسخ‌های بزرگتری نسبت به المان‌های غیرالاستیک دارند. سطح منحنی پسماند المان‌های ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی از هرتز-میراگر بیشتر بوده و در پاسخ ماکزیمم نیروی تماس تأثیر داشته و نیروی ضربه کمتری را نتیجه می‌دهد.

به منظور اعتبارسنجی دوم به تطابق کار آزمایشگاهی چائو و همکاران [۱۲] پرداخته می‌شود. آن‌ها به بررسی ضربه دو سازه تحت مولفه N-S زلزله ELCentro (۱۹۴۰ May ۱۸) پرداختند. حداکثر شتاب زلزله مذکور $۰.۳۴۸g$ و کل زمان ثبت شده زلزله $۵۳/۷۳s$ می‌باشد. قاب سمت چپ دارای جرم $۲۰۴kg$ ، فرکانس $۲/۳۱Hz$ و میرایی $۱/۴\%$ می‌باشد. مشخصات بیان شده برای قاب سمت راست به ترتیب $۱۴۶/۵kg$ ، $۲/۹Hz$ و $۱/۶\%$ می‌باشد. تاریخچه پاسخ سرعت قاب چپ تحت آزمایش در شکل ۴ دیده می‌شود. همچنین در طی آزمایش حداکثر نیروی ضربه $۷۹kN$ به دست آمد. چائو و همکاران در تطابق عددی با نتایج آزمایشگاهی از مدل تماس الاستیک غیرخطی استفاده نمودند. آن‌ها با استفاده از روابط ۵ الی ۸، سختی المان تماس را $۲/۳۶ \times 10^{11} N/m^{1.5}$ بیان کردند [12]. یانکووسکی [۱۴] در تطابق المان ویسکوالاستیک خطی از سختی $۱/۴ \times 10^9 N/m^{1.5}$ و ضریب ارتجاع $۰/۶۵$ استفاده کرد و در مدل سازی المان ویسکوالاستیک غیرخطی سختی $۹/۹ \times 10^{11} N/m^{1.5}$ و ضریب ارتجاع $۰/۶۵$ را بیان نمود. در این تحقیق از سختی‌های بیان شده در مدل‌سازی المان‌ها در نرم‌افزار Opensees استفاده شد. همچنین در مدل‌سازی المان الاستیک خطی از سختی المان ویسکوالاستیک خطی $(۱/۴ \times 10^9 N/m^{1.5})$ و در مدل‌سازی المان هرتز-میراگر از سختی المان الاستیک غیرخطی $(۲/۳۶ \times 10^9 N/m^{1.5})$ و ضریب ارتجاع $۰/۶۵$ استفاده شد. سازه‌ها تحت شتاب نگاشت ELCentro

چپ به راست و راست به چپ تحلیل شدند. به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی از نرم‌افزار OpenSees به همراه Visual C++ استفاده گردید. کاربرد Visual C++ در اضافه کردن و خواندن المان‌های جدید می‌باشد. برای همگرایی نتایج، گام‌های تحلیل 0.0002 و 0.0005 انتخاب شدند. در مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان‌های تیر-ستون استفاده شد. مشخصات فولاد مصرفی: تنش تسلیم 240 Mpa ضریب پواسون 0.3 ، مدول الاستیسیته 200 Gpa و سخت‌شدگی کرنش 3% می‌باشد. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده مطابق خاک نوع ۲ انتخاب شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به اینکه در مدل‌سازی‌ها ضریب ارتجاع در سرعت‌های مختلف، متفاوت است، لذا در المان‌هایی که میرایی را لحاظ می‌کنند، از رابطه ۱۵ در محاسبه ضریب ارتجاع برای ضربه فولاد به فولاد استفاده می‌شود. به این منظور برنامه المان به صورتی نوشته شد که در هر گام تحلیل، سرعت دو انتهای المان که همان سرعت سازه‌های مجاور می‌باشد را دریافت کرده و از رابطه ۱۵ ضریب ارتجاع را محاسبه کند. در مدل‌سازی المان تماس الاستیک و ویسکوالاستیک خطی، سختی المان ۲۰ برابر سختی ساختمان سخت‌تر لحاظ شد. میراگر المان ویسکوالاستیک خطی نیز براساس روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌گردد. سختی المان تماس الاستیک غیرخطی نیز براساس روابط ۶ الی ۸ محاسبه می‌گردد. در جدول ۴ سختی المان‌های خطی و غیرخطی داده شده است. سختی المان‌های ویسکوالاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر برابر المان الاستیک غیرخطی لحاظ می‌گردد.

سازه‌ها برای برخورد در ۱۱ فاصله مختلف 0.1 الی 10 cm بررسی شدند. با توجه به گستردگی پاسخ‌ها، نتایج برای سازه ۳ دهانه بیان می‌شود. این نتایج شامل ماکزیمم برش و نیروی ضربه طبقه پنجم، برش پایه، تغییرمکان و دریفت ماکزیمم می‌باشد.



شکل ۴- O- پاسخ آزمایشگاهی [۱۲]، A- پاسخ المان الاستیک خطی، B- پاسخ المان ویسکوالاستیک خطی C- پاسخ المان الاستیک غیرخطی، D- پاسخ المان ویسکوالاستیک غیر خطی و E- پاسخ المان هرتز-میراگر

با توجه به نتایج به دست آمده، المان‌های الاستیک خطی و غیر خطی که در آن‌ها میرایی لحاظ نشده است، تطابق بهتری در پاسخ سرعت دارند. این امر به میرایی در المان‌های دیگر برمی‌گردد که مستقیماً روی سرعت تأثیر می‌گذارد. از طرفی، نیروی تماس در المان‌های دارای میرایی به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است. بیشترین دقت در نیروی ضربه مربوط به المان هرتز-میراگر می‌باشد. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی، المان‌های الاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر کمترین عدم قطعیت را دارند. در حالی که در المان‌های دیگر باید سختی فرض گردد و میرایی نیز وابسته به سختی فرض شده است.

۴- مدل‌های مورد بررسی

به منظور بررسی المان‌های مختلف تماس، ضربه دو سازه ۵ طبقه در حالت دو بعدی بررسی می‌گردد. سازه سمت چپ و راست به ترتیب ۳ و ۵ دهانه می‌باشند. دهانه قاب-ها ۵ و ارتفاع آن‌ها ۳ متر است. بار مرده و زنده روی سازه ۳ دهانه به ترتیب 3250 و 1000 kg/m است. بارهای روی سازه ۵ دهانه دو برابر سازه ۳ دهانه می‌باشد. جرم طبقات سازه ۳ دهانه 51750 و در سازه ۵ دهانه 172500 kg است. در طراحی سازه‌ها خاک محل از نوع ۲ انتخاب شد. سازه‌ها براساس آیین‌نامه زلزله و فولاد ایران طراحی شدند. سازه‌ها تحت ۶ شتاب‌نگاشت در دو حالت

کمترین عدم قطعیت را در مدل سازی داشته و نیز قادر به لحاظ کردن میرایی است.

پاسخ های سازه ۵ دهانه ارائه نشده است. چون سازه ۵ دهانه سخت تر و سنگین تر است و تغییرات پاسخ آن کمتر می باشد. حداکثر اختلاف پاسخ های مربوط به آن (حتی برای حداکثر شتاب طبقات)، با در نظر گرفتن المان های مختلف تماس، برای همه شتاب نگاشت ها در تمام فواصلی که ضربه روی می دهد، کمتر از ۹٪ در مقایسه با حالت بدون ضربه می باشد.

