

بررسی اثر انفجار بر سازه‌های بتن مسلح

احمد اسدی جعفری^۱، سیدامیرالدین صدرنژاد^۲، امیر ساعدی داریان^۳، حسام‌الدین بهرامپور^۱

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۳/۳۰

چکیده

یکی از مواردی که در اصل پدافند غیر عامل همواره وجود دارد بحث مقاومت‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری است. اولین گام در مسیر نیل به این هدف، شناخت و مدل‌سازی اثرات انفجار بر سازه می‌باشد. مناسب‌ترین و کم هزینه‌ترین روش مدل‌سازی و تحلیل اثرات انفجار بر سازه‌ها حل مسایل انفجار به کمک شبیه‌سازی‌های عددی است. حل مسایل انفجار آزاد و یا انفجار همراه با ترکش، در کل به صورت بارهای دینامیکی شدید که از ضربه یا انفجار ناشی شده و در مدت چند میکروثانیه به وقوع می‌پیوندد مشخص می‌شوند. بنابراین، در شبیه‌سازی‌های عددی، انتشار موج را باید بتوان به خوبی شبیه‌سازی نمود. مساله مکانیک پیوسته عمومی مورد استفاده برای شبیه‌سازی چنین پدیده‌هایی براساس معادلات موازنه جرم، اندازه حرکت و انرژی در واکنش‌هایی است که رفتار مواد را تشریح می‌کنند. با توجه به این که معادلات دارای مشتقات پاره‌ای غیرخطی است، راه‌حل‌های تحلیلی اغلب قابل استفاده نیستند؛ زیرا ورودی‌ها و مقادیر اولیه مساله بسیار پیچیده می‌باشند. تکنیک‌های عددی تنها روش‌هایی هستند که برای دستیابی به راه‌حل‌های کامل در دسترس هستند. در حال حاضر چندین هیدروکد برای چنین شبیه‌سازی‌هایی استفاده می‌شوند. هر کد ویژگی‌هایی دارد که آن را منحصر به فرد می‌گرداند؛ اما هیچ کد یا روش عددی را نمی‌توان در تمام موارد بر دیگر کدها یا روش‌ها برتری داد. در این تحقیق به منظور نشان دادن توانایی و دقت بالای روش‌های عددی در چنین مدل‌سازی‌هایی ضمن بررسی دقیق الگوهای مورد استفاده و معادلات حاکم بر حل آنها به کمک نرم‌افزار توانمند LS-DYNA شبیه‌سازی عددی عکس‌العمل سازه بتنی تحت اثر بار انفجاری صورت گرفته است.

کلیدواژه‌ها: LS-DYNA، سازه بتنی، پدافند غیرعامل، اندرکنش موج انفجار، حل عددی

۱- کارشناس ارشد سازه

۲- استاد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی E-mail: amir_saedi_d@yahoo.com

۱- مقدمه

کشور مهاجم جهت در هم شکستن اراده ملت و توان سیاسی، اقتصادی و نظامی کشور مورد تهاجم با اتخاذ استراتژی انهدام مراکز ثقل (Enter of Gravity) توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی، حساس و مهم می‌نماید. لذا عنایت به این موضوع اهمیت توجه به بحث مقاوم‌سازی سازه‌های مهم در برابر انفجار را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

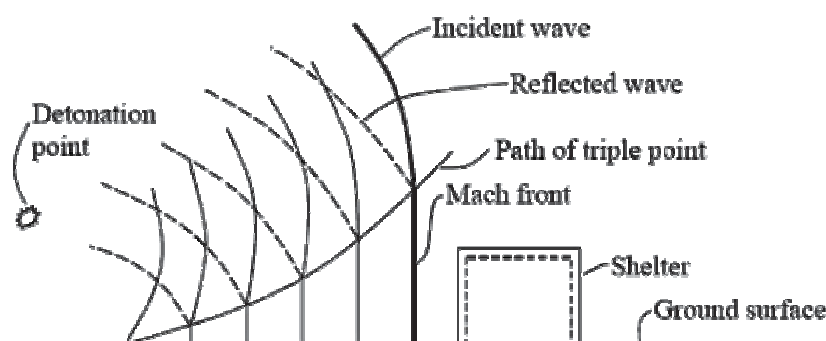
۲- مبانی انفجار، نظریه موج انفجار، شوک و تنش

به‌منظور درک رفتار سازه‌های بتنی در معرض بارگذاری شدید ناشی از سلاح‌های نظامی، می‌بایست ابتدا طبیعت و فیزیک انفجارها و تولید موج انفجار و انعکاس آن از یک بمب درک گردد. هنگام برخورد موج انفجار به یک سطح بتنی، یک موج شوک درون بتن گسترش پیدا می‌کند. دو روش برای بیان پاسخ وجود دارد: روش اویلری (مبداء ثابت در فضا - نظریه موج شوک بر پایه‌ی بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی) و روش لاگرانژی (مبداء متحرک - نظریه‌ی موج تنش بر اساس معادلات موج کلاسیک حرکت با لحاظ تعادل و سازگاری) [۱-۳].

۲-۱- انفجار در هوا و موج انفجار

در شرایط انفجار در هوا، موج انفجار در اثر برخورد با زمین منعکس می‌شود. این امواج با امواج برخوردی در هم آمیخته و یک جبهه ماخ ایجاد می‌نماید. نقطه تلاقی سه جبهه‌ی موج رخداد، موج انعکاس و جبهه‌ی ماخ به عنوان نقطه‌ی سه‌گانه شناخته می‌شود (شکل ۱).

