

تحلیل تجربی و نظری رفتار تیرهای بتنی تحت بار دینامیکی با معرفی رهیافت تشابه محدود

علی مومنی امیرکنده

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندر انزلی، ایران.

علی علی جانی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندر انزلی، ایران.

سینا گوهری راد

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.

چکیده

روش‌های تحلیل ابعادی دارای کاستی‌هایی در تعیین پیش‌بینی رفتار نمونه‌های مقیاس کامل با استفاده از نتایج مقیاس کوچک به دلیل غیرخطی بودن رفتار، بارگذاری و یا تغییرات جنس ماده، عدم توانایی در پیش‌بینی هم‌زمان دو پارامتر دارای واحد یکسان و تعداد محدود درجه آزادی مستقل می‌باشند. به‌تازگی نظریه جدیدی بنام تشابه محدود برای رفع این مسائل مطرح شده است که در این مقاله با استفاده از این نظریه به تحلیل پیش‌بینی رفتار دینامیکی تیرهای بتنی با استفاده از نتایج تیرهای بتنی در مقیاس کوچک‌تر و تیرهای دارای رفتار مشابه بتن (گچ-سنگ) تحت بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای پرداخته شده است. نتایج پیش‌بینی شده همچون نیرو، جابجایی، انرژی و زمان نشان می‌دهد که تحلیل ابعادی دقیق نتایج با مصالح متفاوت از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد و در بعضی موارد اختلاف نتایج حاصله بیش از ۵۰٪ است. حال آنکه با روش تشابه محدود می‌توان با استفاده از نمونه‌های گچ-سنگ در مقیاس کوچک رفتار تیرهای بتنی در مقیاس کامل را با هزینه کمتر، کاهش زمان ساخت و دقت بالا پیش‌بینی نمود، به طوری که درصد خطا در تحلیل دینامیکی در تمامی نمونه‌ها تقریباً کمتر از ۱۰٪ حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: تشابه محدود، تیر بتنی، بار دینامیکی، روش تجربی و نظری.

* نویسنده مسئول: ali.alijani@iau.ac.ir

۱- مقدمه

آنکه نمونه‌های اصلی و آزمایشی از مواد متفاوتی ساخته شوند اهمیت پیدا نمود [۸]، بنابراین نظریه تشابه محدود مطرح گردید. مطالعات اندکی در زمینه تعیین پاسخ نمونه اصلی با استفاده از نمونه آزمایشی ساخته شده از ماده متفاوت نسبت به نمونه اصلی صورت پذیرفته است [۹-۱۲]. آلوز و اُشیرو [۹] تلاش نمودند روشی براساس تصحیح انحرافات بین نتایج نمونه‌های اصلی و آزمایشی ساخته شده از مواد مختلف برای سازه‌های ساده دارای رفتار الاستیک-پلاستیک کامل ارائه دهند. صادقی و همکاران [۱۲] روشی برای مقیاس‌سازی رفتار دینامیکی نرخ بالای سازه‌ها تحت اثر بارهای ضربه‌ای براساس روش تشابه محدود [۱۳] ارائه نمودند. آن‌ها تلاش نمودند تا با ثابت نمودن خواص مواد از جمله چگالی و حاصلضرب سخت‌شوندگی در تنش تسلیم استاتیکی مشکل مربوط به روش ابعادی را در مسائل دارای اثرات نرخ کرنش حل کنند. صادقی و همکاران [۱۴] در مطالعه دیگری، به چارچوب مقیاس‌بندی شده برای تعیین پاسخ خرابی سازه‌ها در معرض بارگذاری نرخ بالا پرداخته‌اند. ویژگی‌های مواد مختلف نمونه‌های اصلی و کوچک شده با اصلاح عوامل مقیاس‌بندی از جمله جرم، سرعت و دما در نظر گرفته شد. دیوی و همکاران [۱۵]، یک رویکرد شبیه‌سازی محدود به مکانیک ضربه مقیاس شده را طراحی نمودند. متأسفانه، تحلیل ابعادی در مقیاس متفاوت دچار ضعف بوده و برای مکانیک ضربه، عدم مقیاس پذیری نرخ کرنش و سخت شدن کرنش می‌تواند اثربخشی آزمایش‌های مقیاس شده را کاهش دهد. ژانگ و همکاران [۱۶]، آسیب و شکست تحت بارگذاری با نرخ بالا را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که استفاده از آزمایش‌های ابعادی به همراه مدل‌های فیزیکی (تشابه محدود) برای بررسی پاسخ‌های پیچیده سازه‌های مقیاس بزرگ تحت بارگذاری با نرخ بالا بسیار کارآمد است.

هدف اصلی این تحقیق استفاده از روابط تحلیل ابعادی و تشابه محدود می‌باشد که به کمک آن روش پیش‌بینی رفتار نمونه‌های اصلی براساس نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های دارای خواص مشابه و یا غیر مشابه به دست می‌آید. همچنین برخلاف تحلیل ابعادی در این روش ضعف اثرات نرخ کرنش وجود ندارد. علاوه بر آن، امکان استفاده از مواد دارای ساختار مشابه به عنوان ماده نمونه آزمایشی

سازه‌های بتنی جزو یکی از مقاوم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های امروزی می‌باشند. ساخت و ساز با بتن، یک روش ارزان، سریع و با دوام برای انجام بسیاری از پروژه‌های ساختمانی است. بتن دارای مزایای فراوانی نظیر صلیبیت بالا، دسترسی آسان به مصالح مورد استفاده برای ساخت و ایجاد شکل‌های گوناگون با استفاده از قالب‌های مختلف می‌باشد [۱]؛ به همین دلیل، انجام آزمایش‌هایی جهت تعیین رفتار دینامیکی بتن ضرورت دارد. ا ز آنجایی که ساخت نمونه‌ها در اندازه‌ی واقعی با ماده بتنی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و مقاومت نهایی بتن (بالای ۹۰٪) پس از ۹۰ روز محقق می‌گردد، استفاده از روش‌های جایگزین که بتواند با انجام آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های کوچکتر و یا مواد ارزانتر و با زمان ساخت کوتاهتر امکان بررسی رفتار دینامیکی در بتن را مهیا نماید، با اهمیت و ضروری می‌باشد. تعیین پاسخ تجربی نمونه اصلی با انجام آزمایش بر نمونه‌های با ابعاد کوچکتر و هندسه مشابه به عنوان تحلیل ابعادی^۱، رپلیکا ابعادی^۲، مدل‌سازی یا تشابه^۳ شناخته می‌شود. بررسی ابعادی سازه‌های تحت بار دینامیکی در گستره وسیعی توسط محققین مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲]. همچنین، همه تلاش‌های صورت گرفته برای بررسی ابعادی سازه‌های حساس به نرخ کرنش تحت بارهای دینامیکی به شکست انجامیده است [۲]. در بررسی ابعادی [۳-۷]، ماده نمونه‌های اصلی و آزمایشی یکسان است، اما ارضای شرایط می‌تواند با مشکل مواجه شود. نبود تشابه در سازه‌های حساس به نرخ کرنش تحت بارگذاری ضربه‌ای نرخ بالا منجر به این شد که محققان [۳-۷] به دنبال ضرایب تصحیح باشند که این امر مستلزم استفاده از مجموعه‌ای از اعداد بی‌بعد برپایه جرم ضربه‌زننده، سرعت اولیه ضربه و تنش تسلیم دینامیکی به جای جرم، طول و زمان می‌باشد. اُشیرو و آلوز [۳] برای بررسی ابعادی اثرات نرخ کرنش، ضریب تصحیحی برای سرعت ضربه به دست آوردند. به‌طور مشابه، آلوز و اُشیرو [۴] ضریب تصحیحی برای جرم ضربه‌زننده تعیین نمودند. در هر دو نگرش، خطاهای کوچکی برای مثال‌های ساده‌ای که رفتار ماده پلاستیک کامل^۴ در نظر گرفته شد، ایجاد گردید. با توجه به مشکلات ساخت، هزینه و محدودیت‌های آزمایشگاهی، ضرورت

³ Modeling or similitude

⁴ Perfectly plastic material

¹ Scaling

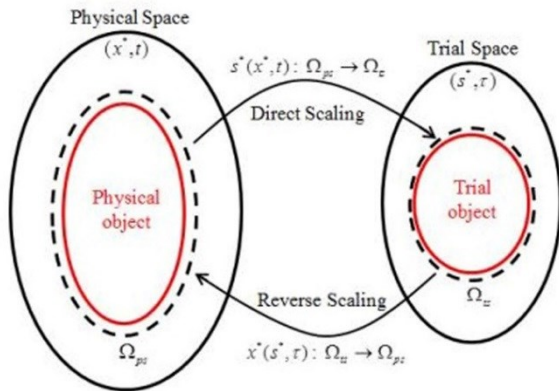
² Replica scaling

با مشتق مادی ایفا می‌نماید و منجر به تعریف سرعت حجم کنترل به صورت $\underline{v}_{ps}^* = D^*S^*/D^*\tau$ می‌گردد که در آن $\Omega_{TS}^*(S^*, \tau): \Omega_{TS}^* \rightarrow \Omega_{TS}$ تابع نگاشت کننده معکوس‌پذیر که حجم کنترل مرجع Ω_{TS}^* و حجم کنترل جاری Ω_{TS} را مرتبط می‌نماید. فرم عمومی معادلات بقا که به صورت روابط (۱) و (۲) بیان شد، همه معادلات بقا از جمله بقای جرم (معادله (۳)) و بقای اندازه حرکت (معادله (۴)) که مطلوب فرآیندهای مکانیکی^{۱۱} است را شامل می‌شود.

$$\frac{D^*}{D^*\tau} \int_{\Omega_{ps}} \rho_{ps} dV_{ps} + \int_{\Gamma_{ps}} \rho_{ps} (\underline{v}_{ps} - \underline{v}_{ps}^*) \cdot \underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} = 0 \quad (۳)$$

$$\frac{D^*}{D^*\tau} \int_{\Omega_{ps}} \rho_{ps} \underline{v}_{ps} dV_{ps} + \int_{\Gamma_{ps}} \rho_{ps} \underline{v}_{ps} (\underline{v}_{ps} - \underline{v}_{ps}^*) \cdot \underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} = \int_{\Gamma_{ps}} \underline{\sigma}_{ps} \cdot \underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} + \int_{\Omega_{ps}} \rho_{ps} \underline{b}_{ps} dV_{ps} \quad (۴)$$

که $\underline{\sigma}$ تانسور تنش کوشی^{۱۳} و \underline{b} نیرو و حجمی می‌باشد. برای مرتبط نمودن فضاهای فیزیکی و آزمایشی، باید نگاشتی بین Ω_{TS} و Ω_{PS} در نظر گرفته شود [۱۳]. شکل (۱) تصویر شماتیک نگاشت استفاده شده بین Ω_{TS} و Ω_{PS} را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- تصویر شماتیک از نگاشت‌های مقیاس شده بین فضاهای فیزیکی و آزمایشی [۱۹].