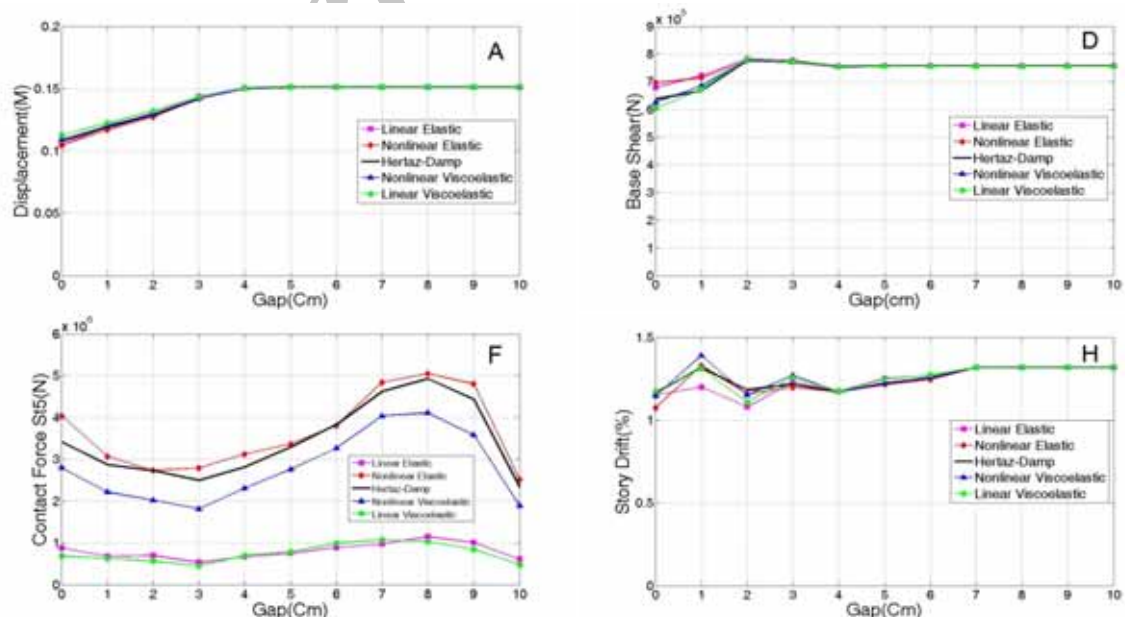
در شکل های ۵ الی ۱۶ پاسخ های برش پایه، تغییر مکان، دریافت و نیروی ضربه بین دو سازه در طبقه پنجم برای سازه ۳ دهانه تحت ۶ شتاب نگاشت آورده شده است. در جدول ۵ ماکزیمم اختلاف المان های مختلف در مقایسه با المان هرتز- میراگر برای پاسخ های تغییر مکان، برش پایه و برش طبقه پنجم در بین همه فواصل بین دو سازه ارائه شده است. علت اینکه اختلاف بقیه المان ها با المان هرتز- میراگر سنجیده می شود، این است که در بین المان ها،

جدول ۳- شتاب نگاشت های مورد استفاده

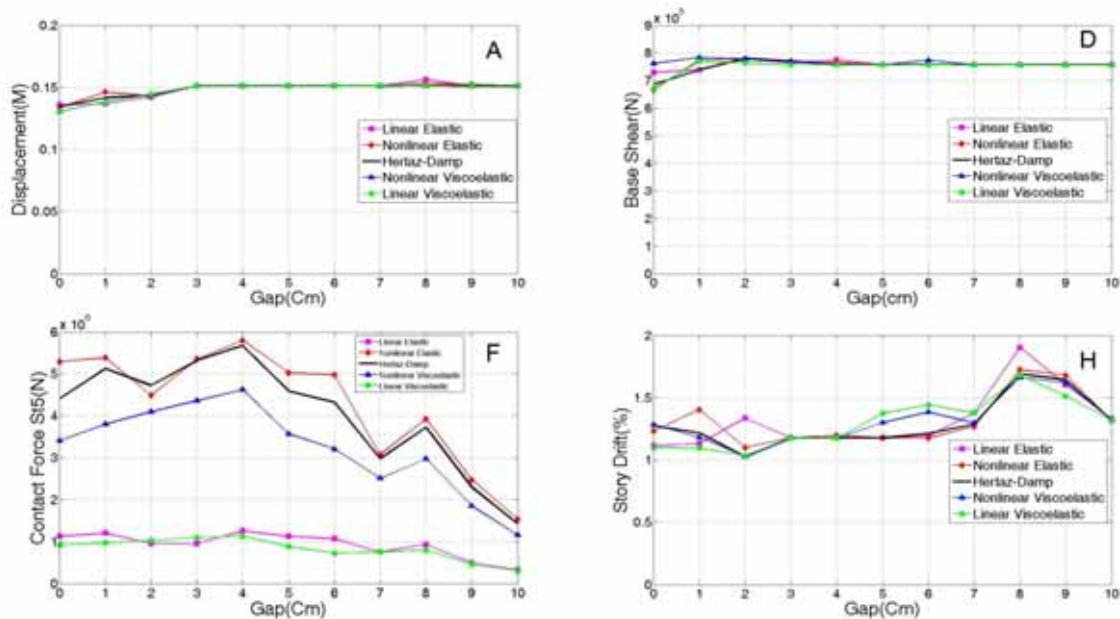
بزرگا	PGA	ایستگاه	زلزله
)۷/۱Ms(	۰/۳۶۷	Gilroy Array	Loma Prieta
)۵/۶MI(	۰/۳۶۸	Fire Station	Westmoreland
)۷/۱Ms(	۰/۵۹	Petrolia	Cape Mendocino
)۶/۷Ms (	۰/۵۹	Newhall	Northridge
)۶/۹Ms (	۰/۷۷۵	Bonds Corner	Imperial Valley
)۶/۷Ms (	۰/۸۲۸	Sylmar-Converter	Northridge

جدول ۴- سختی المان های الاستیک و غیرالاستیک خطی

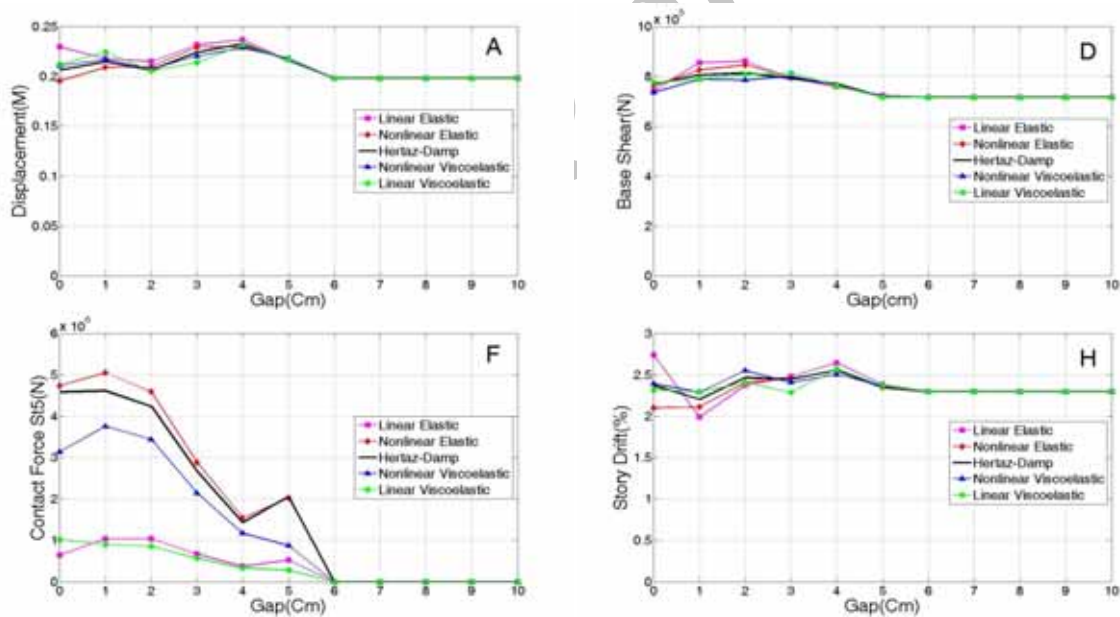
سختی المان تناس بین طبقات					
نوع المان تماس	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
الاستیک خطی	$۲/۷۶ \times 10^8$	$۴/۸ \times 10^8$	$۷/۹ \times 10^8$	$۱۵/۶ \times 10^8$	$۵۳/۱ \times 10^8$
الاستیک غیر خطی	۱۳۴×10^9	۱۳۴×10^9	۱۳۴×10^9	۱۳۴×10^9	۱۳۴×10^9