تاریخ زندگی بشر همواره با موضوع جنگ همراه بوده است. این واقعیت به قدری تأثیرگذار بوده که به‌عنوان یک پدیده اجتماعی پذیرفته شده و جامعه‌شناسان بخشی از تحقیقات خود را پیرامون آن و تأثیراتی که بر زندگی انسان‌ها می‌گذارد اختصاص داده‌اند. در این راستا بحث دفاع غیر عامل یا همان پدافند غیرعامل با مفهوم کلی دفاع در برابر تهاجم، بدون استفاده از سلاح و درگیر شدن مستقیم، سابقه‌ای بس طولانی در تاریخ بشری به قدمت خلقت انسان دارد. انجام اقدامات دفاع غیرعامل در جنگ‌های امروزی در جهت مقابله با تهاجمات دشمن و تقلیل خسارات ناشی از حملات زمینی، هوایی و دریایی مهاجم، موضوع بنیادی است که وسعت و گستره آن تمامی زیر ساخت‌های کلیدی، مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیر نظامی کشور نظیر: پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، بنادر، فرودگاه‌ها، مجتمع‌های بزرگ صنعتی، قرارگاه‌ها و مراکز عمده فرماندهی نظامی، هدایت، تصمیم‌گیری‌های سیاسی، مراکز اصلی مخابراتی و ارتباطی، پل‌های استراتژیک، صنایع نظامی، پایگاه‌های هوایی، سایت‌های موشکی، مراکز و ایستگاه‌های رادیویی و تلویزیونی، انبارهای عمده مواد غذایی و دارویی، مراکز جمعیتی و قرارگاه‌های تاکتیکی، مقرهای عمده آمادگی و پشتیبانی، زاغه‌های مهمات و نفرات و... را در برمی‌گیرد. تجارب حاصله از جنگ‌های گذشته به خصوص هشت سال دفاع مقدس، جنگ ۴۳ روزه در سال ۱۹۹۱ متحدین علیه عراق (جنگ اول خلیج فارس)، جنگ ۱۱ هفته‌ای سال ۱۹۹۹ ناتو علیه یوگسلاوی، جنگ ۲۰۰۳ آمریکا و انگلیس علیه عراق و جنگ ۳۳ روزه اخیر اسرائیل علیه لبنان موید این نظر است که



شکل ۱- محیط انفجار ناشی از انفجار هوایی

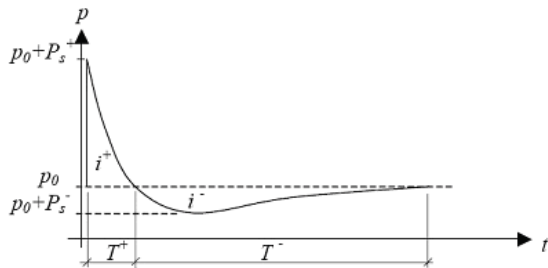
$$p(t) = p_s \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{bt}{T_s} \right\} \quad (۴)$$

b یک مقدار ثابت است (پارامتر شکل موج)، که تابعی از فشار بیشینه p_s می‌باشد. تاریخچه زمانی فشار به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود. دوره‌ی زمانی فاز منفی به مراتب در قیاس با فاز مثبت بیشتر می‌باشد. و T_s مدت زمانی است که فشار در فاز منفی قرار دارد.

۲-۳- موج شوک

موج شوک در واقع سطح جداکننده مواد متحرک و مواد ساکن می‌باشد. وقتی که نیرویی به سطحی از مواد اعمال می‌شود، مواد مجاور آن سطح به حرکت در می‌آیند؛ در حالی که مواد دورتر از آن سطح هنوز ساکن هستند. بنابراین مواد در حرکت فشرده می‌شوند و فضای کمتری را نسبت به حالت اولیه اشغال می‌کنند. در آزمایشات معمول وقتی نیرو به جسم فلزی اعمال می‌شود جسم فلزی به‌صورت جسم صلب رفتار می‌کند و جسم نیز به همان اندازه‌ای که نیرو حرکت می‌کند، جابجا می‌شود. در واقع در این اجسام سرعت صوت و سرعت موج شوک بسیار زیاد است و فاصله تاخیر اعمال نیرو بر جسم و حرکت انتهای دیگر جسم به راحتی قابل مشاهده نیست. در واقع تنها در زمانی که این فاصله تاخیر بسیار مهم است یا تراکم مواد قابل توجه است و یا وقتی که تغییر شکل مواد زیاد است، احتیاج است که موج شوک مورد بررسی قرار گیرد.

$$p - p_0 = \rho_0 (\dot{C}u + su^2 + q_s u^2) \quad (۵)$$



شکل ۲- تاریخچه زمانی فشار حاصل از یک انفجار

سرعت جبهه‌ی موج انفجار U_s ، چگالی هوای پشت جبهه ρ_s و بیشینه فشار دینامیکی q_s ، به‌صورت زیر ارایه گردیده است.

$$U_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \cdot a_0 \quad (۱)$$

$$\rho_s = \frac{6p_s + 7p_0}{p_s + 7p_0} \cdot \rho_0 \quad (۲)$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \quad (۳)$$

در حالی که

p_s حداکثر فشار افزوده استاتیک

p_0 فشار هوای محیط قبل از موج

ρ_0 چگالی هوای محیط قبل از موج

a_0 سرعت انتشار صوت در هوا در فشار محیط

روابط فوق مربوط به انفجارهای درون فضای باز و دور از هر سطح بازتابی می‌باشد و معمولاً تحت عنوان انفجارهای هوایی گروه طبقه‌بندی می‌شوند. هنگامی که سعی می‌کنیم مقدار فشار افزوده تولید شده توسط انفجار مواد منفجره یا تسلیحات هسته‌ای را در تماس با زمین محاسبه نماییم، اصلاحاتی باید صورت گیرد تا اثرات را اعمال کند. ارتباط مناسبی میان انفجارهای روی سطح مواد منفجره متراکم با داده‌های انفجار در فضای باز حاصل می‌گردد؛ اگر، ضریب افزایشی برابر ۱/۸ در نظر گرفته شود. به بیان دیگر انفجارهای روی سطح، امواج انفجاری‌ای تولید می‌کنند که مشابه آنچه از انفجار در هوای باز رخ می‌دهد با ۱/۸ برابر منبع انرژی واقعی، می‌باشد. لازم به ذکر است، در صورتی که زمین یک بازتاب‌دهنده‌ی عالی بود و هیچ انرژی در اثر ایجاد حفره و موج زمینی تلف نمی‌گردید، ضریب بازتاب معادل (۲) می‌شد.

۲-۲- نمودار فشار

تاریخچه زمانی فشار موج انفجار عموماً به‌صورت تابع نمایشی مانند معادله فردلندر^۱ که به‌صورت زیر می‌باشد، بیان می‌گردد.

