

بررسی قابلیت اعتماد سازه بتن آرمه مدفون در خاک متأثر از انفجار سطحی

سید شهاب امامزاده^{۱*}، خداداد واحدی^۲، فریدون خسروی^۳، سعید هاشمپور^۴

۱- استادیار دانشگاه خوارزمی، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(دریافت: ۹۶/۱۰/۲۵، پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۹)

چکیده

سازه‌های بتن آرمه مدفون، فضاهای ایمن برای مقاصد نظامی به شمار می‌روند. در پروژه‌های پدافند غیرعامل، فضاهای زیرزمینی، کاربردهای گسترده‌ای دارند و از نظر امنیتی به تجهیزات دفاعی کمتری در مقایسه با سازه‌های سطحی نیازمندند. یکی از بارهای محتمل بر سازه‌های مدفون، انفجار است. در انفجارهای سطحی که در روی زمین یا عمق کمی از سطح زمین رخ می‌دهند، بخشی از انرژی انفجار وارد محیط خاک شده و سبب ایجاد گودال و امواج درون زمینی می‌شود. با توجه به این که سقف سازه مدفون بیشترین اثر را از انفجار سطحی دریافت می‌کند، بررسی قابلیت اعتماد سقف ضروری است. در این تحقیق، با ساخت مدل اجزای محدود سازه مدفون، از روش هاسوفر و لیند در طراحی سقف سازه برای رسیدن به یک شاخص قابلیت اعتماد مشخص استفاده شده است. هدف طراحی، رسیدن به شاخص قابلیت اعتمادی برابر ۳/۷ بود که معادل احتمال خرابی ۰/۰۰۰۱ است. اثر انفجار و میزان خرابی آن در سازه با نرم‌افزار اتوداین شبیه‌سازی شد. بدین ترتیب، تأثیر متغیرهای مقاومتی در قابلیت اعتماد سازه مدفون تحت بار انفجار سطحی تعیین شد و مشخص گردید که بهبود کیفیت اجرا و شناخت دقیق مصالح و رفتار سازه‌ها، امکان افزایش ضریب اطمینان را فراهم می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: سازه مدفون، قابلیت اعتماد، انفجار سطحی، بتن، خاک، اتوداین

Reliability Analysis of Buried Reinforced Concrete Structure Affected by Surface Explosions

S. Sh. Emamzadeh*, Kh. Vahedy, F. Khosravi, S. Hashempour

Kharazmi University, Tehran

(Received: 15/01/2018; Accepted: 29/04/2018)

Abstract

Buried reinforced concrete structures are considered as secure places for military purposes. In passive defence projects, underground spaces have a lot of applications and in terms of security, less defence equipment is required, compared to surface structures. One of the possible loads on buried structures is explosion. In surface explosions, which take place on the ground or in the shallows of the ground, a part of explosion energy enters the soil and creates holes and waves in the ground. Since the roof of the buried structure receives the greatest effect of the explosion, it is necessary to review the rules that govern the slab bending. In this research, through the Hasofer-Lind method, the specified reliability index of the roof is designed. After validating the numerical model, a buried structure is simulated for the reliability index of 3.7 with the potential destruction of 0.0001. The explosion effects and damage rate are examined by AUTODYN software. Thus, the effects of resistance variables in the reliability of buried structures under explosion load are determined and it has been shown that improving the quality of implementation and the precise knowledge of the materials and behavior of the structures would make it possible to increase reliability of the plan.

Keywords: Buried Structure, Reliability, Surface Explosion, Concrete, Soil, Autodyn

* Corresponding Author E-mail: shemamzadeh@khu.ac.ir

۱. مقدمه

در تغییر قابلیت اعتماد سازه بتنی مدفون از دستاوردهای این تحقیق است.

۲. روش تحقیق

به دلیل ماهیت پیچیده پدیده انفجار و رفتار غیرخطی خاک و سازه برای دستیابی به جایجایی و تنش‌های ایجادشده، روش عددی اجزای محدود پیشنهاد می‌گردد. در این تحقیق با فرض ثابت بودن وزن ماده منفجره و مشخص بودن نوع ماده منفجره (TNT)، تأثیر بار حاصل از انفجار سطحی بر روی یک سازه مدفون بتنی با ابعاد و جنس خاک مشخص بررسی می‌شود. در مدل ساخته شده سه قسمت ماده منفجره، خاک و سازه با اجزای محدود سه بعدی آجری مدل شده و معادلات حالت و رفتار غیرخطی در این اجزا تعریف گردیده است. پس از تحلیل عددی به روش هاسوفر و لیند، سقف سازه مدفون برای رسیدن به یک شاخص قابلیت اعتماد مشخص طراحی می‌گردد.

۲-۱. ملاحظات پدافند غیرعامل و لزوم توجه به آن

طبق تعریف مندرج در مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان، پناهگاه مکان بسته‌ای است که به سبب طراحی تخصصی و کاربری خاص در مقابل انواع تهدیدها، نسبت به ساختمان‌های متعارف از درجه حفاظت به مراتب بالاتری برخوردار است و امنیت جانی و روانی بیشتری را برای افراد فراهم می‌سازد. مشخصات پناهگاه عبارت است از اندازه پناهگاه که باید جوابگوی نیازهای عملکردی اقامت بلندمدت در شرایط بحران و انجام فعالیت‌های روزمره و برنامه‌ریزی شده افراد در حداقل فضا و با کارایی قابل قبول باشد. حداقل ارتفاع مفید پناهگاه باید در راهروها ۲/۱۰ متر و در بخش‌های اقامتی ۲/۳۰ متر باشد. حداقل مساحت مفید مورد نیاز برای هر نفر در بخش‌های اقامتی یک مترمربع در نظر گرفته شود. حداقل عرض مفید در بخش اقامتی سه متر و راهروهای ارتباطی دو متر است. در بخش‌های اقامتی تا ارتفاع دو متر باید یک لایه مناسب داخلی پیش‌بینی شود و از مصالح شکننده و قابل اشتعال در فضاهای داخلی اجتناب شود. از سیستم‌های سازه‌ای رایج در پناهگاه‌ها انتظار می‌رود، در مقابل فشارهای زیاد ناشی از انفجار متوسط و زیاد مقاوم باشند. سازه‌های پناهگاهی را معمولاً می‌توان به سه روش نیمه مدفون، مدفون و تونل اجرا کرد [۹].

در روش اجرای مدفون و نیمه مدفون، ضخامت خاک روی پناهگاه باید حداقل به اندازه نصف کوچک‌ترین بعد پناهگاه یا دو متر (هر کدام که بزرگ‌ترند) باشد. به هر حال مجموع ضخامت خاک و بتن باید بزرگ‌تر از عمق نفوذ بمب‌های نفوذگر باشد. استفاده از خاک تراکم‌پذیر نسبت به خاک‌های با دانه‌بندی یکنواخت ارجحیت دارد. همچنین استفاده از ماسه بادی مجاز