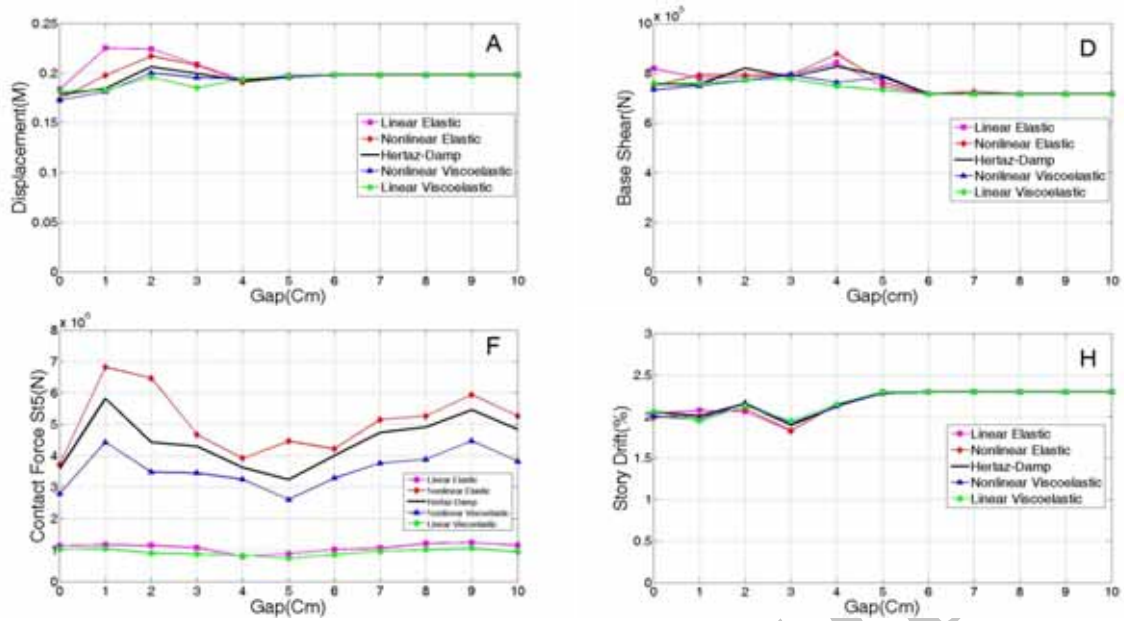
شکل ۵- پاسخ های مربوط به زلزله Loma Prieta- زلزله از چپ به راست (A- تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم)



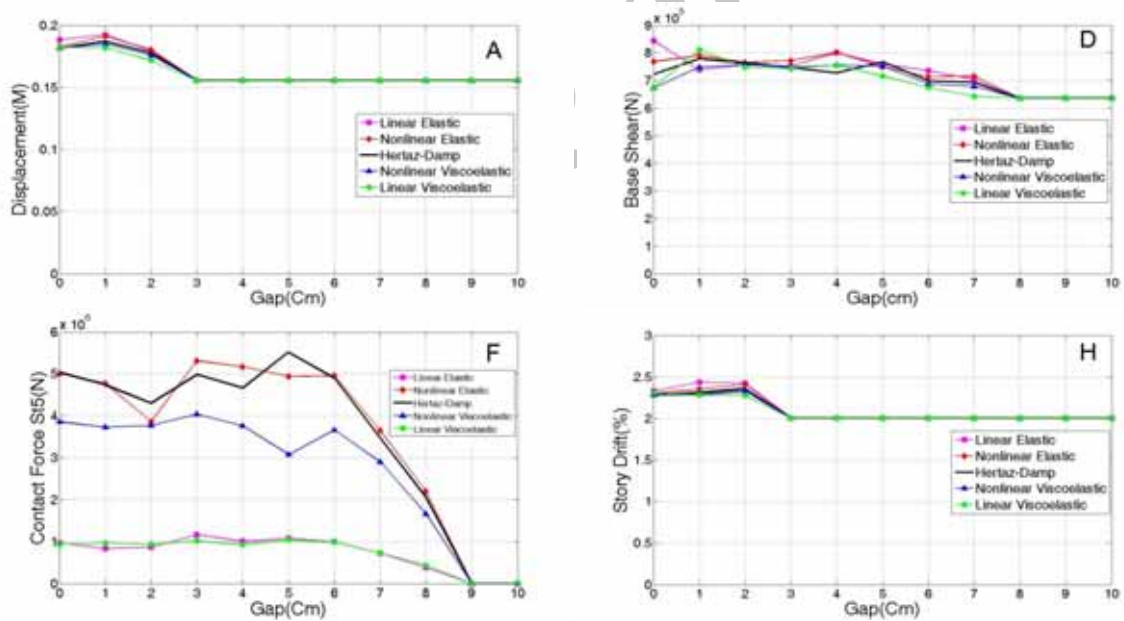
شکل ۶- پاسخ‌های مربوط به زلزله Loma Prieta - زلزله از چپ به راست (A) - تغییر مکان ماکزیمم D - برش پایه F - ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H - تغییر مکان ماکزیمم



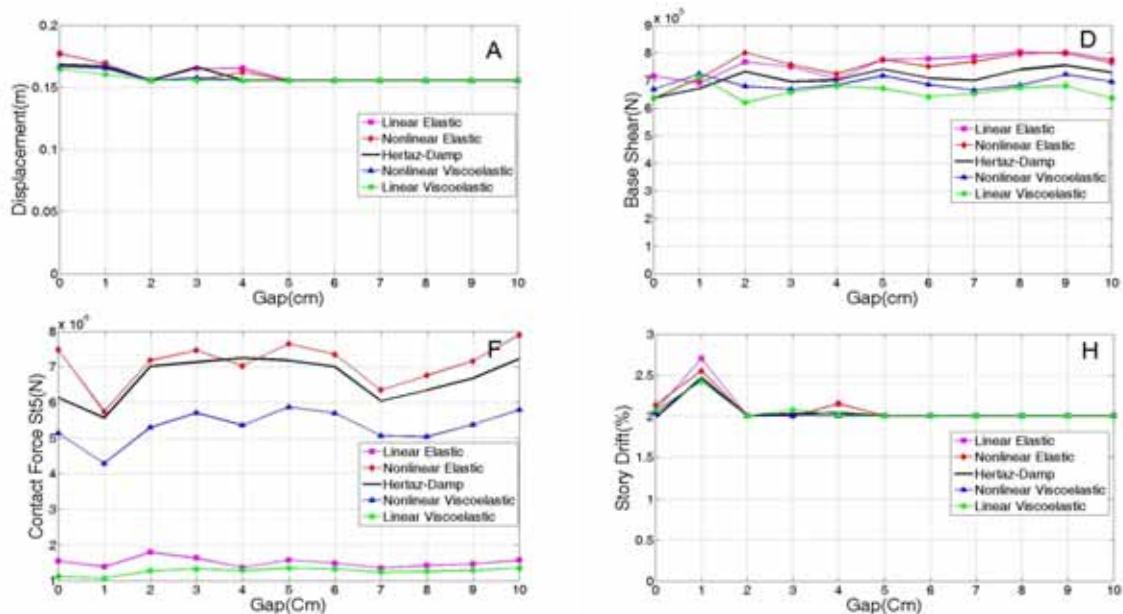
شکل ۷- پاسخ‌های مربوط به زلزله Westmoreland - زلزله از چپ به راست (A) - تغییر مکان ماکزیمم D - برش پایه F - ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H - تغییر مکان ماکزیمم