فضاهای فیزیکی و آزمایشی می‌توانند با فرض وجود نگاشتی مانند $\chi^*(S^*, \tau)$ که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود، مرتبط

برای پیش‌بینی نتایج مربوط به مدل اصلی در بارگذاری‌های دینامیکی وجود دارد که در این تحقیق از ماده گچ-سنگ برای پیش‌بینی رفتار مدل اصلی ساخته شده از بتن استفاده شده است.

۲- نظریه تشابه محدود

نظریه ابعادی براساس فرم انتگرالی عمومی معادلات بقا می‌باشد که معادله ریاضی آن برای فضای فیزیکی^۱ و فضای آزمایشی^۲ به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند [۱۷]. منظور از فضای فیزیکی فضایی است که جسم یا سازه واقعی در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و منظور از فضای آزمایشی، فضایی است که می‌تواند از لحاظ ابعاد بزرگتر یا کوچکتر از فضای فیزیکی باشد.

$$\frac{D^*}{D^*\tau} \int_{\Omega_{ps}} \rho_{ps} \Psi_{ps} dV_{ps} + \int_{\Gamma_{ps}} \rho_{ps} \Psi_{ps} (\underline{v}_{ps} - \underline{v}_{ps}^*) \cdot \underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} = - \int_{\Gamma_{ps}} J_{ps}^{\Psi} \underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} + \int_{\Omega_{ps}} \rho_{ps} b_{ps}^{\Psi} dV_{ps} \quad (۱)$$

$$\frac{D^*}{D^*\tau} \int_{\Omega_{ts}} \rho_{ts} \Psi_{ts} dV_{ts} + \int_{\Gamma_{ts}} \rho_{ts} \Psi_{ts} (\underline{v}_{ts} - \underline{v}_{ts}^*) \cdot \underline{n}_{ts} d\Gamma_{ts} = - \int_{\Gamma_{ts}} J_{ts}^{\Psi} \underline{n}_{ts} d\Gamma_{ts} + \int_{\Omega_{ts}} \rho_{ts} b_{ts}^{\Psi} dV_{ts} \quad (۲)$$

که ρ ، Ψ ، \underline{v} ، \underline{J} ، \underline{b} و \underline{n} به ترتیب عبارتند از چگالی، میدان فیزیکی^۳، حجم، میدان سرعت، شار^۴، منبع^۵ و نرمال واحد مرز Γ از حجم کنترل Ω ^۶ می‌باشند. زیرنویس‌های ps و ts به ترتیب بیانگر متغیر مرتبط با فضای فیزیکی (نمونه اصلی^۷) و متغیر مرتبط با فضای آزمایشی (نمونه با ابعاد کوچک‌تر یا بزرگتر^۸) است. مشتق ستاره-زمان^۹ $D^*/D^*\tau = \partial/\partial\tau|_{x^*}$ نقشی مشابه مشتق مادی^{۱۱} ایفا می‌نماید و منجر به تعریف سرعت حجم کنترل به صورت $\underline{v}_{ps}^* = D^*x^*/D^*\tau$ می‌گردد که در آن $\chi^*(X^*, t): \Omega_{PS}^* \rightarrow \Omega_{PS}$ تابع نگاشت کننده معکوس‌پذیر^{۱۱} که حجم کنترل مرجع Ω_{PS}^* و حجم کنترل جاری Ω_{PS} را مرتبط می‌نماید (برای اطلاعات بیشتر به مراجع [۱۷ و ۱۸] مراجعه شود). برای فضای آزمایشی نیز $D^*/D^*\tau = \partial/\partial\tau|_{s^*}$ نقشی مشابه

⁸ Scaled model

⁹ Star-time derivative

¹⁰ Material derivative

¹¹ Diffeomorphism: تابع معکوس‌پذیری که یک فضای دیفرانسیل پذیر را به یک فضای دیفرانسیل پذیر دیگر تبدیل و معکوس می‌نماید

یک فضای دیفرانسیل پذیر دیگر تبدیل و معکوس می‌نماید

¹² Pure mechanical processes

¹³ Cauchy tensor stress

¹ Physical space

² Trial space

³ Physical field

⁴ Flux

⁵ Source: (این منبع می‌تواند هریک از موارد انرژی، اندازه حرکت، نیروهای کالبدی، آنتروپی را شامل شود)

⁶ Control volume (CV)

⁷ Full-scale or un-scaled model

مربوط به میدان فیزیکی، شار و حجمی به ترتیب عبارتند از: $\Psi = 0$ ، $\underline{J} = 0$ و $\underline{b} = 0$. با جایگذاری این واحدها در روابط (۸) منجر به رابطه‌های $\rho_{ts} = \alpha^\rho \beta^3 \rho_{ps}$ ، $\underline{v}_{ts}^* = h\beta^{-1} \underline{v}_{ps}^*$ ، $\underline{v}_{ts} = h\beta^{-1} \underline{v}_{ps}$ و $\rho_{ts} \underline{b}_{ts} = 0$ و $\underline{J}_{ts} = 0$ می‌گردد. بنابراین، مهم‌ترین رابطه این قسمت که ضریب ابعادی چگالی و وزن است، به صورت رابطه (۹-۱) و (۹-۲) بیان می‌شود.

$$\rho_{ts} = \alpha^\rho \beta^3 \rho_{ps} \quad (۹-۱)$$

$$M_{ts} = \frac{M_{ps}}{\alpha^p} \quad (۹-۲)$$

۲-۲- ضریب ابعادی اندازه حرکت

همچنان که در رابطه (۴) بیان شد، ترم‌های مربوط به میدان فیزیکی، شار به ترتیب عبارتند از: $\underline{\Psi} = \underline{v}$ ، $\underline{J} = \underline{\sigma}$ و \underline{b} مبین بقای اندازه حرکت می‌باشد. با جای گذاری این واحدها در روابط (۸) منجر به رابطه‌های $\rho_{ts} \underline{v}_{ts} = \alpha^\nu \beta^3 \rho_{ps} \underline{v}_{ps}$ ، $\underline{v}_{ts}^* = h\beta^{-1} \underline{v}_{ps}^*$ ، $\underline{v}_{ts} = h\beta^{-1} \underline{v}_{ps}$ و $\underline{\sigma}_{ts} = \alpha^\nu h\beta^2 \underline{\sigma}_{ps}$ می‌گردد. روابط (۸-۳) و (۹-۱) همراه با رابطه $\rho_{ts} \underline{v}_{ts} = \alpha^\nu \beta^3 \rho_{ps} \underline{v}_{ps}$ منجر به رابطه (۱۰) می‌شود.

$$\alpha^\nu = h\beta^{-1} \alpha^\rho \quad (۱۰)$$

رابطه $\underline{\sigma}_{ts} = \alpha^\nu h\beta^2 \underline{\sigma}_{ps}$ می‌تواند در هر مدل پیوسته‌ای از جمله مدل پلاستیسته ون-میسز^۳ مورد استفاده قرار گیرد. با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه $\underline{\sigma}_{ts} = \alpha^\nu h\beta^2 \underline{\sigma}_{ps}$ رابطه (۱۱) حاصل می‌شود.

$$\underline{\sigma}_{ts} = \alpha^\rho h^2 \beta \underline{\sigma}_{ps} \quad (۱۱)$$

با استفاده از مدل پلاستیسته ون-میسز، روابط $\underline{\sigma}'_{ps} : \underline{\sigma}'_{ps} = 3Y_{ps}^2$ و $\underline{\sigma}'_{ts} : \underline{\sigma}'_{ts} = 3Y_{ts}^2$ حاصل می‌شوند که $\underline{\sigma}'_{ts} : \underline{\sigma}'_{ps}$ بیانگر تنش‌های انحرافی و Y_{ts} و Y_{ps} بیانگر تنش‌های تسلیم هستند. با استفاده از رابطه (۱۱) و روابط $\underline{\sigma}'_{ps} : \underline{\sigma}'_{ps} = 3Y_{ps}^2$ و $\underline{\sigma}'_{ts} : \underline{\sigma}'_{ts} = 3Y_{ts}^2$ رابطه مربوط به ضریب ابعادی زمان به صورت رابطه (۱۲) حاصل می‌شود.

$$h = \sqrt{\frac{1}{\alpha^\rho \beta} \frac{Y_{ts}}{Y_{ps}}} \quad (۱۲)$$

گردد. متغیرهای زمان در فضاهای فیزیکی و آزمایشی بواسطه رابطه (۶) مرتبط می‌شوند.