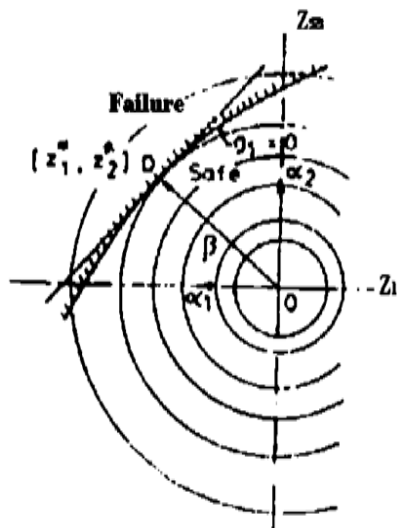
امروزه با توجه به حملات تروریستی و افزایش وحشت از جنگ در دنیا، کشورهای مختلف به ناچار مطالعات زیادی در زمینه موضوع انفجار و اثرهای آن انجام داده‌اند، به خصوص در مورد سازه‌های راهبردی مانند سایت‌های هسته‌ای، مراکز فرماندهی و کنترل، تأسیسات مهم صنعتی، زاغه‌های مهمات نظامی، مراکز مهم آزمایشگاهی و اقتصادی. در کشور ما نیز با توجه به انواع تهدیدها (حملات هوایی، موشکی و تروریستی) و لزوم آمادگی کامل در برابر آن‌ها، نیاز بسیار زیادی به انجام این مطالعات در حوزه پدافند غیرعامل احساس می‌شود. امروزه با توجه به انواع سازه‌های امن، می‌توان از سازه‌های زیرزمینی به عنوان ایمن‌ترین آن‌ها نام برد. اصطلاح قابلیت اعتماد سازه‌ها از سال ۱۹۲۹ در زمینه خستگی مواد و در ادامه از اواسط ۱۹۳۰ در بررسی مقاومت مصالح مطرح شد. یکی از این موارد، مطالعات فریدنتال و پوگسلی در زمینه قابلیت اعتماد سازه‌ها در برابر بارهای استاتیکی بود [۱]. مورد دیگر، تحقیقات سندرس و برنوبن در زمینه تأثیر ارتعاش و بارهای دینامیکی بر طول عمر سازه‌ها بود [۱]. اهمیت مطالعه قابلیت اعتماد را می‌توان از نظر صدمات جانی نیز مورد توجه قرار داد. ریسک شکست سازه‌های مکانیکی و ساختمانی غیرقابل مقایسه است، با وجود این طراحان سعی دارند تا قابلیت اعتماد بیشتری برای ماشین‌آلات و سازه‌ها به دست آورند. در ادامه چند عنوان مهم از مقالات قابلیت اعتماد مرتبط با این تحقیق که قبلاً ارائه شده است، بیان می‌شود.

«تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های بتنی مدفون در برابر برخورد پرتابه‌ها» [۲]؛ «تحلیل قابلیت اعتماد ساختمان‌های موجود در برابر زلزله» [۳]؛ «تحلیل قابلیت اطمینان عرشه دال‌های بتنی تقویت شده با تیر ورق‌های آهنی» [۴]؛ «تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان دال‌های بتن مسلح تحت اثر بارگذاری انفجاری» [۵]؛ «روش جدید برای تحلیل فروپاشی پیشرفته بتن مسلح تحت اثر بارگذاری انفجاری» [۶]؛ «بررسی قابلیت اعتمادپذیری دال‌های بتن آرمه تحت اثر نیروی ناشی از انفجار» [۷]؛ «محاسبه عمق نفوذ پرتابه‌ها در اهداف بتنی پوشش‌دار» [۸].

با توجه به این که بر روی قابلیت اعتماد سازه‌های مدفون دفاعی مطالعات اندکی توسط محققین انجام شده است، به همین دلیل در این مقاله قابلیت اعتماد این نوع سازه‌ها در برابر انفجارهای سطحی بررسی می‌شود.

در این تحقیق ایمنی یک سازه مدفون تخمین زده شده و با مطالعه تأثیر متغیرهای تصادفی بر روی قابلیت اعتماد سازه بتنی مدفون، در مورد چگونگی تغییر قابلیت اعتماد سازه در برابر تغییرات پارامترهای مؤثر بحث می‌شود. بررسی پارامترهای مؤثر

در روش هاسوفر و لیند شاخص قابلیت اعتماد β یعنی کوتاه‌ترین فاصله بین مبدأ مختصات تا سطح خرابی در دستگاه مختصات نرمال. مطابق شکل (۱)، نقطه D، نقطه طراحی نامیده می‌شود که روی سطح خرابی است. این نقطه همچنین نقطه کنترل ایمنی سازه نامیده می‌شود [۱۱].



شکل ۱. روش هاسوفر و لیند و شاخص β در مختصات نرمال [۱۱].

۳-۲. طراحی بر اساس قابلیت اعتماد

طراحی بر اساس قابلیت اعتماد یعنی رسیدن به یک تراز معینی از مخاطره. اگر عضوی با مقاومت R تحت اثر بار S قرار گرفته باشد به طوری که R و S متغیرهای نرمال مستقل باشند، آن‌گاه:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

میانگین مقاومت مورد نیاز برای تأمین قابلیت اعتماد مورد نظر β عبارت است از:

$$\mu_R = \mu_S + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (3)$$

معمولاً مقاومت R و بار S بر حسب چندین متغیر و ثابت‌های طراحی تعریف می‌شوند، لذا برای ایمنی باید:

$$g_R(X_1, X_2, \dots, X_m, C_1, C_2, \dots, C_i) \geq g_S(X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n, C_j, C_{j+1}, \dots) \quad (4)$$

که در آن X_1, X_2, \dots, X_m متغیرهای مقاومت و $X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n$ متغیرهای بار و C_1, C_2, \dots, C_i ثابت‌های طراحی اند. g_S و g_R به ترتیب توابع مؤثر مقاومت و بار هستند. اگر x_i^* مقادیر طراحی متغیرها باشند، پس معادله طراحی چنین خواهد بود [۱۱].

نیست و بهتر است از شن شکسته با دانه‌بندی درشت استفاده شود [۹].

۲-۲. ایمنی و خدمت‌پذیری

ایمنی یعنی کفایت مقاومت یک سازه در مقابل تمام بارهایی که وقوع آن‌ها محتمل است. اگر مقاومت یک سازه به طور دقیق قابل پیش‌بینی بود و اگر بارها و آثار داخلی آن‌ها مثل لنگر خمشی، نیروی برشی و محوری با دقت کامل معلوم بود، آن‌گاه با فراهم ساختن ظرفیت باربری سازه به مقدار جزئی بیشتر از بارهای وارده می‌توان از ایمنی سازه مطمئن بود. لیکن در تحلیل، طراحی و اجرای سازه‌های بتن مسلح همیشه تعدادی عوامل غیرقطعی وجود دارند. این عوامل غیرقطعی، برقراری یک حاشیه اطمینان یا ضریب اطمینان را لازم می‌دارند.

مقدار بارهای واقعی و توزیع آن‌ها ممکن است با مقدار بارهای مفروض طراحی متفاوت باشند. ساده‌سازی‌ها و مفروضاتی که برای ایده‌آل کردن سازه هنگام تحلیل به کار می‌رود، موجب به وجود آمدن خطاهایی در آثار نیرو (تلاش‌های خمشی، برشی، محوری) می‌شود. به علت نداشتن دانش کافی، رفتار یک سازه ممکن است با رفتار مفروض متفاوت باشد. به دلیل مغایرت احتمالی ابعاد واقعی سازه با مقادیر مفروض طراحی ممکن است مقاومت واقعی مصالح، با مقادیر فرض شده در طراحی متفاوت باشد.

یک سازه وقتی دارای حاشیه ایمنی (Z) خواهد بود که مقاومت سازه (R) بزرگ‌تر از بارهای وارده (S) بر آن باشد، یعنی

$$Z = R - S > 0 \quad (1)$$

چون R و S متغیرهای اتفاقی یا تصادفی هستند، حاشیه ایمنی سازه Z نیز یک متغیر اتفاقی خواهد بود [۱۰]. برای تعیین ایمنی سازه‌ها در نظر گرفتن این تغییرات تصادفی مورد نیاز است.

ایمنی با قابلیت اعتماد تعریف می‌شود که عبارت است از احتمال بقای یک ساختمان در شرایط محیطی داده‌شده و آن چیزی جزء قابلیت یک سازه در انجام وظایف تعیین‌شده به نحو مطلوب و در زمان تعیین‌شده نیست.

