

ارزیابی رفتار آشیانه‌های بتنی نیم استوانه‌ای تحت اثر بارهای ناشی از انفجار

محمودرضا شیراوند^{۱*}، مهسا رسولی^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۵/۰۱/۲۲، پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۷)

چکیده

هواپیماها، بالگردها و سایر هواگردهای نظامی یکی از مشخصه‌های مهم قدرت نظامی یک کشور می‌باشند. بنابراین نگهداری این تجهیزات از تهدیدها و آسیب‌های احتمالی در حوزه پدافند غیرعامل ضروری به نظر می‌رسد. نتایج تحقیقات گذشته بر روی آشیانه‌های هواگردها عمدتاً در محدوده بارهای استاتیکی بوده و در زمینه اثر بارهای خاص مانند انفجار تحقیقات ناچیزی انجام شده است. با توجه به گسترش حملات تروریستی، لزوم عملکرد مناسب این سازه‌ها تحت اثر بارهای ناشی از انفجار مشخص می‌شود. بدین منظور در این تحقیق رفتار یک آشیانه بتنی با مقطع نیم استوانه تحت اثر بار انفجار ناشی از ۱ تن TNT در فواصل نزدیک، متوسط و دور از آشیانه مورد بررسی قرار گرفته است. موقعیت ماده منفجره نیز در سه حالت عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی، در راستای محور در روبه‌روی درب آشیانه و در راستای روبه‌روی ورودی آشیانه با انحراف ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. پارامترهای بررسی شده عبارتند از: تنش ایجاد شده در بدنه آشیانه، تاریخچه جابه‌جایی عرضی و قائم تاج و تاریخچه فشار هوا در طول تونل. میزان خرابی بدنه آشیانه نیز در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته است. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان فاصله ایمن را برای مقادیر دلخواه مواد منفجره تخمین زد. انتظار می‌رود در فاصله ایمن هیچ‌گونه خرابی در بدنه آشیانه رخ ندهد.

کلیدواژه‌ها: آشیانه هواگرد، مقطع بتنی نیم استوانه، انفجار، بارگذاری دینامیکی، مودهای خرابی

Behavior of Semi-Cylindrical Concrete Hangars under Blast Loading

M. R. Shiravand*, M. Rasouli

Shahid Beheshti University

(Received: 10/04/2016; Accepted: 07/09/2016)

Abstract

Planes, helicopters and other military aircrafts are one of the important features of a country's military power. Therefore, maintenance of this equipment from potential threats and vulnerabilities in the domain of passive defense appear to be necessary. Results of previous studies on aircraft hangars had been predominantly in the range of static loads and little research has been done in the field of special loads such as explosion. . With due attention to the spread of terrorist attacks, necessity of appropriate operation of these structures under blast loads is become clarified. Therefore in this research, behavior of semi cylindrical concrete hangar under blast loading of 1 tone TNT at near, intermediate and far from hangar has investigated. The location of explosives substance was considered in three state of perpendicular to the hangar axis in mid-length, along the axis in front of the hangar door and in front of hangar entrance with a deviation of 45 degrees. Modeling had been done with ABAQUS software. Study parameters included: the stresses created in the body of the hangar, horizontal and vertical displacement of the crown and the air pressure in the tunnel. The failure modes of the hangar also discussed in the different cases and safe scaled distance is obtained. Using the results of this study, safe distance for arbitrary values of explosives substance could be estimated. It is expected during this distance, no failure occurs in the body of hangar.

Keywords: Aircraft Hangar, Semi-Cylindrical Concrete Section, Explosion, Dynamic Loading, Failure Modes

*Corresponding Author E-mail: m_shiravand@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

نتایج نشان داد که برای آشیانه‌های طویل اثرات حرارتی مهم بوده و تنش‌های حرارتی ناشی از توزیع غیر یکنواخت حرارت قابل ملاحظه است. کازاکویچ [۲] رفتار آیرودینامیک سقف پوسته‌ای آشیانه هواگردی فرودگاه ریگا در اوکراین را در برابر فشار باد بررسی نمود. سقف آشیانه نیم استوانه‌ای، طول آشیانه ۱۰۸ و دهانه آن ۶۰ متر بود. پاسترناک و همکاران [۳] رفتار نوع جدیدی از آشیانه‌های فلزی را مورد بررسی قرار دادند. دهانه این آشیانه ۲۱۰ متر و طول آن ۳۶۳ متر بود. مانگ و همکاران [۴] مطالعاتی بر روی تأثیر فرم انواع سقف‌های آشیانه‌ها انجام دادند. در این تحقیق رفتار خستگی با مطالعات نظری و آزمایش‌های مصالح مورد بررسی قرار گرفت.

تحقیقات انجام شده بر روی آشیانه هواپیماها عمدتاً در محدوده بارهای استاتیکی بوده و در زمینه اثر بارهای خاص مانند انفجار تحقیقات ناچیزی بر روی این نوع سازه‌ها انجام شده است. اما در خصوص رفتار سایر سازه‌های بتنی مانند پانل‌های بتن مسلح، دیوار بتنی، محفظه با پوسته بتن مسلح و... تحت اثر بار انفجار، تحقیقات مختلف عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. با توجه به اینکه در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود رفتار آشیانه‌های بتنی تحت اثر انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد، در ادامه به برخی مطالعات عددی صورت گرفته اشاره می‌شود.

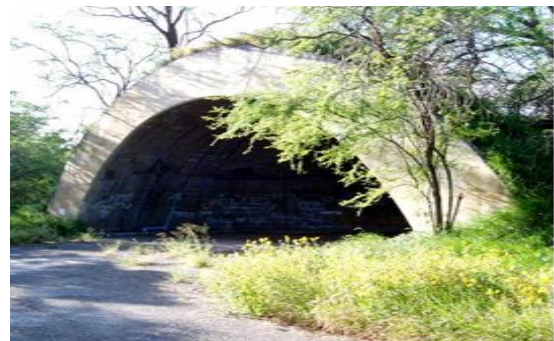
پنتلیدز و همکاران [۵] مطالعاتی بر روی رفتار پانل‌های بتن مسلح تحت بار انفجار انجام دادند. هدف اصلی آن‌ها از این مطالعات، تصدیق روش‌های شبیه‌سازی بار انفجار بود. لین و همکاران [۶] بر روی مدل سه‌بعدی اجزاء محدود شبیه‌سازی پاسخ پانل بتن مسلح تحت بار انفجار، مطالعاتی انجام دادند. اثر اندازه اجزاء و نیز اثر نرخ کرنش‌های بالا در مصالح لحاظ شد. این مطالعه همچنین به بررسی اثر وزن ماده منفجره، فاصله انفجار، ضخامت پانل و درصد آرماتور بر روی مقاومت بتن در برابر انفجار پرداخته شد. نگوین و تران [۷] اثر انفجار بر روی دیوار بتنی عمودی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نسبت میرایی و محل قرارگیری نقطه انفجار نسبت به دیوار و فشار حاصله از آن در پاسخ دیوار تأثیر بسزایی دارد. پندی [۸] رفتار یک محفظه با پوسته بتن مسلح را تحت اثر ضربه و بارگذاری انفجار مورد مطالعه عددی قرار داد. در این مطالعه تغییر مکان‌ها، توزیع تنش در پوسته و ترک‌ها تحت اثر ضربه یک فانتوم و انفجار مربوطه مورد بررسی قرار گرفت.

۱-۳. بارگذاری انفجاری

انفجار آزادسازی سریع انرژی مواد منفجره است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب، در یک محیط ایجاد شود. از مشخصه‌های اساسی انفجارها که موجب وارد آمدن نیرو به سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن

با افزایش حملات تروریستی در جهان امروز، لزوم طراحی سازه‌ها تحت بار دینامیکی انفجار مشخص می‌شود. به ویژه سازه‌های مهم و حیاتی هر کشور که طراحی صحیح آن‌ها منجر به حفظ سرمایه ملی خواهد بود. از جمله این سازه‌ها می‌توان به آشیانه هواپیما و بالگردها اشاره کرد که عموماً مربوط به سازمان‌های نظامی و یا دولتی هر کشور هستند. علی‌رغم اهمیت بالای موضوع، پژوهش‌ها و تحقیقات ناچیزی در این راستا صورت گرفته است. طرح آشیانه از یک سایبان ساده گرفته که فقط برای نگهداری و محافظت انواع هواگردها استفاده می‌شود تا انواع پیشرفته آشیانه‌ها با یک محیط کنترلی و مجهز به روبات و تجهیزات مکانیکی کامل متغیر است.

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار یک آشیانه بتنی نیم استوانه‌ای هواپیما تحت اثر موج ناشی از انفجار پرداخته شده است و مقاومت آن تحت تأثیر انفجارهای مختلف از نظر فاصله و راستا مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین سطح تخریب آشیانه با توجه به فاصله و مقدار ماده منفجره و تأثیر پارامترهای انفجاری بر تغییر شکل و تنش‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج به دست آمده می‌توان درک بهتری در خصوص طراحی فاصله ایمن انفجاری آشیانه‌های هواگردهای نظامی یا حتی غیر نظامی ایجاد نمود. در شکل (۱) نمایی از یک آشیانه بتنی نشان داده شده است.