$$dx_i^* = \frac{\partial x_i^*}{\partial s_j^*} \Big|_\tau ds_j^* + \frac{\partial x_i^*}{\partial \tau} \Big|_{s^*} d\tau \quad (۵)$$

$$dt = h(\tau) d\tau \quad (۶)$$

که h نگاشت بایجکشن^۱ است. فرض می‌گردد که χ^* فقط تابعی از s^* است، بنابراین، رابطه (۵) به $dx^* = F_s \cdot ds^*$ کاهش می‌یابد که در آن تانسور گرادینان تغییرشکل $F_s = \partial x_i^* / \partial s_j^*$ به صورت رابطه $dV_{ps} = |F_s| dV_{ts}$ و $\underline{n}_{ps} d\Gamma_{ps} = |F_s| F_s^{-T} \underline{n}_{ts} d\Gamma_{ts}$ می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان رابطه (۷) را استخراج نمود.

$$\frac{1}{h(\tau)} \frac{D^*}{D^* \tau} \int_{\Omega_{ts}} \rho_{ps} \Psi_{ps} |F_s| dV_{ts} + \int_{\Gamma_{ts}} \rho_{ps} \Psi_{ps} |F_s| F_s^{-1} \cdot (\underline{v}_{ps} - \underline{v}_{ps}^*) \cdot \underline{n}_{ts} d\Gamma_{ts} = - \int_{\Gamma_{ts}} |F_s| F_s^{-1} \cdot \underline{J}_{ps}^\Psi \cdot \underline{n}_{ts} d\Gamma_{ts} + \int_{\Omega_{ts}} \rho_{ps} b_{ps}^\Psi |F_s| dV_{ts} \quad (۷)$$

با برابر قرار دادن ترم‌های معادل روابط (۲) و (۷)، روابط (۸-۱) تا (۸-۵) برای ضریب ابعادی ایزوتروپیک^۲ حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که در ضریب ابعادی ایزوتروپیک پارامترهای فیزیکی با نسبت‌های یکسان در تمامی جهات تغییر ابعادی می‌یابند. این شرط تانسور مرتبه دوم F_s را به βI ساده می‌کند که β ضریب ابعادی اسکالر و I تانسور واحد می‌باشد.

$$\rho_{ts} \Psi_{ts} = \alpha^\psi \beta^3 \rho_{ps} \Psi_{ps} \quad (۸-۱)$$

$$\underline{v}_{ts}^* = h\beta^{-1} \cdot \underline{v}_{ps}^* \quad (۸-۲)$$

$$\underline{v}_{ts} = h\beta^{-1} \cdot \underline{v}_{ps} \quad (۸-۳)$$

$$\underline{J}_{ts}^\Psi = \alpha^\psi h\beta^2 \cdot \underline{J}_{ps}^\Psi \quad (۸-۴)$$

$$\rho_{ts} b_{ts}^\Psi = \alpha^\psi h\beta^3 \rho_{ps} b_{ps}^\Psi \quad (۸-۵)$$

که α^ψ برای تعمیم فراگیرتر استفاده شده و در ادامه ضرایب ابعادی چگالی، اندازه حرکت و زمان تعیین شده تشریح می‌گردد.

۲-۱- ضریب ابعادی جرم

برای بقا جرم همانطور که از رابطه (۳) مشخص است واحدهای

³ Von-Mises

¹ Bijection map

² Isotropic scaling

- تحلیل ابعادی امکان استفاده از دو نمونه با جنس متفاوت را فراهم نمی کند.
- تحلیل ابعادی در بارگذاری دینامیکی نمی تواند پاسخ مناسبی را ارائه دهد.

۴- ساخت نمونه های تجربی و نحوه انجام آزمایش

طرح مخلوط بتن فرایندی است که در آن ترکیب مناسب اجزای بتن با توجه به مشخصات فنی داده شده تعیین می شود. برای نمونه- های تیرهای بتنی از طرح مخلوط بتن کارگاهی با عیار kg/m^3 ۳۵۰ و وزن مخصوص بتن kg/m^3 ۲۴۰۰ با وزن سیمان kg ۳۵۰، نسبت آب به سیمان ۰/۵، ماسه شسته رودخانه ای طبیعی ۳۵٪، مصالح، ماسه شسته دستگاری ۲۰٪، مصالح و درشت دانه (شن) ۴۵٪، مصالح استفاده شد. همانند طرح مخلوط بتن در طرح مخلوط گچ-سنگ نیز از نسبت آب به گچ ۰/۵ استفاده شده است. همچنین، برای ساخت نمونه های حاوی گچ-سنگ از نصف میزان درشت دانه (شن) و نصف میزان گچ استفاده شده است. در شکل (۲) مراحل ساخت نمونه های بتنی نشان داده شده است.



الف) نحوه دانه بندی سنگدانه ها



ب) مخلوط بتن در همزن ج) قالب های مکعبی و بتن موجود در آن



د) آزمایش اسلامپ بتن ه) نحوه قالب بندی تیرهای بتنی



و) عمل آوری بتن در حوضچه آب

شکل ۲- مراحل ساخت نمونه های بتنی.

۳- تعیین ضرایب ابعادی برای بار ضربه ای

ضرایب ابعادی فرایندهای مکانیکی عبارتند از ضریب ابعادی هندسی (β)، ضریب ابعادی چگالی (α^p)، ضریب ابعادی اندازه حرکت (α^v) و ضریب ابعادی زمان (h) می باشند. مطابق رابطه (۱۰)، α^p و α^v وابسته به یکدیگرند، بنابراین، سه تا از ضرایب ابعادی معرفی شده مستقل اند (α^p ، h و β) که این به معنای وجود سه درجه آزادی است.

۳-۱- تحلیل ابعادی

یکی از مهم ترین ویژگی های تحلیل ابعادی، استفاده از آن برای تشخیص غلط یا درست بودن یک معادله فیزیکی است. در واقع تحلیل ابعادی به کمک نوعی فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن تعداد متغیرهای تجربی مؤثر روی یک پدیده معین فیزیکی منجر می گردد. جدول (۱) روابط مربوط به تحلیل ابعادی را نشان می دهد که وابسته به بعد می باشد. منظور از جذب انرژی سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی می باشد.

جدول ۱- روابط تحلیل ابعادی

معکوس نمودن		
جابجایی	جذب انرژی	نیرو
$\beta \times$	$\beta^3 \times$	$\beta^2 \times$
ts	ts	ts

۳-۲- تحلیل تشابه محدود

در این بخش روابط تشابه محدود با استفاده از جدول (۲) نشان داده شده است. P نشان دهنده ضریب α مدل فیزیکی می باشد. لازم به ذکر است، تحلیل تشابه محدود علاوه بر ابعاد ماده، خواص مصالح را نیز در نظر می گیرد.

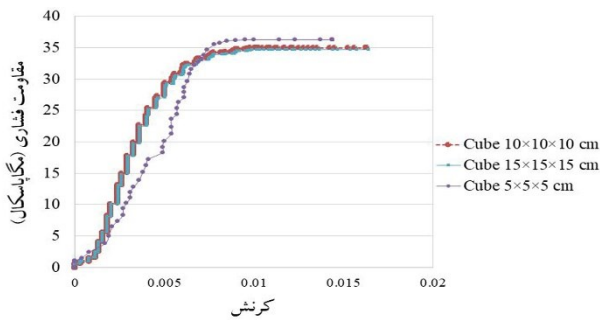
جدول ۲- روابط تشابه محدود

معکوس نمودن		
جابجایی	جذب انرژی	نیرو
$\beta \times$	$\frac{\beta^2}{\alpha^p h^2} \times$	$\frac{\beta}{\alpha^p h^2} \times$
ts	ts	ts

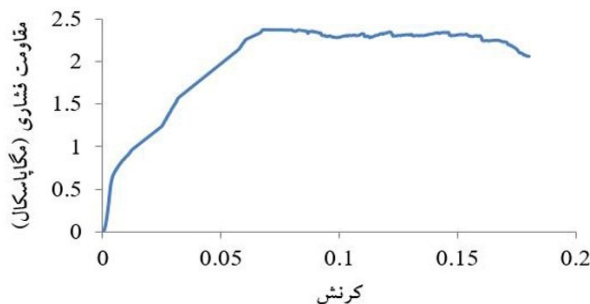
با مقایسه دو نظریه تشابه محدود و روش ابعادی، می توان نقاط ضعف روش ابعادی را نسبت به تشابه محدود به شرح زیر بیان نمود:
- تحلیل ابعادی قادر به پیش بینی در رفتارهای غیرخطی نمی باشد.
- تحلیل ابعادی در مواردی که اثرات نرخ کرنش وجود دارد پاسخ مناسبی نمی دهد.

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ دیلمان گیلان.

۲۱-۲۲	SiO ₂ (%)
۴/۵-۴/۸	Al ₂ O ₃ (%)
۳/۵-۳/۸	Fe ₂ O ₃ (%)
۱/۴۵	MgO (%)
۲-۲/۳	SO ₃ (%)
۰/۶	Na ₂ O (%)
۱/۵	LOI (%)
۰/۰۰۳	Cl (%)
۰/۷-۰/۹	انبساط
۱۱۵-۱۳۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۹۰-۲۰۵	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۳۰۰۰-۳۲۰۰	بلین (cm ² /gr)



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی.



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه مکعبی گچ-سنگ.

شکل (۵) و شکل (۶) نمای طولی نمونه‌های بتنی و گچ-سنگ مورد استفاده در آزمایش دینامیکی را نشان می‌دهد. برای آزمایش تیرهای حاوی بتن و گچ-سنگ تعداد شش نمونه در سه دسته‌بندی با ویژگی‌های فهرست شده مطابق جدول (۵) تا (۷) به عنوان نمونه‌های اصلی و در مقیاس کوچک‌تر در نظر گرفته شدند.