در مباحث قابلیت اعتماد برای سیستم‌های سازه‌ای، تعیین عمر، نرخ خرابی یا زمان از کارافتادگی مشکل است. با استفاده از روش احتمالاتی، امکان کسب قابلیت اعتماد یکنواخت وجود دارد که ممکن است به طراحی‌های اقتصادی‌تر منجر شود. روش‌های رایج قابلیت اعتماد سازه عبارت‌اند از روش مونت کارلو، روش قابلیت اعتماد تراز و روش هاسوفر و لیند.

$$x_i^* = \mu_i + \sigma_i y_i^* \quad x_i^* = \mu_i + \sigma_i \alpha_i^* \beta \quad (13)$$

که در آن، δ_i ضریب پراکندگی X_i است، بنابراین، ضریب اطمینان جزئی مورد نظر که برای β داده شده عبارت است از:

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{x_{ni}} = \mu_i \frac{(1 + \delta_i \alpha_i^* \beta)}{x_{ni}} \quad (14)$$

ضرایب اطمینان جزئی را می توان بر حسب مقدار میانگین تعریف نمود [۱۱]

$$\gamma_{ci} = \frac{x_i^*}{\mu_i} \quad \lambda_{ci} = (1 + \delta_i \alpha_i^* \beta) \quad (15)$$

۲-۵. الگوهای کنترل ایمنی LRFD

الگوی کنترل ایمنی LRFD عبارت است از کنترل ضریب بار و مقاومت، که توسط راویندرا، گالاموس و الینگوود پیشنهاد شد. در این الگو فقط چهار نوع ترکیبات بار توصیه می شود که عبارت اند از:

$$\gamma_R R_n \geq \gamma_D \mu_D + \gamma_L \mu_{L_m}$$

$$\gamma_R R_n \geq \gamma_D \mu_D + \gamma_{apt} \mu_{L_{apt}} + \gamma_W \mu_{W_m} \quad (16)$$

$$\gamma_R R_n \geq \gamma_D \mu_D + \gamma_{apt} \mu_{L_{apt}} + \gamma_S \mu_{S_m}$$

$$\gamma_R R_n \geq \gamma_W \mu_{W_m} - \gamma_D \mu_D$$

μ_D میانگین بار مرده و μ_{L_m} و μ_{W_m} و μ_{S_m} به ترتیب میانگین های بارهای زنده و حداکثر بار باد و برف در طول عمر سازه هستند. ضرایب بار باید پیش از تحلیل اعمال شوند. اگر رابطه بین بار و اثر بار خطی باشد، ضرایب بار می توانند مستقیماً به اثرات بار اعمال شوند [۱۱].

۲-۶. شبیه سازی با یک نمونه فرضی

برای بررسی روش طراحی بر اساس قابلیت اعتماد، یک سازه زیرزمینی بتنی به طول ۱۱، عرض و ارتفاع ۵ متر که در عمق ۴ متر مدفون شده به عنوان یک نمونه فرضی در نظر گرفته شد. نوع خاک روی سازه از جنس ماسه نرم و سست بوده و مشخصات آن مطابق کتابخانه مواد نرم افزار اتوداین (Autodyn) تعریف گردید [۱۲] که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک در نظر گرفته شده در نرم افزار Autodyn [۱۲]

ردیف	نام مشخصه خاک	مقدار مشخصه
۱	ضریب دانه بندی	$\frac{c_r}{c_r} = 2$
۲	چگالی خاک خشک	۱۵۷۴ کیلوگرم بر مترمکعب
۳	چگالی خاک مرطوب	۲۶۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب
۴	متوسط درصد رطوبت	۶/۵۷ درصد

$$g_R(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*, C_1, C_2, \dots) \geq g_S(x_{m+1}^*, x_{m+2}^*, \dots, C_j, C_{j+1}, \dots) \quad (5)$$

۲-۴. تعیین ضرایب اطمینان جزئی

ضریب اطمینان جزئی نسبت به یک مقدار خاص متغیر تعریف می شود. اگر آن نسبت به مقدار میانگین مانند آنچه در زیر آمده تعریف شده باشد:

$$\gamma_{ci} = \frac{x_i^*}{\mu_i} \quad (6)$$

ضریب اطمینان مرکزی نامیده می شود. μ_i مقدار میانگین X_i است. ضریب اطمینان جزئی γ_i تعریف شده بر حسب مقدار اسمی X_{ni} از متغیر X_i چنین داده شده است:

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{x_{ni}} \quad (7)$$

هر وقت γ_i به کار می رود، منظور ضریب اطمینان جزئی نسبت به مقدار اسمی است. بر مبنای γ_i معادله طراحی به صورت زیر در می آید:

$$g_R(\gamma_1 X_{n1}, \gamma_2 X_{n2}, \dots, \gamma_k X_{nk}, C_1, C_2, \dots, C_i) \geq g_S(\gamma_{k+1} X_{n,k+1}, \gamma_{k+2} X_{n,k+2}, \dots, X_n, C_j, C_{j+1}, \dots) \quad (8)$$

طراحی بر اساس قابلیت اعتماد به معنای تعیین مقادیر ضرایب اطمینان جزئی برای رسیدن به یک سطح خرابی خاص است. ترازهای مختلف ایمنی (بر حسب β) سطوح خرابی مختلفی را خواهند داد که به طراحی های مختلف منجر می شود. اگر x_i^* مقدار طراحی متغیر اصلی X_i باشند، معادله سطح خرابی عبارت است از:

$$g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0 \quad (9)$$

اگر ضرایب ایمنی جزئی به مقادیر اسمی متغیرها مربوط باشند، معادله چنین می شود:

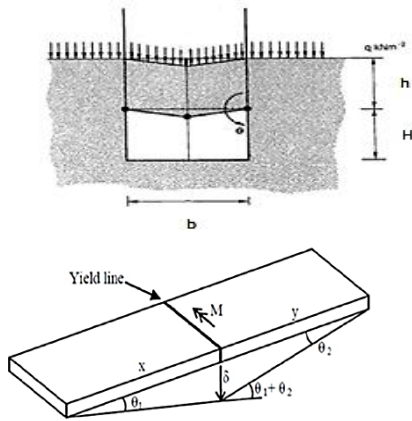
$$g_R(\gamma_1 X_{n1}, \gamma_2 X_{n2}, \dots, \gamma_n X_{nn}) = 0 \quad (10)$$

از آنجا که نقطه طراحی باید محتمل ترین نقطه خرابی باشد، مسئله تعیین محتمل ترین نقطه خرابی است. در دستگاه مختصات نرمال محتمل ترین نقطه خرابی با معادله زیر داده شده است [۱۱].

$$x_i^* = \mu_i (1 + \delta_i \alpha_i^* \beta) \quad (11)$$

و

$$\alpha_i^* = \frac{-\left(\frac{\partial g_1}{\partial y_i}\right)^*}{\left[\sum \left(\frac{\partial g_1}{\partial y_i}\right)^*\right]^{1/2}} \quad y_i^* = \alpha_i^* \beta \quad (12)$$



شکل ۳. مکانیزم شکست سقف سازه مدفون [۱۳]

$$2c_u \theta \frac{b}{2} Lh \tag{۱۸}$$

لذا مجموع مقاومت خاک و سازه R برابر است با [۱۳].

$$R = 4M_p \theta + 2c_u \theta \frac{b}{2} Lh \tag{۱۹}$$

و بارهای وارد بر سازه از وزن خاک و انفجار S برابر است با [۱۳].

$$S = 2\rho h \frac{b}{2} \frac{b}{4} \theta + 1/5 P_s \frac{b^2}{4} \theta \tag{۲۰}$$

معادله تعادل برای قابلیت اعتماد سازه برابر است با:

$$Z = R - S$$

$$Z = 4M_p \theta + 2c_u \theta \frac{b}{2} Lh - 2\rho h \frac{b}{2} \frac{b}{4} \theta - 1/5 P_s \frac{b^2}{4} \theta \tag{۲۱}$$

طبق طبقه‌بندی UFC، [۱۵]، دال سقف از نوع تیپ A در نظر گرفته می‌شود. در این تیپ $0 < \theta < 2$ است و در این حالت پوشش بتنی آرماتورهای دال سقف خرد نشده و سقف ریزش نمی‌کند [۱۶]. با توجه به ماسه‌ایی بودن نوع خاک، ضریب c_u که پارامتر مقاومت برشی کوشی است، برابر صفر است، بنابراین خاک هیچ مقاومت برشی به دلیل ماسه بودن در برابر جابه‌جایی نخواهد داشت [۱۷]. در واقع مقاومت برشی خاک در برابر بارهای وارده صفر خواهد بود و تنها پارامتر مقاومت، مقاومت خمشی دال است. برای طراحی ۱ متر از طول دال در نظر گرفته می‌شود درواقع $L=1m$.

$$Z = 4M_p \theta - 2\rho h \frac{b}{2} \frac{b}{4} \theta - 1/5 P_s \frac{b^2}{4} \theta \tag{۲۲}$$

۲-۷. بار مرده وارده به سازه

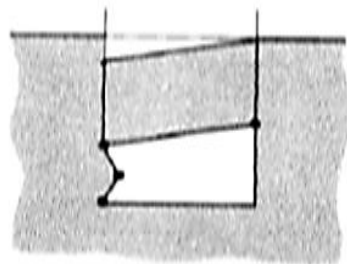
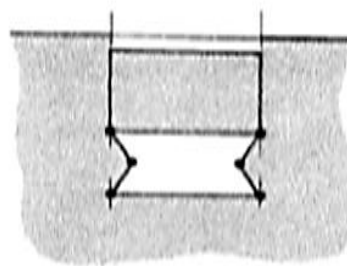
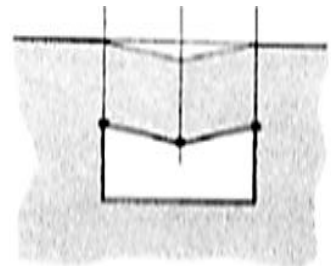
بار مرده عبارت است از وزن خاک روی سقف سازه و فشار جانبی خاک روی دیوارها. فشار وزن روی سقف عبارت است از نرخ کاری که به وسیله وزن خاک انجام می‌گیرد (شکل ۳).