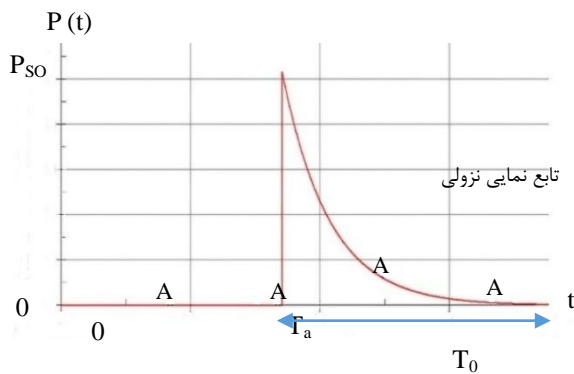


شکل ۱. نمایی از یک آشیانه واقعی

۱-۲. پیشینه تحقیق

سابقه تحقیقات انجام شده بر روی طراحی و ساخت آشیانه‌ها به زمان ابداع هواگردها برمی‌گردد. با گسترش انواع هواگردهای نظامی و تهدیدات آن‌ها طراحی و ساخت آشیانه‌های بتن مسلح جهت حفاظت از تجهیزات نظامی در زمان جنگ جهانی دوم و در دهه ۵۰ مرسوم شد و تاکنون مورد توجه بوده است. برای مثال پی و همکاران [۱] توزیع حرارتی را در آشیانه‌های طویل بررسی نمودند. دهانه آشیانه ۱۱۰ متر و طول آن ۳۲۵ متر در نظر گرفته شده بود. این آشیانه می‌توانست هم‌زمان به شش هواگرد سرویس دهد. سقف آشیانه ساختار شبکه‌ای و خرپایی داشت.

TM 5-855-1 [۱۰] ارائه شده و در برخی از نرم‌افزارهای اجزاء محدود [۱۲] نیز از آن استفاده شده است. در این مدل نیازی به مدل‌سازی اجزای محدود هوای اطراف ماده منفجره نیست، زیرا اینرسی و سختی هوا قابل نظر کردن است. بنابراین بار انفجار مستقیماً بر خود سازه وارد می‌شود. بارگذاری با استفاده از روابط تجربی انجام می‌شود. این مدل نمی‌تواند انعکاس‌های متوالی موج برخوردی از سطوح را در نظر بگیرد. در مدل CONWEP، یک فاصله مقیاس شده بر حسب فاصله نقطه مورد نظر از منبع انفجار و مقدار ماده منفجره تعریف می‌شود. در این مدل نمودار بارگذاری فشار انفجار بدون در نظر گرفتن فاز منفی، مطابق شکل (۳) در نظر گرفته می‌شود. این مدل برای فروکش کردن فشار بازتاب و رویداد از تابع نمایی استفاده می‌کند که از تقریب مثلثی دقیق‌تر می‌باشد.



شکل ۳. بارگذاری انفجاری در مدل CONWEP [۱۳ و ۱۴]

در شکل (۳)، $P(t)$ معرف فشار، P_{SO} فشار حداکثر رویداد انفجار، T_a زمان رسیدن موج انفجار، T_0 مدت زمان فاز مثبت انفجار و A ضریب بی‌بعد فروکش کردن موج انفجار می‌باشد.

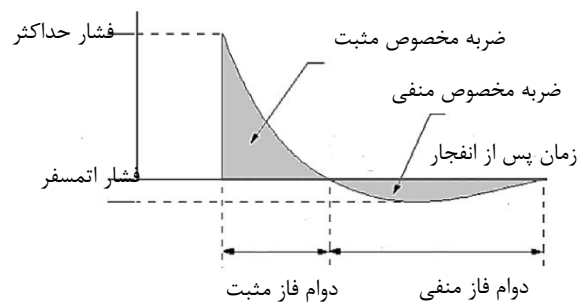
در مدل CONWEP برای محاسبه توزیع زمانی فشار، ابتدا پارامترهای موج انفجار همچون فشار حداکثر و ضربه رویداد و بازتاب، زمان رسیدن موج انفجار و مدت زمان فاز مثبت، از معادلات کینگری-بولماش [۱۳] محاسبه می‌شوند. سپس به کمک رابطه (۲) که معادله فریدلندر نام دارد، مقادیر فشار در زمان‌های مختلف قابل محاسبه است [۱۴].

$$P(t) = P_{SO} \left[1 - \frac{t-T_a}{T_0} \right] \exp\left[\frac{-A(t-T_a)}{T_0} \right] \quad (2)$$

در این رابطه، $P(t)$ و P_{SO} بر حسب کیلوپاسکال، T_a و T_0 بر حسب میلی‌ثانیه است.

در بارگذاری دینامیکی به دلیل نرخ کرنش بالا، مقاومت مصالح افزایش می‌یابد. بنابراین اثر نرخ کرنش بارگذاری در رفتار مصالح باید در نظر گرفته شود. نسبت مقاومت مصالح در حالت بارگذاری دینامیکی به مقاومت مصالح در حالت بارگذاری استاتیکی ضریب افزایش دینامیکی (DIF) نام دارد. شکل‌های

موقعیت انفجار، گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم در حد چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه اشاره کرد. در شکل (۲) منحنی فشار- زمان برای موج انفجار در فضای آزاد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدت زمان کوتاهی فشار انفجار به حداکثر خود می‌رسد. در این لحظه فشار چند برابر فشار اتمسفر است. همین مسئله باعث وارد آمدن نیروهای بزرگی به سازه می‌شود. سپس فشار کاهش یافته و به فشار اتمسفر می‌رسد و بعد وارد فاز منفی می‌شود. فاز منفی در مدت زمان طولانی‌تری اتفاق می‌افتد و ایجاد مکش می‌کند که در طراحی سازه از اهمیت کمتری برخوردار است.



شکل ۲. منحنی فشار- زمان موج انفجار [۹]

برای محاسبه پارامترهای انفجار معمولاً از روش فاصله مقیاس‌بندی شده استفاده می‌کنند. عمومی‌ترین روش مقیاس‌گذاری انفجار، روش ریشه سوم است. طبق این قانون امواج مشابه زمانی به وجود می‌آیند که دو ماده منفجره با جنس یکسان در فواصل مقیاس‌گذاری شده مشابه منفجر شوند. مواد منفجره مختلف فشارهای مختلفی تولید می‌کنند، بنابراین برای داشتن یک مینا، مواد منفجره مختلف با ماده منفجره TNT معادل می‌شوند. فاصله مقیاس شده Z_G طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$Z_G = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

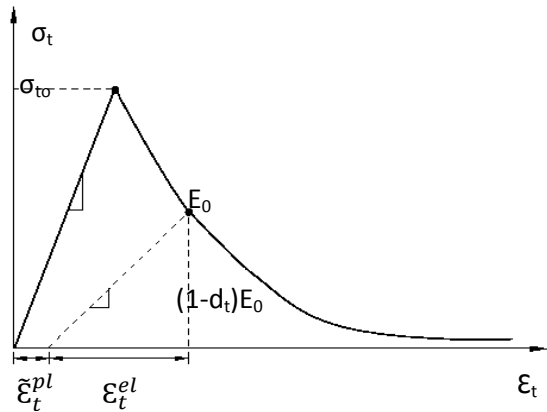
که در آن، R فاصله از محل انفجار و W وزن ماده منفجره معادل TNT است. در دستورالعمل‌های مختلف مانند UFC 3-340-02 [۹]، TM 5-855-1 [۱۰] و TM 5-1300 [۱۱]، منحنی‌هایی ارائه شده که بر اساس آن می‌توان با داشتن فاصله مقیاس شده، پارامترهای انفجار نظیر بیشینه فشار انفجار در فاز مثبت و منفی، مدت زمان فاز مثبت و منفی انفجار، ضربه ناشی از انفجار در فاز مثبت و منفی و ... را به دست آورد.

انفجار در هوا تشکیل گازی با تراکم بالا می‌دهد که می‌تواند هوای دست نخورده اطراف را تحت تأثیر قرار دهد. برای برآورد فشار گاز متراکم روابط و مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از این مدل‌ها، مدل مرسوم CONWEP است که بر اساس

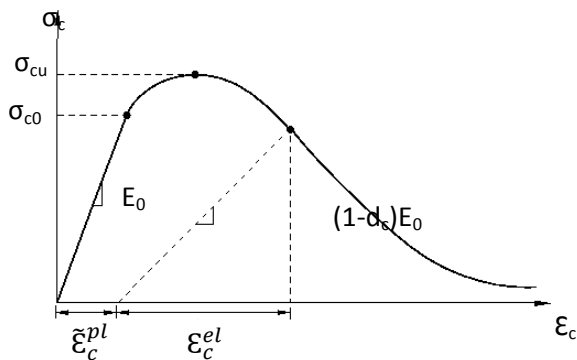
کششی و فشاری تک محوره می‌باشد که در رابطه‌های (۳) و (۴) بیان شده است:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (۳)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (۴)$$



شکل ۶. رفتار بتن در بارگذاری تک محوره در کشش [۱۲]



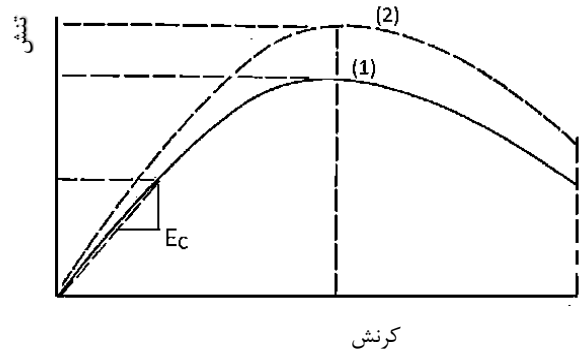
شکل ۷. رفتار بتن در بارگذاری تک محوره در فشار [۱۲]

مدل بتن آسیب دیده پلاستیک که در نرم‌افزار آباکوس [۱۲] از آن استفاده می‌شود، مدل دراگر- پراگر می‌باشد که جهت مدل‌سازی تعیین رفتار پلاستیک بتن از جمله سطوح تسلیم و جریان پلاستیک به کار می‌رود. تابع پتانسیل جریان دراگر- پراگر مطابق رابطه (۵) می‌باشد.