مطابق شکل (۲) پس از تهیه مصالح و طرح مخلوط بتن بر پایه عیار 350 kg/m^3 ، به دانه‌بندی مصالح پرداخته شد. سپس درشت‌دانه و ریزدانه به همراه آب و سیمان در همزن بتن^۱ قرار گرفته تا تمام اجزاء با هم مخلوط گردد. پس از بررسی اسلامپ بتن، برای آگاهی از مقاومت فشاری بتن قالب‌های مکعبی با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر، $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر، پس از روغنکاری در سه مرحله با مخلوط بتن پر و متراکم شدند. تیرهای بتنی نیز به روش ذکر شده ساخته شدند. پس از گیرش اولیه، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب نگهداری شدند. فرایند ساخت برای نمونه‌ها از جنس گچ-سنگ نیز مشابه فرآیند ساخت نمونه‌های بتنی انجام شد، با این تفاوت که نمونه‌های گچ-سنگ پس از خروج از قالب به جای حوضچه آب، به مدت ۷ روز در هوای آزاد با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و رطوبت ۴۰ درصد نگهداری شدند. شایان ذکر است، گچ مصرفی از شرکت سیمین سمنان و سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ دیلمان گیلان برای آزمایش‌ها تهیه گردید. مشخصات گچ مصرفی و سیمان به صورت جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. برای استخراج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از قالب‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر، $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر و برای نمونه‌های گچ-سنگ از قالب‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر استفاده شد. همچنین برای انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها از دستگاه جک بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰ تن مجهز به سیستم ثبت نمودار نیرو-جابجایی در نمونه‌ها و از دستگاه آزمایش کشش و فشار یونیورسال ستنام STM-250 براساس استاندارد ASTM E4 استفاده شد. منحنی مقاومت فشاری-کرنش نمونه‌های مکعبی بتنی و گچ-سنگ در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

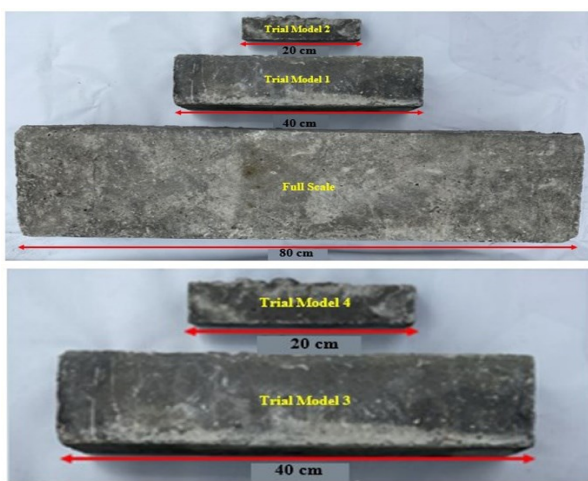
جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی گچ سیمین سمنان.

۳۸	CaO (%)
۰/۰۳	Na ₂ O (%)
۰/۱۷	MgO (%)
۵	محتوای آب هیدراتاسیون (%)
۶-۸	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۳-۱۴	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۲/۵-۳	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)

¹ Mixture



شکل ۶- نمای طولی نمونه‌های گچ-سنگ مورد استفاده در آزمایش دینامیکی



شکل ۵- نمای طولی نمونه‌های بتنی مورد استفاده در آزمایش دینامیکی

جدول ۵- مشخصات نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی به وزن پرتابه ۲۰۰ کیلوگرم.

Specimen	Material	Dimensions		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Scaling Factors			Velocity (mm/min)	M (Kg)	H (m)
		Length (cm)	Square Cross Section (cm ²)			β	α^p	h			
Full-Scale Model	Concrete	80	20×20	35	5407	-	-	-	6.26	200	2
Trial Model 1	Concrete	40	10×10	36.30	3982.24	0.50	8	0.49	6.38	25	2.07
Trial Model 2	Concrete	20	5×5			0.25	64	0.246		3.12	
Trial Model 3	Plaster-Stone	70	17.5×17.5	2.37	80.45	0.875	2.9	2.42	2.27	69.3	0.26
Trial Model 4	Plaster-Stone	60	15×15			0.75	4.6	2.07		43.6	
Trial Model 5	Plaster-Stone	40	10×10			0.5	15.47	1.38		12.9	

جدول ۶- مشخصات نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی به وزن پرتابه ۲۵۰ کیلوگرم.

Specimen	Material	Dimensions		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Scaling Factors			Velocity (mm/min)	M (Kg)	H (m)
		Length (cm)	Square Cross Section (cm ²)			β	α^p	h			
Full-Scale Model	Concrete	80	20×20	35	5407	-	-	-	7	250	2.5
Trial Model 1	Concrete	40	10×10	36.30	3982.24	0.50	8	0.49	7.1	31.25	2.6
Trial Model 2	Concrete	20	5×5			0.25	64	0.246		3.91	
Trial Model 3	Plaster-Stone	70	17.5×17.5	2.37	80.45	0.875	2.9	2.42	2.5	86.6	0.32
Trial Model 4	Plaster-Stone	60	15×15			0.75	4.6	2.07		54.5	
Trial Model 5	Plaster-Stone	40	10×10			0.5	15.47	1.38		16.1	

جدول ۷- مشخصات نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی به وزن پرتابه ۳۰۰ کیلوگرم.

Specimen	Material	Dimensions		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Scaling Factors			Velocity (mm/min)	M (Kg)	H (m)
		Length (cm)	Square Cross Section (cm ²)			β	α^p	h			
Full-Scale Model	Concrete	80	20×20	35	5407	-	-	-	8.28	300	3.5
Trial Model 1	Concrete	40	10×10	36.30	3982.24	0.50	8	0.49	8.43	37.5	3.63
Trial Model 2	Concrete	20	5×5			0.25	64	0.246		4.69	
Trial Model 3	Plaster-Stone	70	17.5×17.5	2.37	80.45	0.875	2.9	2.42	3	103.9	0.46
Trial Model 4	Plaster-Stone	60	15×15			0.75	4.6	2.07		65.4	
Trial Model 5	Plaster-Stone	40	10×10			0.5	15.47	1.38		19.4	

نمونه اصلی، نمونه آزمایشی ۱ و نمونه آزمایشی ۲ از دانه بندی یکسانی ساخته شده‌اند. همچنین نمونه‌های آزمایشی ۳، ۴ و ۵ از گچ-سنگ که ترکیبی از گچ، سنگ و آب است ساخته شده‌اند تا امکان آزمایش سازه‌ای بر روی تیرهای گچ-سنگ به جای تیر بتنی بررسی گردد. لازم به ذکر است از هر نمونه ۱۰ عدد ساخته شده و هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده است. وزن پرتابه‌ها ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در آزمایش‌ها دینامیکی می‌باشد. بغیر از نمونه‌ی اصلی که به ابعاد دلخواه می‌باشد، مابقی نمونه‌ها براساس ضریب β که ضریب ابعادی هندسی است حاصل می‌گردد. مقادیر α^p و h براساس روابط (۹) و (۱۲) بدست می‌آید.

در این تحقیق انرژی جنبشی مورد نیاز براساس سقوط آزاد وزنه چکش پرتابه‌ای با انرژی پتانسیل معین استحصال می‌گردد. با صرف نظر از اصطکاک بخش‌های مختلف سامانه و مقاومت هوا، انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه برخورد چکش با نمونه در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد، بارگذاری از نوع ضربه‌ای و دینامیکی می‌باشد. برای اعمال بار دینامیکی از دستگاه پرتاب سقوط آزاد جرم مطابق شکل (۷) استفاده می‌شود.

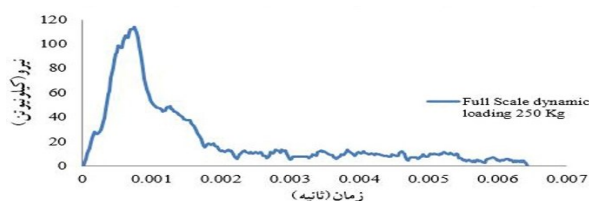
برای در نظر گرفتن فاصله تکیه‌گاه تا لبه تیر استفاده شد. طول آزاد تیر می‌بایست طوری در نظر گرفته شود که اگر طول مؤثر تیر (فاصله بین دو تکیه‌گاه L نامیده شود) عرض تیر (d) برابر با $d=L/3$ باشد. به عنوان مثال در نمونه‌ی اصلی عرض تیر ۲۰ سانتی‌متر بوده بنابراین طول مؤثر برابر با ۶۰ سانتی‌متر ($L=60$ cm) می‌باشد. به همین دلیل در نمونه اصلی که طول ۸۰ سانتی‌متر است، تکیه‌گاه‌ها به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از لبه تیر می‌باشند. در تیر به طول ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۵ سانتی‌متر، طول مؤثر باید ۱۵ سانتی‌متر باشد، بنابراین فاصله آزاد طرفین تکیه‌گاه تا لبه‌ی تیر ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشا- زیباکنار انجام شده است. زمانی که آزمایش دینامیکی (ضربه) انجام می‌شود، نیرو توسط بارسنج مدل DLM-01 ساخته شده توسط شرکت کاوش تجهیز کاسپین منطقه آزاد انزلی با ظرفیت بار ۳۰۰ کیلو نیوتن بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. بارسنج بخشی از سیستم اندازه‌گیری دینامیکی مورد استفاده بود که این سیستم شامل بارسنج، تقویت کننده و اسلیسکوپ با دقت ۱۰۰ گیگا سیمبل بر ثانیه می‌باشد که توانایی ثبت مقادیر نیرو و زمان را در طی فرایند دارد. بارسنج در زیر وزنه سقوط کننده قرار می‌گیرد. سرانجام با ضریب تبدیل $1\text{mv}=77\text{N}$ ، پاسخ ولتاژ-زمان به پاسخ نیرو-زمان تبدیل می‌گردد.