در این نمونه، ۲۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در روی سطح زمین و در راستای مرکز هندسی سقف سازه قرار دارد. هدف طراحی، تعیین ضخامت سقف و مساحت آرماتور کششی با توجه به شاخص قابلیت اعتماد مشخص (β) و بر اساس آیین‌نامه‌ها و اعمال ضرایب اطمینان جزئی است. مکانیزم‌های احتمالی شکست سازه مدفون در شکل (۲) نشان داده شده است. با فرض شکست در سقف سازه به علت نزدیکی سقف به سطح زمین، شکست سقف طبق شکل (۳) فرض می‌گردد.

به منظور اطمینان، مطابق شکل (۳)، حداکثر فشار حاصل از انفجار ماده منفجره که از خاک بر روی سقف منتقل می‌شود، به صورت یکنواخت فرض می‌شود [۱۴]. بر اساس شکل (۳)، نرخ کار لنگر پلاستیک بر حسب کیلووات بر متر برابر است با (زاویه کناری θ باشد زاویه میانی 2θ است) [۱۳].

$$4M_p \theta \tag{۱۷}$$

توان به‌دست‌آمده از چسبندگی خاک نیز برابر است با [۱۳].



شکل ۲. مکانیزم‌های احتمالی شکست سازه مدفون [۱۳]

که در آن، P_0 حداکثر فشار، ρ چگالی خاک و C سرعت انتشار موج و U حداکثر سرعت ذرات است. C از رابطه زیر به دست می آید [۱۳]:

$$C = c + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) U \quad (25)$$

n ارائه شده برای ماسه خشک یا نرم نامتراکم برابر ۳ و c سرعت ارتعاش برابر ۲۰۰ متر بر ثانیه است. U حداکثر سرعت ذرات از رابطه زیر به دست می آید:

$$U = 48.8 f_c \left(\frac{2.52r}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (26)$$

f_c ضریب کاهنده با توجه به عمق ماده منفجره از سطح زمین است که برای سطح زمین ($h=0$) برابر 0.4 است [۱۳]. بنابراین رابطه فشار حاصل از انفجار ۲۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۴ متر از سطح سازه در این نوع خاک بر حسب چگالی و فاصله مقیاس شده $\left(\frac{r}{W^{1/3}} \right)$ عبارت است از:

$$P = \rho \times \left(\begin{array}{l} 200 + 4 \left(48.8 \times 0.4 \left(\frac{2.52r}{W^{1/3}} \right)^{-3} \right) \times \\ \left(48.8 \times 0.4 \left(\frac{2.52r}{W^{1/3}} \right)^{-3} \right) \end{array} \right) \quad (27)$$

حال رابطه اصلی قابلیت اعتماد با فرض شکست در مرکز سطح سقف سازه برای طراحی سقف با قابلیت اعتماد β برابر $3/7$ به دست می آید. بر اساس پارامترهای مورد نظر

$$Z = R - S \quad (28)$$

Z بار انفجار روی سازه - مقاومت خمشی سازه =
وزن خاک روی سازه -

$$z = 4 \left[\left(A_s f_{d_s} \right) \left(d - \frac{A_s f_{d_s}}{2 \times 0.85 \times b \times f_{d_c}} \right) \right] \quad (29)$$

$$- (1.5 \rho (c + 4u) u) \frac{b^2}{4} - \rho \times h \times \frac{b^2}{4}$$

حال بر اساس رابطه ۲۹، متغیرها با ذکر کوواریانس و انحراف معیار که از مراجع مورد اشاره برداشت شده است، انتخاب می شوند. در جدول (۲) رابطه اصلی قابلیت اعتماد بر اساس این متغیرها بیان شده است.

$$Z = 4 \left[\left(A_s x_1 \right) \left(x_5 - \frac{A_s x_1}{2 \times 0.85 \times x_4 \times f_{d_c}} \right) \right] \quad (30)$$

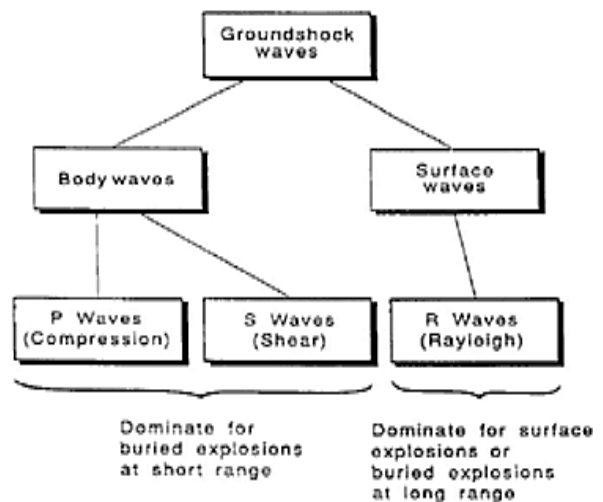
$$(1.5 x_2 (c + 4u) u) \frac{x_4^2}{4} - x_2 \times x_3 \times \frac{x_4^2}{4}$$

با قرار دادن مقادیر میانگین در رابطه ۲۹ معادله درجه دوم بر حسب A_s به دست می آید:

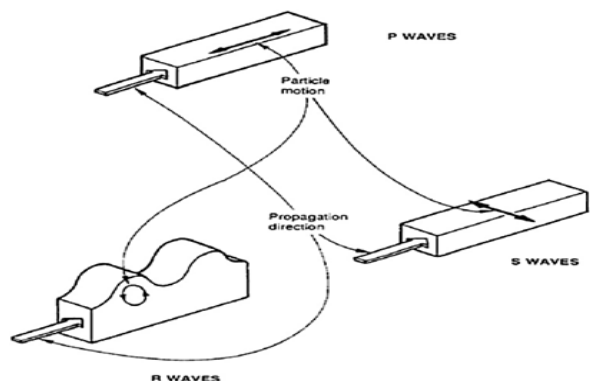
$$2\rho h \frac{b}{2} \theta \quad (23)$$

۲-۸. بار زنده وارده به سازه

بار حاصل از انفجار ماده منفجره یک نوع بار زنده است. در این مسئله بار حاصل از انفجار ۲۰۰ کیلوگرم TNT در روی سطح زمین درست در مرکز سطح سقف به عنوان بار زنده در نظر گرفته شده است. فرض می شود این بار به صورت یکنواخت و گسترده بر روی سقف توزیع می گردد. برای به دست آوردن فشار حاصل از بار انفجار آیین نامه های متعددی وجود دارد. بر اساس آیین نامه TM5-855-1 و همچنین کتاب اسمیت [۱۳]، شوک زمینی به دو دسته تقسیم می شود (شکل ۴)؛ موج های سطحی یا موج R که در سطح خاک حرکت می کنند و موج های بدنه (درونی) که شامل موج های S و موج P هستند که مطابق شکل (۵) در خاک منتشر می شوند.



شکل ۴. دسته بندی انواع موج های شوک درون زمین [۱۳].



شکل ۵. نحوه انتشار امواج شوک در خاک [۱۳].