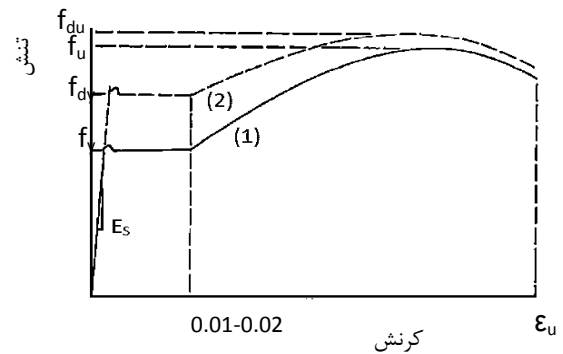
$$G = \sqrt{(f_c - m \cdot f_t \cdot \tan\beta)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan\beta \quad (۵)$$

در این رابطه، f_c و f_t مقاومت فشاری و کششی تک محوری بتن و β زاویه اتساع است که بتن تحت تنش، در نزدیکی نقطه خرابی افزایش حجم می‌دهد. این افزایش حجم غیر الاستیک که عموماً ناشی از رشد فزاینده ریز ترک‌ها در بتن حاصل می‌شود به نام اتساع شناخته می‌شود. m پارامتر خروج از مرکزیت است و بیانگر نرخی است که تابع جریان دارای مجانب می‌شود. هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر شود، تابع G به خط مستقیم نزدیک‌تر می‌شود. بتن تحت تنش فشاری دو محوره نسبت به حالت تک

(۴) و (۵) به ترتیب نمودار تنش- کرنش بتن و فولاد را در حالت‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد. مقدار این ضریب با توجه به دستورالعمل UFC 3-340-02 [۹] برای بتن و آرماتور قابل حصول است.



شکل ۴. نمودار تنش- کرنش بتن: (۱) بارگذاری استاتیکی و (۲) بارگذاری دینامیکی [۹]



شکل ۵. نمودار تنش- کرنش فولاد: (۱) بارگذاری استاتیکی و (۲) بارگذاری دینامیکی [۹]

۴-۱. الگوی رفتار غیر خطی بتن

جهت پیش‌بینی رفتار غیر خطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک استفاده می‌شود. رفتار کششی و فشاری تک محوری بتن استفاده شده در مدل به صورت شماتیک در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که نمونه بتنی در هر نقطه از شاخه نرم شدگی کرنش بارگذاری می‌شود، سختی الاستیک مصالح کاهش می‌یابد. کاهش سختی الاستیک به وسیله پارامترهای آسیب dc و dt مشخص می‌شود. این پارامترها به ترتیب سطح آسیب در کشش و فشار را توصیف می‌کنند. پارامترهای آسیب می‌توانند مقداری بین ۰ (مصالح آسیب ندیده) تا ۱ (از دست رفتن کل مقاومت مصالح) داشته باشند. مدول الاستیسیته E_0 بیان‌کننده سختی الاستیک اولیه (آسیب ندیده) مصالح و رابطه تنش- کرنش برای بارگذاری

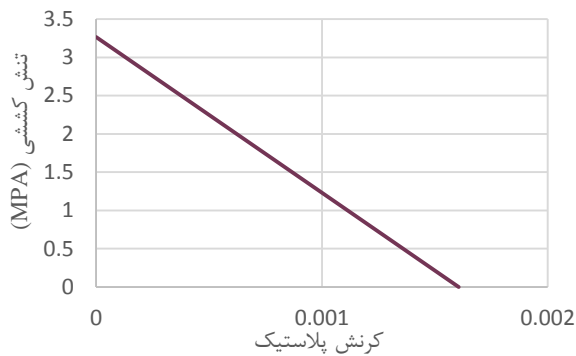
رفتار میلگردها به صورت دو خطی با سخت شوندگی کرنشی در نظر گرفته شده است. اثر نرخ کرنش بالا در افزایش مقاومت مصالح در بارگذاری انفجاری از طریق محاسبه ضریب DIF طبق آیین‌نامه UFC 3-340-02 [۹] نیز برای آرماتورها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات آرماتور و بتن مصرفی

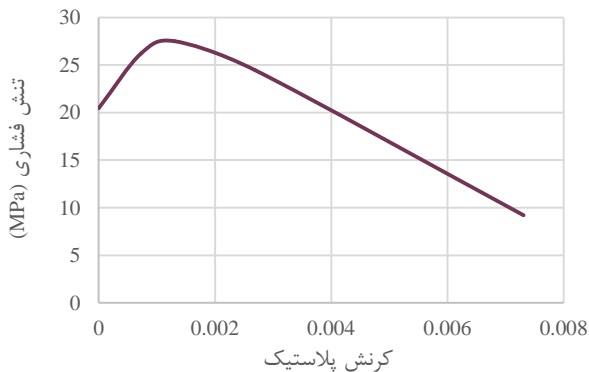
آرماتور	ضریب پواسون	۰/۳
	حد جاری شدن	MPa ۴۰۰
	حد نهایی	MPa ۶۰۰
بتن	مدول الاستیسیته	GPa ۲۰۰
	مقاومت	MPa ۲۵
	مدول الاستیسیته	GPa ۲۰
	چگالی	kg/m ³ ۲۴۰۰
	ضریب پواسون	۰/۲

جدول ۲. مشخصات پلاستیک بتن [۱۲]

زاویه اتساع (درجه)	۱۵
گریز از مرکز	۰/۱
پارامتر تابع گسیختگی ($f=f_b0/f_c0$)	۱/۱۶
پارامتر ویسکوزیته (N.s/m ²)	۰/۰۱



شکل ۹. رفتار کششی بتن بر حسب کرنش پلاستیک [۱۲]

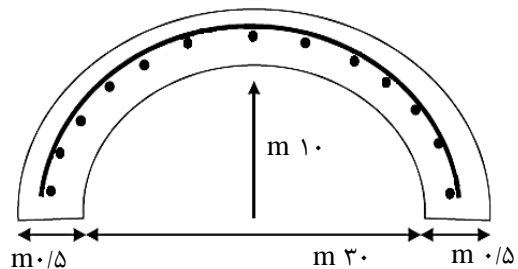


شکل ۱۰. رفتار فشاری بتن بر حسب کرنش پلاستیک [۱۲]

محوره افزایش مقاومت دارد. مدل ماده بتن آسیب دیده پلاستیک با دریافت نسبت تنش تسلیم در حالت دو محوره به تک محوره، (f_{b0}/f_{c0}) قادر به تعیین سطح تسلیم دو محوره بتن می‌باشد. \bar{p} فشار هیدرواستاتیک مؤثر و \bar{q} تنش مؤثر معادل فون میسر است.

۲. روش تحقیق

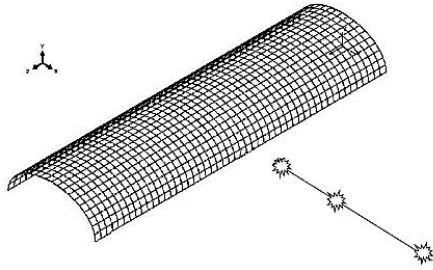
آشیانه در نظر گرفته شده، یک نمونه بتنی طراحی شده برای بارهای ثقلی و زلزله، دارای مقطع نیم استوانه، با دهانه ۳۰ متر، طول ۱۰۰ متر، ضخامت ۰/۵ متر و انتهای بسته می‌باشد. این آشیانه دارای دو لایه آرماتور مش $\Phi 20 @ 200$ در راستای طولی و حلقوی در دو سمت جداره بتنی برای مقابله با لنگرهای مثبت و منفی ناشی از بارهای ثقلی و زلزله است. از آنجا که در این تحقیق هدف اصلی ارزیابی رفتار این آشیانه در برابر بار انفجاری است و از طرفی با توجه به اینکه بارگذاری انفجاری در هر مقطع به صورت کشش یا فشار یکنواخت به بدنه وارد می‌شود، می‌توان انتظار داشت تنش‌هایی که در ضخامت جداره هر مقطع ایجاد می‌شوند، توزیع تقریباً یکنواختی داشته باشند (نیروها به صورت کششی و یا فشاری باشد). به همین علت به منظور ساده‌سازی و افزایش سرعت تحلیل‌ها در مدل‌سازی از المان پوسته استفاده شده است و دو لایه آرماتور مش نزدیک جداره با یک لایه آرماتور مش معادل در میان تار در نظر گرفته شده است (شکل ۸). در مدل اجزای محدود آشیانه در نرم‌افزار آباکوس [۱۲] از المان‌های پوسته‌ای چهار گره‌ای برای بدنه آشیانه استفاده شده است و آرماتورها به صورت المان وایر در نظر گرفته شده‌اند. تکیه‌گاه‌های آشیانه گیردار بوده و از اندرکنش خاک و سازه آشیانه نیز صرف نظر می‌شود.