شکل ۷- دستگاه چکش پرتابه‌ای در آزمایشگاه

۵- بحث و بررسی نتایج

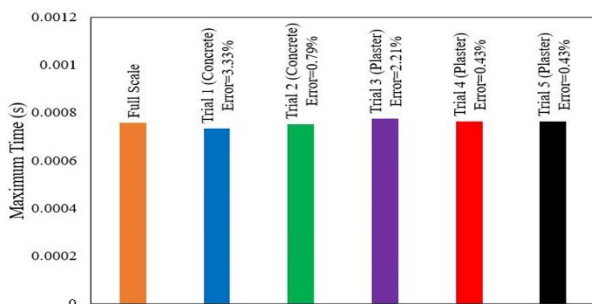
در این بخش ابتدا نمودار نیرو-زمان تیر بتنی اصلی با وزن پرتابه ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم به صورت نمونه در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است تا رفتار تیر بتنی تحت بارگذاری ضربه‌ای بررسی شود. همانطور که مشاهده می‌شود در بارگذاری ضربه‌ای تیر بتنی پس از رسیدن به نقطه حداکثر بار دچار شکست می‌گردد؛ بنابراین در نتایج ارائه شده در بخش بعدی بار تا مرحله حداکثر نیرو مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.



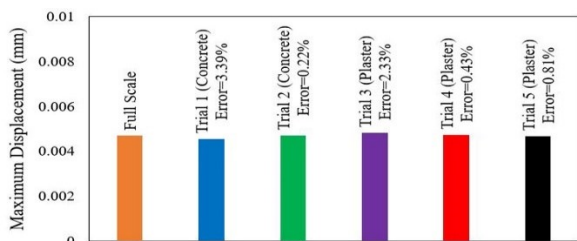
شکل ۸- منحنی نیرو-زمان تیر بتنی اصلی تحت وزنه ۲۰۰ کیلوگرمی.

باتوجه به محدودیت که در وزنه سقوط کننده براساس وزن بوده است، طراحی آزمایش به گونه‌ای صورت گرفت که وزن‌های پرتابه و سرعت ضربه‌زننده خارج از توان دستگاه چکش پرتابه و سیستم اندازه‌گیری دینامیکی نباشد. وزنه‌های 20×20 سانتی‌متر با ضخامت‌های مختلف که بر روی بارسنج با شعاع ۲۰ سانتی‌متری نصب می‌گردد که در لحظه سقوط بر روی یک میله از جنس فولاد مستحکم VCN200 در وسط تیر قرار دارد برخورد می‌کنند. همچنین تکیه‌گاه‌ها به صورت مفصلی و غلطکی بوده و از استاندارد ملی ایران

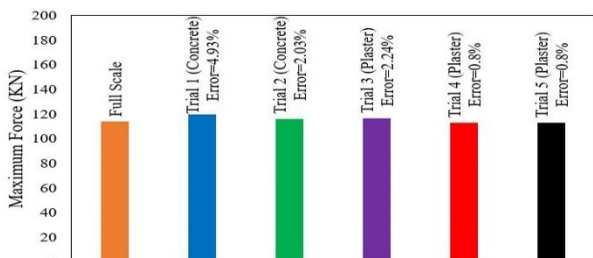
نمونه‌های آزمایشی ۴ و ۵ به میزان ۰/۴۳٪ می‌باشد. نشان داده شد که نمونه‌های گچ-سنگ قابلیت پیش‌بینی بهتری را برای پارامترهای تبدیل به نمونه اصلی دارا می‌باشند. شکل (۱۲) نحوه انتشار ترک و رفتار شکست برای نمونه‌های جدول (۵) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مسیر ترک خوردگی برای تمامی نمونه‌ها در وسط تیر و بر هم منطبق می‌باشد که نشان از تطابق خوب نتایج نمونه اصلی با نمونه‌های آزمایشی در نظر گرفته شده دارد.



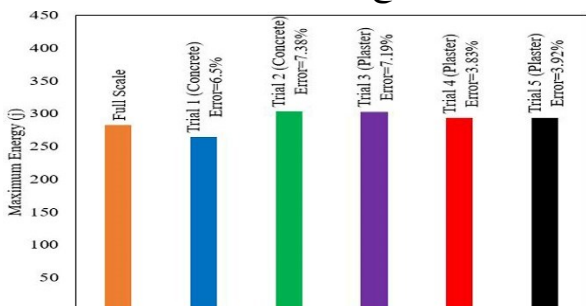
(الف) حداکثر زمان



(ب) حداکثر جابجایی

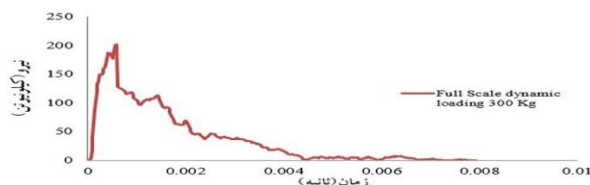


(ج) حداکثر نیرو



(د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

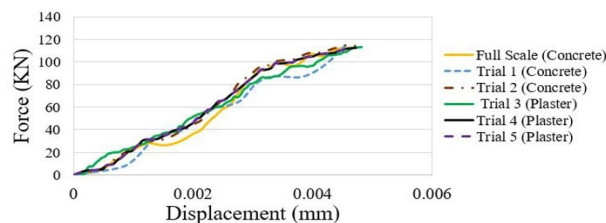
شکل ۱۱- خروجی‌های کلی نمونه‌ی اصلی و نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ برای جدول (۵).



شکل ۹- منحنی نیرو-زمان تیر بتنی اصلی تحت وزنه ۳۰۰ کیلوگرمی.

۱-۵- نتایج تیرهای بتنی و گچ-سنگ به روش تشابه محدود

در این بخش روش تشابه محدود با استفاده از جدول (۲) برای نمونه‌های تیر بتنی و تیرهای گچ-سنگ استفاده شد. همانطور که در جدول (۵) نشان داده شد نمونه‌ها به صورت نمونه بتنی اصلی، ۲ نمونه تیر بتنی و ۳ نمونه تیر گچ-سنگ تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از منحنی نیرو-جابجایی آن‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی نیرو-جابجایی براساس جدول (۵).

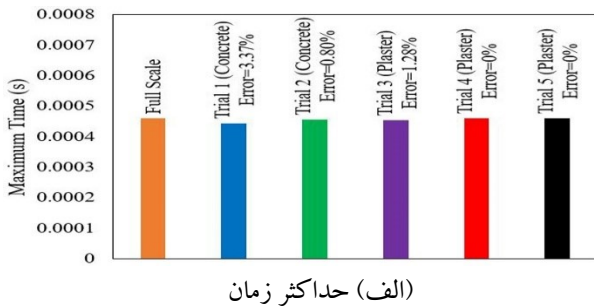
همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نمونه‌ها حاصل شده است. در واقع روش تشابه محدود با دقت بالایی می‌تواند نتایج حاصل از نمونه‌ها را پیش‌بینی نماید. همچنین میزان خطا برای هر نمونه نسبت به نمونه اصلی برای پارامترها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا کمتر از ۱۰٪ در مقایسه با نمونه اصلی بوده است. همچنین در حداکثر جابجایی کمترین خطا ۰/۲۲٪ متعلق به نمونه بتنی به دلیل تشابه مصالح با نمونه اصلی بوده است و پس از آن نمونه‌های گچ-سنگ آزمایشی ۴ و ۵ با خطاهای به ترتیب ۰/۴۳٪ و ۰/۸۱٪ در جایگاه کمترین خطا با نمونه اصلی قرار گرفتند. همچنین حداکثر نیرو، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان برای نمونه‌های آزمایشی ۴ و ۵ کمترین خطا را با نمونه اصلی به دنبال داشت. به صورتیکه در حداکثر نیرو این خطا برای هر دو نمونه آزمایشی ۴ و ۵ به میزان ۰/۸٪ نسبت به نمونه اصلی گزارش شد. در حداکثر جذب انرژی این خطا برای دو نمونه آزمایشی ۴ و ۵ به ترتیب ۳/۸۳٪ و ۳/۹۲٪ رسید و در حالت حداکثر زمان این خطا برای هر دو

آزمایشی ۴ و ۵) استفاده نمود. همچنین شکل (۱۵) نحوه انتشار ترک و رفتار شکست برای نمونه‌های جدول (۶) را نشان می‌دهد. میزان ترک خوردگی و انتشار ترک با توجه به افزایش جرم ضربه زنده افزایش یافته است. با این حال همانطور که مشاهده می‌شود مسیر ترک خوردگی برای تمامی نمونه‌ها در وسط تیر و بر هم منطبق می‌باشد که نشان از تطابق خوب نتایج نمونه اصلی با نمونه‌های آزمایشی در نظر گرفته شده دارد.

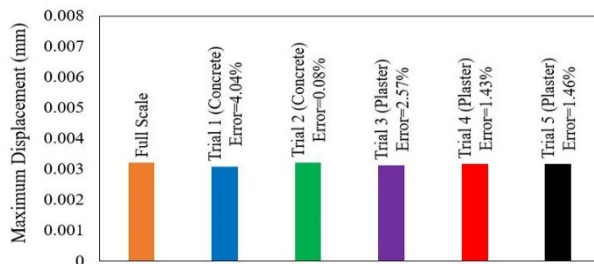


شکل ۱۲- انتشار ترک و رفتار شکست نمونه اصلی و نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ براساس جدول (۵).