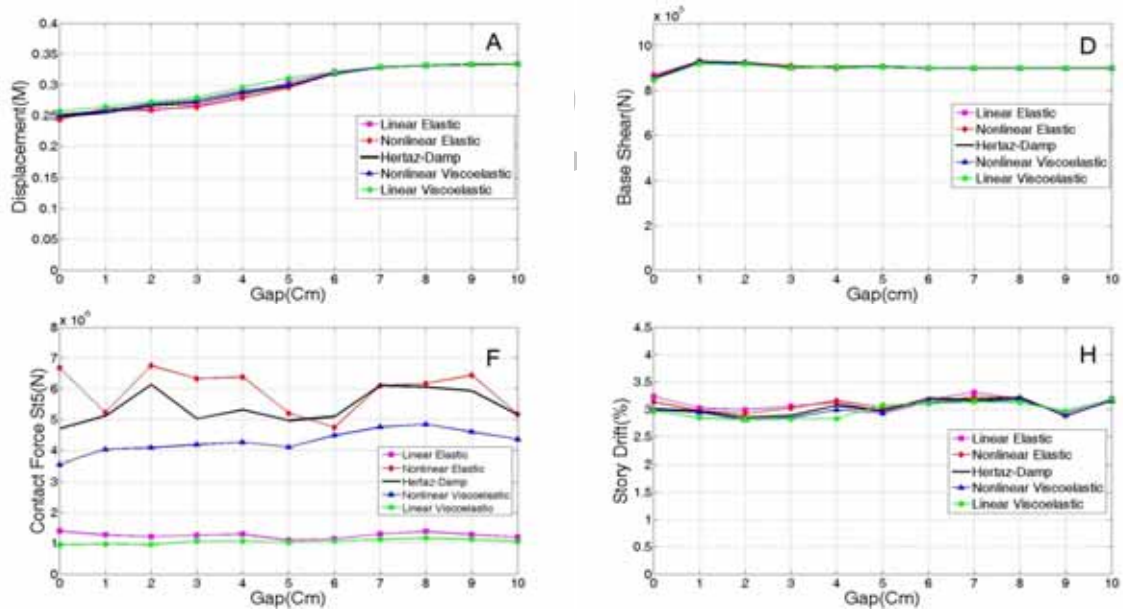
شکل ۸- پاسخ‌های مربوط زلزله Westmoreland - زلزله از چپ به راست (A- تغییرمکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییرمکان ماکزیمم)



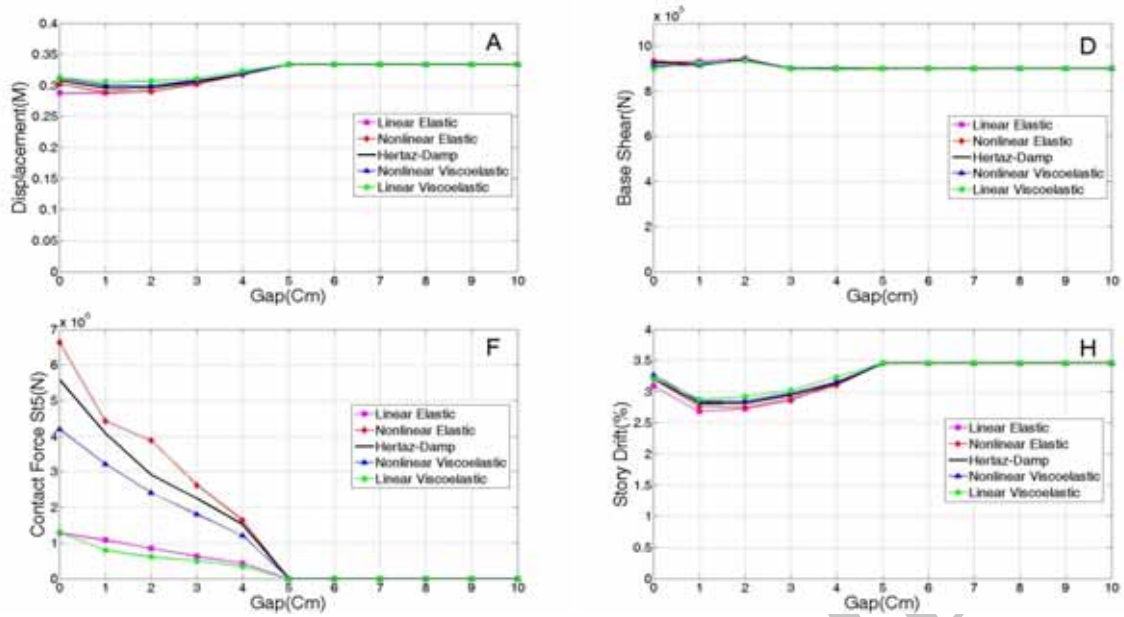
شکل ۹- پاسخ‌های مربوط زلزله Cape Mendocino - زلزله از چپ به راست (A- تغییرمکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییرمکان ماکزیمم)



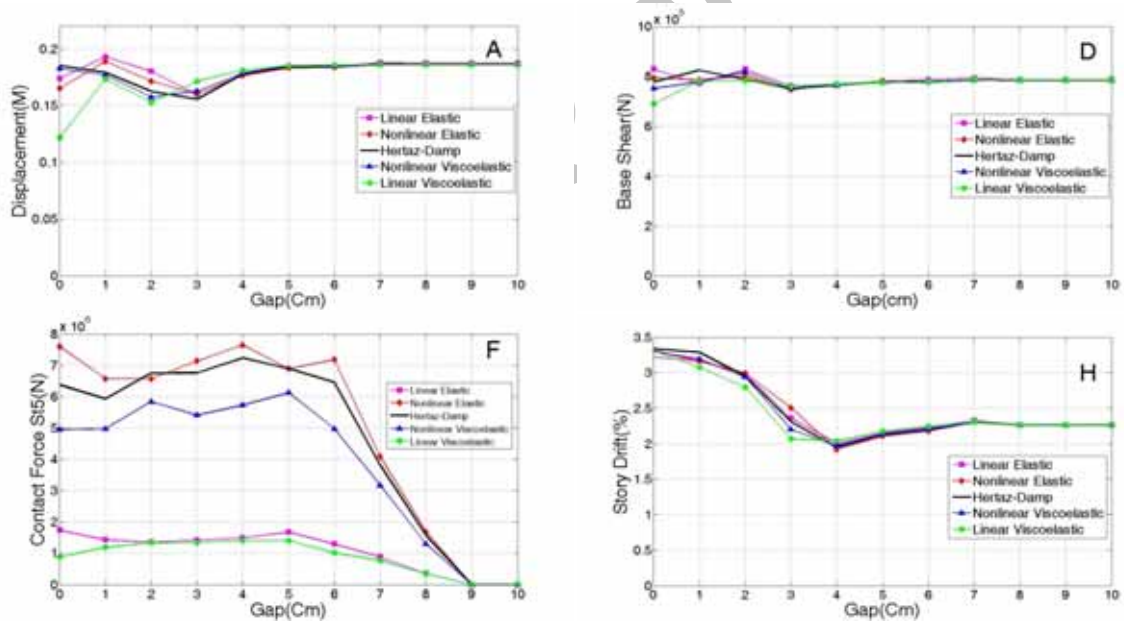
شکل ۱۰- پاسخ‌های مربوط زلزله Cape Mendocino- زلزله از راست به چپ (A-تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم)