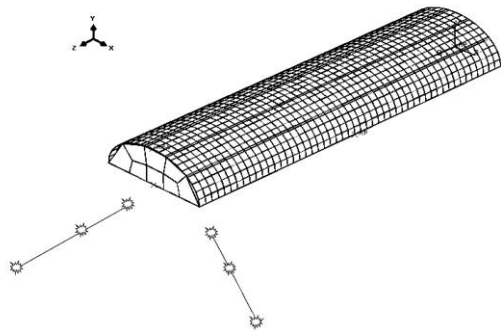
شکل ۸. مقطع عرضی آشیانه با لایه آرماتور معادل در میانه

مشخصات مکانیکی آرماتورها و بتن مصرفی در جدول‌های (۱) و مشخصات پلاستیک بتن در تابع پتانسیل دراگر- پراگر در جدول (۲) آورده شده است. رفتار کششی و فشاری بتن با اعمال ضریب افزایش دینامیکی (DIF) در شکل‌های (۹) و (۱۰)، و خرابی کششی و فشاری آن بر حسب کرنش پلاستیک در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان شده است.

گرفته شده، نشان داده شده است. در جدول (۳) مشخصات مربوط به هوای داخل آشیانه ارائه شده است.



شکل ۱۳. سناریوهای انفجار در میانه طولی آشیانه

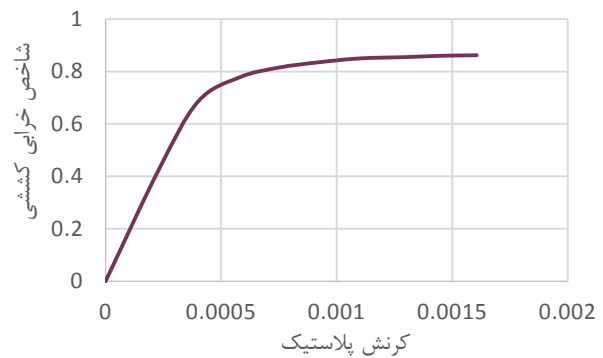


شکل ۱۴. سناریوهای انفجار در راستای ورودی و کنج آشیانه

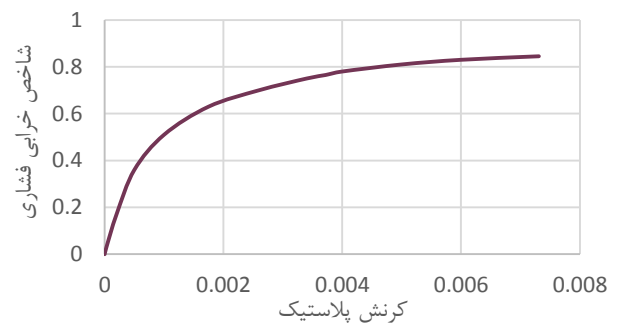
جدول ۳. مشخصات مربوط به هوای داخل آشیانه

J/kg.K ۲۸۷	ثابت گازها	گاز کامل
Pa ۱۰۱۳۲۵	فشار محیطی	
$Pa.s 6/92 * 10^{-6}$	ویسکوزیته	
J/kg ۷۱۷	گرمای ویژه	
kg/m ³ ۱/۲۹۳	چگالی	

در هر یک از سه راستای ماده منفجره در سه فاصله نزدیک، متوسط و دور از آشیانه قرار داده شده است. فواصل نزدیک، متوسط و دور، طوری در نظر گرفته شده است که اگر ماده منفجره در آن فاصله قرار داده شود، موج انفجار حاصل باعث ایجاد مناطق به ترتیب کم فشار، فشار متوسط و پر فشار بر روی سازه شود. بر اساس UFC 3-340-02 [۹]، منطقه‌ای کم فشار است که فشار آن کمتر از ۱۰ پوند بر اینچ مربع (حدود ۰/۷ مگاپاسکال) باشد. منطقه با فشار متوسط و پر فشار نیز به ترتیب فشارهای کمتر از ۱۰۰ (حدود ۰/۷ مگاپاسکال) و بیشتر از ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع دارند. با انتخاب فشار در هر حالت، می‌توان فاصله مقیاس شده را به دست آورد. مشخصات فاصله، زمان اعمال بار و فشارهای ناشی از انفجارهای مفروض در جدول (۴) نشان داده شده است. فواصل ماده منفجره برای حالت پر فشار، متوسط و کم فشار به ترتیب ۱۰، ۳۰ و ۶۰ متری از آشیانه به دست آمده است.



شکل ۱۱. خرابی کششی بتن [۱۲]



شکل ۱۲. خرابی فشاری بتن [۱۲]

نوع انفجار در نظر گرفته شده از نوع انفجار سطحی است. انفجار در سناریوهای مختلفی از نظر مقدار ماده منفجره، فاصله ماده منفجره و راستای برخورد موج انفجار به آشیانه انتخاب شده است. در تمامی حالات مقدار ماده منفجره، معادل ۱ تن TNT است. در این تحقیق سه زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای طولی آشیانه در نظر گرفته شده است. به عبارتی می‌توان گفت راستاهای در نظر گرفته شده عبارتند از: انفجار عمود به محور آشیانه در میانه طولی، انفجار در راستای محور آشیانه و انفجار در راستای کنج آشیانه. در انفجار عمود بر محور در میانه طولی آشیانه فرض می‌شود که موج انفجار نمی‌تواند وارد فضای آشیانه شود. به همین علت به مدل‌سازی هوای داخل آشیانه پرداخته نشده است و بنابراین بار انفجار با استفاده از مدل CONWEP به طور مستقیم به سازه وارد شده است. در دو حالت انفجار روبه‌روی آشیانه و انفجار در راستای مایل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور، با توجه به اینکه موج انفجار می‌تواند وارد فضای آشیانه شده و در اثر برخورد با بدنه و کف آشیانه تشدید شود، بنابراین هوای داخل آشیانه مدل‌سازی شده است. در این دو حالت تنها برای انتشار موج از ماده منفجره تا ورودی آشیانه از مدل CONWEP استفاده شده است. در مدل اجزای محدود هوای داخل آشیانه در نرم‌افزار آباکوس از المان‌های شش وجهی هشت گرهی به نام C3D8R استفاده شده است و به آن‌ها معادلات حالت گازهای کامل تخصیص یافته است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) سناریوهای مختلف انفجار و نحوه مدل‌سازی در نظر

جدول ۴. مشخصات انفجار بر طبق UFC 3-340-02 [۹]

فاصله	میزان فشار	P (MPa)	Z ($\frac{m}{\sqrt{tan}}$)	R (m)	زمان اعمال بار انفجار (ms)
نزدیک	زیاد	۷/۰۰	۱۰	۱۰	۱۹/۵
متوسط	متوسط	۰/۳۵	۳۰	۳۰	۲۷/۳
دور	کم	۰/۰۷	۶۰	۶۰	۳۹

جدول ۵. هندسه دال و شرایط آرماتورگذاری در آزمایش وو [۱۵]

نوع دال	یکطرفه
تکیه‌گاه	ساده
ابعاد دال (mm)	۲۰۰۰*۱۰۰۰*۱۰۰
میلگرد گذاری	در دو جهت در بالا و پایین دال
میلگردهای طولی	$\phi 12 @ 100 \text{ mm}$
میلگردهای عرضی	$\phi 12 @ 200 \text{ mm}$

۳. راستی آزمایشی مدل

برای راستی آزمایشی فرضیات رفتار مصالح، مدل اعمال بار انفجار و نتایج تحلیل، از مطالعه‌ای که توسط وو و همکاران [۱۵] به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، استفاده می‌شود. به همین منظور یک دال یک طرفه بتن مسلح کاملاً مشابه با شرایط آزمایش در نرم‌افزار مدل شده و بار انفجاری مطابق با شرایط آزمایش به آن وارد می‌شود. در نهایت مقدار خیز و فشار حداکثر در مرکز دال که از مدل‌سازی و آزمایش به دست آمده است، با یکدیگر مقایسه می‌شود. هندسه دال، میلگرد گذاری، موقعیت ماده منفجره نسبت به دال، مشخصات مصالح و مشخصات انفجار در آزمایش در شکل (۱۵) و جدول‌های (۷-۵) آمده است.

جدول ۶. مشخصات مصالح در آزمایش وو [۱۵]

بتن	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
	۳۹/۵	۸/۲	۲۸/۳
آرماتور	مقاومت تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	
	۶۰۰	۲۰۰	

جدول ۷. مشخصات انفجار در آزمایش وو [۱۵]

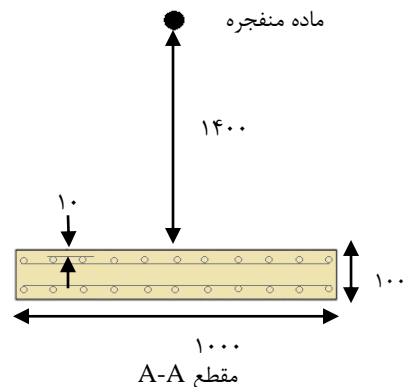
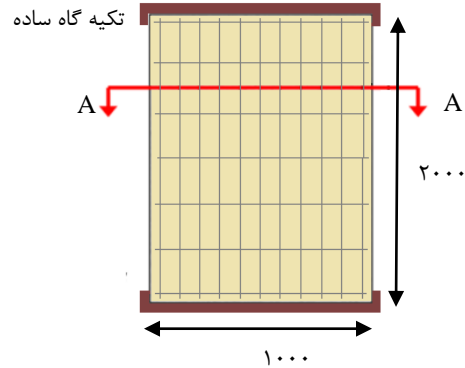
جرم معادل TNT (Kg)	۳/۴۴۰
فاصله (m)	۱/۴
جنس	Composition B
شکل	استوانه‌ای با D/H=1
فاصله مقیاس شده ($m/kg^{1/3}$)	۰/۹۳

پس از مدل‌سازی دال با شرایط مشابه با آزمایش، بار انفجاری به دو طریق به دال اعمال می‌شود: (۱) مدل CONWEP که به صورت خودکار در نرم‌افزار تولید و اعمال می‌شود و (۲) با استفاده از منحنی‌های فشار- زمان استخراج شده از دستورالعمل UFC با تقریب مثلی که برای مرکز دال محاسبه شده و به طور یکنواخت بر کل سطح دال وارد می‌شود. نتایج حاصل برای فشار بازتاب و خیز به دست آمده از آزمایش، مدل CONWEP (نرم‌افزار) و روابط دستورالعمل UFC در جدول (۸) مقایسه شده‌اند.