حداکثر فشار ناشی از امواج شوک محیط اطراف منبع شوک از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_0 = \rho \cdot C \cdot U \quad (24)$$

$$\alpha_i = \frac{-\left(\frac{\partial g_1}{\partial y_i}\right)_*}{k}, \quad k = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_1}{\partial y_i}\right)_*^2} \quad (32)$$

$$x_i = \mu_i + \sigma\beta\alpha_i \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

در جدول (۴) خلاصه محاسبات و نتایج به دست آمده برای طراحی با $\beta = 3/7$ بیان شده است.

$$z = -9.9 \times 10^9 A_s^2 + 1.72 \times 10^9 A_s - 20556563.8 = 0 \quad (31)$$

$$A_s = \{0.0129 < 0.026 = A_{s_{\max}}\}$$

بر اساس این سطح مقطع و با توجه به انحراف معیار هر متغیر (σ) و ضریب قابلیت اعتماد β مقادیر جدید متغیرها بر اساس فلوجارت شکل (۶) با استفاده از روابط زیر به دست می آید [۱۱].

جدول ۲. جدول مشخصات متغیرها با ذکر مراجع کوواریانس

ردیف	نوع متغیر	مقدار متغیر	کوواریانس (COV)	انحراف معیار (σ_x)	نام متغیر	مرجع کوواریانس
۱	تنش تسلیم فولاد (N/m ²)	$43.0/5 \times 10^6$	۰/۰۲۶	$11/2 \times 10^6$	$x_1 = f_{d_s}$	[۱۸] [۴]
۲	چگالی خاک (kg/m ³)	$2/46 \times 10^3$	۰/۱۵	۴۰۶/۵۶	$x_2 = \rho$	[۲]
۳	ارتفاع خاک روی سازه (m)	۴	۰/۰۳	۰/۱۲	$x_3 = h$	[۲]
۴	عرض سازه بتنی (m)	۵	۰/۰۳	۰/۱۵	$x_4 = \frac{b^2}{4}$	[۱۹]
۵	فاصله آرماتور کششی تالیله بالای (m)	۱	۰/۰۳	۰/۰۳	$x_5 = d$	[۲۰] [۱۹]
۶	فاصله مقیاس شده از مرکز ماده منفجره (m/kg ^{1/3})	۰/۶۸	۰/۰۳	$2/04 \times 10^{-2}$	$x_6 = \left(\frac{R}{w}\right)^2$	[۲۱] [۱۹]

بر اساس مقادیر به دست آمده طبق جدول (۳) ضرایب اطمینان جزئی نسبت به مقدار اسمی به دست می آید.

جدول ۳. ضرایب اطمینان جزئی نسبت به مقدار اسمی

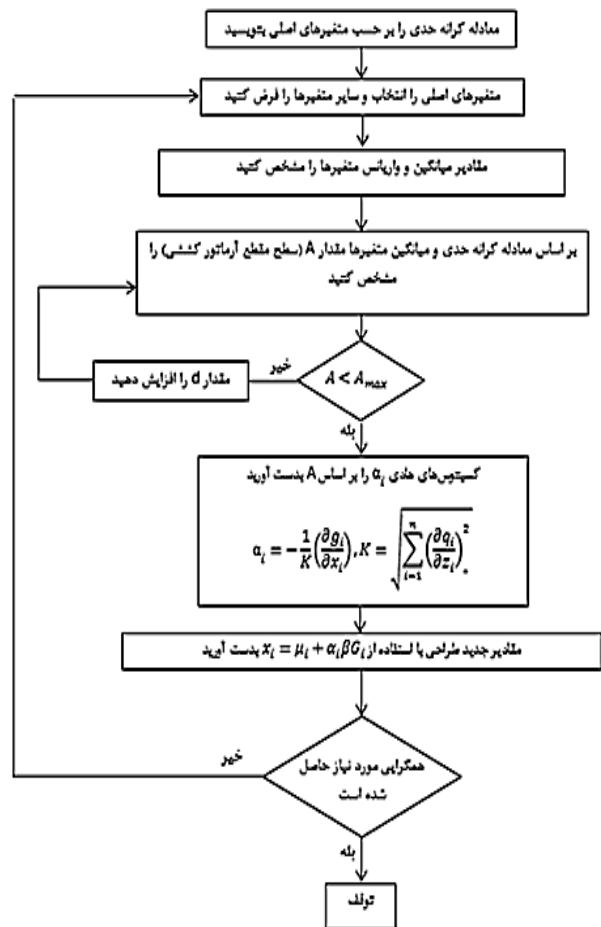
γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
۱	۱	۱	۱	۰/۹۷۶	۰/۸۹

رابطه اصلی بر اساس این ضرایب اطمینان جزئی عبارت است:

$$Z = 4 \left[A_s(1)f_{d_s} \left((0.976)d - \frac{A_s(1)f_{d_s}}{2 \times 0.85 \times b \times f_{d_s}} \right) - \left(1.5(1)\rho \left(c + \frac{n+1}{n-1}u \right) u \right) \frac{(1)b^2}{4} - (1)\rho \times (1)h \times \frac{(1)b^2}{4} \right] \quad (33)$$

بنابراین، معادله طراحی در حالت زیر برای اطلاعات داده شده یک تراز قابلیت اعتماد برابر حداقل ۳/۷ را تضمین خواهد کرد.

$$\left[A_s(1)f_{d_s} \left((0.976)d - \frac{A_s(1)f_{d_s}}{2 \times 0.85 \times b \times f_{d_s}} \right) - \left(1.5(1)\rho \left(c + \frac{n+1}{n-1}u \right) u \right) \frac{(1)b^2}{4} - (1)\rho \times (1)h \times \frac{(1)b^2}{4} \right] \geq \quad (34)$$



شکل ۶. فلوجارت روند طراحی بر اساس قابلیت اعتماد مشخص [۱۱].

جدول ۴. جدول خلاصه محاسبات و نتایج حاصل برای طراحی با $\beta = 3/7$

متغیر	شروع	تکرار	
		اول	دوم
X_1	$430 \times (10)^6$	$430 \times (10)^6 - 0.18$	$430 \times (10)^6 - 0.149$
X_2	$2/64 \times (10)^7$	$2/64 \times (10)^7 + 0.117$	$2/64 \times (10)^7 + 0.102$
X_3	۴	$4 + (7/3 \times (10)^{-5})$	$4 + (4/3 \times (10)^{-5})$
X_4	۵	$5 + (4/5 \times (10)^{-7})$	$5 + (3/9 \times (10)^{-7})$
X_5	۱	۰/۹۷۵	۰/۹۷۶
X_6	۰/۶۸	۰/۶۰۶	۰/۶۰۶۴
A_S	۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۰۳	۰/۰۲۰۲۷
α_1	$-4/4 \times (10)^{-10}$	$-3/6 \times (10)^{-10}$	
α_2	$7/8 \times (10)^{-5}$	$6/8 \times (10)^{-5}$	
α_3	$1/65 \times (10)^{-7}$	$9/9 \times (10)^{-5}$	
α_4	۰/۰۸۲۵	۰/۰۷۱۹	
α_5	-۰/۲۲۲	-۰/۲۱۰	
α_6	-۰/۹۷	-۰/۹۷۴	

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی تغییرات شاخص قابلیت اعتماد

محدوده شاخص قابلیت اعتماد مطلوب برای سازه بتنی مدفون بین ۳ و ۴ است [۲]. بر حسب آیین نامه ایران بر پایه روش های جاری طراحی برای خرابی هایی که از خود علائم پیش آگاهی نشان می دهند، مقدار β بین ۳ تا ۳/۵ و برای خرابی های ترد و ناگهانی یا خرابی های فاجعه آور مقدار β بین ۳ تا ۴ انتخاب می شود [۱۰].

بر اساس کد حاضر (روش حاشیه حدی 1978-456-IS) در موقعیت های طراحی مختلف تراز اطمینان مختلف دارند و به طور وسیعی تغییر می کنند. برای دال ها β از ۴/۲ تا ۴/۸ و برای تیرها در خمش از ۳/۲ تا ۴/۷ و برای تیرها در برش از ۳ تا ۳/۸ و برای ستون ها از ۲/۹ تا ۴/۶ تغییر می کند. ترازهای اطمینان دال ها و تیرها در خمش بالاتر از تیرها در برش و ستون هاست. برای اعضای بتن آرمه یک سطح قابلیت اعتماد ۳/۵ برای خرابی عضو پیشنهاد شده است [۱۱].

