

# یک رابطه جدید برای المان‌های پیوند در محاسبه اثر ضربه، بر پایه آثار ضریب استرداد و سرعت برخورد

حسین نادرپور<sup>۱\*</sup>، روی مانوئل منزس کارنیرو باروس<sup>۲</sup>، سید محمد خاتمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پورتو، (FEUP)، پورتو، پرتغال

۳- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

naderpour@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۰۸

**چکیده**- اثر ضربه ساختمان‌ها هنگام زلزله و آثار آسیب‌زای آن، به گونه‌ای گسترده بررسی شده است. از آن‌جا که ساختمان‌ها به صورت منفرد و بدون توجه به شرایط ساختمان کناری، طراحی و ساخته می‌شوند، با وارد شدن بارهای لرزه‌ای، هر ساختمان رفتار متفاوتی از خود بروز داده و تغییر مکان‌های کناری آن‌ها بر اساس جنس سازه، ارتفاع آن و همچنین مود ارتعاشی هر یک از آن‌ها ایجاد می‌شود. این تفاوت رفتاری سبب می‌شود که ساختمان‌ها با یکدیگر برخورد کرده و آسیب‌هایی به اعضای سازه‌ای آن‌ها وارد شود. پژوهشگران بسیاری درباره‌ی نیروی وارد شده در اثر ضربه ساختمان‌ها و انرژی هدر رفته در این رخداد مطالعه کرده‌اند. برای به دست آوردن این نیرو و میزان انرژی آن، بررسی‌های عددی نیاز به المان مجازی دارد که شامل فنر و میراگر است و به صورت موازی با هم به محل اتصال دو جسم مورد مطالعه وصل می‌شود. روابط ریاضی زیادی برای به دست آوردن نیروی وارد شده و انرژی دقیق و واقعی‌تر ارائه شده است. در این پژوهش با استفاده از رابطه جدید محاسبه ضریب میرایی، آثار ضریب استرداد، بررسی شده و برای همگرایی پاسخ‌های داده شده در بررسی‌های عددی ضربه، رابطه‌ی ریاضی برای آن و سرعت برخورد پیشنهاد شده است.

**کلیدواژه‌گان:** ضربه ساختمان‌های کناری، سرعت ضربه، انرژی هدر رفته، ضریب میرایی.

## ۱- مقدمه

بنابراین بسیاری از پژوهشگران، با ارزیابی ضربه به صورت آزمایشگاهی و عددی، در پیشبرد علم این پدیده کمک کرده‌اند. آناگنوستوپولوس [۱]، از نخستین پژوهشگرانی بود که با ارزیابی ضربه، مقدار عددی و آزمایشگاهی آن را به صورت خطی به دست آورد. پایادراکیس و مزاکیس [۲] با استفاده از میز لرزان، دو سازه بتنی با مقیاس واقعی را بدون

در دهه نزدیک، ضربه ساختمان‌ها و موضوعات مرتبط به آن توجه پژوهشگران و مهندسين علم ساختمان را به خود جلب کرده است. در حقیقت ضربه ساختمان‌ها به یکدیگر هنگام زلزله، باعث شده که مهندسين زلزله بیشتر به آثار آسیب‌زای آن پی برده و در پی برطرف کردن آن باشند.

یکسان‌سازی نتایج محاسبات عددی ضربه، رابطه‌ای ریاضی بین ضریب استرداد و سرعت ضربه ارائه می‌شود.

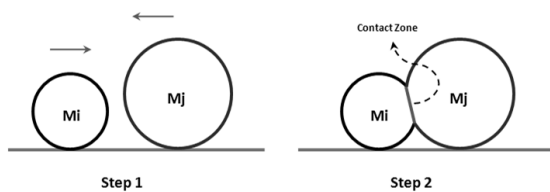


شکل (۱) برخورد دو ساختمان در زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵

## ۲- پیوند المان

### ۲-۱- ضربه

در بررسی‌های عددی، اثر ضربه با استفاده از دو جسم به جرم  $m_i$  و  $m_j$  و سرعت ضربه  $v_{imp}$  تعریف می‌شود که به سمت یکدیگر در حرکتند و پس از برخورد، به اندازه  $\delta$  در یکدیگر فرو رفته و از هم جدا می‌شوند.