1- Friedlander

مربوط به توزیع فشار ایجاد شده ناشی انفجار می‌باشد. در اغلب موارد برای تولید توزیع فشار، از یک برنامه‌ی ثانویه استفاده می‌شود. نتایج حاصل از برنامه‌ها را می‌توان به یک فشار میانگین معادل تبدیل نمود. آن‌گاه به‌منظور تعیین نیروی وارد بر سیستم، فشار میانگین در مساحت تحت اثر فشار ضرب می‌شود. اگرچه سیستم‌های SDOF نتایج مناسبی را تولید می‌کنند، اما تحلیل‌گر می‌بایست نسبت به نتایج به‌دست آمده محتاط و مراقب باشد؛ چرا که این سیستم تنها قابلیت تولید اطلاعات کلی از عملکرد عضو را دارند و اگر منظور از انجام تحلیل دستیابی به اطلاعات دقیق تری از فرضاً خرابی و یا تغییر شکل‌ها باشد این سیستم کارایی ندارد.

۳-۲- برنامه‌های تجربی

برنامه‌های تجربی اغلب به‌جهت زمان اجرا سریع بوده و توانایی بالایی در ارزیابی تحلیل دقیق انفجار و اندرکنش سازه، در مقایسه با سیستم‌های SDOF دارند. به‌منظور ارزیابی معادلات مورد نیاز برای استفاده در برنامه‌های تجربی از داده‌های نظری و آزمایشگاهی بهره گرفته می‌شود. این امر به نرم‌افزار امکان تولید نتایج دقیق تر را می‌دهد.

۳-۳- هیدروکدها

هیدروکدها برنامه‌های تحلیلی کاملاً اختصاصی مورد استفاده برای ارزیابی رخدادهای دینامیکی و ضربه از قبیل برخورد یا انفجار هستند. این برنامه‌ها به محققین امکان می‌دهند تا نتایج عددی جزئی و دقیق مانند تنش‌های ماده، تغییر شکل و خرابی را به همراه تولید و توزیع امواج فشار ناشی از انفجار به‌دست آورند. هیدروکدها برپایه‌ی سه اصل بنیادی که در سطح میکروسکوپی مورد ارزیابی واقع می‌شوند، یعنی بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی، استوار است. با توجه به کاربرد این قوانین و استفاده از یک معادله حالت و الگوی ساختاری، برنامه قادر به برآورد عملکرد یک ماده خواهد بود. معادله حالت، یک روش نشان دادن اثر فشار بر چگالی و انرژی داخلی است در حالی که الگوی ساختاری، رابطه‌ی میان تنش و کرنش برای ماده‌ی مورد نظر می‌باشد. عوامل دیگری از قبیل نرخ کرنش، سخت‌شدگی و اثرات وابستگی به دما نیز می‌تواند در الگوی ساختاری لحاظ گردد. در این تحقیق از هیدروکد LS-DYNA که از معروف‌ترین و توانمندترین هیدروکدهای موجود است استفاده شده است.

که در این رابطه s شیب منحنی تنش کرنش ماده و \hat{C} سرعت انتشار موج می‌باشد. این منحنی، مکان هندسی تمام حالات ممکن برای موج شوک در استحکام‌های متفاوت می‌باشد. به این منحنی، منحنی هوگونیت گفته می‌شود.

۳- شیب‌سازی عددی انفجار

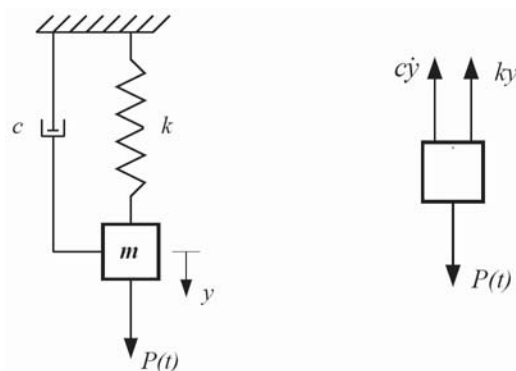
اکثر نرم‌افزارهای مورد استفاده برای مدل‌سازی و تحلیل اثر انفجار در یکی از سه دسته زیر قابل تقسیم‌بندی می‌باشد: سیستم‌های یک‌درجه آزادی ساده (SDOF)، برنامه‌های تجربی و یا هیدروکدها.

۳-۱- سیستم‌های یک‌درجه آزادی

سیستم‌های یک‌درجه آزادی (SDOF)، سریع‌ترین و ساده‌ترین روش تحلیل چگونگی اثر بارگذاری انفجار بر یک سازه می‌باشند. در این سیستم‌ها فرض بر این است که تنها در یک راستا آزادی حرکت وجود دارد؛ یعنی یک‌درجه آزادی. حال می‌تواند این یک‌درجه آزادی، انتقال و یا دورانی حول یک محور باشد.

ساده‌ترین شکل یک سیستم یک‌درجه آزادی شامل یک جرم، فنر و میراگر است، که در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (۶)$$



شکل ۳- ساده‌ترین حالت یک سیستم یک‌درجه آزادی

در این رابطه، m جرم سوژه، k سختی فنر و c میراگر لزوج می‌باشد. نیروی خارجی اعمال شده تابعی از زمان بوده و با $P(t)$ نمایش داده شده است. در تحلیل انفجار، نیروهای وارد بر سازه

$$F_2 = \beta = \frac{1-V}{1-V_{CJ}} \quad (10)$$

که در آن V_{CJ} نسبت حجمی Chapman-Jouguet و t زمان در لحظه است. در صورتی که F از ۱ تجاوز نماید، مقدار آن برابر ۱ قرار داده می‌شود. در این محاسبات، نسبت سوختن عموماً نیاز به چندین گام زمانی برای رسیدن به واحد دارد، در نتیجه جبهه‌ی سوختن روی اجزاء متعددی گسترش می‌یابد. پس از رسیدن به واحد، F ثابت نگاه داشته می‌شود. این محاسبات نسبت سوختن برپایه‌ی مطالعات Wilkins 1964 و Giroux 1973 حاصل شده است.