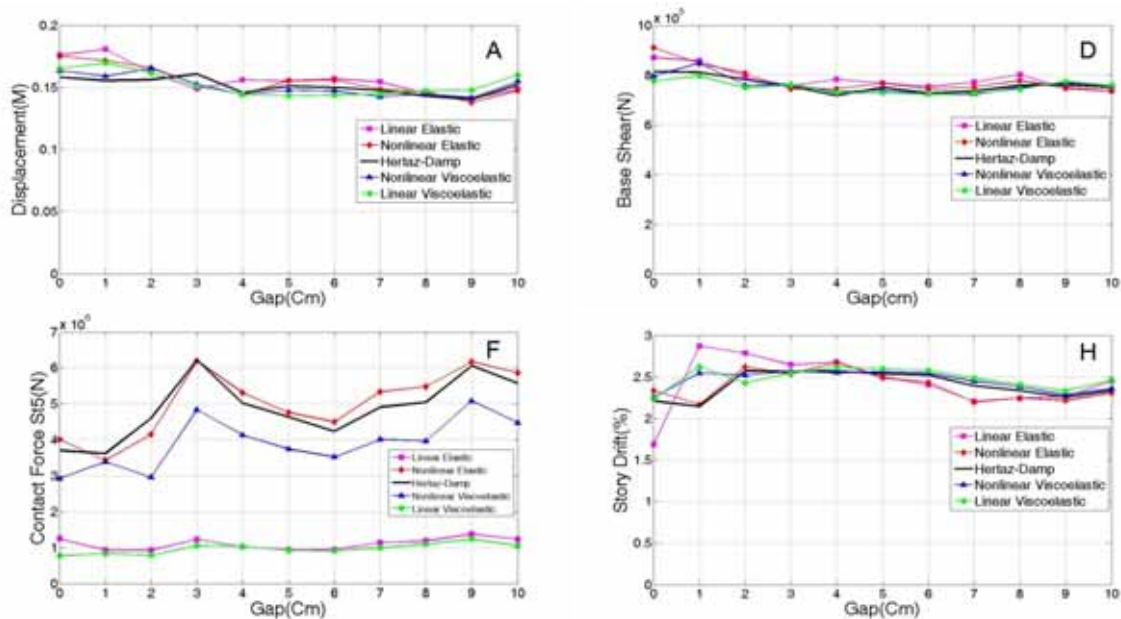
شکل ۱۱- پاسخ‌های مربوط زلزله Northridge(Newhall)- زلزله از چپ به راست (A-تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم)



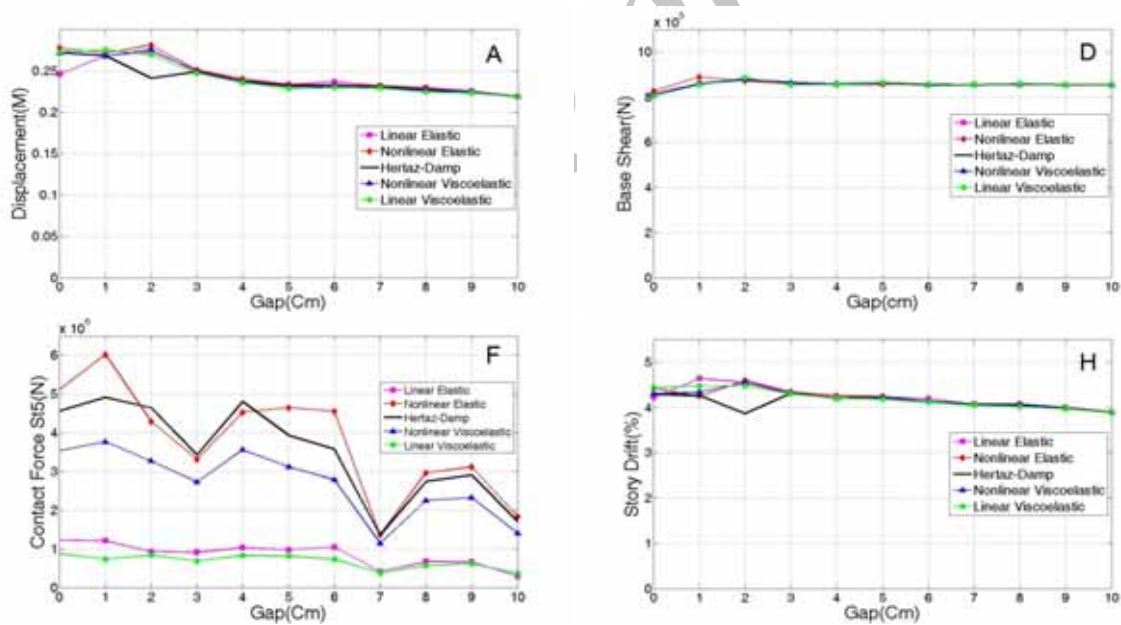
شکل ۱۲- پاسخ‌های مربوط زلزله Northridge (Newhall)- زلزله از چپ به راست (A)- تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم



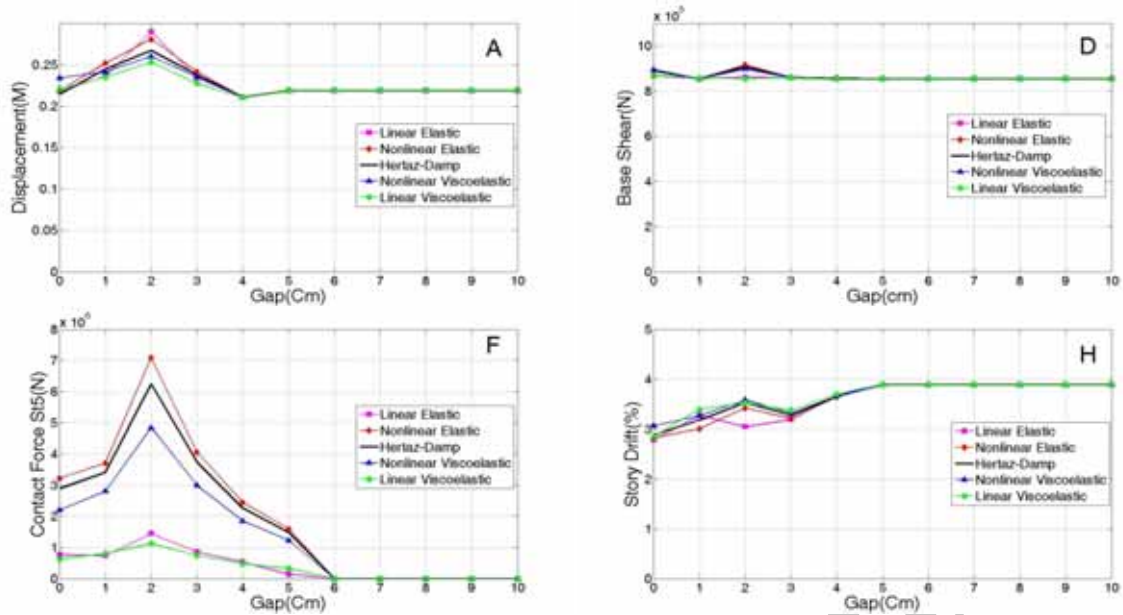
شکل ۱۳- پاسخ‌های مربوط زلزله Imperial Valley- زلزله از چپ به راست (A)- تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم



شکل ۱۴- پاسخ‌های مربوط زلزله Imperial Valley- زلزله از راست به چپ (A- تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم)



شکل ۱۵- پاسخ‌های مربوط به زلزله Northridge (Sylmar-Converter) - زلزله از چپ به راست (A- تغییر مکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییر مکان ماکزیمم)



شکل ۱۶- پاسخ‌های مربوط به زلزله Northridge(Sylmar-Converter) - زلزله از راست به چپ (A)-تغییرمکان ماکزیمم D- برش پایه F- ماکزیمم نیروی ضربه طبقات پنجم H- تغییرمکان ماکزیمم

جدول ۵- مقادیر اختلاف پاسخ‌های تغییرمکان، برش پایه و برش طبقه‌المان‌های مختلف با المان هرترز میراگر

اختلاف پاسخ المان‌ها با المان هرترز- میراگر				پاسخ سازه	زلزله
الاستیک خطی	الاستیک غیرخطی	ویسکوالاستیک غیرخطی	ویسکوالاستیک خطی		
-۲/۶۵	-۲/۸۴	۱/۵۰	۴/۳۴	تغییرمکان(st5)	Loma Prieta Left To Right
۸/۱۰	۹/۲۲	۲/۶۳	-۵/۲۰	برش پایه	
-۱/۷۳	۰/۴۶	-۰/۲۴	-۱/۳۴	برش طبقه(st5)	
-۳/۳۸	۳/۱۶	-۲/۷۳	-۲/۵۷	تغییرمکان(st5)	Loma Prieta Right To Left
۶/۴۵	۵/۱۲	۱۱/۱۴	۴/۳۷	برش پایه	
-۱/۹۱	-۰/۰۸	-۰/۰۳	-۰/۴۶	برش طبقه(st5)	
۱۱/۱۳	-۵/۳۸	۲/۰۵	-۴/۷۰	تغییرمکان(st5)	Westmoreland Left To Right
۶/۱۱	۳/۹۴	-۴/۳۰	۲/۸۳	برش پایه	
۱/۱۸	۰/۵۸	-۰/۴۲	-۰/۵۷	برش طبقه(st5)	
۲۱/۹۷	۷/۲۶	-۳/۲۰	-۷/۱۹	تغییرمکان(st5)	Westmoreland Right To Left
۸/۲۳	۶/۱۶	-۷/۷۱	-۹/۵۲	برش پایه	
-۱/۴۵	۱/۲۲	-۰/۵۰	-۰/۷۸	برش طبقه(st5)	
۳/۷۲	۲/۰۸	-۱/۱۶	-۳/۲۱	تغییرمکان(st5)	Cape Mendocino Left To Right
۱۶/۶۸	۱۰/۲۱	-۶/۷۹	-۷/۰۷	برش پایه	
۲/۳۰	-۰/۸۷	-۰/۷۳	-۱/۱۳	برش طبقه(st5)	
۶/۳۳	-۶/۳۴	-۵/۱۲	-۶/۳۴	تغییرمکان(st5)	Cape Mendocino Right To Left
۱۲/۴۹	۹/۵۸	۷/۸۳	-۱۵/۳۵	برش پایه	
-۱/۷۶	-۱/۷۶	-۱/۸۱	-۱/۷۲	برش طبقه(st5)	
-۲/۸۳	-۲/۷۸	۱/۴۱	۴/۱۱	تغییرمکان(st5)	Northridge (Newhall) Left To Right
۱/۵۹	۱/۰۱	-۰/۳۱	-۰/۹۱	برش پایه	
۲/۰۳	۱/۳۱	۰/۲۶	۰/۴۴	برش طبقه(st5)	

-۶/۶۲	-۲/۳۵	۱/۴۷	۳/۵۲	تغییر مکان (st5)	Northridge (Newhall) Right To Left
۱/۶۵	۰/۷۵	-۱/۵۷	-۲/۷۱	برش پایه	
۱/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۵۲	برش طبقه (st5)	
۱۰/۹۲	-۱۰/۸۹	۴/۷۲	-۳۴/۳۶	تغییر مکان (st5)	Imperial Valley Left To Right
۶/۸۶	-۴/۷۰	-۵/۵۷	-۱۱/۱۲	برش پایه	
-۱/۹۶	-۲/۷۶	۰/۸۵	-۱/۵۱	برش طبقه (st5)	
۱۶/۳۲	۱۰/۷۴	۵/۸۳	۹/۰۸	تغییر مکان (st5)	Imperial Valley Right To Left
۹/۱۶	۱۱/۸۲	۴/۵۸	-۴/۶۶	برش پایه	
۵/۱۷	-۴/۵۹	-۲/۳۱	-۱/۴۰	برش طبقه (st5)	
۱۲/۹۴	۱۶/۵۱	۱۴/۳۳	۱۱/۶۴	تغییر مکان (st5)	Northridge Left To (Sylmar) Right
۱/۱۲	۳/۵۶	۰/۵۰	-۱/۰۸	برش پایه	
-۲/۹۰	۱/۹۶	۲/۰۵	۲/۳۱	برش طبقه (st5)	
۸/۵۱	۵/۲۰	۹/۱۰	-۵/۱۱	تغییر مکان (st5)	Northridge Right (Sylmar) To Left
-۴/۹۶	۱/۰۲	-۰/۹۰	-۵/۷۳	برش پایه	
۰/۷۵	۰/۵۲	۱/۰۵	-۱/۰۹	برش طبقه (st5)	

۵- بحث و بررسی

فوق روندی مشابه یکدیگر را دارند. علت تفاوت در این دو زلزله این است که تغییر شکل ماکزیمم در طبقه پنجم، اما دررفت ماکزیمم در طبقه چهارم روی می‌دهد. در حالی که در زلزله‌های دیگر، ماکزیمم تغییر شکل و دررفت در طبقه پنجم اتفاق افتاده است. با توجه به جدول ۵، در اکثر زلزله‌ها خطا در برش پایه بیشتر از خطا در برش طبقه پنجم است. علت این امر تأثیر نیروی ضربه طبقات پایین‌تر بر برش پایه می‌باشد. نیروی تماس طبقات پایین‌تر در زمانی روی می‌دهد که فاصله دو سازه کم باشد. پس خطای ماکزیمم در برش پایه در فواصل کمتر و خطای ماکزیمم در برش طبقه پنجم می‌تواند در فواصل بیشتر بین دو سازه روی دهد. با توجه به نمودارهای پاسخ زلزله‌ها به خصوص Westmoreland و Loma Prieta دیده می‌شود که لزوماً در بعضی فواصل، پاسخ‌های سازه نسبت به فاصله صفر کاهش نمی‌یابد. این موضوع بیانگر این است که فاصله بین دو سازه باید آنقدر باشد که نیروی ضربه ناچیز و یا صفر شود. در غیر این صورت ممکن است فاصله بین دو سازه در افزایش پاسخ‌ها و به زبان سازه نسب به حالتی که دو سازه بدون فاصله باشند، عمل کند.

با توجه به شکل‌های ۵ الی ۱۶، رفتار دو سازه می‌تواند در زلزله‌های چپ به راست و راست به چپ، متفاوت باشد. این موضوع به نامتقارن بودن مجموعه دو سازه و تفاوت در زمان تناوب آن‌ها برمی‌گردد. همانطور که از نمودارهای پاسخ نیروی ضربه و تغییر مکان حداکثر در هنگام زلزله در هر دو جهت مشخص است، هرچند تغییر مکان حداکثر از فاصله بین دو سازه بیشتر می‌باشد، نیروی ضربه در یکی از جهت‌های تحریک در همه زلزله‌ها بجز Loma Prieta در فواصل بزرگتر صفر می‌شود. علت این امر به تغییر شکل غیرخطی سازه‌ها در جهت جدا شدن از هم مرتبط می‌باشد.