شکل (۲) برخورد دو جسم با یکدیگر

نظریه‌های ارائه‌شده در این زمینه، در سه حالت گوناگون مطرح می‌شود:

- الف- دو جسم با سرعت یکسان در یک راستا حرکت می‌کنند.
- ب- دو جسم با سرعت‌های گوناگون در مسیر برگشت خود قرار می‌گیرند.
- ج- جسم با سرعت کمتر، پس از برخورد، با سرعت بیشتری در مسیر برگشت قرار می‌گیرد و جسم با سرعت بیشتر، با کاهش سرعت مواجه شده و در مسیر برگشت خود قرار می‌گیرد.

درز انقطاع، ارزیابی کردند. همچنین دو ساختمان سه و هشت طبقه فلزی به وسیله‌ی فیلترالت [۳] ارزیابی آزمایشگاهی و آثار ضربه ساختمان کوتاه‌تر به سازه بلندتر، بررسی شده است. نتایج این آزمایش با نتایج عددی پیش‌بینی شده که به وسیله‌ی ایشان انجام شده بود، مقایسه و دقت نتایج عددی تأیید شد. کول [۴] با بررسی سامانه‌های ضربه با جرم متمرکز و گسترده، به این نتیجه رسید که سرعت ضربه دو ساختمان از مهم‌ترین پارامترها در بحث ضربه ساختمان‌ها است. کان [۵]، یانکوفسکی [۶] و کومودروموس [۷] در پژوهش‌های جداگانه، ضربه را بررسی و برای میزان میرایی پیوند المان، روابطی پیشنهاد کردند. باروس و خاتمی [۸] با بررسی فاصله میان ساختمان‌ها در آیین نامه زلزله ایران، نشان دادند که فاصله توصیه‌شده در این آیین‌نامه نمی‌تواند از برخورد ساختمان‌ها جلوگیری کند و نیاز به بازبینی دارد. این پژوهشگران همچنین با بررسی دو قاب بتنی یک طبقه، روابط ریاضی گوناگون ارائه‌شده برای به دست آوردن ضربه را بررسی و با هم مقایسه کردند [۹]. در پژوهش دیگری، باروس و کوردیرو [۱۰] با استفاده از انواع فنرها و میراگرها، ضربه مدل‌های گوناگون با مقیاس کوچک را بررسی کردند. باروس و خاتمی [۱۱] با برآورد یک میرایی متناسب با فنر، میزان متعادل را برای میراگر استفاده شده در پیوند المان، پیشنهاد کرده‌اند. این دو همچنین نقش دیوار برشی بتنی را در کاهش تغییر مکان کناری، کاهش تعداد و قدرت ضربه ساختمان‌های کناری بررسی کرده‌اند [۱۲]. یانکوفسکی [۱۳] در یک کار آزمایشگاهی با استفاده از گلوله‌های بتنی، رابطه‌ای برای سرعت ضربه و ضریب استرداد ارائه کرده است.

در این مقاله، در کنار بررسی پیوند المان‌های استفاده شده معمول، یک رابطه جدید برای محاسبه میرایی پیوند المان پیشنهاد شده و بررسی می‌شود. همچنین، برای بهینه‌سازی و

اجسام بررسی شده به صورت زیر است:

$$c_{imp} = 2 \cdot \zeta \sqrt{k_l \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (4)$$

در این رابطه، ضریب میرایی  $\zeta$  از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\zeta = -\frac{\ln CR}{\sqrt{\pi^2 + (\ln CR)^2}} \quad (5)$$

از رابطه ۳، افزون بر نیروی ضربه، میزان انرژی جذب شده برخورد که سطح زیر منحنی نمودار  $F_l - \delta(t)$  است نیز به دست می‌آید؛ اما از آنجا که در این نمودار به خاطر فعال بودن میراگر پس از ضربه، مقدار منفی نیز دیده می‌شود، پژوهشگران، روابط جدیدی بر اساس نیروی ضربه و میزان میرایی ارائه کرده‌اند که بررسی خواهد شد.