بر اساس آیین نامه SSCJ در حالت نرمال با خرابی متوسط مقدار (β) برابر با ۴/۲ است و در حالت نرمال با خرابی کم (مینور) مقدار β برابر با ۳/۷ است [۳]. به منظور مقایسه بهتر میزان تغییرات متغیرها بر اساس تغییرات شاخص قابلیت اعتماد، مقادیر مختلف به دست آمده برای متغیرها بر اساس شاخص های قابلیت اعتماد مختلف در جدول (۵) ذکر شده است.

در ادامه تغییرات متغیرها در قابلیت اعتماد سازه مدفون تحت بار انفجار سطحی بررسی می شود. این تغییرات عبارت است از:

۱. تغییرات تنش تسلیم (f_{ds}) در مقایسه با مقدار اولیه (f_{ds}) بسیار ناچیز است. اگرچه این متغیر برای مقاومت است و مقدار α آن منفی است، با تغییرات شاخص قابلیت اعتماد تغییر چندانی رخ نمی دهد. در واقع پارامتر مقاومت در ازای تغییرات شاخص قابلیت اعتماد ثابت است و تغییر نمی کند.

۲. در خصوص متغیر چگالی خاک، تغییرات زیادی در اثر این متغیر بارگذاری مشاهده نشد. چگالی هم در بار زنده و هم در بار مرده به صورت وزن خاک مؤثر است. با تغییرات اندکی که دارد و در واقع با توجه به اینکه α آن نیز مثبت است، جزء پارامتر بار است که می توان گفت با تغییر شاخص قابلیت اعتماد سازه ثابت است.

۳. ارتفاع خاک روی سازه که هم در بار مرده و هم در فاصله مقیاس شده پارامتر بار زنده مؤثر است. با توجه به مثبت بودن α و اینکه با افزایش قابلیت اعتماد باید در جهت اطمینان به میزان بار افزوده شود و سازه توان تحمل بار بیشتری را داشته باشد. مشاهده می شود که تغییرات هرچند ناچیز ولی با افزایش شاخص قابلیت اعتماد افزایش می یابد، ولی دارای تغییرات بسیار اندک است.

۴. در خصوص متغیر عرض دال سقف (عرض سازه) با توجه به مثبت بودن α آن و بیان اینکه در میزان وزن خاک روی سازه نیز مؤثر است و هرچه عرض دال (عرض سازه) بیشتر باشد، وزن خاک روی سازه بیشتر می شود، بنابراین جزء پارامترهای بار مرده است. ولی می توان آن را ثابت فرض کرد و در جهت اطمینان با افزایش شاخص قابلیت اعتماد به مقادیر بسیار کم به عرض دال افزوده شده و در واقع عرض خاک روی سازه به مقدار بسیار کمی افزوده می شود. سازه باید قابلیت تحمل وزن بیشتری از خاک را داشته باشد تا قابلیت اعتماد بیشتری داشته باشد.

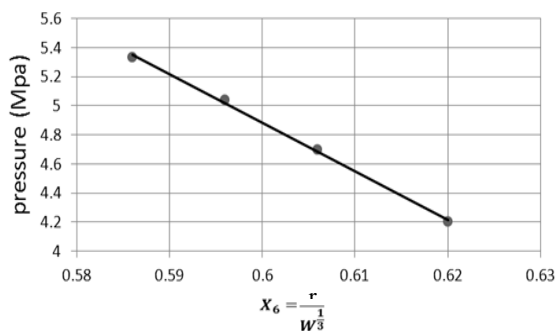
۵. فاصله آرماتور کششی تا لبه دال جزء پارامترهای مقاومت بوده و در مقاومت خمشی دال مؤثر است و دارای α منفی و در واقع در جهت اطمینان با افزایش شاخص قابلیت اعتماد سازه از مقدار پارامتر مقاومت کسر می شود. ولیکن این تغییرات کم است و می توان گفت که با توجه به مؤثر بودن فاصله آرماتور کششی تا لبه دال در مقاومت خمشی دال، ولی با تغییر شاخص قابلیت اعتماد سازه این پارامتر ثابت است.

۶. فاصله مقیاس شده این متغیر در پارامترهای بارگذاری استفاده می شود، ولی α آن منفی است و بر اساس شکل (۷) با افزایش شاخص قابلیت اعتماد از مقدار آن کسر می شود. در صورتی که باید با افزایش شاخص قابلیت اعتماد میزان بارگذاری در جهت اطمینان افزوده شود. با کمی دقت متوجه می شویم که هرچه این پارامتر کوچک شود، مطابق شکل (۸) سبب افزایش میزان فشار حاصل از انفجار می شود که همان بار زنده است و در جهت اطمینان با افزایش

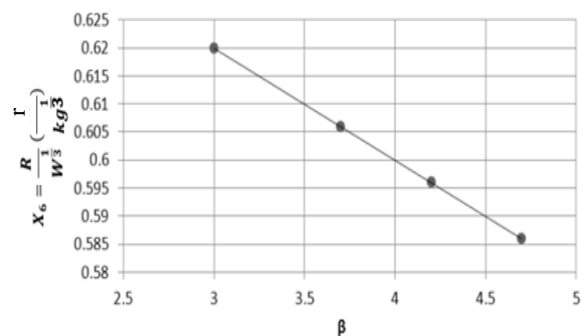
افزوده شود تا این مقیاس کوچک شود و در نتیجه فشار بیشتری به سازه وارد شود. در واقع برای اینکه سازه قابلیت اعتماد بیشتری داشته باشد، باید در برابر مقدار بیشتری از ماده منفجره مقاومت کند.

شاخص قابلیت اعتماد به میزان بار زنده که سازه باید تحمل کند، افزوده می‌شود. چون ارتفاع خاک نیز تغییر چندانی نداشته است (متغیر سوم)، نتیجه گرفته می‌شود باید به میزان وزن ماده منفجره **جدول ۵**. تغییرات متغیرها بر اساس تغییرات شاخص قابلیت اعتماد β

متغیر	مقادیر اولیه	مقادیر برای $\beta=3$	مقادیر برای $\beta=3.7$	مقادیر برای $\beta=4.2$	مقادیر برای $\beta=4.7$
$X_1 = f_{ds}$ تنش تسلیم فولاد (N/m^2)	$430 \times (1.0)^6$	$430 \times (1.0)^6 - 0.12$	$430 \times (1.0)^6 - 0.14$	$430 \times (1.0)^6 - 0.15$	$430 \times (1.0)^6 - 0.177$
$X_2 = \rho$ چگالی خاک (kg/m^3)	$2164 \times (1.0)^3$	$2164 \times (1.0)^3 + 0.85$	$2164 \times (1.0)^3 + 1.02$	$2164 \times (1.0)^3 + 1.1$	$2164 \times (1.0)^3 + 1.11$
$X_3 = h$ ارتفاع خاک روی سقف (m)	4	$4 + (4/3 \times (1.0)^{-5})$	$4 + (4/3 \times (1.0)^{-5})$	$4 + (4/6 \times (1.0)^{-5})$	$4 + (4/7 \times (1.0)^{-5})$
$X_4 = b$ عرض دال سقف (m)	5	$5 + (2/9 \times (1.0)^{-3})$	$5 + (2/9 \times (1.0)^{-3})$	$5 + (4/4 \times (1.0)^{-3})$	$5 + (4/8 \times (1.0)^{-3})$
$X_5 = d$ فاصله آرماتور از لبه بالایی دال (m)	1	0.981	0.976	0.973	0.97
$X_6 = \frac{r}{W^{1/3}}$ فاصله مقیاس شده ($m/kg^{1/3}$)	0.68	0.62	0.606	0.596	0.586
A_s سطح مقطع آرماتور (m^2)	0.129	0.118	0.123	0.117	0.123



شکل ۸. تغییرات فشار ناشی از انفجار بر اساس فاصله مقیاس شده



شکل ۷. تغییرات فاصله مقیاس شده (متغیر ششم) بر اساس تغییرات شاخص قابلیت اعتماد (β)