با توجه به نمودارها، اختلاف در برش پایه، تغییر شکل و دررفت کمتر از اختلاف در نیروهای ضربه می‌باشد. این نشان می‌دهد که از المان‌های ساده‌تر (خطی) می‌توان در مدل‌سازی استفاده نمود. اما باید خطای استفاده از این المان‌ها در پاسخ‌ها لحاظ گردد.

با توجه به نمودارهای تغییر مکان و دررفت دیده می‌شود که در همه زلزله‌ها بجز زلزله Loma Prieta و Northridge (Newhall) (چپ به راست)، پاسخ‌های

که این موضوع به وارد شدن سازه‌ها به مرحله غیرخطی مرتبط است و با نتایج تحلیل‌های خطی [۱۳] متفاوت است. المان‌های الاستیک و ویسکوالاستیک خطی در اکثر نرم‌افزارهای مهندسی موجود هستند. لذا در بررسی پاسخ‌های برش پایه، تغییر مکان، تغییر شکل نسبی و برش طبقات می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. اما باید در پاسخ‌های نهایی خطای مدل‌سازی نیز لحاظ گردد. ماکزیمم اختلاف آن‌ها برای زلزله با $PGA=0.37g$ در مورد المان الاستیک و ویسکوالاستیک خطی به ترتیب در تغییر مکان حداکثر $21/97$ و $7/19$ ، در برش پایه $8/23$ و $9/52$ و در ماکزیمم تغییر شکل نسبی طبقات $30/18$ و $19/02$ می‌باشد. این ماکزیمم اختلاف در زلزله با $PGA=0.59g$ در مورد المان الاستیک و ویسکوالاستیک خطی به ترتیب در تغییر مکان حداکثر $6/62$ و $6/34$ ، در برش پایه $16/68$ و $15/37$ و در ماکزیمم تغییر شکل نسبی طبقات $9/4$ و $7/74$ می‌باشد. همچنین ماکزیمم اختلاف در زلزله با PGA بالاتر از $0.7g$ در مورد المان الاستیک و ویسکوالاستیک خطی به ترتیب در تغییر مکان حداکثر $16/32$ و $34/36$ ، در برش پایه $9/16$ و $11/12$ و در ماکزیمم تغییر شکل نسبی طبقات $33/91$ و $22/32$ می‌باشد. این نشان می‌دهد که در اکثر زلزله‌ها، خطای المان ویسکوالاستیک خطی از المان الاستیک خطی کمتر است و لحاظ کردن میرایی موجب دقت در پاسخ‌ها می‌شود. خطای المان‌ها خطی در تعیین نیروی ضربه بالاتر از 0.8 بوده و بهتر است از این المان‌ها در برآورد نیروی ضربه و طراحی موضعی سازه‌ها استفاده نشود.

از آنجا که از سختی المان تماس غیرخطی در مدل‌سازی المان ویسکوالاستیک غیرخطی استفاده شد، لذا پاسخ‌ها این المان به المان هرتز-میراگر نزدیک گردید. همانطور که از نمودارها و جدول ۵ مشخص است، در مقایسه با المان هرتز-میراگر، المان‌های ویسکوالاستیک غیرخطی نیروی ضربه را دست پایین و المان الاستیک غیرخطی نیروی ضربه را دست بالا تخمین می‌زند. این به اتلاف انرژی بالاتر در المان ویسکوالاستیک غیرخطی و عدم

با توجه به اکثر نمودارها فاصله‌ای که در آن برش پایه به مقدار ثابتی می‌رسد، تقریباً با فاصله‌ای که در آن تغییر مکان ثابت می‌شود، یکی و یا بیشتر است. البته در بعضی زلزله‌ها به مقدار مشخصی همگرا نمی‌شود. این موضوع بیانگر این است که ضربه و نیروی ناشی از آن بر برش پایه بیشتر از تغییر شکل تاثیر دارند.

همانطور که دیده می‌شود، در بعضی از زلزله‌ها مانند Westmoreland (راست به چپ)، بعد از فاصله $5cm$ پاسخ تغییر مکان ثابت می‌شود. اما در زلزله Imperial Valley (راست به چپ) تا فاصله $10cm$ نیز ضربه روی پاسخ‌ها مؤثر است. برای نمونه در فاصله $8cm$ برخی پاسخ‌های سازه ناشی از این دو زلزله با هم مقایسه می‌شود. در فاصله $8cm$ برای زلزله Westmoreland (راست به چپ)، بین دو سازه ۳ ضربه روی داده است که ۲ ضربه بین طبقات ۵ و ۱ ضربه بین طبقات ۴ بوده است. حداکثر سرعت سازه نیز $0.51m/s$ می‌باشد. اما در فاصله $8cm$ برای زلزله Imperial Valley (راست به چپ)، بین دو سازه ۶ ضربه روی داده است که ۳ ضربه بین طبقات ۳ و ۳ ضربه بین طبقات ۴ روی داده است. حداکثر سرعت سازه نیز $0.65m/s$ می‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای (AF) و (۱۴F) نیروی ضربه در زلزله Imperial Valley بزرگتر است. با توجه به تعداد، نیرو و سرعت ضربه مشخص است که تغییرات در پاسخ زلزله Imperial Valley (راست به چپ) مشهودتر خواهد بود.

در اکثر نمودارهای برش پایه، تغییر مکان و دریافت، بعد از فاصله $3cm$ ، پاسخ المان الاستیک خطی و غیر خطی به هم نزدیک می‌شوند. این نشان می‌دهد که سختی المان در تعیین این پاسخ‌ها خیلی مهم نمی‌باشد و با توجه به تفاوت پاسخ المان‌های دارای میرایی مشخص است که میرایی دارای اهمیت بیشتری در اختلاف پاسخ‌ها می‌باشد. نسبت پریرود سازه ۵ دهانه به ۳ دهانه (0.87) می‌باشد. با توجه به این نسبت پریرودها، این نتیجه حاصل می‌شود که در نسبت بالاتر از 0.7 نیز ضربه بین سازه‌ها می‌تواند به طور مؤثری در افزایش و یا کاهش پاسخ‌ها دخیل باشد،

می‌توان فرض نمود، لذا می‌توان خطای آن‌ها را در محاسبه پاسخ‌ها کم کرد. اما در محاسبه پارامترهای مدل‌سازی المان‌های الاستیک غیرخطی و هرتز-میراگر کمترین عدم قطعیت وجود دارد و همچنین پاسخ‌های مناسبی را در تطابق با نتایج آزمایشگاهی داشتند. به طوری که المان هرتز-میراگر کمترین خطا را در نیروی ضربه و تغییر شکل داشت.

* در بررسی پاسخ‌های تغییرمکان، برش پایه و دریافت می‌توان در مدل‌سازی ضربه بین دو سازه از المان‌های خطی استفاده نمود. اما باید با توجه به PGA زلزله وارده خطایی را محتمل دانست.

* در بررسی پاسخ‌های نیروی ضربه خطای المان‌های خطی به بیشتر از ۸۰ درصد رسیده و استفاده از المان‌های خطی در بررسی موضعی سازه در محل برخورد مناسب نمی‌باشد.