#### ۲-۴- مدل ضربه ویسکوالاستیک غیر خطی

یانکوفسکی [۶] برای بهبود رفتار این المان و همچنین از بین بردن قسمت منفی انرژی جذب شده، فرض کرد که بیشتر انرژی در قسمت نخست برخورد و زمانی که سرعت مثبت است جذب می‌شود. او از جذب انرژی در سرعت منفی چشم‌پوشی کرده و با ارائه رابطه‌ای جدید، میراگر را پس از ضربه، غیرفعال در نظر گرفته است.

$$F_l = k_h \cdot \delta(t)^{1.5} + c_{imp} \delta(t) \quad (6)$$

با استفاده از رابطه ۶، معادله  $c_{imp}$  به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$c_{imp} = 2 \cdot \zeta \sqrt{k_l \sqrt{\delta(t)} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (7)$$

در این معادله:

$$\zeta = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - CR^2}{CR(CR(9\pi - 16) + 16)} \quad (8)$$

بنابراین ضریب  $CR^1$  تعریف می‌شود که نسبتی بین سرعت قبل و بعد از ضربه است. به این ضریب، ضریب استرداد گفته می‌شود که رفتار الاستیک یا پلاستیک ضربه را مشخص می‌کند.

$$0 < CR = \frac{v_{before}}{v_{after}} < 1 \quad (1)$$

#### ۲-۲- مدل ضربه خطی

نخستین مدل استفاده شده در محاسبه ضربه، از دو جسم که با یک فنر به یکدیگر وصل می‌شوند، تشکیل شده است. این المان، شرایط را برای یک ضربه الاستیک خطی بین دو جسم فراهم کرده و نیروی ضربه را به دست می‌آورد.

$$F_l = k_l \cdot \delta(t) \quad (2)$$

سختی فنر استفاده شده،  $k_l$  میزان فشردگی فنر در زمان  $t$ ،  $\delta(t)$  است.

#### ۲-۳- مدل ضربه ویسکوالاستیک خطی

از آنجایی که مدل ضربه خطی تنها توانایی نشان دادن نیروی ضربه را در زمان‌های گوناگون و تحت یک رابطه خطی دارد، پژوهشگران برای محاسبه انرژی جذب شده در هر ضربه، از یک میراگر موازی فنر استفاده کرده‌اند. این مدل، کلوین-ویت (Kelvin-Voigt) نامیده می‌شود و نیروی ضربه دو جسم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_l = k_l \cdot \delta(t) + c_{imp} \delta(t) \quad (3)$$

$c_{imp}$  میزان میرایی میراگر و  $\delta(t)$  رابطه سرعت بین دو جسم، است. بر پایه پیشنهاد اناگنوستوپولوس [۱۴]، میزان میرایی ویسکوز با استفاده از سختی فنر استفاده شده و جرم

1- CR=Coefficient of Restitution

بر پایه‌ی نمودار ارائه‌شده و برای مدل‌های یک درجه آزادی، خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\delta}{\delta_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}_0}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

نسبت پیشنهادشده برای تناسب بین تغییر مکان‌ها و سرعت‌ها در شکل ۳، محاسبه و به صورت تقریبی ارائه شده است (معادله پیشنهادشده اتلاف انرژی در میرایی لزجی). فرضیه اساسی این معادله، تناسب بین جابه‌جایی در یک زمان مشخص با سرعت آن و جابه‌جایی بیشینه با سرعت نخستین است. بر پایه‌ی معادله و شکل ارائه شده، رابطه بین سرعت و جابه‌جایی به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}}\right)^2} \quad (11)$$

اگر در رابطه (۶) فرض شود که مقدار میرایی  $c_{imp} = \zeta \delta^{1.5}$  باشد، انرژی جذب‌شده در پیوند المان با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^{\delta_{\max}} c \dot{\delta}_0 d\delta = \int_0^{\delta_{\max}} \zeta \delta^{1.5} \dot{\delta}_0 d\delta = \\ &= \int_0^{\delta_{\max}} \zeta \delta^{1.5} \dot{\delta}_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}}\right)^2} d\delta \end{aligned} \quad (12)$$

پاسخ انتگرال داده‌شده و انرژی جذب‌شده آن در روابط عددی پیوند المان، به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta E = \zeta (\dot{\delta}_0) \delta_{\max}^{2.5} \int_0^1 x^{1.5} \sqrt{1-x^2} dx \quad (13)$$

معادله ارائه‌شده و میزان جذب انرژی آن بر اساس رفتار الاستیک و یا پلاستیک به صورت زیر تغییر می‌کند:

## ۲-۵- مدل هرتز با میرایی غیر خطی

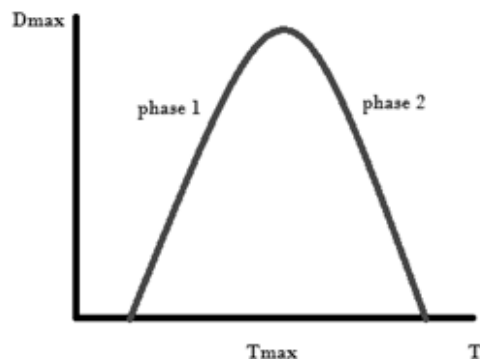
مدل هرتز با میرایی غیر خطی، در حقیقت مدل یانکوفسکی گسترش یافته است. موتوکومار [۱۵] با ارائه رابطه‌ای برای  $c_{imp}$ ، نشان داد که سرعت ضربه نیز در میزان جذب انرژی مؤثر است. بر پایه رابطه پیشنهادشده، سختی فنر، جابه‌جایی، ضریب  $CR$  و سرعت قبل از ضربه بر میزان میرایی اثر دارند.

$$c_{imp} = \frac{3k_h(1-CR^2)}{4v_{imp}} \delta(t) \quad (9)$$

## ۲-۶- مدل پیشنهاد شده جدید پیوند المان

مدل پیشنهادشده جدید، شامل یک فنر معادل غیرخطی است که از دو فنر پشت سر هم و یک فنر موازی تشکیل شده که این ترکیب به صورت موازی به یک میراگر وصل شده است. این مدل، در حقیقت مدل هرتز با میرایی غیرخطی است که گسترش یافته و با افزایش سختی، مدل می‌شود. با استفاده از ایده مدل موتوکومار و بر خلاف رابطه یانکوفسکی، سرعت ضربه نیز در میرایی و مقدار انرژی جذب شده، اثر داده شده است.

اگر قسمت بیشینه نمودار جابه‌جایی المان هنگام فعالیت، انتخاب و به دو قسمت رفت و برگشت تقسیم شود، در حالت بهینه، نمودار جابه‌جایی برحسب زمان به صورت شکل ۳ خواهد بود.



شکل (۳) نمودار جابه‌جایی انتخاب‌شده

### ۳- مقایسه انرژی جذب شده به وسیله

#### پیوند المان‌ها

برای تایید مدل ریاضی پیوند المان پیشنهاد شده، مدل‌های ارائه شده در بخش‌های ۲-۵ و ۲-۶ با هم مقایسه می‌شوند. انتخاب مدل هرتز با میرایی غیرخطی این گونه توجیه می‌شود که هر دو معادله ارائه شده، پارامترهای یکسانی دارد و به سختی،  $CR$ ، سرعت ضربه و جابه‌جایی وابسته است.

برای این مقایسه، از یک جابه‌جایی کناری تایید شده در پژوهش‌های پیشین [۱۱] استفاده شده است. جابه‌جایی جانبی ارائه شده بر پایه‌ی سری فوریه برآورد شده و با جابه‌جایی واقعی آن هماهنگ‌سازی سازی شده است. این معادله برابر است با:

$$\delta(t) = 0.2245 \cos(3.644t) - 0.7828 \sin(3.644t) - 0.2004 \cos(7.288t) + 0.2102 \sin(7.288t) + 0.07995$$

برای این مقایسه از یک برخورد ریاضی یک درجه آزادی با  $CR=0/5$ ،  $k=30000 \text{ kN/m}$  و سرعت ضربه  $10 \text{ m/s}$  استفاده شده است. زمان برخورد دو جسم در بازه‌ی ۴ تا ۶ ثانیه، با ضریب تقسیم  $0/01$  ثانیه قرار دارد.

بر اساس شکل‌های داده شده، فرض می‌شود که انرژی جذب شده، در بازه‌ی هیستریزس نمودار ضربه-تغییر مکان، نشان داده شود. بنابراین، سطح محدود شده در نمودار ارائه شده، انرژی جذب شده به وسیله‌ی پیوند المان، هنگام برخورد دو جسم است. مقایسه دو پیوند المان نشان می‌دهد که معادله میرایی پیشنهاد شده، انرژی بیشتری نسبت به مدل موتوکومار جذب می‌کند. این مقدار در معادله پیشنهاد شده در حدود  $18/55$  کیلونیوتن میلی‌متر است که در مقایسه با انرژی  $15/85$  کیلونیوتن میلی‌متری مدل موتوکومار، حدود ۱۵ درصد بیشتر است.

$$\Delta E = 0.25 \zeta (1+e) \delta_0^{2.5} \delta_{\max}^{2.5} \quad (14)$$

با استفاده از رابطه انرژی و تعادل در نظر گرفته شده در شکل ۳، در رفت و برگشت خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = U_m + \Delta E + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V^2$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) V \quad (15)$$