جدول ۸. مقایسه فشار بازتاب و حداکثر خیز در مرکز دال

UFC	CONWEP	آزمایش	فشار در مرکز دال (MPa)
۶/۲۰	۶/۱۵	۶/۳۸	
-۳	-۴	-	درصد خطا نسبت به آزمایش
۱۷/۹	۱۲/۹	۱۳/۹	حداکثر خیز در مرکز دال (mm)
۲۹	-۷	-	درصد خطا نسبت به آزمایش

همان‌طور که مشاهده می‌شود فشار حاصل از مدل CONWEP و نمودارهای استخراج شده از UFC تطابق خوبی با نتیجه آزمایش دارند. اما در مورد حداکثر خیز می‌توان گفت روش CONWEP مقادیر قابل قبول تری نسبت به نتایج UFC ارائه می‌دهد. هر چند نتایج UFC محافظه‌کارانه‌تر است اما می‌توان گفت دقت روش CONWEP در برآورد تغییر مکان بیشتر از UFC می‌باشد و به واقعیت نزدیک‌تر است.



شکل ۱۵. هندسه دال، میلگرد گذاری و موقعیت ماده منفجره نسبت به دال در آزمایش وو - اعداد بر حسب میلی‌متر [۱۵]

لبه‌های انتهایی آشیانه به وقوع پیوسته‌اند. در فاصله ۳۰ متری از آشیانه خرابی تنها در دو لبه انتهایی اتفاق افتاده است. در این حالت به دلیل متوسط بودن فشار انفجار، خرابی موضعی در میانه طولی آشیانه به وجود نیامده است. در فاصله ۶۰ متری به علت دور بودن ماده منفجره نسبت به آشیانه هیچ‌گونه خرابی در بدنه آشیانه مشاهده نشده است.

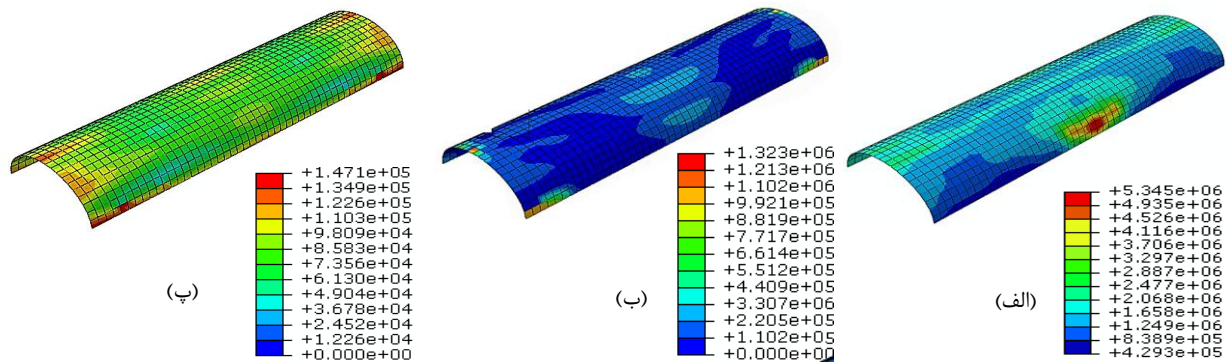
در شکل (۱۷) تاریخچه جابه‌جایی عرضی و قائم تاج در میانه طولی آشیانه، برای انفجار در فاصله ۱۰ متری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نوساناتی در نمودار وجود دارد که حول صفر است و نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های قابل برگشت در پوسته ایجاد شده است. در این حالت حداکثر جابه‌جایی عرضی به ۲۰ میلی‌متر و حداکثر جابه‌جایی قائم به ۶ میلی‌متر می‌رسد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در نظر گرفتن شرایط مدل‌سازی برای مصالح مطابق فرضیات انجام شده و استفاده از مدل CONWEP نتایج قابل قبولی را در مورد برآورد فشار بازتاب و تغییر مکان ارائه می‌دهد.

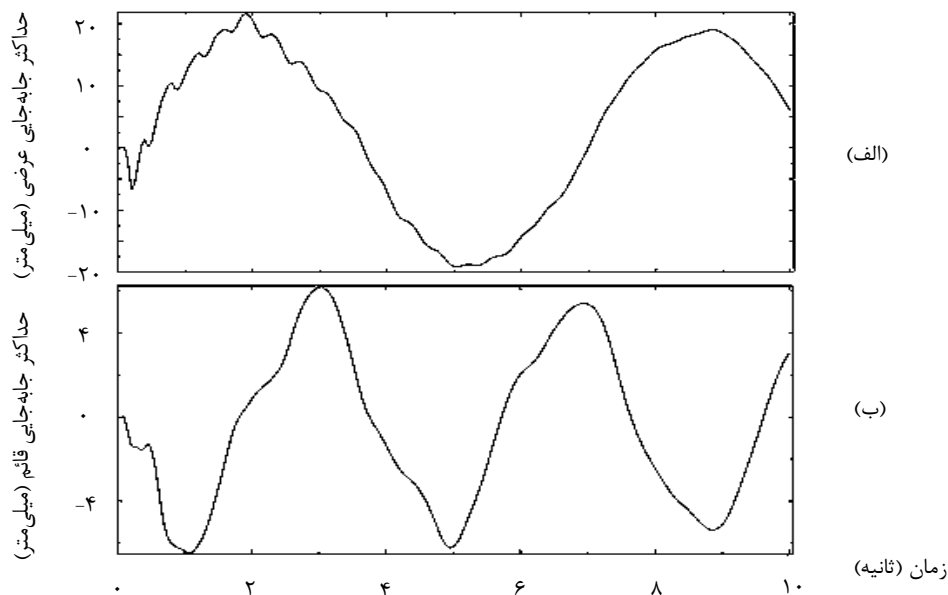
۴. نتایج و بحث

۴-۱. انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی

در شکل (۱۶) تنش‌های ایجاد شده در بدنه آشیانه، پس از وقوع انفجار نمایش داده شده است. در فاصله ۱۰ متری بیشترین مقدار تنش وجود دارد. در این فاصله مقادیر تنش حداکثر در میانه آشیانه ایجاد شده‌اند. مبنای خرابی آشیانه همان‌طور که ذکر شد، خرابی کششی و فشاری بتن بر اساس معیارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌باشد. با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده، مشاهده شد که خرابی‌ها در میانه طولی و



شکل ۱۶. کانتور پوش تنش. انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی برای فاصله: الف) ۱۰ متری، ب) ۳۰ متری و پ) ۶۰ متری



شکل ۱۷. تاریخچه جابه‌جایی تاج در میانه طولی آشیانه برای انفجار در فاصله ۱۰ متری: الف) حداکثر جابه‌جایی عرضی و ب) حداکثر جابه‌جایی قائم

۴-۲. انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه

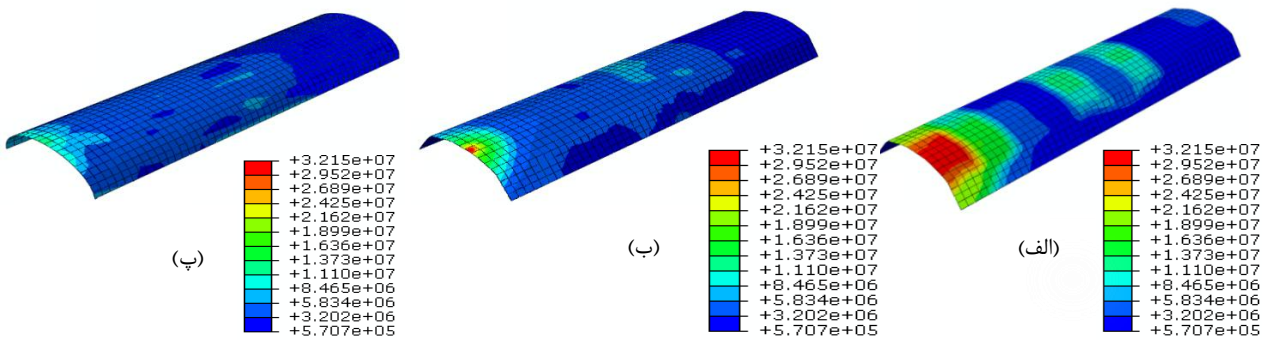
یکی از سناریوهای مطرح، احتمال وقوع انفجار در ورودی آشیانه است. در این حالت به دلیل امکان ورود موج به داخل آشیانه، هوای درون آشیانه مدل شده است. فشار هوای درون آشیانه بر پوسته وارد شده و باعث تغییر شکل آن می‌شود.

انتهای آشیانه با یک پوسته بتنی بسته شده است. سه عدد فشارسنج، به ترتیب در تاج ورودی، تاج میانی و تاج انتهایی آشیانه قرار گرفته که تاریخچه فشار هوا را در این نقاط نشان می‌دهد. در شکل (۱۸) تنش‌های ایجاد شده در نتیجه انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه حالات، حداکثر تنش‌ها در نزدیکی ورودی آشیانه اتفاق افتاده است.