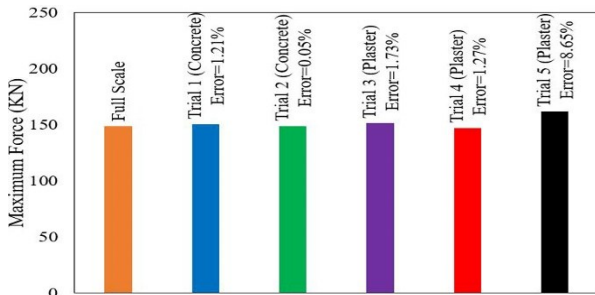
همانطور که پیش‌تر اشاره شد برای جدول (۵) روش مشابه محدود با دقت زیادی می‌تواند نتایج را برای نمونه‌های بتنی یا ماده مشابه نظیر گچ-سنگ پیش‌بینی نماید. منحنی نیرو-جابجایی برای جدول (۶) در شکل (۱۳) ارائه شده است



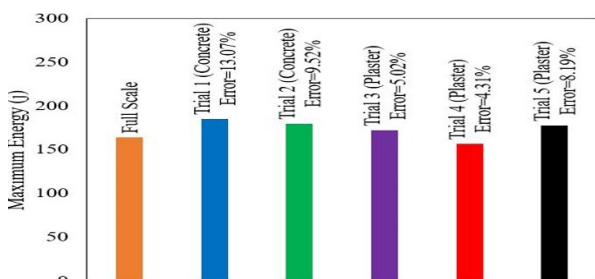
الف) حداکثر زمان



ب) حداکثر جابجایی

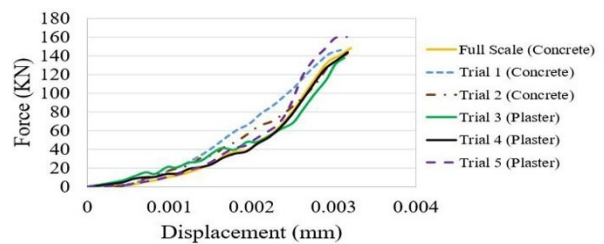


ج) حداکثر نیرو



د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

شکل ۱۴- خروجی‌های کلی نمونه اصلی و نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ برای جدول (۶).



شکل ۱۳- منحنی نیرو-جابجایی براساس جدول (۶).

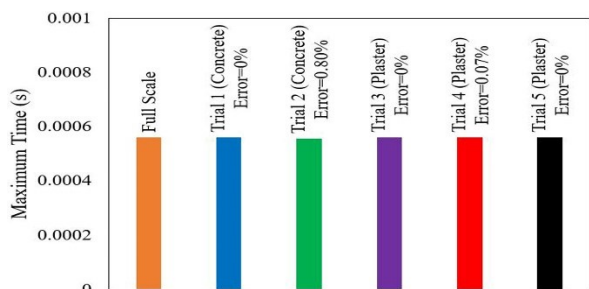
همچنین اختلاف حداکثر پارامترهای نظیر حداکثر نیرو، حداکثر جابجایی، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان برای نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ با نمونه اصلی در شکل (۱۴) ارائه گردید.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جرم ضربه زنده نتایج تغییر یافت به طوری که میزان خطا برای جذب انرژی در مقایسه با نمونه اصلی بیشتر شد و همچنین رفتار نمونه‌های آزمایشی برای هر پارامتر متغیر بود به گونه‌ای که در کمترین خطا در حداکثر میزان جابجایی نسبت به نمونه اصلی متعلق به نمونه آزمایشی ۲ به میزان ۰/۰۸٪ می‌باشد. در حالت حداکثر نیرو نیز نمونه آزمایشی ۲ که از بتن ساخته شده کمترین خطا را نسبت به نمونه اصلی به میزان ۰/۰۵٪ داشت. در خصوص حداکثر جذب انرژی کمترین خطا نسبت به نمونه اصلی متعلق به نمونه آزمایشی ۴ (گچ-سنگ) با طول ۶۰ سانتی‌متر بود. همچنین میزان خطا برای حداکثر زمان برای نمونه‌های آزمایشی ۴ و ۵ نسبت به نمونه اصلی صفر بدست آمد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان به این نتیجه پی برد که برای بررسی میزان حداکثر جابجایی و نیرو در حالت جرم پرتابه بیشتر نمونه‌های با همان مصالح نمونه اصلی قادر به پیش‌بینی بهتری می‌باشند، حال آنکه برای پارامترهایی نظیر حداکثر جذب انرژی و زمان می‌توان از نمونه‌های با ابعاد متوسط و کوچک گچ-سنگ (نمونه‌های

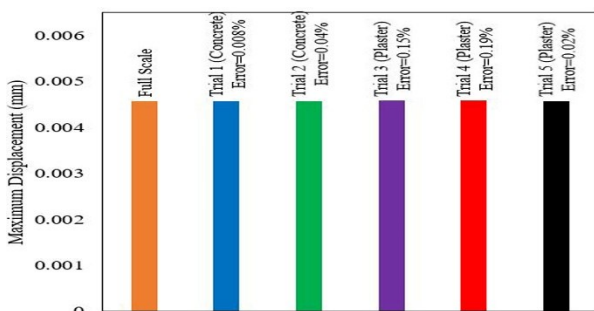
میزان ترک خوردگی و انتشار ترک با توجه به افزایش جرم ضربه زنده افزایش یافته است. مشاهده می شود که ترک خوردگی ها به بخش میانی تیرها و با حجم بیشتری رخ داده است که ناشی از شدت جرم پرتابه می باشد. با این حال تطابق خوبی بین مسیر ترک نمونه اصلی با نمونه های آزمایشی وجود دارد.



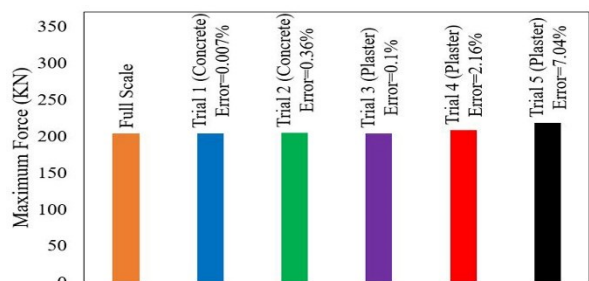
شکل ۱۵- انتشار ترک و رفتار شکست نمونه اصلی و نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ براساس جدول (۶).



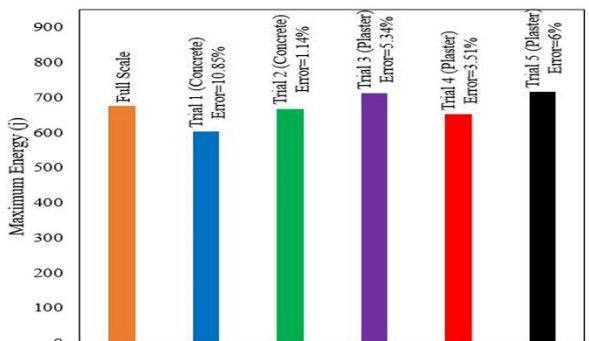
(الف) حداکثر زمان



(ب) حداکثر جابجایی



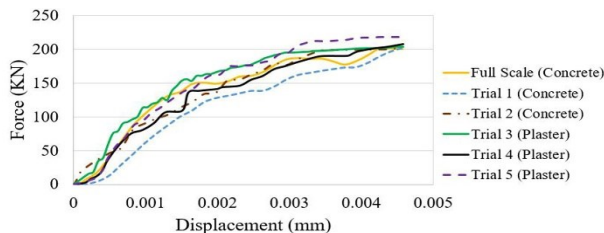
(ج) حداکثر نیرو



(د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

شکل ۱۷- خروجی های کلی نمونه اصلی و نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ برای جدول (۷).

در ادامه به بررسی منحنی نیرو-جابجایی برای جدول (۷) مطابق شکل (۱۶) پرداخته می شود.



شکل ۱۶- منحنی نیرو-جابجایی براساس جدول (۷).

همچنین اختلاف حداکثر پارامتری نظیر حداکثر نیرو، حداکثر جابجایی، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان برای نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ نسبت به نمونه اصلی در شکل (۱۷) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش جرم ضربه زنده میزان خطا برای نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ نسبت به نمونه اصلی کمتر از ۱۰٪ بوده که با دقت قابل قبولی پذیرش می شود. در حداکثر میزان جابجایی کمترین خطا نسبت به نمونه اصلی به نمونه های آزمایشی ۱، ۵ و ۲ به میزان ۰/۰۰۸٪، ۰/۰۲٪ و ۰/۰۴٪ می باشد که نشان می دهد همچنان نمونه های بتنی به دلیل یکپارچگی تطابق بهتری را نشان می دهند. در حالت حداکثر نیرو نمونه های آزمایشی ۱ و ۳ که بتن یا مقیاس متوسط و گچ-سنگ با مقیاس بزرگ می باشد به ترتیب اختلاف ۰/۰۰۷٪ و ۰/۱٪ را نسبت به نمونه اصلی نشان می دهند. در خصوص حداکثر جذب انرژی کمترین خطا نسبت به نمونه اصلی متعلق به نمونه آزمایشی ۲ (بتن) بود. همچنین میزان خطا برای حداکثر زمان برای تمامی نمونه های آزمایشی نسبت به نمونه اصلی صفر بدست آمد. با توجه به توضیحات ارائه شده می توان به این نتیجه پی برد که برای بررسی میزان حداکثر جابجایی و نیرو در حالت جرم پرتابه بیشتر نمونه های با همان مصالح نمونه اصلی قادر به پیش بینی بهتری می باشند. همچنین برای حداکثر زمان تطابق بسیار خوبی بین نمونه های آزمایش شده و اصلی وجود دارد. شکل (۱۸) نحوه انتشار ترک و رفتار شکست برای نمونه های جدول (۷) را نشان می دهد.

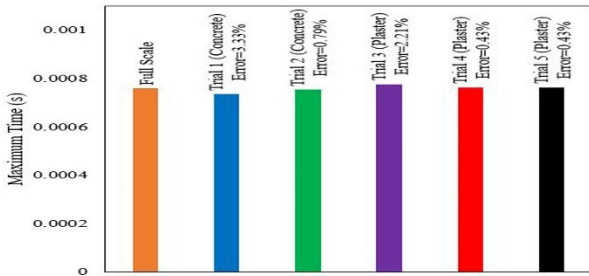
همانطور که در شکل های (۱۹) تا (۲۱) نشان داده شد، تحلیل ابعادی تنها می تواند برای نمونه ها با ماده مشابه نمونه اصلی مورد استفاده قرار گیرد و با تغییر ماده از بتن به گچ-سنگ تحلیل ابعادی نمی تواند پاسخ درستی را ارائه نماید. شکل (۲۲) خروجی های حاصل از حداکثر جابجایی، حداکثر نیرو، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان براساس تحلیل ابعادی برای جدول (۵) را نشان می دهد.