$U_m$  بیشترین مقدار انرژی جنبشی و  $\Delta E$  انرژی جذب شده است؛ پس خواهیم داشت:

$$U_m = \int_0^{\delta_{\max}} k_{eff} \delta^{1.5} d\delta = \int_0^{\delta_{\max}} 1.5 k_h \delta^{1.5} d\delta = \frac{3}{5} k_h \delta_{\max}^{2.5} \quad (16)$$

در نتیجه و با استفاده از معادله ۱۵ خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{3}{5} k_h \delta_{\max}^{2.5} + 0.25 \zeta \delta_0^{2.5} \delta_{\max}^{2.5} + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V^2 \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V^2 = \delta_{\max}^{2.5} \left( \frac{3}{5} k_h + 0.25 \zeta \delta_0 \right) \quad (18)$$

$$\delta_{\max}^2 = 0.5 \left( \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) V^2 \left( \frac{20}{12 k_h + 5 \zeta \delta_0} \right) \quad (19)$$

سرانجام و با استفاده از معادلات ارائه شده می‌توان ضریب میرایی عددی پیوند المان پیشنهاد شده را به صورت زیر نوشت:

$$\zeta = \frac{12(1-e)k_h}{5ev_{imp}} \quad (20)$$

$$c_{imp} = \frac{12(1-e)k_h}{5ev_{imp}} \delta(t) \quad (21)$$

نتایج نشان می‌دهد که ضریب‌های ۰/۱ و ۰/۳ نمی‌توانند انتخاب مناسبی برای این کار باشند. زیرا این دو، انرژی منفی همراه خود دارند، بنابراین از بررسی آن‌ها چشم‌پوشی می‌شود. استفاده از این ضریب در پیوند المان پیشنهاد شده نتایجی با نیروی ضربه و انرژی جذب‌شده منفی ارائه می‌دهد. میزان انرژی جذب‌شده در دیگر ضریب‌های استفاده‌شده، در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱) انرژی جذب‌شده مدل پیشنهادی با استفاده از CRهای

گوناگون

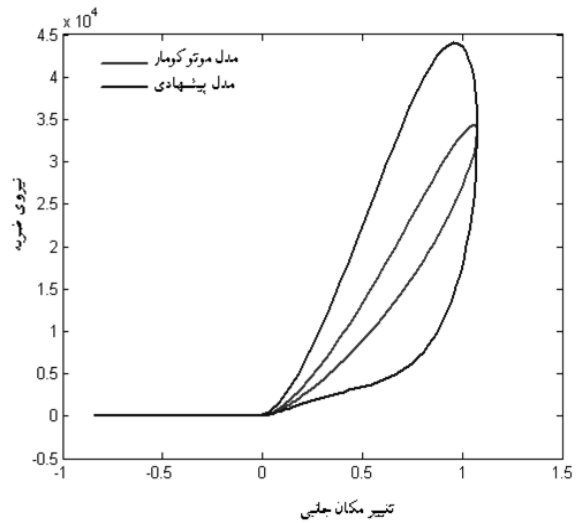
CR	انرژی جذب‌شده (kN.mm)
۰/۵	۳۳/۳۴
۰/۷	۲۷/۱۲
۰/۹	۲۴/۸۵

در این جدول و نمودارهای هیستریزس ارائه‌شده، جذب انرژی از  $CR=0/5$ ، به مقدار بیشینه خود یعنی  $42/85$  کیلونیوتن میلی‌متر رسیده است. کمینه مقدار انرژی جذب‌شده مربوط به  $CR=0/9$  است که حدود ۳۸ درصد کمتر از مدل با  $CR=0/3$  است.