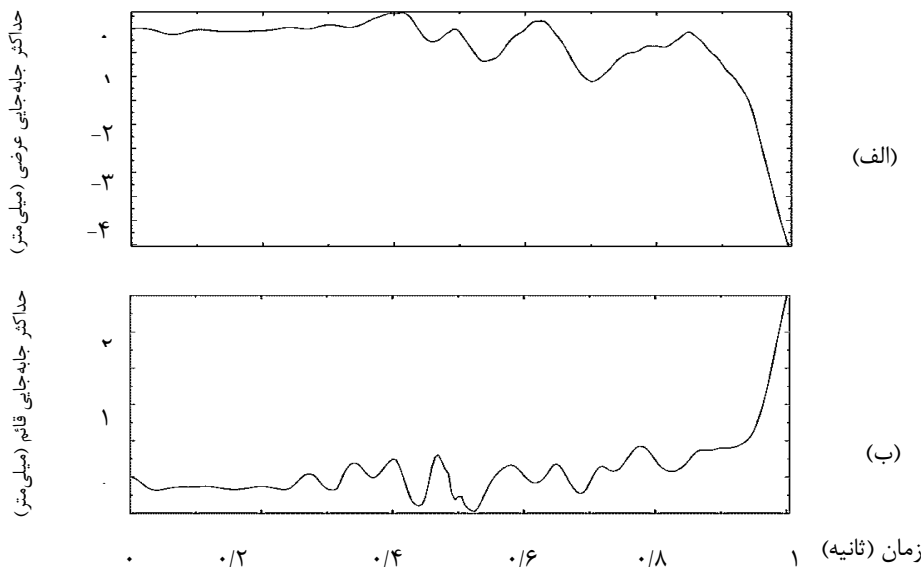
در حالت‌های انفجار در فاصله ۱۰ متری و ۳۰ متری از ورودی، تقریباً اکثر بدنه آشیانه با توجه به معیارهای خرابی معرفی شده در بخش قبل، دچار خرابی شده است و انهدام

کامل آشیانه در این حالت‌ها پیش‌بینی می‌شود. در فاصله ۶۰ متری، به علت دور بودن ماده منفجره نسبت به آشیانه هیچ‌گونه خرابی در بدنه آشیانه مشاهده نشده است. در شکل (۱۹) تاریخچه جابه‌جایی عرضی و قائم تاج میانی نشان داده شده است. تاریخچه جابه‌جایی عرضی و قائم تاج در قسمت میانی آشیانه نوساناتی دارد که حول صفر نیست و نشان می‌دهد جابه‌جایی‌های ماندگار در پوسته ایجاد شده است. در این حالت حداکثر جابه‌جایی عرضی و قائم به ترتیب به ۴/۵ و ۲۵ میلی‌متر می‌رسد.

در شکل (۲۰) تاریخچه فشار ثبت شده در سه گیج درون فضای آشیانه نشان داده شده است. در این حالت نوساناتی در نمودار دیده می‌شود که برای گیج نزدیک به دیواره انتهایی، فشار پس از یک تأخیر زمانی و حالت کم فشار به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و به ۲ برابر فشار دهانه ورودی می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که موج انفجار در اثر برخورد با دیواره‌های آشیانه دچار تشدید شده است.



شکل ۱۸. کانتور پوش تنش. انفجار در راستای محور آشیانه در ورودی برای فاصله: (الف) ۱۰ متری، (ب) ۳۰ متری و (پ) ۶۰ متری



شکل ۱۹. تاریخچه جابه‌جایی تاج در نقطه میانی آشیانه. انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه برای فاصله ۱۰ متری: (الف) حداکثر جابه‌جایی عرضی و (ب) حداکثر جابه‌جایی قائم

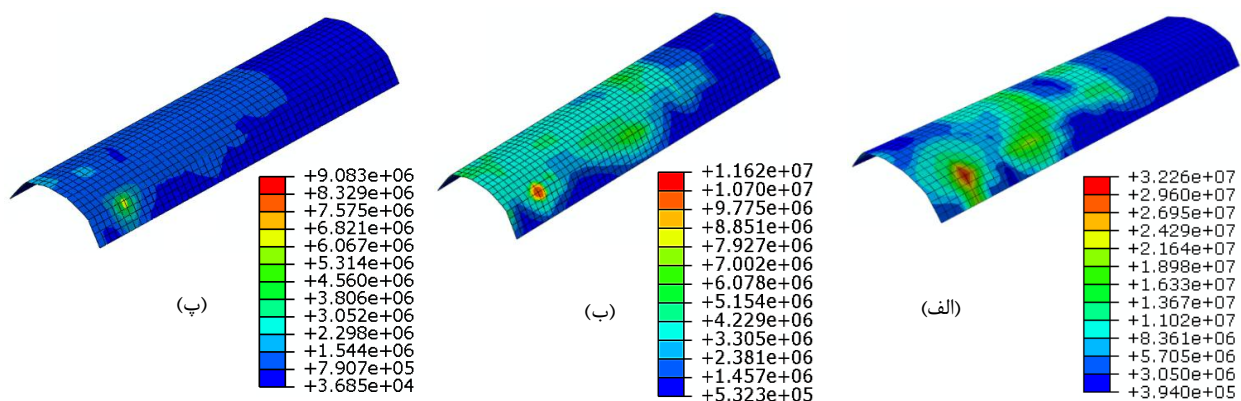
۳-۴. انفجار در راستای کنج آشیانه

در این حالت نیز امکان ورود موج انفجار به داخل آشیانه وجود دارد. بنابراین هوای درون آشیانه نیز مدل شده است. در شکل (۲۱) کانتور پوش تنش در حالت انفجار برای راستای کنج آشیانه نشان داده شده است. بیشترین مقادیر تنش‌ها در محدوده کنج آشیانه متمرکز شده است.

مبنای خرابی آشیانه، خرابی کششی و فشاری بتن مطابق شکل‌های (۱۱) و (۱۲) است. برای بررسی اثر انفجار در فاصله نزدیک، ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری از آشیانه قرار داده شده است. در این حالت اکثر بدنه دچار خرابی شده است و انهدام کامل آشیانه پیش‌بینی می‌شود. برای بررسی اثر انفجار در فاصله متوسط ماده منفجره در ۳۰ متری از کنج ورودی آشیانه مدل می‌شود. در این حالت خرابی در بدنه آشیانه به وجود نیامده است. در نهایت ماده منفجره در فاصله ۶۰ متری از کنج ورودی آشیانه قرار داده می‌شود. در این حالت نیز به علت دور بودن ماده منفجره نسبت به آشیانه هیچ‌گونه خرابی در بدنه آشیانه مشاهده نشد.

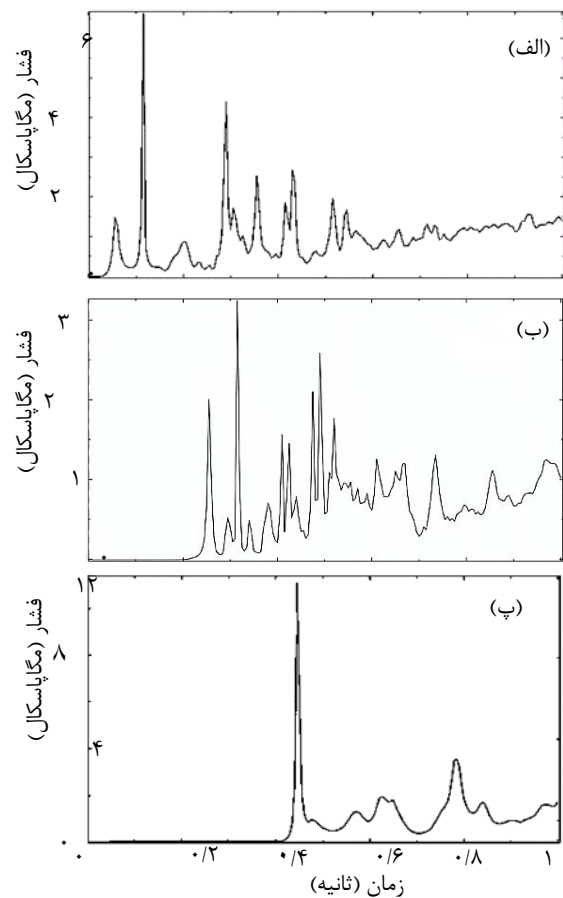
۴-۴. بررسی وضعیت ایمنی آشیانه

در جدول (۹) خرابی بتن آشیانه در حالت‌های مختلف انفجار و در فواصل مختلف بیان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله، سطح خرابی کاهش می‌یابد. در فاصله کم، در حالت‌هایی که امکان ورود موج انفجار به داخل آشیانه وجود دارد، انهدام کامل رخ داده، در غیر این صورت خرابی موضعی است.