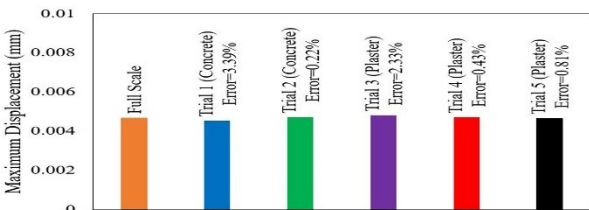
شکل ۱۸- انتشار ترک و رفتار شکست نمونه اصلی و نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ براساس جدول (۷).

۲-۵- نتایج تیرهای بتنی و گچ-سنگ با استفاده از تحلیل ابعادی

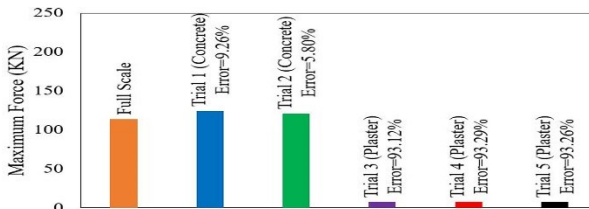
همانطور که قبلاً اشاره شد به منظور نشان دادن دقت و توانمندی روش تشابه محدود به نسبت تشابه ابعادی در این بخش نتایج با استفاده از روش تحلیل ابعادی نیز مورد بررسی قرار می گیرد تا امکان مقایسه این دو روش با یکدیگر وجود داشته باشد. در این بخش تحلیل ابعادی تمام نمونه های جدول (۵) تا (۷) نسبت به نمونه اصلی انجام پذیرفته است. شکل های (۱۹) تا (۲۱) منحنی نیرو-زمان بر مبنای تحلیل ابعادی تیرهای بتنی و گچ-سنگ را براساس جداول (۵) تا (۷) نشان می دهند.



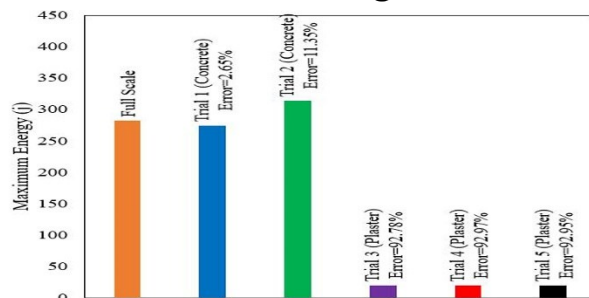
(الف) حداکثر زمان



(ب) حداکثر جابجایی



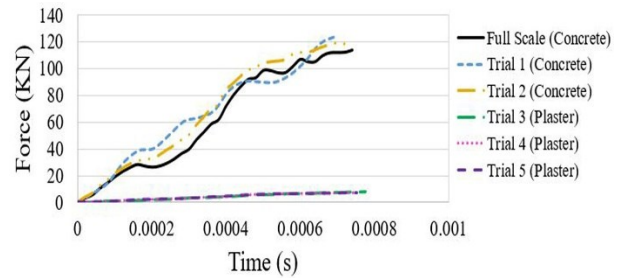
(ج) حداکثر نیرو



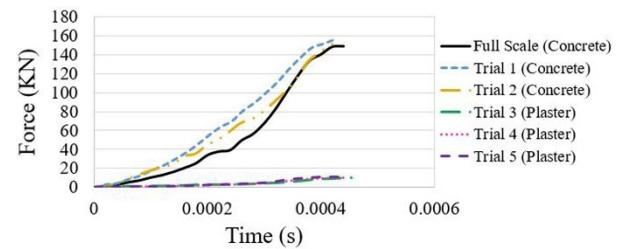
(د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

شکل ۲۲- خروجی های کلی نمونه اصلی و نمونه های آزمایشی ۱ تا ۵ براساس تحلیل ابعادی.

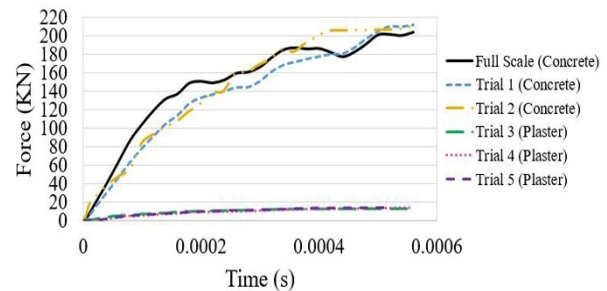
از نمودارهای شکل (۲۲) مشخص شد که تحلیل ابعادی می تواند پاسخ مناسبی را برای جابجایی و زمان حاصل نماید به طوری که حداکثر خطا در جابجایی ۳/۳۹٪ مربوط به نمونه آزمایشی ۱ و



شکل ۱۹- منحنی نیرو-زمان براساس جدول (۵).

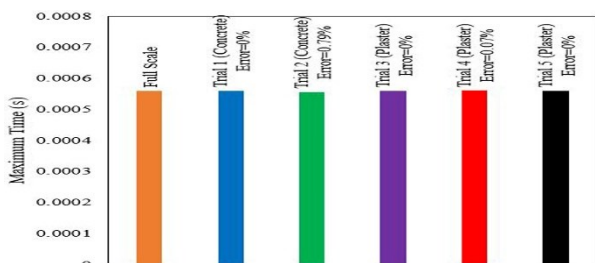


شکل ۲۰- منحنی نیرو-زمان براساس جدول (۶).



شکل ۲۱- منحنی نیرو-زمان براساس جدول (۷).

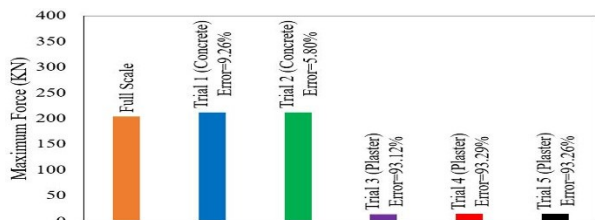
پاسخ مناسبی را برای جابجایی و زمان مطابق نتیجه قبلی حاصل نماید به گونه‌ای که حداکثر خطا در جابجایی ۴/۴٪ مربوط به نمونه آزمایشی ۱ و حداکثر خطا در زمان در نمونه آزمایشی ۱ و به میزان ۳/۳۷٪ می‌باشد. روند حداکثر نیرو و حداکثر جذب انرژی مانند قبل بوده و با تغییر ماده از بتن به ماده مشابه بتن نظیر گچ-سنگ میزان خطا تا حدود ۹۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین میزان خطا نمونه-های آزمایشی ۱ و ۲ نسبت به نمونه اصلی برای حداکثر نیرو به ترتیب ۵/۳۹٪ و ۳/۷۵٪ و برای حداکثر جذب انرژی اعداد قابل توجهی به ترتیب ۱۷/۷۳٪ و ۱۳/۵۷٪ می‌باشد. شکل (۲۴) خروجی‌های حاصل از حداکثر جابجایی، حداکثر نیرو، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان براساس تحلیل ابعادی برای جدول (۷) را نشان می‌دهد.



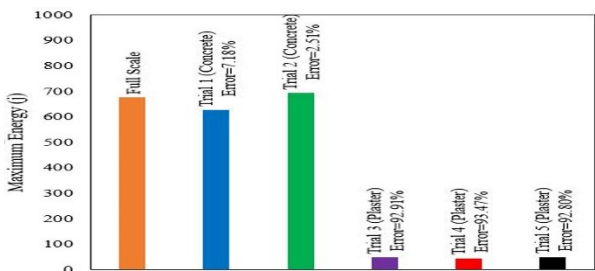
الف) حداکثر زمان



ب) حداکثر جابجایی



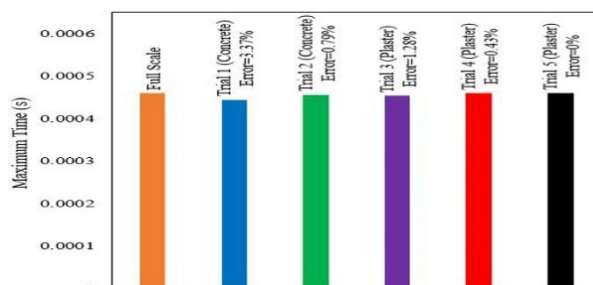
ج) حداکثر نیرو



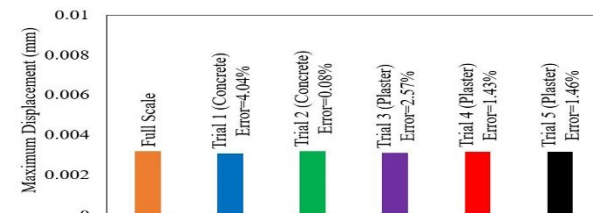
د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

شکل ۲۴- خروجی‌های کلی نمونه اصلی و نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ جدول (۷) براساس تحلیل ابعادی.

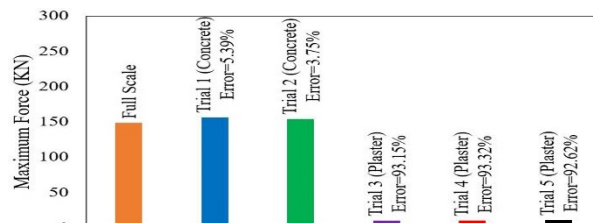
حداکثر خطا در زمان برای نمونه آزمایشی ۱ به میزان ۳/۳۳٪ می‌باشد. همچنین حداکثر نیرو و حداکثر جذب انرژی همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر ماده از بتن به ماده مشابه بتن نظیر گچ-سنگ نسبت به نمونه اصلی میزان خطا تا حدود ۱۰۰ درصد نشان داد. در حالی که میزان خطا نمونه‌های آزمایشی ۱ و ۲ نسبت به نمونه اصلی برای حداکثر نیرو و حداکثر جذب انرژی فراتر از ۱۲٪ نشده است. شکل (۲۳) خروجی‌های حاصل از حداکثر جابجایی، حداکثر نیرو، حداکثر جذب انرژی و حداکثر زمان براساس تحلیل ابعادی برای جدول (۶) را نشان می‌دهد.