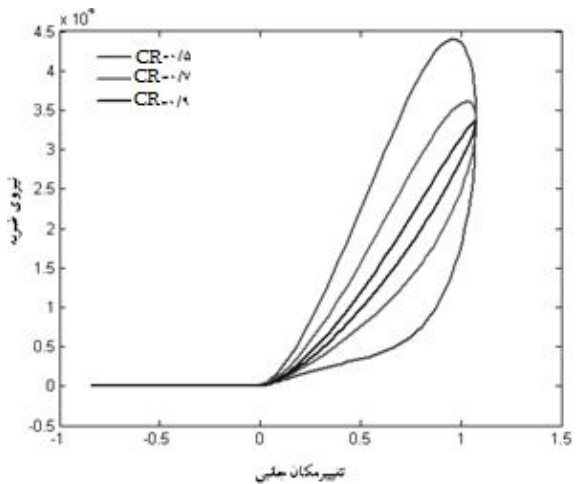
دقت محاسبات انجام‌شده به خاطر متغیر بودن مقدار  $CR$ ، وابستگی شدیدی به مقدار این ضریب دارد. به بیان بهتر، درستی رابطه ارائه‌شده برای میزان میرایی، در صورتی که بتواند مقدار  $CR$  استفاده شده را به مقدار  $CR$  رابطه انرژی، نزدیک نشان دهد، تأیید می‌شود. بر این اساس، میزان انرژی جذب‌شده با  $CR$  مربوط به آن، به دست می‌آید و با معادله انرژی [۱۶] مقایسه می‌شود.

$$\Delta E = \frac{1}{2} \left( \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) (1 - CR^2) v_{imp}^2 \quad (22)$$

با ارزیابی‌های عددی، میزان ضریب استرداد به دست آمده است. شکل (۶)،  $CR$  انتخاب شده را نسبت به  $CR$



شکل (۴) رفتار هیستریزس برخورد در دو پیوند المان گوناگون

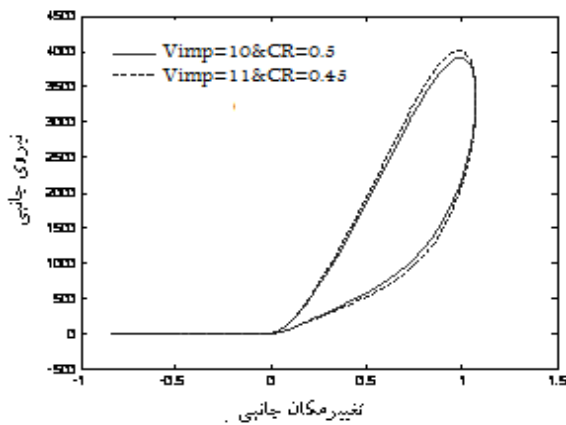


شکل (۵) رفتار هیستریزس برخورد با CRهای گوناگون

## ۴- مقایسه انرژی جذب‌شده با استفاده از CRهای گوناگون

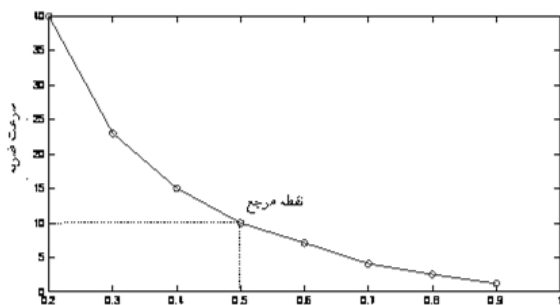
در این قسمت، آثار  $CR$  با استفاده از پیوند المان پیشنهاد شده ارزیابی می‌شود. از آنجا که میزان میرایی، وابستگی شدیدی به مقدار  $CR$  دارد، انتخاب بهترین مقدار آن، به داشتن نتایج دقیق‌تر کمک زیادی می‌کند. بر این اساس، میزان  $CR$  از ۰/۱ تا ۰/۹ تغییر می‌کند و نمودارهای آن با هم مقایسه می‌شود.

این دو انتخاب در یک چرخه محاسباتی قرار می‌گیرد و پس از محاسبه انرژی جذب شده، مقدار آن با مقدار انرژی به دست آمده از معادله (۱۸) مقایسه می‌شود. اگر انرژی جذب شده در منحنی هیستریزس با انرژی جذب شده محاسبه شده یکسان باشد، برنامه، عددها را به عنوان مقادیر مورد نیاز انتخاب می‌کند؛ اگر نه، مقدار عددی دیگری برای سرعت ضربه، انتخاب و چرخه تکرار می‌شود.