۲-۴- الگوی بتن CONCRETE_DAMAGE

الگوی ماده CONCRETE_DAMAGE یک الگوی مناسب، توانمند و توسعه یافته از الگوی ماده PSEUDO_TENSOR می‌باشد. این الگوی ماده یکی از بهترین گزینه‌ها برای تحلیل سازه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری‌های تکانشی می‌باشد. یکی از مواردی که بایستی مشخص شود نحوه تعریف گسیختگی ماده در این الگو است. صفحات گسیختگی حد نهایی تنش انحرافی در فشارهای هیدرواستاتیک مختلف می‌باشند و در الگو ماده CONCRETE_DAMAGE تعریف این صفحات گسیختگی بر اساس عواملی مانند مقاومت کششی تک محوره و منحنی تنش فشاری صورت می‌گیرد. الگوی سه بعدی پوش گسیختگی که در واقع فاصله هر نقطه دلخواه روی این پوش تا محور فشار هیدرواستاتیک می‌باشد توسط رابطه زیر تعریف می‌گردد [۴].

$$\frac{r}{r_c} = \frac{2(1-\psi^2)\cos\theta + (2\psi-1)\sqrt{4(1-\psi^2)\cos^2\theta + 5\psi^2 - 4\psi}}{4(1-\psi^2)\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} \quad (11)$$

که در آن $\psi(p) = \frac{r_t}{r_c}$ برابر فاصله نسبی بین نمودارهای کشش و فشار و $\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}}$ می‌باشد. این الگو از قانون جاری شدن با حجم ثابت prandtl-Reuss که در آن جاری‌شدگی خمیری از محور فشار هیدرواستاتیک شروع و به صورت دایره‌ای منتشر می‌شود، تبعیت می‌کند.

۴- مروری بر الگوسازی عددی رفتار مواد

همانطور که اشاره شد از مهمترین بخش‌های مدلسازی اثر انفجار بر سازه‌ها بحث انتخاب و تعیین الگوی مواد می‌باشد. در ادامه، الگوی ماده منفجره و همچنین بتن استفاده شده در این تحقیق به صورت مفصل ارایه شده است.

۱-۴- الگوی ماده منفجره

TNT – (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)

در این نرم‌افزار از الگوی ماده منفجره به‌منظور شبیه‌سازی انفجار استفاده شده است. به‌طور کلی می‌بایست مواردی از قبیل چگالی جرمی، سرعت انفجار، فشار CJ، نمایه‌ی سوختن بتا^۲، مدول حجمی^۳، مدول برشی و تنش تسلیم به الگو اعمال گردد. در استفاده از این الگو لازم است توجه شود که رهاسازی انرژی شیمیایی برای شبیه‌سازی انفجارها، به‌واسطه‌ی نسبت سوختن^۴ F ، که در معادله حالت مواد منفجره ضرب می‌شود، کنترل می‌گردد [۴].

$$p = F p_{eso}(V, E) \quad (7)$$

که در آن p_{eos} ، فشار و V حجم نسبی و E چگالی انرژی اولیه در واحد حجم اولیه می‌باشد. در مرحله آغازش، یک زمان جرقه‌زنی t_1 ، برای هر جزء با تقسیم فاصله از نقطه‌ی انفجار تا مرکز جزء بر سرعت انفجار D ، محاسبه می‌گردد. در صورتی که نقاط انفجار متعددی تعریف شده باشد، نزدیک‌ترین نقطه، تعیین‌کننده‌ی t_1 خواهد بود. نسبت سوختن برابر بیشینه‌ی ذیل در نظر گرفته می‌شود.

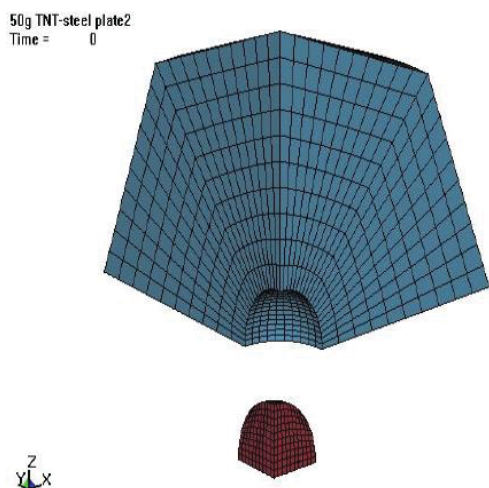
$$F = \max(F_1, F_2) \quad (8)$$

که

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t-t_1)DA_{\max}}{3v_e} & \text{if } t > t_1 \\ 0 & \text{if } t \leq t_1 \end{cases} \quad (9)$$

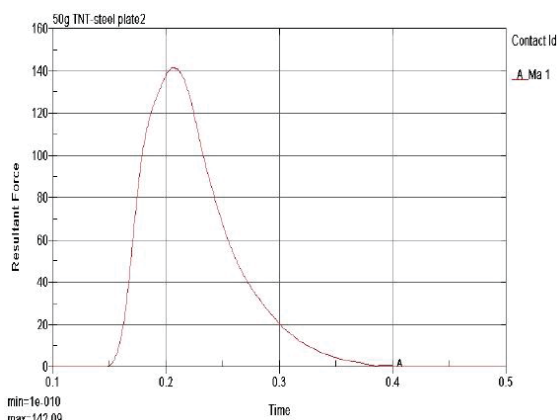
- 1- Chapman-Jouget pressure
- 2- Beta burn flag
- 3- Bulk modulus
- 4- Burn Fractions

در شکل (۵) نحوه مدل‌سازی و شبکه‌بندی خرج و هوا مشاهده می‌شود.



شکل ۵- جزئیات شبکه‌بندی خرج و هوا در ناحیه‌ی تماس

در نمودار شکل (۶) نیروی حاصل از خرج وارد بر صفحه مشاهده می‌شود.



شکل ۶- نیروی کل روی صفحه، ناشی از ۵۰ gr TNT

در نمودار شکل (۷) نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان اختلاف بین نتایج در محدوده تقریب مهندسی بوده و می‌توان آن را پذیرفت. لازم به ذکر است علت وجود نویز در نتایج تحلیلی به علت ویژگی‌های خاص حل گر نرم‌افزار می‌باشد که معادلات را به صورت ضمنی حل می‌کند و می‌توان به کمک فیلترهای مناسب نتایج را فیلتر کرده و نویز آن را برطرف نمود.

$$f(p, \eta) = \sqrt{3J_2} - Y \quad (12)$$

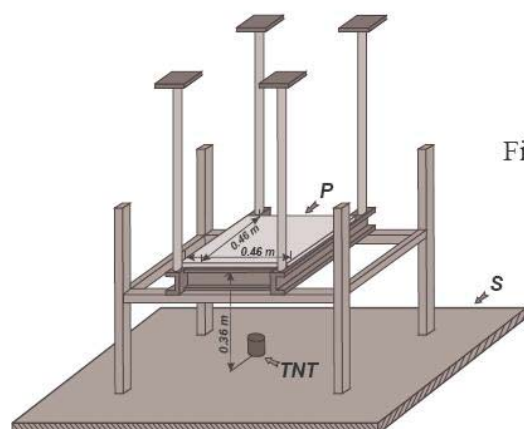
که در آن Y موقعیت فعلی پوش مقاومت در فضای تنش سه بعدی می‌باشد.