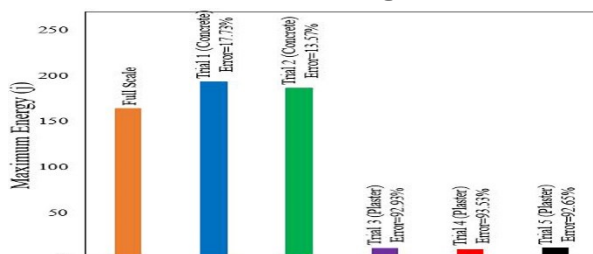
الف) حداکثر زمان



ب) حداکثر جابجایی



ج) حداکثر نیرو



د) حداکثر جذب انرژی قبل شکست

شکل ۲۳- خروجی‌های کلی نمونه اصلی و نمونه‌های آزمایشی ۱ تا ۵ جدول (۶) براساس تحلیل ابعادی.

از نمودارهای شکل (۲۳) مشخص می‌شود که تحلیل ابعادی می‌تواند

آمده از دقت قابل قبولی برخوردار است و درصد خطای حاصله در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۱۰٪ است.

- نتایج نشان داد که در روش تشابه محدود برای پیش‌بینی رفتار تیر بتنی در ابعاد اصلی می‌توان از ماده‌ی جایگزین مشابه همچون گچ-سنگ به جای بتن و در ابعاد کوچک‌تر نسبت به نمونه اصلی در آزمایش‌های تجربی استفاده نمود. این یک پیشرفت قابل توجه در بررسی تجربی سازه‌های بتنی است، زیرا آماده سازی نمونه‌های بتنی می‌تواند بیش از سه ماه طول بکشد، در حالی که نمونه‌های گچ-سنگ را می‌توان کمتر از یک هفته آماده کرد.

۷- منابع

- [1]. Gulkan, P., & Sozen, M.A. Inelastic responses of reinforced concrete structure to earthquake motions. Journal proceedings. Vol. 71. No. 12. 1974.
- [2]. Jones, N. Structural Impact, Cambridge: Cambridge University Press, Second Edition, pp. 479-510, 2012.
- [3]. Oshir R.E., & Alves M. Scaling impacted structures, Archive of Applied Mechanics, Vol. 74, No. 1-2, pp. 130-145, 2004.
- [4]. Alves M., & Oshiro R.E. Scaling the impact of a mass on a structure, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 7, pp. 1158-1173, 2006.
- [5]. Oshiro R.E., & Alves M. Scaling of cylindrical shells under axial impact, International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 89-103, 2007.
- [6]. Oshiro R.E., & Alves M. Scaling of structures subject to impact loads when using a power law constitutive equation, International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, No. 18-19, pp. 3412-3421, 2009.
- [7]. Trimiño L.F., & Cronin D.S. Non-direct similitude technique applied to the dynamic axial impact of bonded crush tubes, International Journal of Impact Engineering, Vol. 64, No. 2, pp. 39-52, 2014.
- [8]. Mazzariol L.M., Oshiro R.E., & Alves M., A method to represent impacted structures using scaled models made of different materials, International Journal of Impact Engineering, Vol. 90, No. 4, pp. 81-94, 2016.
- [9]. Alves M., & Oshiro R.E. Scaling impacted structures when the prototype and the model are made of different materials, International Journal of

از نمودارهای شکل (۲۴) مشخص می‌شود که تحلیل ابعادی می‌تواند پاسخ مناسبی را برای جابجایی و زمان مطابق نتایج قبل حاصل نماید به گونه‌ای که حداکثر خطا در جابجایی عددی بسیار ناچیز به میزان ۰/۱۹٪ مربوط به نمونه آزمایشی گچ-سنگ و حداکثر خطا در زمان در نمونه آزمایشی ۲ و به میزان ۰/۷۹٪ می‌باشد. حداکثر نیرو و حداکثر جذب انرژی با تغییر ماده از بتن به ماده مشابه بتن نظیر گچ-سنگ تا میزان خطا حدود ۹۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین میزان خطا نمونه‌های آزمایشی ۱ و ۲ نسبت به نمونه اصلی برای حداکثر نیرو به ترتیب ۹/۲۶٪ و ۵/۸۰٪ و برای حداکثر جذب انرژی اعداد قابل توجهی به ترتیب ۷/۱۸٪ و ۲/۵۱٪ برای نمونه آزمایشی ۱ و ۲ می‌باشد. این نشان می‌دهد که مطابق با حالت قبل برای نمونه‌های جدول (۷) وزن پرتابه می‌تواند تأثیر مناسبی بر جذب انرژی داشته باشد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق نظریه تشابه محدود برای پیش‌بینی ویژگی‌های پاسخ تیرهای بتنی و گچ-سنگ تحت بار دینامیکی به کار گرفته شد. این نظریه به روش تجربی برای تیرهای اصلی و کوچک ساخته شده از مواد مختلف بررسی شد. نمونه‌های آزمایشی در مقیاس کوچک با استفاده از ضرایب مقیاس گذاری ابعادی برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۷۵ برای بارگذاری دینامیکی در نظر گرفته شدند. همچنین آزمایش‌های دینامیکی با استفاده از پرتابه‌های به جرم ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر روی نمونه‌های اصلی از جنس بتن، دو نمونه با ابعاد متفاوت نسبت به نمونه اصلی از جنس بتن و سه نمونه از جنس گچ-سنگ با ابعادهای متفاوت نسبت به ابعاد نمونه اصلی انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- تحلیل ابعادی به دلیل وجود عواملی همچون غیرخطی بودن رفتارها در بارگذاری دینامیکی نمی‌تواند نتایج را با دقت لازم در مقایسه با نتایج آزمایشی پیش‌بینی کند. اما روش تشابه محدود به خوبی در رفتارهای غیرخطی، می‌تواند نتایج را برای ماده اصلی از نتایج آزمایشی نمونه‌های انجام شده پیش‌بینی نماید.
- صحت‌سنجی نتایج به دست آمده با استفاده از روش تشابه محدود برای نمونه‌های اصلی تحت بارگذاری دینامیکی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پاسخ بدست

Solids and Structures, Vol. 43, No. 9, pp. 2744-2760, 2006.

[10]. Ramu M., Raja V.P., & Thyra P.R., Establishment of structural similitude for elastic models and validation of scaling laws, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 139-144, 2013.

[11]. Mazzariol L.M., & Alves M., Experimental study on scaling of circular tubes subjected to dynamic axial crushing using models of different materials, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Brazil, November 3-7, 2013.

[12]. Sadeghi H., Alitavoli M., & Darvizeh A., Finite similitude in high rate dynamic behavior of structures under impact loads, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 263-274, 2018. (In Persian)

[13]. Davey K., Darvizeh R., & Al-Tamimi A., Scaled metal forming experiments: a transport equation approach, International Journal of Solids and Structures, Vol. 125, No. 10, pp. 184-205, 2017.

[14]. Sadeghi H., Davey K., Darvizeh, R., & Darvizeh A., Scaled models for failure under impact loading. International Journal of Impact Engineering, 129, pp.36-56, 2019.

[15]. Davey, K., Sadeghi, H., Darvizeh, R., Golbaf, A. and Darvizeh, A., A finite similitude approach to scaled impact mechanics. International Journal of Impact Engineering, 148, p.103744, 2021.

[16]. Zhang J., Davey K., Darvizeh R., & Sadeghi H., A two-experiment approach to physical modelling: damage and failure under high-rate loading. Thin-Walled Structures, 179, p.109589, 2022.

[17]. Darvizeh R., & Davey K., A transport approach for analysis of shock waves in cellular materials, International Journal of Impact Engineering, Vol. 82, No. 8, pp. 59-73, 2015.

[18]. Darvizeh R., & Davey K., Non-physical finite element method: multiple material discontinuities, Computers and Structures, Vol. 164, No. 2, pp. 145-160, 2016.

[19]. Sadeghi, H., Davey, K., Darvizeh, R., & Darvizeh, A. A scaled framework for strain rate sensitive structures subjected to high rate impact loading. International Journal of Impact Engineering, 125, pp. 229-245, 2019.

Experimental and Theoretical analysis of Concrete beams behavior under Dynamic loading by introducing Finite Similitude approach

Ali Momeni Amirkandeh

PhD student, Department of Mechanical Engineering, Bandar Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran.

Ali Alijani *

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Bandar Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran.

Sina Gohari Rad

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

Abstract

Dimensional analysis methods have shortcomings in predicting the behavior of full-scale samples using small-scale results due to non-linearity of behavior, loading, or changes in material type, the inability to simultaneously predict two parameters with the same unit, and a limited number of independent degrees of freedom are independent. Recently, a new theory called Finite Similitude has been proposed to solve these problems, and in this article, using this theory to analyze the prediction of the dynamic behavior of concrete beams using the results of concrete beams on a smaller scale and beams with similar behavior to concrete (plaster-stone) under dynamic impact loading has been discussed. The predicted results such as force, displacement, energy, and time show that the dimensional analysis of the results with different materials is not accurate enough and in some cases, the difference in the results is more than 50%. However, with the finite similitude method, the behavior of full-scale concrete beams can be predicted by using small-scale plaster-stone samples with less cost, reduced construction time, and high accuracy, so that the error percentage in dynamic analysis in all samples is almost less than 10% was achieved.

Keywords: Finite Similitude, Concrete Beams, Dynamic loading, Experimental and Theoretical method.

* Corresponding: ali.aliyani@iaiu.ac.ir