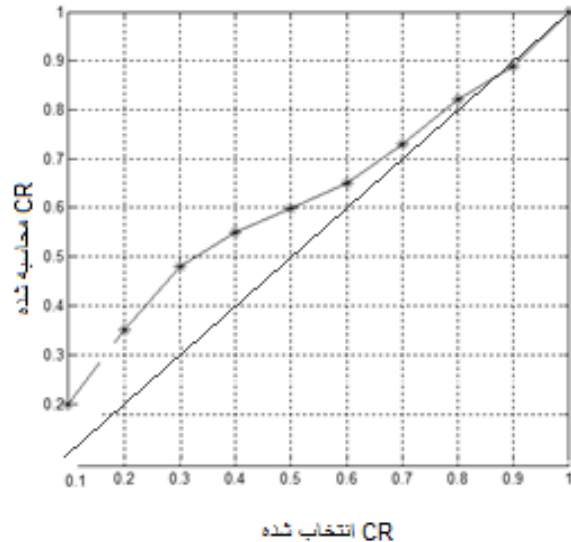
شکل (۷) هماهنگ سازی دو نمودار هیستریزس با ضریب استرداد و سرعت ضربه گوناگون

برای نمونه، ارزیابی عددی انجام شده نشان داده است که سرعت ضربه ۱۱/۰۵ متر بر ثانیه، متناسب با  $CR=0.45$  است و همگرایی این پاسخ با مدل مرجع، این دو پارامتر را تأیید می‌کند. انرژی جذب شده در این مدل، ۲۸/۶۴ کیلو نیوتن میلی متر است که نزدیکی قابل قبولی به میزان انرژی مدل مرجع نشان می‌دهد.



شکل (۸) نمودار پیشنهاد شده برای ارتباط CR و سرعت ضربه

محاسبه شده نشان می‌دهد. نزدیکی نمودار به خط قطری، دقت نمودار را نشان می‌دهد.



شکل (۶) دقت CR استفاده شده در پیوند المان پیشنهاد شده

## ۵- رابطه پیشنهاد شده جدید بین ضریب استرداد (CR) و سرعت ضربه ( $V_{imp}$ )

برای همگرایی پاسخ‌های محاسبات ضربه و رسیدن به هدف یکسان‌سازی و بهینه‌سازی انتخاب‌های CR و سرعت ضربه در پیوند المان‌ها، با استفاده از یک روند سعی و خطا (برنامه CRVK)، معادله‌ای برحسب CR پیشنهاد می‌شود که با انتخاب آن می‌توان سرعت ضربه متناسب با CR را به دست آورد. برای این کار، نخست به عنوان یک فرض و بر پایه‌ی پژوهش‌های باروس و خاتمی [۱۷]، ضریب ۰/۵ برای CR و سرعت ضربه ۱۰ متر بر ثانیه به عنوان معیار انتخاب می‌شود. میزان انرژی جذب شده در مقدار مرجع محاسبه شده است. این مقدار در شرایط گفته شده، ۲۸/۳۳ کیلو نیوتن میلی متر است. در مرحله بعد، در بازه‌ی صفر تا یک عددی برای CR انتخاب می‌شود. برای سرعت ضربه نیز یک حدس منطقی می‌تواند نتایج را با سرعت بیشتری به همگرایی سوق دهد.

می‌دهد که پیوند المان جدید، میزان جذب نیروی بیشتری نسبت به مدل پیشین فراهم می‌کند. برای درستی صحت نتایج، میزان  $CR$  انتخاب شده با ضریب استرداد محاسباتی، مقایسه شد و دقت مناسبی داشت. همچنین برای بهینه‌سازی نتایج محاسبات ضربه، رابطه‌ای بین  $CR$  و سرعت ضربه پیشنهاد شده است که نتایج آن، نشان از یکسان‌سازی پاسخ‌های ضربه و انرژی جذب شده در شرایط و حالات گوناگون دارد.

- همه حقوق مادی و معنوی برنامه نوشته شده CRVK به وسیله‌ی خاتمی و همکاران، در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه پورتو تحت قوانین کپی رایت، برای این دانشگاه محفوظ است.

## ۷- مراجع

- [1] Anagnostopoulou, S.A. 1998 "Pounding of Building in Series During Earthquakes". *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 16(3), 443-456
- [2] Papadrakakis, M and Mouzakis, H. 1991 " A Lagrange multiplier solution method for pounding of building during earthquakes ". *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 20, 981-998.
- [3] Filiatrault, A and Wagner, P 1995 "Analytical Prediction of Experimental Building Pounding". *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 24, 1131-1154.
- [4] Cole, G.L and Dhakal, R.P. 2009 " the Effect of Diaphragm Wave Propagation on the Analysis of Pounding Structures". Proc. 2 nd Int. Confrence on computational method in structural dynamic an earthquake engineering (COMPADYN) Paper CD 200. Rhodes. Greece.
- [5] Ye, K and Zhu, H. 2008, "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(9):1135-1142.