شکل ۲۱. کانتور پوش تنش. انفجار در راستای کنج آشیانه برای فاصله: الف) ۱۰ متری، ب) ۳۰ متری و پ) ۶۰ متر

در این حالت فاصله مقیاس شده $Z_G = 60 \text{ m/ton}^{1/3}$ و مدت زمان اعمال بار انفجار ۳۹ میلی‌ثانیه است. برای تعمیم دادن نتیجه این تحقیق لازم است اشاره شود فشار موج انفجار وابسته به مقدار فاصله مقیاس شده است اما میزان خرابی علاوه بر فاصله مقیاس شده به مدت زمان اعمال بار



شکل ۲۰. تاریخچه فشار در سه گیج درون آشیانه برای فاصله ۱۰ متری: الف) گیج در تاج ورودی، ب) گیج در تاج میانی و پ) گیج در تاج انتهایی

هنگامی که ۱ تن ماده منفجره معادل TNT در فاصله ۶۰ متری از آشیانه منفجر می‌شود، در سناریوهای مختلف هیچ‌گونه خرابی ناشی از موج انفجار مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت آشیانه در نظر گرفته شده در برابر انفجار یک تن ماده منفجره در فاصله ۶۰ متری با مدت زمان انفجار ۳۹ میلی‌ثانیه ایمن می‌باشد.

بودن آشیانه بررسی شده است. مشاهده می‌شود که در فاصله مقیاس شده برابر با $60 \text{ m/ton}^{1/3}$ برای مقادیر ماده منفجره کمتر از ۱ تن، آشیانه در حاشیه امنیت قرار دارد و این امر به دلیل کاهش مدت زمان اعمال بار انفجار و کاهش انرژی ناشی از کاهش سطح زیر منحنی فشار- زمان بار انفجار است. با توجه به ساده‌سازی‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی و محدود بودن تعداد سناریوهای بررسی شده باید گفت تخمین دقیق فاصله ایمن احتیاج به مطالعات بیشتری دارد. با تخمین فاصله ایمن برای آشیانه‌های هواپیماها می‌توان به نحو مطلوب‌تری از این سازه‌های مهم در برابر عملیات تروریستی محافظت کرد.

انفجار نیز بستگی دارد. واضح است که در مقدار ماده منفجره ثابت، هر چه فاصله مقیاس شده بیشتر باشد خرابی کمتر است و در فاصله مقیاس شده ثابت، هر چه مدت زمان اعمال بار انفجار کمتر باشد، انرژی موج کمتر و در نتیجه میزان خرابی کمتر خواهد بود. بنابراین انتظار می‌رود در آشیانه‌های مشابه با آشیانه مورد بررسی در این تحقیق، هنگامی که فاصله مقیاس شده برابر با $Z_G = 60 \text{ m/ton}^{1/3}$ و مدت زمان اعمال بار انفجار کمتر از ۳۹ میلی‌ثانیه باشد، آشیانه در برابر انفجار ایمن باشد و هیچ‌گونه خرابی در بدنه آشیانه رخ ندهد.

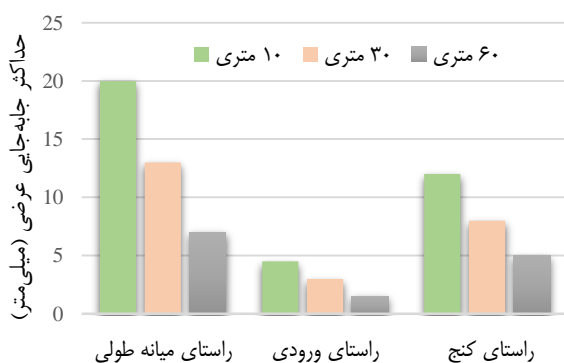
در جدول (۱۰) برای مقادیر مختلف ماده منفجره وضعیت ایمن

جدول ۹. میزان خرابی

انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی	انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه	انفجار در راستای کنج آشیانه	
خرابی موضعی	خرابی کامل	خرابی کامل	فاصله ۱۰ متری
خرابی موضعی	خرابی کامل	بدون خرابی	فاصله ۳۰ متری
بدون خرابی	بدون خرابی	بدون خرابی	فاصله ۶۰ متری

جدول ۱۰. فواصل ایمن برای مقادیر مختلف ماده منفجره

وزن ماده منفجره معادل TNT (ton)	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳
فاصله محاسبه شده با توجه به $Z_G = 60 \text{ (m) m/ton}^{1/3}$	۱۳	۲۲	۲۸	۴۸	۶۰	۶۹	۷۶	۸۱	۸۷
مدت زمان اعمال بار انفجار (ms)	۸/۴	۱۴/۴	۱۸/۱	۳۱	۳۹	۴۴/۷	۴۹/۲	۵۳	۵۶/۳
وضعیت آشیانه	دارای حاشیه امنیت			بدون خرابی		باید بررسی شود			



شکل ۲۲. اثر فاصله انفجار از آشیانه بر حداکثر جابه‌جایی عرضی تاج

حداکثر جابه‌جایی‌های قائم تاج در نقاط مختلف طول آشیانه، در حالت‌های انفجار در نظر گرفته شده در فواصل ۱۰، ۳۰ و ۶۰ متری در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

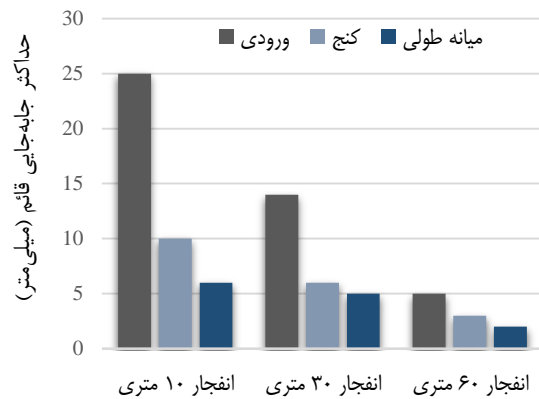
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک راستای مشخص، با افزایش فاصله ماده منفجره، مقدار جابه‌جایی قائم کاهش می‌یابد.

۴-۵. بررسی اثر شدت و راستای انفجارها

حداکثر جابه‌جایی‌های عرضی تاج در نقاط مختلف طول آشیانه در حالت‌های انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی، در راستای محور در ورودی آشیانه و در راستای کنج آشیانه در فواصل ۱۰، ۳۰ و ۶۰ متری در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

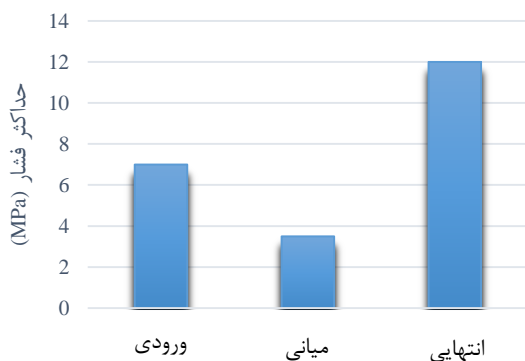
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک راستای مشخص، با افزایش فاصله ماده منفجره مقدار جابه‌جایی عرضی کاهش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش انرژی موج انفجار حین طی کردن مسافت بیشتر تا رسیدن به آشیانه است. همچنین می‌توان دریافت که در فاصله انفجار معین، بیشترین جابه‌جایی عرضی در حالت انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی و کمترین جابه‌جایی عرضی در حالت انفجار در راستای محور در ورودی اتفاق می‌افتد.

است. امواجی که به صورت موازی محور طولی آشیانه با آن برخورد می‌کنند، جابه‌جایی قائم بیشتری نسبت به سایر امواج ایجاد می‌کنند. در این حالت ارتعاش قائم آشیانه با سهولت بیشتری رخ می‌دهد. امواجی که عمود بر محور طولی آشیانه هستند، کمترین جابه‌جایی قائم را ایجاد می‌کنند. شبیه حالتی که آشیانه از جهت قائم تقریباً ثابت نگه داشته شده است.



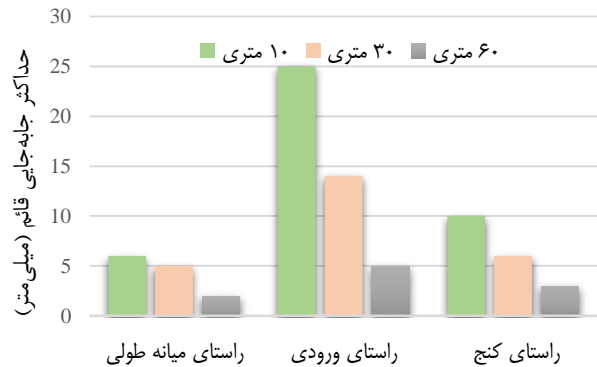
شکل ۲۵. اثر راستای انفجار بر حداکثر جابه‌جایی قائم تاج

در شکل‌های (۲۸) و (۲۶) تغییرات فشار گج‌های موجود در تاج ورودی، تاج میانی و تاج انتهایی آشیانه در حالت انفجار در راستای محور آشیانه در ورودی برای فواصل مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فاصله معین ماده منفجره بیشترین فشار در طول آشیانه مربوط به انتهای آشیانه است و این به دلیل بسته بودن انتهای آشیانه است که موجب انعکاس امواج می‌گردد. پس از آن بیشترین فشار را نقطه ابتدایی دارد زیرا نسبت به سایر قسمت‌های آشیانه، به محل انفجار نزدیک‌تر است. کمترین فشار در نقطه‌ای در میانه طولی رخ می‌دهد. همچنین نکته حائز اهمیت دیگر این است که در یک نقطه مشخص از آشیانه، هر چه فاصله ماده منفجره بیشتر شده، فشار کاهش یافته است.