۵- اعتبارسنجی روش مورد استفاده جهت مدل‌سازی انفجار

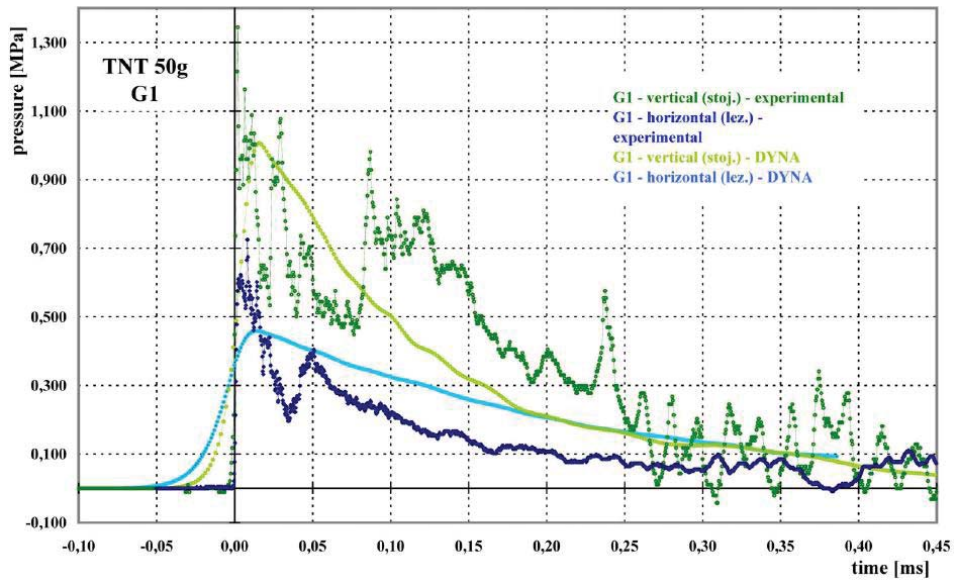
به‌منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی و تحلیل‌ها و با توجه به کمبود اطلاعات مربوط به آزمایشات انفجار بر روی سازه‌های بتنی در ادامه، ابتدا نتایج حاصل از مدل‌سازی اثر انفجار بر روی صفحه فولادی با یک نمونه آزمایشگاهی که توسط مؤسسه‌ی صنعت تسلیحات دانشگاه صنعتی ارتش لهستان انجام شده مقایسه شده است.

۵-۱- هندسه‌ی آزمایش

صفحه‌ی چهارگوش به ابعاد 50×50 سانتیمتر مربع در شرایط خاصی که در شکل (۴) مشاهده می‌شود ثابت نگاه داشته شده است. صفحه‌ی تحت بار قرار گرفته دارای ابعاد 46×46 سانتیمتر مربع می‌باشد. موج انفجار به‌واسطه‌ی ترکیدن یک خرج استوانه‌ای TNT به مقدار 50 گرم تولید می‌شود. خرج روی یک صفحه‌ی سنگین فولادی در فاصله‌ی 36 سانتیمتری زیر صفحه‌ی در حال آزمایش قرار گرفته است. فیوز معادل $65/1$ گرم TNT از لحاظ انرژی به‌منظور شروع انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

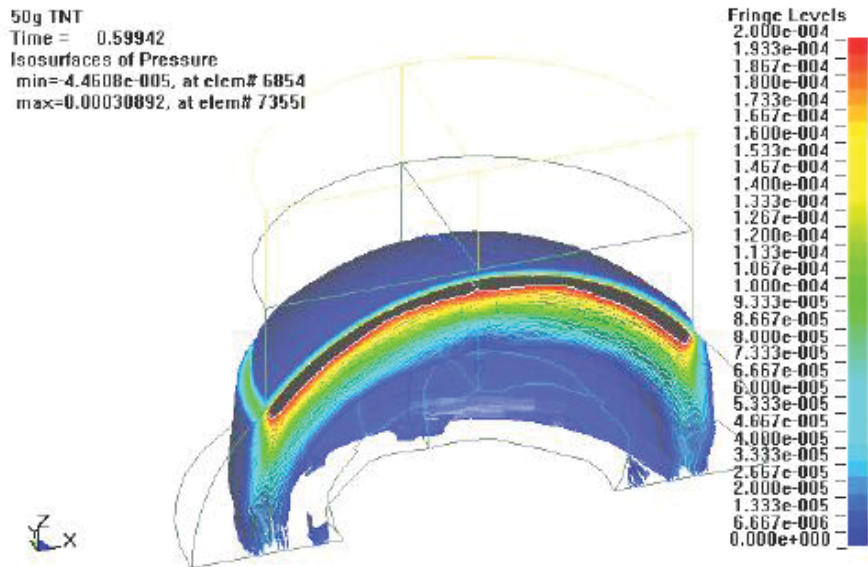


شکل ۴- وضعیت کلی قرارگیری اجزاء آزمایش

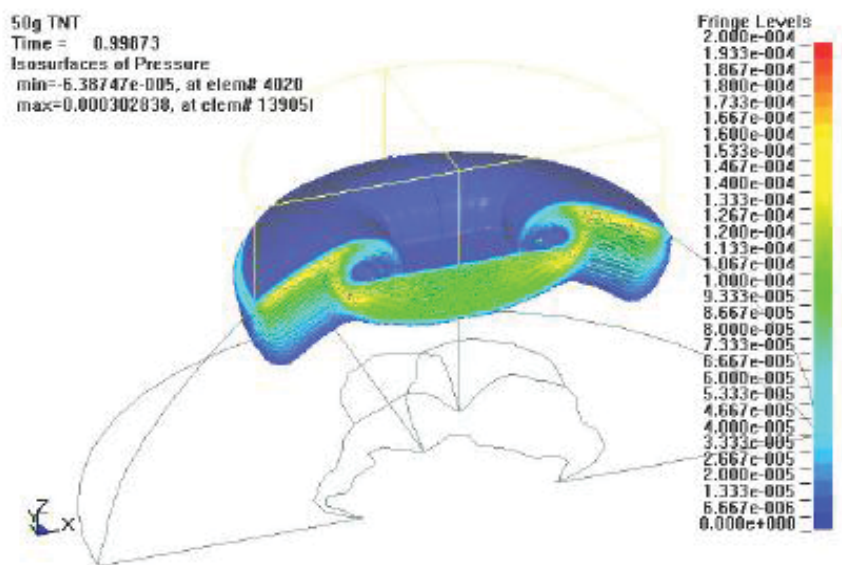


شکل ۷- تاریخچه فشار افزوده تجربی و عددی در مرکز صفحه

در شکل (۸) و (۹) نحوه حرکت موج در هوا در طول آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۸- صفحات هم‌فشار در زمان ۰/۶ ms، قبل از برخورد با صفحه