* در بیشتر پاسخ‌ها، المان‌های الاستیک دارای پاسخ‌های بزرگتر و المان‌های ویسکوالاستیک دارای پاسخ‌های کوچکتر نسبت به المان هرتز-میراگر هستند و این المان در محدوده متوسطی در بین المان‌های دیگر قرار می‌گیرد. * در بررسی پاسخ‌های تغییرمکان و برش پایه، خطای المان ویسکوالاستیک غیرخطی کمتر از ۹ و در تغییرمکان نسبی کمتر از ۱۹٪ می‌باشد. در بسیاری از موارد نیز پاسخ‌ها بسیار به هم نزدیک بودند. لذا مدل‌سازی توسط هر دو المان معقول بوده و انتخاب استفاده از این المان‌ها به پارامترهای مورد مطالعه و یا جواب‌های محافظه‌کارانه‌تر با توجه به نمودارها و جدول ۵ بستگی دارد.

* گرچه پیوند دو سازه به هم نزدیک بوده و نسبت آن‌ها ۰/۸۷ می‌باشد، اما به دلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها، افزایش و یا کاهش قابل توجهی در پاسخ‌ها، در حالتی که دو سازه به هم ضربه می‌زنند نسبت به حالت بدون ضربه دیده می‌شود.

* در صورتی که قرار است دو سازه در کنار هم اجرا شوند، بهتر است یا فاصله بین دو سازه آنقدر زیاد باشد که ضربه زده نشود و اگر به اجبار دو سازه با فاصله کمی در کنار

اتلاف انرژی در المان الاستیک غیرخطی برمی‌گردد. المان هرتز-میراگر در محدوده‌ای بین دو المان قرار می‌گیرد. ماکزیمم برش پایه و درصد افزایش آن در هنگام ضربه در فواصل مختلف با در نظر گرفتن المان هرتز-میراگر نسبت به حالت بدون ضربه برای زلزله‌های مختلف در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- ماکزیمم خطای سازه در هنگام ضربه به حالتی که ضربه‌ای روی ندهد.

افزایش (%)	برش پایه (kN)	زلزله
۳/۰۶	۷۵۶/۹	Loma Prieta
۱۵/۴	۷۱۵/۴	Westmoreland
۲۲/۵	۶۳۵/۶	Cape Mendocino
۴/۳۵	۸۹۹/۹	Northridge (Newhall)
۵/۱	۷۸۳/۷	Imperial Valley
۱۵/۴	۸۴۵/۵	Northridge(Sylmar)

با توجه به این سازه‌ها و شتاب‌نگاشت‌ها، با استفاده از جدول ۶ می‌توان سازه‌ها را در کنار یکدیگر فرض نمود، اما باید افزایش نیروی برش پایه در طراحی اولیه سازه لحاظ گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مقایسه المان‌های مختلف تماس پرداخته شد. المان‌های مختلف تماس توسط Visual C++ به برنامه Opensees اضافه شد و بعد از تطابق‌های عددی مدل‌سازی این تحقیق با نتایج عددی و آزمایشگاهی دیگران، این المان‌ها در بررسی عددی ضربه بین دو ساختمان ۵ طبقه مجاور ۳ و ۵ دهانه استفاده شدند. سازه‌های فوق تحت ۶ رکورد زلزله در دو حالت چپ به راست و راست به چپ تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند. نتایج این مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌ها به صورت زیر است:

* از آنجا که در مدل‌سازی عددی کارهای آزمایشگاهی، سختی المان‌های خطی و ویسکوالاستیک غیرخطی را

هم قرار گرفتند، به طوری که به هم ضربه می‌زنند، افزایش برش پایه در طراحی اولیه سازه‌ها لحاظ گردد.

۷-مراجع

- [1] Goldsmith, W. (1960), "Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids". Edward Arnold, London, England.
- [2] Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Plevris, N., Bitzarakis, S. (1991), "A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 20, pp. 981-998.
- [3] Stoykovich, M. (1978), "Nonlinear effects in dynamic analysis and design of nuclear power plant components: Research status and needs". *Nuclear Eng. Design*, Vol. 50, pp. 93-114.
- [4] Maison, F., Kasai, K. (1990), "Analysis of type of structural pounding". *Struc. Eng.*, Vol. 116, pp. 657-677.
- [5] Karayannis, C., Favvata, M. (2005), "Earthquake-induced interaction between two adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights". *Earthquake Eng. Earthquake Vibra.*, Vol. 34, pp. 1-20.
- [6] Shatoff, H., Thompson, R., Lee, T. (1980), "Nonlinear dynamic analysis of prismatic elements for high-temperature gas-cooled reactor cores". *Nuclear Eng. Design*, Vol. 59, pp. 185-195.
- [7] Anagnostopoulos, A. (1988), "Pounding of buildings in series during earthquakes". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 16, pp. 443-456.
- [8] Zhu, P., Abe, M., Fujino, Y. (2002), "Modeling three-dimensional non-linear seismic performance of elevated bridges with emphasis on pounding of girders". *Earthquake Eng Struc. Dynam.*, Vol. 31, pp. 1891-1913.
- [9] Anagnostopoulos, A. (2005), "Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 33, pp. 897-902.
- [10] Anagnostopoulos, A., Karamaneas, C. (2008), "Use of collision shear walls to minimize seismic separation and to protect adjacent buildings from collapse due to earthquake-induced pounding". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 37, pp. 1371-1388.
- [11] Davis, R. (1992), "Pounding of buildings modeled by an impact oscillator". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 21, pp. 253-274.
- [12] Chau, K., Wei, X., Guo, X., Shen, C. (2003), "Experimental and theoretical simulations of seismic poundings between two adjacent structures". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 32, pp. 537-554.
- [13] Muthukumar, M., Desroches, R. (2006), "A Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 35, pp. 811-826.
- [14]- Jankowski, R. (2005), "Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding". *Earthquake Eng. Struc. Dynam.*, Vol. 34, pp. 595-611.
- [15] Jankowski, R. (2006), "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", *Eng. Struc.*, Vol. 28, pp. 1149-1161.
- [16]- Jankowski, R. (2008), "Earthquake-induced pounding between equal height building with substantially different dynamic properties". *Eng. Struc.*, Vol. 30, pp. 2818-2829.
- [17] Mahmoud, S., Chen, X., Jankowski, R. (2008), "Structural pounding model with Hertz spring and nonlinear damper". *Appl. Sci.*, Vol. 8, pp. 1850-1858.
- [18] Jankowski, R. (2009), "Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials earthquake engineering and structural dynamics". *Short Communication*.
- [19] Muthukumar, M., Desroches, R. (2004), "Evaluation of impact models for seismic pounding". 13th World Conf. on Earthquake Eng., August 1-6, Vancouver, B.C., Canada.

STUDY OF DIFFERENT CONTACT ELEMENTS IN POUNDINGS OF STEEL BUILDINGS

J. Vaseghi Amiri¹, S.G. Jalali^{2,*}

1. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol

2. PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol

*Corresponding Author: sg.jalali@stu.nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Pounding,
linear contact
element,
linear viscoelastic
contact element,
nonlinear elastic
contact element,
Hertz-damp contact
element,
nonlinear viscoelastic
contact element.

ABSTRACT

Pounding of adjacent building have been seen in the moderate and strong earthquakes. There are different methods to model the impact. One of these methods is contact elements. Contact elements include linear and nonlinear elastic and viscoelastic and Hertz-damp elements. Investigators have generally studied on contact elements in elastic structures. In this study, the ability of different contact modelings is added to Opensees software. Validation of modeling is achieved by comparing the numerical result of this study with other investigations' numerical studies. Simulations between analytical modeling and experimental studies show that to conquer displacement, results of different contact elements are the same, but velocity and contact force results of elements with and without damping have more accuracy. Finally these elements are used to model the contact of 5-story building under 6 records, in two left to right and right to left states. As regards, Hertz-damp has the least uncertainty of modeling; therefore results of other elements are compared with this element. Results generally show that accuracy of nonlinear elements is more than linear elements. This is more obvious in the maximum contact forces.