فلزی مدل سازی شده‌اند. هر جداره پناهگاه دارای یک لایه تقویت کننده است که فاصله آن از جداره درونی برابر با ۱۰ سانتیمتر است. جداره با اجزای محدود سه بعدی آجری و لایه معادل آرماتورها با اجزای محدود پوسته چهار گرهی گسسته سازی شده‌اند. خاک اطراف پناهگاه نیز با استفاده از المان‌های آجری لاگرانژی مدل شده‌اند. برای ساخت مدل هندسی خاک محیط ابتدا یک مکعب بزرگ، که در حقیقت تشکیل دهنده خاک محیط اطراف پناهگاه است، ساخته شده و از درون آن یک محدوده

۲-۳. ساخت مدل اجزای محدود پناهگاه

پناهگاه مورد نظر دارای ابعاد به عرض ۵ متر طول ۱۱ متر و ارتفاع ۵ متر است. ضخامت جداره بتنی پناهگاه در هر شش وجه آن برابر با ۱/۱۰ سانتی متر است. با توجه به اینکه سازه پناهگاه به صورت مسلح طراحی می‌شود باید عناصر تقویتی معادل مساحت آرماتورها را درون جداره بتن جای داد. عناصر تقویتی معادل آرماتورها برای سادگی به صورت پوسته‌های نازک

مورد استفاده در مورد خاک (ماسه) ضروری به نظر می‌رسد. این که خاک ماده‌ای با تخلخل بالا است. این خلل و فرج درون ماده توسط هوا و یا آب و یا ناخالصی‌های جامد و مایع مختلف پر شده است. به همین دلیل چگالی خاک با بارگذاری‌های مختلف متغیر است [۱۲]. به عبارتی تنش هیدرو استاتیک وارده بر المان مکعبی شکل بی‌نهایت کوچک خاک باعث تغییر چگالی آن می‌شود.

وجود آب خاصیت تراکم‌پذیری را به طور محسوسی بالا می‌برد، به همین دلیل تعریف معادله حالت (Eos) برای چنین ماده‌ای ضروری است. در معادله حالت رابطه تنش هیدرو استاتیک و چگالی ماده و یا سایر پارامترهای ترمودینامیکی ماده مشخص می‌شود [۱۲]. در اینجا معادله حالت Compaction برای خاک انتخاب شده است. برای مدل مقاومت نیز از مدل مادی MO-Granual استفاده شده است. در این مدل تغییرات تنش تسلیم بر حسب فشار هیدرو استاتیک وارد بر ماده، تنش تسلیم بر حسب چگالی ماده و مدول برشی خاک بر حسب چگالی تعیین می‌شوند. ورودی این مدل‌ها برای خاک و یا ماسه، خود به تنهایی حاکی از رفتار بسیار پیچیده و غیرخطی ماده در برابر بارگذاری مختلف است [۱۲].

ماده بعدی بتن است. تنش تسلیم بتن انتخابی در اینجا ۳۵ مگاپاسکال است. ضرایب ماده فولاد نیز در کتابخانه نرم‌افزار ارائه شده است. در هر دو مورد بتن و فولاد، مدل‌های مادی به نرخ کرنش حساسیت دارند. ماده بعدی TNT است که ماده منفجره عمل‌کننده در سطح خاک است. ضرایب مادی مورد استفاده در TNT در کتابخانه نرم‌افزار ارائه شده است. معادله حالت برای مواد منفجره معمولاً از نوع JWL بوده و معادله مقاومت یا خرابی برای آن‌ها تعریف نمی‌شود. البته با توجه به اینکه در مراحل بعدی باید از حلگر لاگرانژی برای تحلیل‌های عددی استفاده کنیم. برای TNT یک کرنش شکست Erosion تعریف شده است [۱۲]. با انجام تعاریفات فوق در مازول Materials نوبت به ساخت مدل هندسی مسئله خواهد رسید [۱۲].

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های شبیه‌سازی، تعریف صحیح شرایط مرزی است. در این مسئله محل قرارگیری پناهگاه در یک محیط نیمه متناهی است. طبیعی است که امکان شبیه‌سازی و شبکه‌بندی یک محدوده وسیع برای نرم‌افزار وجود ندارد. این محدودیت به سخت‌افزار و همچنین پشتیبانی نرم‌افزار از یک حافظه مشخص باز می‌گردد [۱۲].

به همین دلیل باید برای تعریف چنین محیط‌هایی که صد البته در حالت واقعی نیز مسائل بسیاری در این محدوده قرار می‌گیرند، چاره‌ای اندیشید. خوشبختانه اکثر نرم‌افزارها قابلیت تعریف

مکعبی شکل کوچک‌تر که دقیقاً به اندازه ابعاد هندسی پناهگاه است، کسر گردید. نوع حل گر در دیدگاه لاگرانژی است.

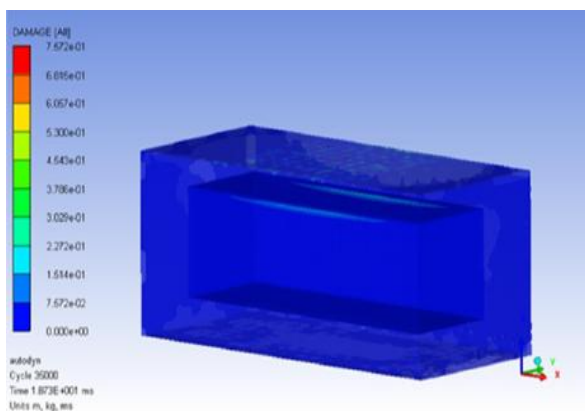
با توجه به اینکه معمولاً در طراحی‌های مبتنی بر نتایج تجربی (نیمه تحلیلی) به جای مدل‌سازی کامل، از اعمال فشار بر روی وجوه سازه استفاده می‌شود. با توجه به این که اعضای تقویتی صرفاً در محلی بین بتن قرار گرفته‌اند و هیچ‌گونه اتصال میان آن‌ها بر قرار نیست و در صورت بارگذاری بر روی سازه هیچ‌گونه نقشی در تحمل بار نخواهند داشت، برای رفع این مشکل و ایجاد اتصال میان اعضای تقویت‌کننده، از آنجایی که موج شوک ناشی از انفجار در محیط خاک منتشر شده و به سطح بیرونی سازه پناهگاه بر خورد خواهد کرد، باید یک برهم‌کنش میان خاک و سازه بتنی پناهگاه تعریف شود. این برهم‌کنش از نوع Lagrange/Lagrange است. بعد از تعریف مدل هندسی سازه و همچنین تعیین اتصالات و برهم‌کنش مکانیکی میان اعضاء باید به طریقی ماده منفجره را فعال کرد. این کار در واقعیت به کمک چاشنی‌های مختلف انجام می‌پذیرد. عملکرد چاشنی‌هایی که در نرم‌افزار AUTODYN در دسترس هستند شش دسته‌اند: نقطه‌ای، خطی، صفحه‌ای، کروی، استوانه‌ای و دستی (تنظیم دستی) البته نوع خطی در تحلیل دو بعدی کاربرد دارد. در اینجا برای عملکرد سریع تر ماده منفجره و زمان کوتاه‌تر برای گسیل انرژی، از چاشنی صفحه‌ای استفاده شد. بارگذاری دینامیکی بر روی سازه ناشی از انفجار مقدار ۲۰۰ کیلوگرم TNT بر روی سطح زمین بود که دارای فاصله عمودی برابر ۴ متر از سطح بام پناهگاه سازه است. سازه نیز در خاک دفن شده و خاک اطراف سازه به صورت نیمه متناهی در فضای سه بعدی در نظر گرفته شد.

۳-۳. تعریف مدل های مادی مواد

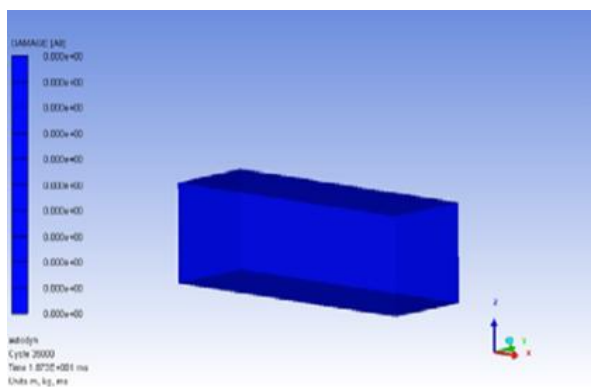
ماده‌هایی که در این مسئله وجود دارند به ترتیب خاک برای اطراف پناهگاه، بتن برای ماده اصلی سازه و فولاد به عنوان تقویت‌کننده سازه در نظر گرفته شده‌اند. ضرایب مدل‌های مادی برای مواد مسئله در کتابخانه مواد نرم‌افزار وجود دارد. نوع تحلیل سه بعدی در نظر گرفته شده و واحدهای اصلی جرم، طول، زمان به ترتیب ms ، am ، kg انتخاب شده‌اند. دلیل انتخاب واحدهای درشت تر، بزرگ بودن ابعاد هندسی سازه و وزن بالای اجزاء است.