شکل ۹- صفحات هم‌فشار در زمان ۰/۱ ms بعد از برخورد با صفحه و تشکیل جریان گردابی

جدول ۱- مشخصات الگوی هوا

هوا	
چگالی	$1/293 \text{ kg} / \text{m}^3$
فشار اولیه	۱ بار
ضریب گرمای ویژه	۱/۴

با شبیه‌سازی انجام شده و مقایسه‌ی نتایج با داده‌های تجربی که در شکل (۷) نیز یک نمونه از این مقایسات نشان داده شد می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی انفجار با استفاده از الگوی ماده منفجره (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) در نرم‌افزار یاد شده می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

۶- مدلسازی و تحلیل اثر انفجار بر صفحه بتنی

۱-۶- هندسه الگو

هندسه هدف شامل یک صفحه مربع شکل به ضخامت ۴۰ سانتیمتر و عرض ۱۴۰ سانتیمتر می‌باشد که تحت اثر انفجار قرار گرفته است.

۲-۶- الگوهای ماده

۱-۲-۶- هوا

هوا به صورت یک گاز ایده‌آل بدون لزجت در نظر گرفته شده، که با الگوی *MAT_NULL شبیه‌سازی شده است. مشخصات الگو ماده‌ی هوا در جدول (۱) ارائه شده است [۵].

مشخصات آرماتورهای استفاده شده در این مسئله به شرح زیر می‌باشد:

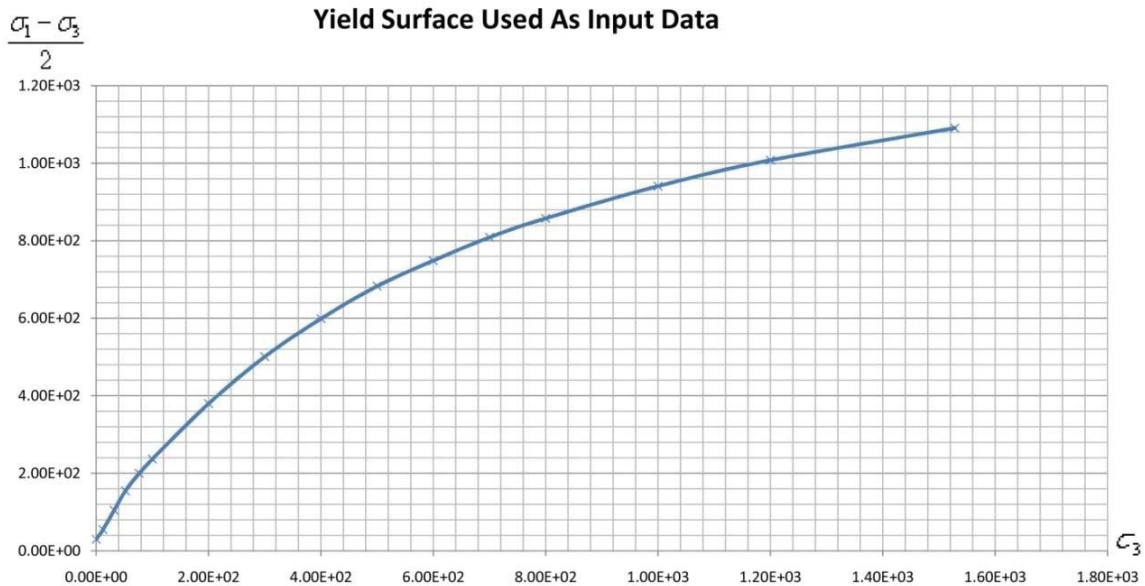
- چگالی جرمی 7800 kg/m^3
- تنش جاری شدگی 600 MPa
- ضریب پواسون 0.3
- مدول ارتجاعی 200 GPa
- مدول سخت شدگی مجدد 1 GPa
- کرنش حداکثر 0.1

جدول ۲- مشخصات ماده منفجره	
TNT	
چگالی	$1630-1640 \text{ kg/m}^3$
سرعت انفجار	6930 m/s
فشار	21 GPa
چگالی انرژی داخلی	7 GPa

۳-۶- خصوصیت المان‌ها (Element Properties)
 اجزاء هدف از نوع Solid، ۸ گره‌ای با یک نقطه انتگراسیون و ضریب کنترل‌ی Hourglass از نوع Flangan-Belytschko stiffness with exact volume integration انتخاب گردیدند.

۴-۶- خروجی‌ها و نتایج تحلیل
 نمودارهای مربوط به شوک در تحلیل مسأله فوق در شکل (۱۱) ارائه شده که نشان‌دهنده تغییرات شتاب در اطراف ماده منفجره می‌باشد.

۳-۲-۶- بتن براساس الگو ماده‌ی CONCRETE_DAMAGE و با مشخصات ذیل مدلسازی شده و نمودار آزمایش سه محوری آن در شکل (۱۰) ارائه شده است.
 - چگالی جرمی 2770 kg/m^3
 - مقاومت فشاری تک‌محوری 153 MPa
 - مقاومت کششی تک‌محوری 8 MPa
 - مدول ارتجاعی 58 GPa
 - ضریب پواسون 0.16

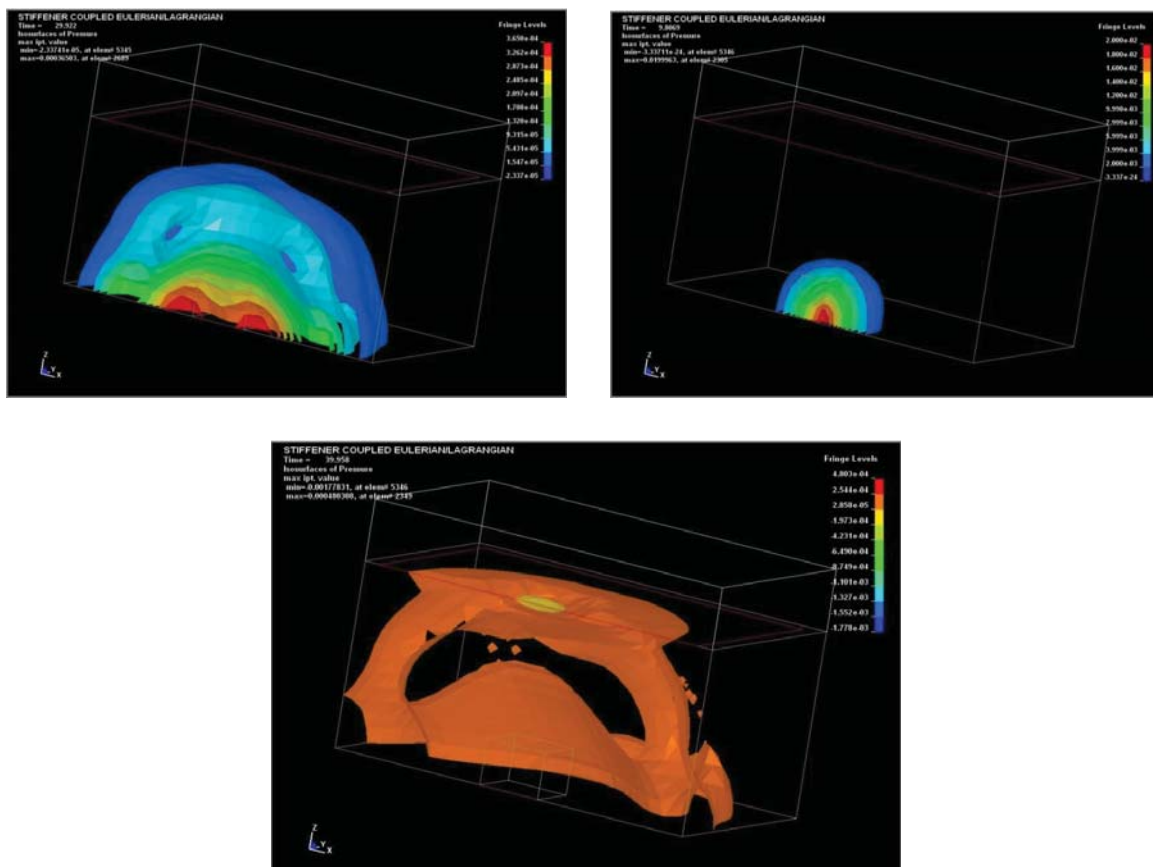


شکل ۱۰- نمودار مربوط به آزمایش سه محوری انجام گرفته روی بتن



شکل ۱۱- مقایسه مؤلفه سوم شتاب روی گره‌های اطراف انفجار

در شکل (۱۲) مراحل مختلف توزیع فشار در هوا در طول آزمایش مشاهده می‌شود.

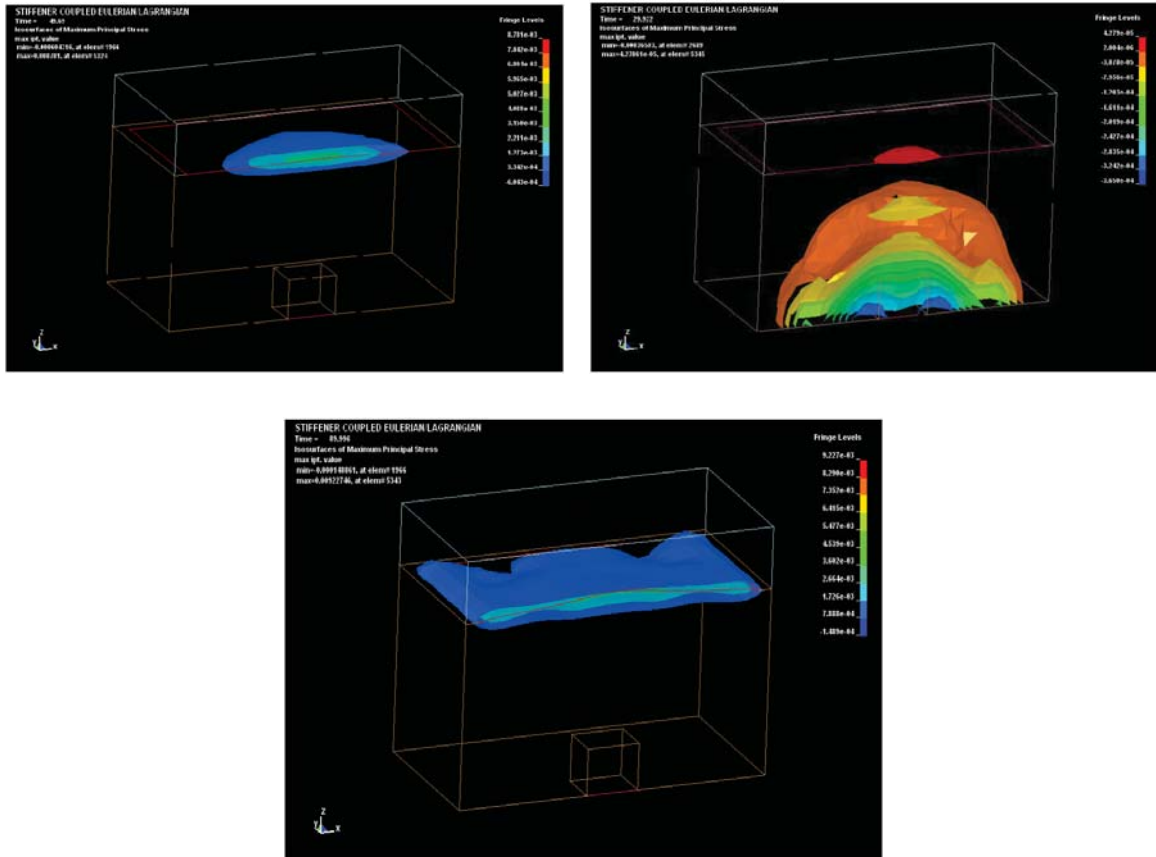


شکل ۱۲- منحنی‌های هم‌فشار از مراحل مختلف انفجار

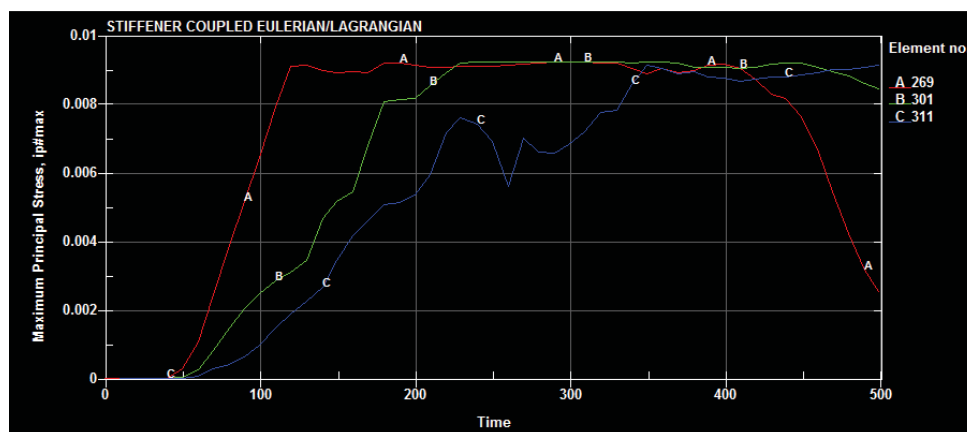
داشتند. به عبارت کلی‌تر، نحوه توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌های صورت پذیرفته در بتن مؤید این مطلب است که اجزاء نزدیک به مرکز دچار تغییر شکل‌ها و تنش‌های بسیار بالایی شده‌اند؛ حال آن که با دور شدن از مرکز، این تاثیر بسیار کاهش یافته است. این مساله به دلیل آن است که موج انفجار در محل وقوع انفجار بالاترین میزان انرژی را داراست و با دور شدن از محل وقوع انفجار این انرژی مستهلک می‌شود و نتیجتاً اثر آن بر اجزاء و المان‌های سازه‌ای نیز کاهش می‌یابد. البته این امر با در نظر گرفتن توزیع امواج کروی انفجار و رابطه فشار انفجار با فاصله از مرکز قابل پیش‌بینی بوده است.

شکل (۱۳) در سه تصویر، وقوع انفجار، ایجاد موج انفجار و توزیع آن و در نهایت مستهلک شدن انرژی انفجار در محیط را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصاویر مشاهده می‌شود در ابتدای وقوع انفجار، انرژی بالایی در پیرامون ماده منفجره ایجاد می‌شود و این انرژی در قالب موج انفجار در محیط توزیع می‌شود و در نهایت با دور شدن از مرکز انفجار، این انرژی رفته‌رفته کاهش پیدا کرده و مستهلک می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، میزان تنش در اجزایی که به مرکز انفجار نزدیک‌تر بوده‌اند به مراتب بالاتر از اجزاء و المان‌هایی است که در فاصله دورتری از محل وقوع قرار



شکل ۱۳- وقوع انفجار و نحوه گسترش موج انفجار در محیط



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای تنش‌های اصلی حداکثر در اجزاء مختلف سازه با فاصله متفاوت از مرکز

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد که پدیده انفجار با مراحل مختلف آن به صورت دقیق و قابل قبولی الگوسازی گردد که این مسأله، خود به تنهایی حائز درجه بالایی از اهمیت می‌باشد، چرا که الگوسازی صحیح رفتار دینامیکی بتن در پدیده انفجار و در نظر گرفتن عوامل متعددی که در این مسأله نقش دارند منجر به آرایه الگویی می‌شود که در نتیجه آن می‌توان به مطالعات بسیار گسترده‌ای در زمینه بررسی این پدیده در سازه‌های مختلف با شرایط مرزی متفاوت پرداخت و در هر یک از آن‌ها به پیش‌بینی میزان تأثیر موج شوک و یا تخریب و جذب انرژی بتن مبادرت ورزید. بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل نشان می‌دهد که نحوه حرکت کروی موج انفجار در فضا و همچنین استهلاک انرژی آن با افزایش فاصله از مرکز انفجار به خوبی توسط نرم‌افزار آرایه شده است. علاوه بر این، رفتار بتن در برابر نرخ سریع افزایش کرنش ناشی از بارگذاری انفجار به خوبی لحاظ شده است که نتیجتاً مدل‌سازی دقیق رفتار بتن در برابر انفجار، امکان محاسبه میزان جذب انرژی انفجار توسط سازه بتنی را میسر می‌سازد.

مراجع

1. Krauthammer T, modern protective structures, (2008).
2. TM5-855, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, (1986).
3. TM5-1300, Structures to resist the effects of accidental explosions, (1990).
4. Masaaki Itabashi, Kozo Kawata, Carbon content effect on high-strain-rate tensile properties for carbon steels, International Journal of Impact Engineering, vol. 24, pp. 117-131, (2000).
5. Chengqing Wu, Hong Hao, Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions, International Journal of Impact Engineering vol.31, pp. 699-717, (2005).

The Study of Blast Effect on Reinforced Concrete Structures

Ahmad Asadi Jafari¹

Sayyed Amireddin Sadrnezhad²

Amir Saedi Daryan³

Hesameddin Bahrampour¹

Abstract

One of the main principles in passive defense is to retrofit of structures against blast loads. The first step to achieve this purpose is understanding and simulation of blast effects on structures. The most convenient method for simulation and analysis of blast effect on structures is numerical simulations. Free explosion problems or explosion with fragment problem are characterized as severe dynamic loads that are induced by blast or impact and last for some micro-seconds. Therefore, in numerical simulations, wave propagation should be accurately modeled. General continuous mechanics that is used for simulation of such phenomena is based on mass, momentum and energy equations in reactions that describe material behavior. Since the equations consist of nonlinear partial derivatives, analytical solutions cannot be used generally because inputs and initial values are too complicated. Numerical techniques are the only method for achieving available complete solutions. Some hydro-codes are now used for such simulations. Each code has features that individualize it, but none of these codes or numerical methods is better than others in all problems. In this study, to show the abilities and accuracy of numerical methods in such simulations, simulation of concrete structure behavior under blast load is conducted using LS-DYNA code. Besides, the used patterns and governing equations are accurately studied.

Key Words: *LS-DYNA, Concrete Structure, Passive Defense, Blast Wave Interaction, Numerical Solution*

1- M. Sc of Structural Session, of Civil Engineering Dept. K.N.Toosi University

2- Professors, Civil Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology

3- PhD. candidate of Structural Session, of Civil Engineering Dept. K.N.Toosi University