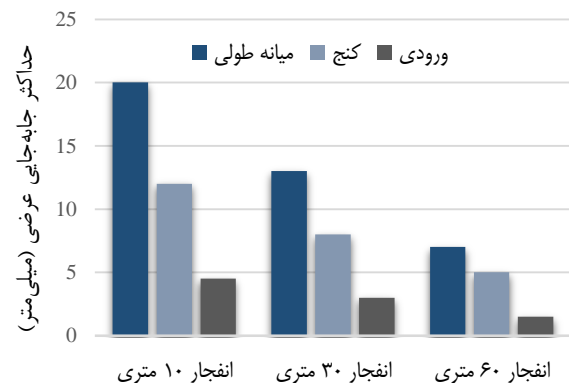
شکل ۲۶. تغییرات فشار در طول تونل برای انفجار در ۱۰ متری ورودی

این امر به دلیل کاهش انرژی موج انفجار حین طی کردن مسافت بیشتر تا رسیدن به آشیانه است. همچنین می‌توان دریافت که در فاصله انفجار معین، بیشترین جابه‌جایی قائم مربوط به حالت انفجار در راستای محور در ورودی و کمترین آن مربوط به انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی است.



شکل ۲۴. اثر راستای انفجار بر حداکثر جابه‌جایی عرضی تاج

در شکل (۲۴) اثر راستای انفجار بر حداکثر جابه‌جایی عرضی تاج در نقاط مختلف طول آشیانه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فاصله معین بیشترین جابه‌جایی عرضی تاج مربوط به انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی است. امواجی که به صورت عمود بر محور طولی آشیانه با آن برخورد می‌کنند، جابه‌جایی عرضی بیشتری نسبت به سایر امواج ایجاد می‌کنند. در این حالت ارتعاش جانبی آشیانه با سهولت بیشتری رخ می‌دهد. امواجی که موازی محور طولی آشیانه هستند کمترین جابه‌جایی عرضی را ایجاد می‌کنند. شبیه حالتی که آشیانه از جهت عرضی تقریباً ثابت نگه داشته شده است.



شکل ۲۵. اثر راستای انفجار بر حداکثر جابه‌جایی قائم تاج در

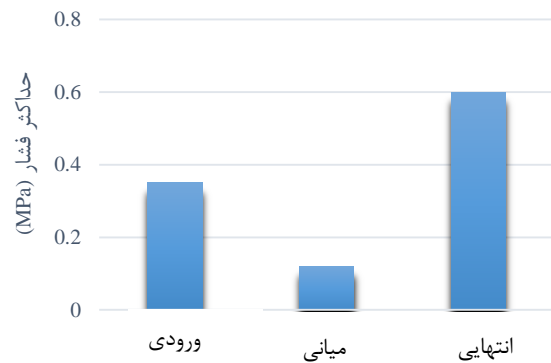
نقاط مختلف طول آشیانه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فاصله معین، بیشترین جابه‌جایی قائم تاج مربوط به انفجار در راستای محور در ورودی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فاصله معین، بیشترین جابه‌جایی قائم تاج مربوط به انفجار در راستای محور در ورودی

گفت با افزایش فاصله ماده منفجره از ۱۰ متر به ۶۰ متر، فشار گنج‌های موجود در قسمت‌های مختلف آشیانه به ۱ درصد مقدار اولیه خود می‌رسد. در یک فاصله مشخص انفجار بیشترین فشار مربوط به گنج واقع در انتهای تونل است، زیرا این گنج نزدیک به دیواره انتهایی آشیانه است و موج پس از برخورد به دیواره انتهایی، تشدید می‌شود. این ناحیه منطقه پر فشار محسوب می‌شود (در انفجار در فاصله نزدیک، فشار گنج انتهایی تا ۱۲ مگاپاسکال می‌رسد). فشار گنج ابتدای تونل به دلیل نزدیک بودن به محل انفجار از فشار گنج میانی بیشتر است. هر چه فاصله ماده منفجره با سطح آشیانه بیشتر می‌شود، سطح خرابی کاهش می‌یابد. هنگامی که ۱ تن ماده منفجره معادل TNT در فاصله ۶۰ متری از آشیانه منفجر می‌شود، در سناریوهای مختلف انفجار هیچ‌گونه خرابی مشاهده نشد. بنابراین می‌توان گفت آشیانه مورد نظر در برابر این سناریوی انفجار ایمن است. فاصله مقیاس شده در این سناریو $Z_G = 60 \text{ m/ton}^{1/3}$ و مدت زمان اعمال بار انفجار ۳۹ میلی‌ثانیه به دست می‌آید. انتظار می‌رود هنگامی که فاصله مقیاس شده برابر با $Z_G = 60 \text{ m/ton}^{1/3}$ ، و مدت زمان اعمال بار انفجار کمتر از ۳۹ میلی‌ثانیه باشد، آشیانه در مقابل خرابی ایمن باشد. البته لازم است برای تصمیم‌گیری قاطع سناریوهای بیشتری بررسی شود. در نهایت، از نتایج این تحقیق می‌توان در خصوص انتخاب یک محدوده شعاعی امن در برابر حملات تروریستی و محافظت این نوع سازه‌ها استفاده کرد. این امر یک تصمیم‌گیری چند معیاره بر مبنای میزان پذیرش خسارت و ریسک، میزان اهمیت سازه و میزان سرمایه‌گذاری است. البته لازم به ذکر است برای تخمین دقیق فاصله ایمن احتیاج به مطالعات بیشتری است تا تصمیم‌گیری در این خصوص با حاشیه اطمینان بیشتری صورت گیرد.

۶. مراجع

- [1] Pei, Y.; Bai, Y.; Shi, Y.; Zhu, D.; Wang, Y. "Temperature Distribution in a Long-Span Aircraft Hangar"; Tsinghua Science & Technology 2008, 13, 184-190.
- [2] Kazakevitch, M. "The Aerodynamics of a Hangar Membrane Roof"; J. Wind Eng. Ind. Aerod. 1998, 77, 157-169.
- [3] Pasternak, H.; Schilling, S.; Komann, S. "The Steel Construction of the New Cargo Lifter Airship Hangar"; Struct. Eng. Mech. 2001, 173-182.
- [4] Mang, F.; Wolfmüller, F.; Yoon, W. Y. "Theoretical and Experimental Investigations on the Tabular Structure of Changi Hangar Roof"; Welding of Tubular Structures 1984, 189-197.
- [5] Pantelides, C. P.; Garfield, T. T.; Richins, W. D.; Larson, T. K.; Blakeley, J. B. "Reinforced Concrete and Fiber Reinforced Concrete Panels Subjected to Blast Detonations and Post-Blast Static Tests"; Eng. Struct. 2014, 76, 24-33.
- [6] Lin, X.; Zhang, Y. X.; Hazell, P. J. "Modeling the Response of Reinforced Concrete Panels under Blast Loading"; Mater. Design 2014, 56, 620-628.



شکل ۲۷. تغییرات فشار در طول تونل برای انفجار در ۳۰ متری ورودی



شکل ۲۸. تغییرات فشار در طول تونل برای انفجار در ۶۰ متری ورودی

۵. نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که در یک روند کلی با افزایش فاصله انفجار، به دلیل کاهش شدت موج انفجار مقدار جابه‌جایی تاج آشیانه کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش در حالات مختلف انفجار کمی متفاوت است؛ اما به طور متوسط می‌توان گفت با افزایش فاصله ماده منفجره از آشیانه، از ۱۰ متر به ۶۰ متر، مقدار جابه‌جایی عرضی به ۳۷ درصد و مقدار جابه‌جایی قائم به ۳۰ درصد مقدار اولیه خود می‌رسد. بیشترین جابه‌جایی عرضی برابر با ۲۰ میلی‌متر و مربوط به انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی و فاصله ۱۰ متری است. کمترین جابه‌جایی عرضی نیز ۱/۵ میلی‌متر و مربوط به انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه و فاصله ۶۰ متری است. بیشترین جابه‌جایی قائم برابر با ۲۵ میلی‌متر و مربوط به انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه و فاصله ۱۰ متری است و علت آن نوسان آشیانه به صورت قائم در این حالت است. کمترین جابه‌جایی قائم نیز ۲ میلی‌متر و مربوط به انفجار عمود بر راستای آشیانه در میانه طولی و فاصله ۶۰ متری است. در حالت انفجار در راستای محور در ورودی آشیانه گنج‌هایی برای اندازه‌گیری فشار قرار داده شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش فاصله انفجار، فشار گنج‌های اندازه‌گیری، کاهش یافته است. به طور متوسط می‌توان

- [12] ABAQUS/CAE, Version 6.11-PR3, Dassault Systems Simulia Corp., User Manual, RI, 2010.
- [13] Kingery, C. N.; Bulmash, G. "Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst"; Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- [14] Hyde, D. "User's Guide for Microcomputer Programs ConWep and FUNPRO Applications of TM5- 855- 1: Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; U.S. Army Engineers Waterways Experimentation Station, 1988.
- [15] Wu, C.; Oehlers D. J.; Rebenrost, M.; Leach, J.; Whittaker, A. S. "Blast Testing of Ultra-High Performance Fiber and FRP-Retrofitted Concrete Slabs"; Int. J. Eng. Struct. 2009, 31, 2060-2069.
- [7] Nguyen, T. P.; Tran M. D. "Response of Vertical Wall Structures under Blast Loading by Dynamic Analysis"; 12th East Asia-Pacific Conf. on Structural Eng. and Construction, 2011, 3308-3316.
- [8] Pandey, A. K. "Damage Prediction of RC Containment Shell Under Impact and Blast Loading"; Struct. Eng. Mech. 2010, 36, 729-744.
- [9] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defence, Washington DC, 2008.
- [10] TM 5-855-1 "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons"; US Army Eng. Water Ways Experiment Station, 1984.
- [11] TM 5-1300 "The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of the Army, Navy, and Air Force, Washington DC, 1990.