برای خاک و از کتابخانه مواد هایدرو، کد ماده sand انتخاب شد. این مدل با دقت خوبی قادر است که رفتار غیرخطی و پیچیده خاک را پیش‌بینی کند. البته می‌توان متناسب با نوع خاک محل احداث، این ضرایب را تغییر داد. در مورد مدل مادی

جهت سازه پیش‌بینی شده بود داشته و سازه قابلیت اعتماد لازم را برای احتمال خرابی در نظر گرفته شده دارد.



شکل ۱۰. میزان خرابی در کل سازه مدفون در اثر انفجار سطحی



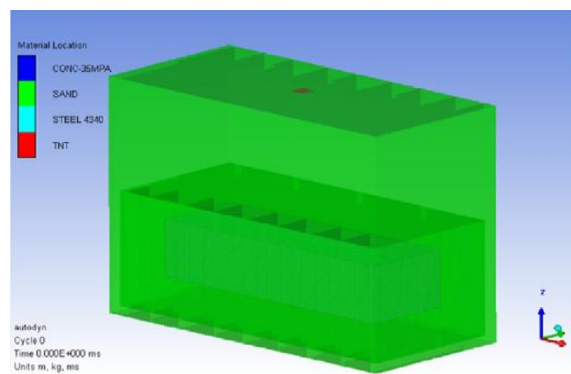
شکل ۱۱. میزان خرابی در آرماتورهای سازه مدفون در اثر انفجار سطحی

۴. نتیجه‌گیری

در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های مدفون، انتخاب یک حاشیه ایمنی یا ضریب اطمینان مناسب هم مشکل و هم مهم است. ضریب اطمینان باید توازن بین اقتصاد و ایمنی سازه را به وجود آورد. ایمنی سازه هیچ‌وقت نباید فدای اقتصاد شود و همچنین نمی‌توان عامل اقتصاد را در کارهای عمرانی از نظر دور داشت. خوشبختانه بهبود کیفیت اجرا و شناخت دقیق مصالح و رفتار سازه‌ها که متأثر از رفتار متغیرها است، این امکان را به وجود می‌آورد که ضریب اطمینان را کاهش داده و در جهت اقتصاد طرح حرکت کرد. همان‌گونه که در جداول و نمودارها مستخرج از تحقیق حاضر مشاهده می‌شود، برای سازه مدفون فرض شده شاخص قابلیت اعتمادی برابر $\beta = 3/7$ به دست آمد که معادل احتمال خرابی $0/0001$ است. بر اساس این مقدار می‌توان احتمال منفی شدن حاشیه ایمنی M را حدود $0/0001$ تعیین نمود که احتمال بسیار ناچیزی است.

شرایط مرزی خاصی دارند که حالت نامتناهی و یا نیمه‌متناهی را شبیه‌سازی می‌کنند فقط باید در هنگام استفاده از این شرایط مرزی، آگاهی کامل نسبت به عملکرد و محل آن‌ها در مدل هندسی وجود داشته باشد [۱۲].

در مدل‌های لاگرانژی، مرزهایی از مدل که در تماس با محیط لایتناهی هستند، دارای ویژگی‌هایی مانند عدم مقاومت در برابر گذر موج‌های تنش و کرنش، ثابت ماندن در اثر برخورد با نیروهای مکانیکی و امیدانس مکانیکی صفر هستند [۱۲]. در شکل (۹)، تصویری از محل اعمال شروط مرزی نمایش داده شده است. بی‌شک با توجه به آزاد بودن وجه بالایی خاک که در تماس با هوا است، نیازی به تعریف شرط مرزی خاصی در این محل نیست [۱۲].



شکل ۹. مدل هندسی مسئله

۳-۴. پارامتر خرابی

خرابی یا همان D از پارامترهای مهم و کارآمدی است که در تعیین میزان مقاومت سازه در هر لحظه مؤثر است، به طوری که در $D=0$ هیچ خرابی در سازه نیست و چسبندگی کامل بین مصالح وجود دارد و در $D=1$ خرابی به مقدار حدی رسیده است و دیگر هیچ مقاومتی وجود ندارد [۱۲]. مطابق شکل (۱۰) در سیکل ۳۵۰۰۰ زمانی که موج انفجار به انتهای سازه رسیده است، میزان خرابی در سقف سازه مشاهده نمی‌شود. شکل (۱۰) و فقط در زیر سطح آرماتوربندی بر اساس تعریف دال تیپ نوع یک (A) فقط مقداری جزئی گسیختگی مشاهده می‌شود [۱۵ و ۱۶] و مابقی بتن کاملاً سالم است که جزء مفروضات اولیه نیز بوده است. در شکل (۱۱) میزان خرابی شبکه آرماتوربندی نشان داده شده که هیچ‌گونه خرابی در سطح آرماتورها در اثر بار وارده مشاهده نمی‌شود و فرض اولیه مبنی بر کفایت آرماتور کششی تأیید می‌شود. در واقع مقادیر به دست آمده برای متغیرها به روش قابلیت اعتماد سازه‌ها همان مقاومت که در برابر انفجار سطحی

۵. مراجع‌ها

- [8] Latifi, M.; Vahedi, Kh.; Khosravi, F.; Khodarahmi, H. "Calculate the Depth of Penetration in Covered Concrete Targets"; J. Energ. Mater. 2008, 3, 37-48 (in Persian).
- [9] "National Building Regulations"; Section 21, Passive Defense, Ministry of Housing and Urban Development Deputy National Building Regulations, Office Buildings, 2012 (in Persian).
- [10] Tahooni, H. "Design of Reinforced Concrete Buildings"; Tehran University, 1996 (in Persian).
- [11] Fereidoon, A.; Ranganathan, R. "Reliability Analysis and Design of Buildings"; Semnan University, 2000 (in Persian).
- [12] Daryan, A. S.; Jalili, S. "Impact and Explosion Engineering"; Software with a Comprehensive Guide, 2012 (in Persian).
- [13] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Butter Worth-Heinemann Ltd, 1994.
- [14] Chee, K. H. "Analysis of Shallow Buried Reinforced Concrete Box Structures Subjected to Air Blast Loads"; University of Florida, 2008.
- [15] Unified Facilities Criteria (UFC) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion Draft"; 2005, 3-340-02.
- [16] Hao, H.; Hao, Y.; Li, J.; Chen, W. "Review of the Current Practices in Blast-Resistant Analysis and Design of Concrete Structures"; Adv. Struc. Eng. 2016, 19, 1193-1223.
- [1] Taqvakoli, H.; Rao, S. S. "Design Based on Reliability" Jahad Daneshgahi Publication, Kerman Province, First Print in 2008 (in Persian).
- [2] Emamzadeh, S. S.; Forghani, S. "The Reliability Analysis of Buried Concrete Constructions against Hitting Projectiles"; The Second Conference on Seismic Retrofitting, Tehran, 2009 (in Persian).
- [3] Abasian, H.; Moarefzadeh, M. "Analyzing the Reliability of Present Buildings against Earthquakes"; Sixth National Congress on Civil Engineering, Semnan, 2010 (in Persian).
- [4] Ferrand, D. "Reliability Analysis of a Reinforced Concrete Deck Slab Supported on Steel Girders"; Ph.D. Thesis, Civil Engineering, University of Michigan, 2005.
- [5] Low, H. Y.; Hao, H. "Reliability Analysis of Direct Shear and Flexural Failure Modes of Rc Slabs under Explosive Loading" Eng. Struct. 2002, 24, 189-198.
- [6] Wang, Z. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast"; Comput. Struct. 2005, 83, 339-356.
- [7] Zirkar, S. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs under the Force of the Explosion"; Padafand Publication, 2009 (in Persian).