نمودار ارائه شده، سرعت‌های ضربه متناسب با  $CR$  را در محاسبات ضربه نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار، رابطه برآورد کننده به صورت زیر خواهد بود :

$$v_{imp} = 494.32CR^4 - 1299CR^3 + 1285CR^2 - 595.9CR + 116.67$$

برای نمونه با استفاده از رابطه ریاضی پیوند المان پیشنهاد شده، برای دو جسم یک درجه آزادی که با فنری به سختی  $22500$  و میراگر پیشنهاد شده به یکدیگر وصل شده است،  $CR=0.7$  و سرعت ضربه  $4/5$  متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. نیروی ضربه و انرژی جذب شده در این مدل به ترتیب،  $438$  کیلونیوتن و  $21/18$  کیلونیوتن میلی‌متر است. در گام دوم، ضریب  $CR=0.3$  در نظر گرفته می‌شود. سرعت ضربه متناظر با این مقدار،  $22/48$  به دست آمده است. انرژی جذب شده در این مدل، حدود  $21/35$  کیلونیوتن میلی‌متر است که هماهنگی دقیقی با نمودار پیشین دارد.

## ۶- نتیجه گیری

از آن جا که ساختمان‌ها جداگانه ارزیابی و ساخته می‌شوند، از مبحث ضربه ساختمان‌ها به یکدیگر هنگام بارگذاری لرزه‌ای چشمپوشی شده آثار جبران ناپذیری به دنبال دارد. هنگام زلزله، ساختمان‌ها با تغییر مکان کناری مواجه شده و ضرباتی به یکدیگر وارد می‌کنند. میزان نیروی ضربه و انرژی هدر رفته در هر ضربه، بستگی به جنس و ارتفاع ساختمان‌ها دارد. برای به دست آوردن مقدار انرژی هدر رفته، معادلات بسیاری پیشنهاد شده است. در این مقاله، با استفاده از معادله تغییر مکان پیوند المان متصل به دو مدل محاسباتی، رابطه جدیدی برای میزان میرایی پیوند المان، پیشنهاد و با مدل پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان



- [12] Barros, R.C and Khatami, S.M. 2012. "Seismic Response Effect of Shear Walls in Reducing Pounding Risk of Reinforced Concrete Building Pounding Subjected to Near Fault-Ground Motion", 15th World Conference Earthquake Engineering, 15WCEE, Lisbon, Portugal.
- [13] Jankowski, R. 2008. "Earthquake-induced pounding between equal heights buildings with substantially different dynamic properties", Engineering Structures 30. 2818–2829.
- [14] Anagnostopoulos SA, 1992 "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings". Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 21:289–302.
- [15] Muthukumar, S. 2006, " A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics.35:811-828.
- [16] Goldsmith, W. Impact: The theory and physical behavior of colliding solids (1<sup>st</sup>edn). Edward Arnold: London, U.K. 1960.
- [17] Khatami, S.M. 2012. "Pounding of Building during Earthquake" Proposal for the Degree of Doctor of Philosophy in Earthquake Engineering, Supervisor: Prof Rui C.Barros. (FEUP)
- [6] Jankowski, R. 2005, "Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding", Earthquake Engineering and Structural Dynamics.34:595-611.
- [7] Komodromos, P and Polycarpou, P. 2010 "On the Numerical Simulation of Impact for the Investigation of Earthquake-Induced Pounding of Building". Ten<sup>th</sup> International Conference on Computational Structures Technology, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- [8] Barros, R and Khatami, S.M. 2012 "Importance of Separation Distance on Building Pounding under Near-Fault Ground Motion, using the Iranian Earthquake Code" 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran
- [9] Barros, R.C. and Khatami, S.M. 2012 "An estimation of damping ratio for the numerical study of impact forces between two adjacent concrete buildings, subjected to pounding". 15th International Conference on Experimental Mechanics (15th ICEM). Symposium on "Dynamics and Stability" (organized by Prof. Rui C. Barros). FEUP (22-27 July 2012), Porto, Portugal.
- [10] Cordeiro, J.M.C. 2011 "Study of the collision between buildings without and with base isolation" (in Portuguese). MSc Thesis in Civil Engineering (Structures) supervised at FE/UP by Prof. Rui Carneiro Barros, 134 pages. Porto (Portugal).
- [11] Barros, R.C. and Khatami, S.M. 2012. "Building Pounding Forces for Different Link Element Models. Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology". Dubrovnik (Croatia) 4-7 September 2012, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK.