

آنالیز قابلیت اعتماد دال های بتن مسلح تحت بار انفجار و ارزیابی اقتصادی آن ها

محمد رضا معرف زاده

استادیار، دانشگاه امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۶/۰۳، پذیرش: ۹۶/۰۹/۰۴)

چکیده

هرچند مطالعات فراوانی در دهه های گذشته در خصوص آنالیز و طراحی سازه های زیربنایی نظیر ساختمان ها و پل ها برای بارهای ناشی از انفجار انجام گرفته است با این وجود تحقیقات زیادی برای احتساب نااطمینانی های ناشی از این بارگذاری ها در سوابق تحقیقاتی گزارش نشده است. از آنجا که عموماً در عملیات تروریستی، متناسب با شرایط محل هدف، بارگذاری ناشی از انفجار با اراده انسانی رقم می خورد بنابراین کمیت این بارها می تواند بسیار متغیر و متنوع باشد. بدین ترتیب همیشه این سؤال مهم برای به خصوص این گونه سازه ها مطرح است که آیا به اندازه کافی ایمن هستند. برای برخورد با این چنین مسائلی استفاده از روش های ارزیابی احتمالاتی ریسک اجتناب ناپذیر است. مطابق این روش ها، با احتساب تمامی نااطمینانی های محتمل در بارگذاری انفجاری (و نیز نااطمینانی های مربوط به پارامترهای مقاومتی سازه) احتمال خرابی تخمین زده می شود. همچنین با در نظر گرفتن هزینه های ناشی از خرابی، ریسک در خصوص سازه مورد مطالعه به دست می آید. در این مقاله علاوه بر مبحث قابلیت اعتماد سازه دال که مورد بررسی تفصیلی قرار گرفته و یک فرمول بندی مناسب برای آن پیشنهاد می گردد، با احتساب یک آنالیز اقتصادی هزینه های چرخه عمر یک سازه در معرض بار انفجاری محاسبه می گردند. مقدار این هزینه ها می توانند معیاری مناسب برای انتخاب گزینه برتر در میان همه گزینه های مطرح برای مسئولین تصمیم گیر فراهم آورد.

کلیدواژه ها قابلیت اعتماد، ریسک، بارهای انفجاری، سازه دال، آنالیز اقتصادی، هزینه های چرخه عمر

Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Loads and their Economic Assessment

M. R. Moarefzadeh

Imam Hossein University

(Received: 25/08/2017; Accepted: 25/11/2017)

Abstract

Despite a large number of studies carried out in the last decades to analyze and design of infrastructures such as buildings and bridges subjected to blast loading, a few are recorded in literature accounting for the uncertainties inherently existing in these loading systems. Since in all terrorist activities, proportional to targeting situations, human willing plays an important role to make an explosion to occur, the quantity of the resulting loads is therefore expected to vary significantly. The question which is always asked regarding these sort of structures is, thus, how safe they are. In order to address such a question, it appears there is no way unless using methods of probabilistic risk assessments. Based on these methods, including all uncertainties existing in loadings (and also, generally, in structural strengthening parameters) the probability of failure is estimated. Furthermore, taking all costs due to failure consequences into account, the amount of the so-called risk is evaluated for the structure under investigation. In this paper, in addition to discussing the structural slab reliability analysis, in detail, and proposing an appropriate formulation to perform it, an economic analysis is also carried out based on which the structural life-cycle costs are finally estimated. These costs may then be used as an appropriate tool to help authorities to choose the best option among different options which might be available.

Keywords: Reliability, Risk, Blast Loads, Slab Structures, Economic Analysis, Life Cycle Cost

۱. مقدمه

با احتساب همه ناطمینانی‌های ناشی از بارگذاری و نیز پارامترهای مقاومتی سیستم سازه، احتمال خرابی را تخمین زده و نیز با احتساب هزینه‌های اجتناب‌ناپذیر لازم در صورت خرابی، مدل مناسبی از یک چارچوب مناسب تصمیم‌گیری را در اختیار مسئولین تصمیم‌گیر قرار دهند. از جمله مدل‌های پیشنهادی در سوابق تحقیقاتی، استفاده از «مقدار سود خالص»^۳ و نیز مقدار «هزینه‌های چرخه عمر»^۴ با احتساب بارگذاری‌های انفجاری در آنالیز مربوطه هستند [۹، ۱۳ و ۱۴].

از آنجا که دال‌های بتن مسلح (و یا به معنای اعم آن، پانل‌های بتن مسلح مربع مستطیلی)، از جمله المان‌های مهم سازه‌ای هستند که در ساختمان‌ها برای مقاومت در مقابل بارهای انفجاری استفاده می‌شوند، در این مقاله آنالیز قابلیت اعتماد آنان مورد بررسی قرار می‌گیرد و بر اساس فرمول‌بندی که در این مقاله پیشنهاد می‌گردد، احتمال خرابی آنان با توجه به توابع حالات حدی مفروض تخمین زده می‌شود. همچنین از آنجا که بارگذاری ناشی از انفجار، یک بارگذاری بسیار بزرگ در طول یک زمان بسیار کوچک است، پاسخ بحرانی سازه بایستی با استفاده از آنالیز دینامیکی سازه برای بارهای دینامیکی و ضربه‌ای محاسبه گردد. در این مقاله برای سادگی بحث، از مدل یک درجه آزادی^۵ برای سازه استفاده شده است. این مدل ساده به‌خصوص زمانی که هدف ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مطرح و یافتن گزینه برتر است (که قاعدتاً حساس به دقت بالا در محاسبات آنالیز سازه‌ای نیست) می‌تواند مدل کاملاً قابل قبولی را ارائه نماید. این مدل که برای دال‌ها به طور مبسوط در کتاب دینامیک سازه اثر بیگز [۱۵] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و روابط و ضرایب مربوطه در سوابق تحقیقاتی عموماً مورد پذیرش و به طور مکرر به کار گرفته شده است [۱۳ و ۱۶]. همچنین در این مقاله با استفاده از یک آنالیز اقتصادی پیشنهادی، تلاش می‌شود که با محاسبه هزینه‌های چرخه عمر چارچوبی ایجاد گردد که مسئولین ذی‌ربط بتوانند با استفاده از نتایج آن راحت‌تر به شکل علمی و منطقی تصمیم مناسب را در انتخاب یک گزینه برتر اتخاذ نمایند.

۲. آنالیز قابلیت اعتماد یک سازه در معرض بار انفجار

قبلاً اشاره شد که در یک تراز فراگیر، آنالیز ریسک یک سیستم را می‌توان به‌صورت کلاسیک ترکیبی از احتمال خرابی^۶ (p_f) و هزینه پیامدهای ناشی از خرابی^۷ (C_f) آن سیستم تعریف کرد. بدین ترتیب در این‌گونه آنالیزها، ارزیابی مقدار مناسبی از احتمال خرابی، اساساً از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. در این

آنالیز و طراحی سازه‌های زیربنایی برای مقاومت در مقابل بارهای انفجاری نظیر ساختمان‌ها و پل‌ها از دهه‌های پیش و به‌خصوص پس از جنگ جهانی دوم و در طول دوران جنگ سرد میان قدرت‌های بزرگ همیشه مطرح بوده است. به این علت مطالعات و پژوهش‌های زیادی چه به‌صورت تئوریک و چه به‌صورت آزمون‌های در مقیاس کوچک در آزمایشگاه‌ها و آزمون‌های در مقیاس کامل میدانی انجام گرفته و در سوابق تحقیقاتی گزارش‌های فراوانی ثبت شده است. به‌عنوان نمونه کتاب‌های منتشره توسط اسمیت و هترینگتون [۱]، بولسون [۲]، بنگاش [۳]، و کراتامر [۴] و نیز مجموعه اسناد دوره‌ای منتشره توسط ارتش آمریکا در سال‌های متممادی، مانند سند TM5-1300 [۵] و جدیدتر آیین‌نامه بارگذاری و طراحی سازه‌ها در مقابل بارهای انفجار UFC [۶] از جمله تلاش‌های فراوانی هستند که می‌توانند ذکر شوند.

در سال‌های اخیر با ظهور گروه‌های تروریستی و افراط‌گرا و حمله به ساختمان‌های مهم دولتی و نظامی و نظامی و نیز حتی ساختمان‌های اقتصادی و گردشگری مهم، ضرورت پرداختن به آنالیز و طراحی ساختمان‌های مهم به بارهای ناشی از انفجار نضج تازه‌ای گرفته است و لحاظ این بارها نظیر همه انواع بارگذاری‌های دیگر (محیطی و غیر محیطی) در میان محققین و صاحب‌نظران سازه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است.

اگر ضرورت مطالعه و کنترل کفایت ظرفیت یک سازه در مقابل بارهای انفجاری مسلم گرفته شود، از جمله واقعیت‌هایی که نمی‌توان آن را نادیده گرفت، وجود ناطمینانی^۱ (عدم قطعیت‌های) فراوانی است که در بارگذاری‌های ناشی از وقوع انفجارهای تروریستی وجود دارد [۷-۱۱]. روشن است که این بارگذاری‌ها، ساخته انسان‌ها بوده و با اراده انسانی (و البته متناسب با شرایط محلی) می‌توانند مقادیر بسیار متنابهی را به خود گیرند. بنابراین مسئله مهمی که در نتیجه مطرح می‌شود آن است که ساختمان تحت مطالعه با توجه به تنوع بالای بارگذاری‌های ممکن، چقدر می‌تواند ایمن فرض گردد؟ ضرورت احتساب این ناطمینانی‌ها و نیز ناطمینانی‌های ناشی از مقادیر ظرفیتی و مقاومتی سازه مورد نظر، تمسک به روش‌های ارزیابی احتمالاتی ریسک^۲ را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. در این روش‌ها ریسک معمولاً ترکیبی از احتمال خرابی سیستم سازه‌ای و هزینه‌های ناشی از خرابی تعریف می‌گردد [۱۲]. این روش‌ها عموماً ابزاری مناسب و قوی برای تصمیم‌سازان فراهم می‌کنند که

^۳ Net Benefit^۴ Life Cycle Cost^۵ Single Degree Of Freedom^۶ Probability of Failure^۷ Cost of Failure^۱ Uncertainty^۲ Probabilistic Risk Assessment

کردن شرط حمله در عبارات سمت راست اختراز شده است.

در رابطه (۲)، $G(R, S) = 0$ تابع (توابع) حالت حدی مورد نظر در مطالعه حاضر بوده و مرز میان فضای خرابی و سلامت سیستم سازه‌ای را تعیین می‌کند. در این مقاله فضایی که در آن $G(\cdot) \leq 0$ باشد فضای خرابی و بالطبع $G(\cdot) > 0$ فضای سلامت در نظر گرفته می‌شود. همچنین $P_r[G(R, S) \leq 0]$ احتمال ایجاد خرابی در سیستم سازه‌ای و $f_{R,S}(r, s)$ تابع چگالی مشترک بردارهای R و S هستند.

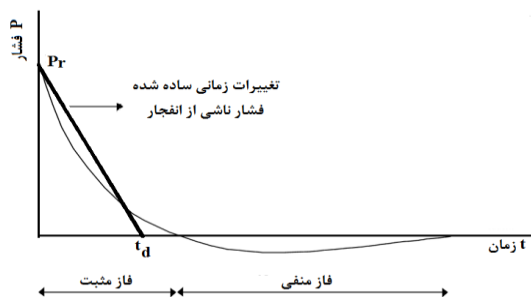
در آنچه که در زیر بخش‌های زیر می‌آید مدل‌سازی بارگذاری و مقاومتی سازه‌ای و بالطبع مؤلفه‌های بردارهای R و S مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲-۱. مدل‌سازی بارگذاری انفجاری و مؤلفه‌های بردار S

در سوابق تحقیقاتی، بارگذاری ناشی از انفجار روی سیستم‌های سازه‌ای را عموماً با بارهای ناشی از فشار انعکاس یافته در نظر می‌گیرند و تغییرات آن را با زمان به شکل نمایی و یا به شکل ساده مثلثی در محاسبات وارد می‌نمایند [۷، ۸ و ۱۸] (شکل ۱) ملاحظه گردد.

همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌گردد حداکثر مقدار فشار انعکاس یافته با P_r نمایش داده می‌شود که در زمان صفر (اعمال بار به سازه) اتفاق می‌افتد و به سرعت با زمان کاهش می‌یابد و در زمان $t = t_d$ به مقدار صفر می‌رسد. معمولاً شکل دقیق بارگذاری انفجاری متشکل از دو فاز مثبت و منفی است (شکل ۱) ملاحظه گردد، با این حال در اینجا تنها فاز مثبت آن و آن هم به شکل مثلثی در نظر گرفته می‌شود. P_r در سوابق تحقیقاتی عموماً به صورت تابعی از فاصله مقیاس شده Z که به شکل زیر تعریف می‌گردد در محاسبات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

$$Z = R/\sqrt[3]{W} \quad (3)$$



شکل ۱. تغییرات زمانی فشار ناشی از انفجار

در این رابطه R فاصله محل انفجار ماده منفجره تا محل مورد نظر بوده و W وزن معادل TNT ماده منفجره است. علاوه بر R و W پارامترهای دیگری در کمیت بار ناشی از انفجار موثر هستند که

بخش هدف آن است که برای یک سازه ساختمانی که در معرض بار ناشی از انفجار قرار دارد روابط مربوط به تخمین p_f عرضه گردد. این محاسبات عموماً تحت عنوان "آنالیز قابلیت اعتماد" شناخته می‌گردند [۱۷]. در هر آنالیز قابلیت اعتماد، اولین گامی که ضرورتاً بایستی برداشته شود شناخت متغیرهای تصادفی دخیل در مسئله است. در تحقیق حاضر از آنجا که خرابی کلی و یا جزئی یک سازه ساختمانی (فروریختگی کلی و یا آسیب‌دیدگی بخشی از ساختمان) مد نظر است متغیرهای تصادفی مسئله می‌توانند به سه دسته زیر تقسیم گردند:

- ۱- حمله تروریستی و احتمال وقوع آن $(P_r(attack))$
- ۲- متغیرهای تصادفی مربوط به پارامترهای بارگذاری (انفجاری) اعمال شده به سازه که مؤلفه‌های بردار S را در اینجا نشان خواهند داد.
- ۳- متغیرهای تصادفی مربوط به پارامترهای مقاومتی سازه که همگی به عنوان مؤلفه‌های بردار R لحاظ خواهند شد.

توضیح این مطلب در اینجا لازم است که معمولاً آنالیز قابلیت اعتماد یک سازه که در معرض آسیب‌های ناشی از حملات تروریستی قرار دارد با فرض وقوع حمله انجام می‌گیرد. اصولاً احتمال وقوع یک حمله تروریستی در جامعه مورد مطالعه به عوامل متعدد بستگی دارد که عموماً غیر مهندسی مثل مسائل سیاسی، اجتماعی، اقتصادی، امنیتی و غیره هستند. این احتمال از جامعه‌ای به جامعه دیگر متفاوت است و حتی می‌تواند ترازهای مختلفی در طول عمر سازه به خود بگیرد (افزایش و یا کاهش یابد). در آنالیزی که ذیلاً می‌آید قصد آن نیست که در مورد مسائل یادشده بحث گردد. در اینجا تنها به صورت نمادین یک عدد به احتمال وقوع یک حمله تروریستی یعنی $P_r(attack)$ نسبت داده می‌شود و تمرکز اصلی بحث در خصوص کمیت احتمال خرابی به شرط وقوع یک حمله تروریستی یعنی $p_{f|attack}$ خواهد بود. به زبان احتمالاتی خواهیم داشت:

$$p_f = p_{f|attack} \cdot P_r(attack) \quad (1)$$

در این رابطه p_f احتمال خرابی غیر مشروط یک سیستم سازه‌ای در دوره مورد مطالعه (مثلاً یک سال) است.

با عنایت به بحث بالا، بدین ترتیب برای تخمین $p_{f|attack}$ از رابطه کلاسیک ذیل که در آن تمامی متغیرهای تصادفی شامل مؤلفه‌های R و S به کار گرفته می‌شوند، استفاده می‌گردد [۱۷]:

$$p_{f|attack} = P_r[G(R, S) \leq 0] = \int_{G(R,S) \leq 0} f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (2)$$

تذکر آن‌که برای نوشتن رابطه (۲) برای سادگی، از داخل

^۱ $P_r(x)$ به معنای احتمال وقوع (x) است

نسبت داده می‌شود (برای مثال برای فاصله دور دو مقدار ۲۵ و ۵۰ متر در نظر گرفته می‌شوند).

در فلوچارت شکل (۲) می‌توان سناریوهای مختلف تهدید و وزن منتسب به هر یک (تراز اول تقسیم‌بندی) و نیز وزن‌های محتمل مواد منفجره که در هر یک از این سناریوها می‌تواند استفاده شود و وزن‌های مربوط به آنان (تراز دوم تقسیم‌بندی) نشان داده شده‌اند. همچنین در ترازهای سوم و چهارم تقسیم‌بندی فواصل کیفی و کمی آمده‌اند که در آنان نیز وزن وقوع متناسب آنان پیشنهاد شده است.

با استفاده از مباحث بالا می‌توان متغیرهای تصادفی مربوط به بارگذاری انفجاری را مجموعه‌ای شامل R_1, W, θ و R_2 در نظر گرفت که مؤلفه‌های بردار S خواهند شد:

$$S = S(\theta, W, R_1, R_2) \quad (۸)$$

ذیلاً به منظور ارائه روابط روشنی برای تخمین احتمال خرابی به شرط وقوع حمله، رابطه (۲) با استفاده از نظریه احتمالات [۲۱] به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$p_{f|attack} = \int_{G(R,S) \leq 0} [f_{R|S}(r|s) dr] f_S(s) ds \quad (۹)$$

که در آن، $f_{R|S}(r|s)$ تابع چگالی احتمال مشروط R به شرط S و $f_S(s)$ تابع چگالی احتمال S هستند. این عبارت می‌تواند همچنین به شکل زیر نیز نوشته شود:

$$p_{f|attack} = \int_{G(R,S) \leq 0} p_{f|S=s} f_S(s) ds \quad (۱۰)$$

که در آن:

$$p_{f|S=s} = \int_{G(R,S=s) \leq 0} f_{R|S=s}(r|s) dr \quad (۱۱)$$

در روابط بالا، $p_{f|S=s}$ احتمال خرابی به شرط وقوع حمله و نیز به شرط مقادیر خاصی برای مؤلفه‌های بارگذاری یعنی $S=s$ است. اگر این کمیت بر حسب پارامترهای بارگذاری (مثل R و W) رسم گردد منحنی‌هایی به دست می‌آیند که اصطلاحاً «منحنی‌های شکنندگی و یا آسیب‌پذیری»^۱ خوانده می‌شوند. در این منحنی‌ها، همان‌طور که از عبارت (۱۱) ملاحظه می‌گردد برخلاف تغییرپذیری‌های مربوط به مؤلفه‌های مقاومتی سازه (یعنی R) که مستقیماً در آنالیز وارد می‌گردند تغییرپذیری‌های مؤلفه‌های بارگذاری دخالت داده نمی‌شوند.

می‌توان مثلاً از زاویه برخورد جبهه موج ناشی از انفجار با سطح مورد نظر، دما و فشار هوای محل انفجار نیز یاد کرد. این پارامترها در اینجا لحاظ نمی‌گردند.

در سوابق تحقیقاتی روابط عمده‌تاً تجربی فراوانی برای محاسبه Pr و همچنین طول زمان انفجار یعنی t_d به عنوان تابعی از Z (و یا R و W) ذکر شده‌اند [۶-۱]. در اینجا از روابط پیشنهادشده توسط هائو و همکاران [۱۹] برای محاسبه میانگین و انحراف معیار t_d و Pr استفاده می‌گردند:

$$\log \mu_{Pr} = 3.651 - 3.018 \log(Z) + 0.1967[\log(Z)]^2 + 0.8873[\log(Z)]^3 - 0.3795[\log(Z)]^4 \quad (۴)$$

$$\log \sigma_{Pr} = 3.03 - 3.533 \log(Z) + 0.4534[\log(Z)]^2 + 0.3248[\log(Z)]^3 - 0.07896[\log(Z)]^4 \quad (۵)$$

$$\log(\mu_{t_d} / \sqrt[3]{W}) = -0.00307 + 1.2186 \log(Z) - 0.5207[\log(Z)]^2 - 0.2835[\log(Z)]^3 + 0.2132[\log(Z)]^4 \quad (۶)$$

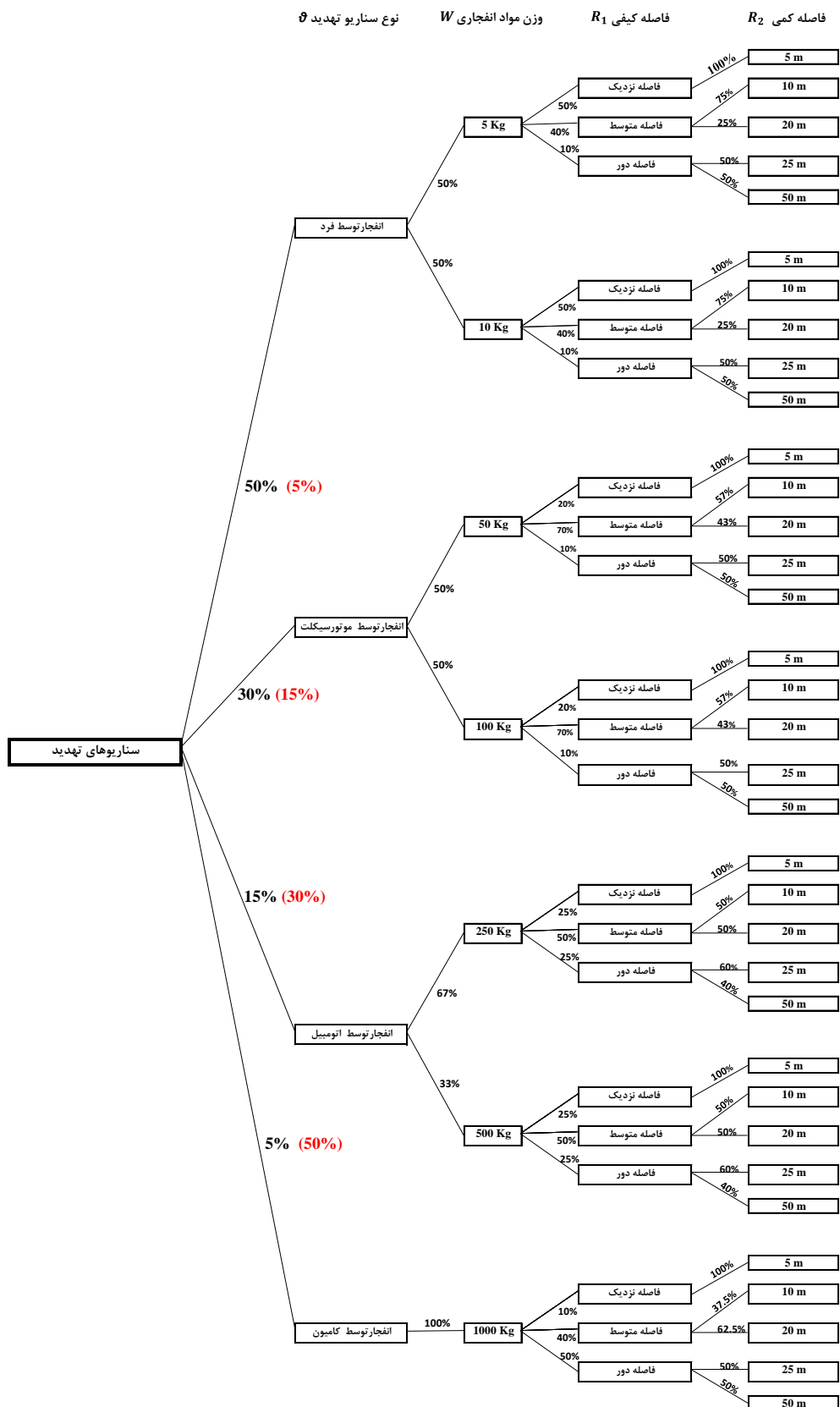
$$\log(\sigma_{t_d} / \sqrt[3]{W}) = -0.8433 + 1.0982 \log(Z) - 0.8127[\log(Z)]^2 + 0.4214[\log(Z)]^3 - 0.1046[\log(Z)]^4 \quad (۷)$$

که در آنها، μ_{Pr} و σ_{Pr} به ترتیب میانگین و انحراف معیار Pr و t_d و σ_{t_d} به ترتیب میانگین و انحراف معیار t_d هستند. بدین ترتیب ملاحظه می‌گردد که با معلوم بودن R و W و نتیجتاً Z می‌توان خواص احتمالاتی Pr و t_d را تخمین زد. از آنجا که توزیع احتمالاتی بهتری تا به حال برای این دو پارامتر پیشنهاد نشده است در اینجا توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیارهای بالا برای آنها در نظر گرفته خواهد شد.

برای لحاظ تغییرپذیری‌های مربوط به R و W ، ورود سناریوهای مختلف و ممکنه تهدید (و یا حمله) در آنالیز با مجموعه‌ای از احتمالات مناسب وقوع پیشنهاد شده است [۱۳] و [۲۰]. در هر یک از این سناریوهای تهدید که با θ نشان داده می‌شوند مقادیر متفاوتی از R و W لحاظ می‌گردد. برای مثال می‌توان سناریوهای تهدید (و یا حمله) توسط کامیون، اتومبیل، موتورسیکلت و یا نفر را تصور کرد که برای هر یک فاصله انفجار R و وزن ماده منفجره W مقادیر متفاوتی هستند.

از طرف دیگر با استفاده از ایده‌ای که توسط قلی‌زاد و عابدی [۲۰] پیشنهاد شده است می‌توان برای احتساب فواصل از دو تراز استفاده کرد: الف) تراز کیفی فاصله و ب) تراز کمی فاصله. در تراز کیفی فاصله که با R_1 نمایش داده می‌شود تقسیم‌بندی فاصله به شکل نزدیک، متوسط و دور در نظر گرفته می‌شود و در تراز کمی فاصله که با R_2 نمایش داده می‌شود کمیت به فاصله

^۱ Fragility Curves



تذکر: وزن‌های متفاوت برای سناریوهای تهدید برای لحاظ رویکرد حمله با وسائط نقلیه سنگین تر

شکل ۲. فلوجارت سناریوهای مختلف تهدید و احتمال وقوع آنان [۲۰]

f_y بوده و درصد به کار رفته در سازه دال $\rho = A_s/bd$ (۱۰) به شکل گسسته ارائه اعمال می گردند، لازم است رابطه (۱۰) به شکل گسسته ارائه گردد. این رابطه به شکل زیر نوشته می شود:

تذکر آنکه از آنجا که در مطالعه حاضر تغییرپذیری های مربوط به مؤلفه های S با ساختار گسسته ارائه شده در شکل (۲) اعمال می گردند، لازم است رابطه (۱۰) به شکل گسسته ارائه گردد. این رابطه به شکل زیر نوشته می شود:

$$P_{f|attack} = \sum_i^N \sum_j^N \sum_k^N \sum_l^N P_{f|\theta_i, w_j, R_{1k}, R_{2l}} \cdot P_r(\theta_i, w_j, R_{1k}, R_{2l}) \quad (12)$$

دال بتنی که در بالا توصیف شد تحت اثر بارگذاری گسترده یکنواخت انفجاری در کل سطح خود قرار داده می شود. به منظور آنالیز دینامیکی این دال، مدل یک درجه آزادی پیشنهادی بیگز [۱۵] مورد استفاده قرار می گیرد که در آن از میرایی سیستم صرف نظر شده است. برای استخراج مشخصات این مدل از ضرایبی که در مرجع یادشده ارائه شده اند استفاده می گردد و نیز از روابط ارائه شده آن برای حل عددی سیستم در مقابل بارهای ضربه ای/دینامیکی ناشی از انفجار استفاده می شود.

در این رابطه N تعداد سناریوهای تهدید (مطابق شکل (۲)، $N=4$)، N_i تعداد مقادیر لحاظ شده برای وزن مواد منفجره برای سناریو تهدید i (برای مثال برای سناریو تهدید انفجار توسط فرد $N_i=2$ است)، N_{ij} تعداد فواصل کیفی (برای مثال مطابق شکل (۲)، $N_{ij}=3$ برای حالتی است که از سناریوی تهدید انفجار توسط فرد و استفاده از وزن ماده منفجره $5kg$ استفاده می گردد) و N_{ijk} تعداد فاصله های کمی در سناریوی i ام، وزن ماده منفجره j ام و فاصله کیفی k ام است (برای مثال مطابق شکل (۲)، $N_{ijk}=2$ برای حالتی است که انفجار توسط فرد با استفاده از ماده منفجره $5kg$ و فاصله کیفی "دور" استفاده می گردد).

رفتار مقاومتی دال بتنی، مرکب از سه فاز یعنی الاستیک، الاستوپلاستیک و پلاستیک در نظر گرفته می شود (شکل (۳) ملاحظه گردد). در فاز اول سازه دال تا تغییر شکل $y = y_e$ به شکل الاستیک عمل می کند و مقاومت نهایی آن در این فاز R_e است. برای تغییر شکل های $y_e \leq y \leq y_m$ تغییر شکل متناظر شروع بازه فاز پلاستیک (دال)، سختی دال کاسته شده و مقاومت انتهایی در این فاز R_m خواهد شد. برای تغییر شکل های $y > y_m$ رفتار دال کاملاً پلاستیک (بدون سختی فنر) است.

در رابطه (۱۲)، $P_r(\theta_i, w_j, R_{1k}, R_{2l})$ که جرم احتمالاتی مربوط به وقوع (i, j, k, l) امین اتفاق بارگذاری است، می تواند به شکل شرطی زیر نیز نوشته شود [۲۱]:

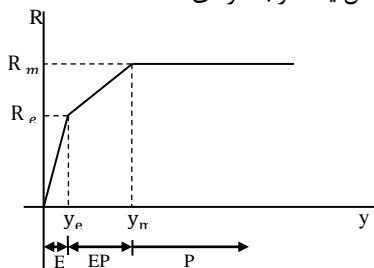
$$P_r(\theta_i, w_j, R_{1k}, R_{2l}) = P_r(R_{2l} | \theta_i, w_j, R_{1k}) \cdot P_r(R_{1k} | \theta_i, w_j) \cdot P_r(w_j | \theta_i) \cdot P_r(\theta_i) \quad (13)$$

در آنالیز دال یادشده تحت بار انفجار، بارگذاری می تواند ضربه ای^۱، دینامیکی^۲، یا حتی، هر چند بندرت، شبه استاتیکی^۳ باشد. با استفاده از معیارهایی که در اسمیت و هترینگتون [۱۱] پیشنهاد شده اند نوع بارگذاری به شکل زیر تشخیص داده می شود:

که در آن، $P_r(R_{2l} | \theta_i, w_j, R_{1k})$ احتمال استفاده از فاصله کمی l ام توسط تروریست ها زمانی که از فاصله کیفی k ام و وزن ماده منفجره j ام در سناریوی حمله i ام استفاده می شود، $P_r(R_{1k} | \theta_i, w_j)$ احتمال استفاده از فاصله کیفی k ام زمانی که از وزن ماده منفجره j ام در سناریوی حمله i ام استفاده می شود، $P_r(w_j | \theta_i)$ احتمال استفاده از وزن ماده منفجره j ام در سناریوی حمله i ام است، $P_r(\theta_i)$ احتمال وقوع سناریوی حمله i ام و $P_r(\theta_i)$ احتمال وقوع سناریوی حمله i ام هستند. این چهار دسته از مقادیر احتمال در شکل (۲) با اوزانی که برای اتفاق هر شاخه نوشته شده است درج شده اند.

- اگر $\omega t_d \leq 0.4$ بارگذاری ضربه ای است،
- اگر $0.4 \leq \omega t_d \leq 40$ بارگذاری دینامیکی است،
- اگر $\omega t_d \geq 40$ بارگذاری شبه استاتیکی است.

ω در جملات بالا فرکانس طبیعی زاویه ای سیستم یک درجه آزادی بوده و از رابطه $\omega = \sqrt{K/M_e}$ به دست می آید. K در این عبارت سختی سیستم در فاز الاستیک و M_e جرم سیستم با احتساب ضرایب تصحیح ارائه شده در تبدیل سیستم واقعی به سیستم معادل یک درجه آزادی است [۱۵].



شکل ۳. تغییرات مقاومت سیستم بر حسب تغییر شکل در بازه های الاستیک (E)، الاستوپلاستیک (EP) و پلاستیک (P)

۲-۲. سیستم سازه ای در آنالیز قابلیت اعتماد

۱-۲-۲. مدل سازی سیستم سازه ای و مؤلفه های بردار R

در این تحقیق آنالیز قابلیت اعتماد یک دال بتن مسلح دوطرفه مربع مستطیلی به ابعاد $a \times b \times h$ (ارتفاع h) که چهار لبه تکیه گاهی آن گیردار هستند مورد بررسی قرار می گیرد. مقاومت فشاری مشخصه بتن f'_c و مدول یانگ بتن E_c از رابطه $E_c = 0.043w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$ (بر حسب Mpa) مطابق توصیه آیین نامه بتن امریکا به دست می آید که در آن w_c وزن حجمی بتن به کار رفته است. فولاد میلگردهای به کار گرفته شده دارای تنش تسلیم

¹ Impulsive

² Dynamic

³ Quasi-static

عموما توسط کارخانه های تولید کننده اعلام می‌گردد.

در آنالیز قابلیت اعتماد سازه دال تحت بارگذاری انفجاری دو تابع حالت حدی در نظر گرفته می‌شوند. در تابع اول خمش دال لحاظ شده و حداکثر تغییر شکل کنترل می‌شود. در صورتی که این تغییر شکل از مقدار از پیش تعیین شده‌ای بیشتر شود دال خراب شده در نظر گرفته می‌شود. در تابع دوم برش دینامیکی حداکثر در لبه های تکیه‌گاهی محاسبه شده و با یک برش قابل قبول مقایسه می‌گردد. این دو تابع حالت حدی بدین ترتیب می‌توانند به شکل زیر نوشته شوند:

$$G_1(S, R) = y_{allow} - y_{max} = 0 \quad (16)$$

$$G_2(S, R) = v_{allow} - v_{max} = 0 \quad (17)$$

در روابط بالا، y_{allow} و v_{allow} تغییر شکل و تنش برشی حداکثر قابل قبول هستند. v_{max} حداکثر تنش برشی موجود بوده که در لبه‌های تکیه‌گاهی ایجاد می‌گردد و برای محاسبه آن از روابط قبلا گزارش شده [۱۵] استفاده می‌گردد.

۲-۲-۲. اثر نرخ کرنش بر خواص مقاومتی سازه

سازه‌های بتن مسلح زمانی که تحت بارگذاری ناشی از انفجار قرار می‌گیرند هم بتن و هم فولاد تحت اثر نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}$ ، بسیار بالایی از مرتبه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ بر ثانیه قرار می‌گیرند [۲۲]. این نوع بارگذاری‌ها با این نرخ کرنش بالا، خواص مقاومتی بتن و فولاد بطور قابل ملاحظه‌ای ارتقاء می‌یابند و مقادیر بزرگتری نسبت به آنچه در بارگذاری تدریجی استاتیکی از خود نشان می‌دهند ارائه می‌دهند. اثر این افزایش مقاومت ناشی از نرخ کرنش بالا معمولا با کمیت ضریب افزایش دینامیکی^۱ (DIF) نمایش داده می‌شود. برای محاسبه این کمیت در سوابق تحقیقاتی برای شاخص‌های مقاومتی بتن و فولاد (که در اینجا f_y' و f_c' در نظر گرفته می‌شوند) روابط مختلفی پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر از روابط پیشنهادی انگو و همکاران [۲۲] استفاده می‌گردد. مطابق این روابط DIF برای f_y' و f_c' به شکل زیر محاسبه می‌گردند:

$$DIF(f_c') = \frac{f_{cs}'}{f_c'} = \gamma \dot{\epsilon}^{1/3} \quad \text{برای } \dot{\epsilon} > 30 / \text{sec} \quad (18)$$

که در آن:

$$\log(\gamma) = 6.156\alpha - 0.492$$

$$\alpha = \frac{1}{5 + 0.8929f_c'}$$

و:

در صورتی که بارگذاری ضربه‌ای محسوب گردد، تغییر شکل بیشینه از رابطه زیر مستقیماً به دست می‌آید [۱۵]:

$$y_{max} = \frac{1}{2} y_e \left[\left(\frac{I\omega}{R_m} \right)^2 + 1 \right] \quad (14)$$

که در آن I عبارت است از ایمپالس (سطح زیر منحنی بارگذاری در فاز مثبت) که با فرض مدل ساده مثلثی از رابطه $I = 1/2 F_1 \cdot t_a$ یافت می‌گردد. در رابطه اخیرالذکر F_1 حداکثر مقدار بار انفجاری متناظر فشار حداکثر Pr است (شکل ۱).

در صورتی که بارگذاری دینامیکی باشد y_{max} با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم ارائه شده توسط بیگز [۱۵] به دست می‌آید. واضح است که اگر بارگذاری شبه استاتیکی باشد y_{max} متناظرا از آنالیز متناسب به سادگی قابل حصول است.

در آنالیز قابلیت اعتماد دال تحت مطالعه پارامترهای ابعادی آن یعنی a ، b و h و نیز f_c' و f_y به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین مؤلفه‌های بردار R را تشکیل می‌دهند:

$$R = R(a, b, h, f_c', f_y) \quad (15)$$

همه متغیرهای تصادفی بالا فرض می‌گردند که دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و ضریب تغییرات (COV) آنان به شکل زیر در نظر گرفته می‌شوند:

الف) میانگین مقادیر ابعادی a ، b و h مقادیر اسمی در نظر گرفته شده در طراحی و ضریب تغییرات آنان برابر ۰/۰۵ مطابق توصیه لو و هائو [۷] در نظر گرفته می‌شوند،

ب) میانگین مقاومت بتن و ضریب تغییرات آن با احتساب مقادیری که برای بتن ریخته شده در محل در نظر گرفته می‌شوند از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۷]:

$$\mu(f_c \text{ in-situ}) = 0.675 f_c' + 7.7 \leq 1.1 f_c' \quad (\text{Mpa})$$

$$COV(f_c \text{ in-situ}) = \sqrt{COV(f_c')^2 + 0.0084}$$

در این روابط $COV(f_c')$ ضریب تغییرات بتن ساخته شده در کارگاه/کارخانه است. برای شرایط کنترلی عالی، متوسط و ضعیف به ترتیب ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر $COV(f_c') = 0.1$ در محاسبات استفاده خواهد شد.

ج) میانگین و ضریب تغییرات f_y مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۷]:

$$\mu_{f_y} = \frac{(f_y)_{characteristic}}{1 - 1.64 COV(f_y)}, \quad COV(f_y) = 0.08$$

$(f_y)_{characteristic}$ مقدار مشخصه تنش تسلیم فولاد بوده که

^۱ Dynamic Increased Factor

رابطه بالا با فرض عدم وجود هیچگونه نرخ تورم و یا به عبارت دیگر ثبات ارزش پول در سال‌های عمر سازه ارائه گشته است. اگر فرض گردد نرخ یادشده به مقدار r' باشد، آنگاه رابطه (۲۰) به شکل زیر اصلاح می‌گردد:

$$LCC = C_R + \sum_{t=1}^T \left\{ (1 - p_f)^{t-1} \cdot p_f \cdot \frac{C_F(t)}{[1 + r_{real}]^t} \right\} \quad (21)$$

که در آن r_{real} نرخ تنزیل واقعی بوده و از رابطه پیشنهادی فیشر به دست می‌آید:

$$r_{real} = \frac{1+r}{1+r'} - 1 \quad (22)$$

در تحقیق حاضر، قصد آن است که دال‌های مختلفی با مشخصات فنی متفاوت با یکدیگر مقایسه اقتصادی گردند و تحلیلی ارائه گردد که چگونه می‌توان با استفاده از کمیت LCC ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری در اختیار مسئولین امر قرار داد.

۴. مثال: آنالیز قابلیت اعتماد دال‌های دوطرفه تحت

اثر بار انفجار

در این مثال یک دال بتن مسلح در نظر گرفته می‌شود که تحت بار ناشی از انفجار ماده منفجره‌ای با وزن W قرار گرفته‌است که در فاصله R منفجر می‌شود. ابعاد اسمی این دال $a \times b \times h$ (ارتفاع) بوده و مقاومت مشخصه بتن و تنش تسلیم فولاد به کار رفته در آن به ترتیب f_c' و f_y هستند.

در آنالیز قابلیت اعتماد این دال، پارامترهای مقاومتی h, b, a ، f_c' و f_y به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و مولفه‌های بردار R راتشکیل می‌دهند. خواص احتمالاتی این مولفه‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. همچنین خواص احتمالاتی پارامترهای بارگذاری (مولفه‌های بردار S) یعنی W, θ, R_1 و R_2 با استفاده از اوزان ارائه شده در شکل (۲) در آنالیز در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۱. خواص احتمالاتی پارامترهای مقاومتی دال

| متغیر تصادفی | میانگین | ضریب تغییرات (COV) | توزیع احتمال |
|--------------|-------------------|--------------------|--------------|
| a (m) | ۴ | ۰/۰۵ | نرمال |
| b (m) | ۵ | ۰/۰۵ | نرمال |
| h (m) | ۰/۱۵ | ۰/۰۵ | نرمال |
| f_c' (Pa) | ۳۰×۱۰^۶ | ۰/۱ | نرمال |
| f_y (Pa) | ۵۰۰×۱۰^۶ | ۰/۰۸ | نرمال |

$$DIF(f_y) = \frac{f_{yd}}{f_{ys}} = \left(\frac{\epsilon}{10^{-4}} \right)^\alpha \quad (19)$$

که در آن:

$$\alpha = 0.074 - \frac{0.04 f_y}{414} \quad (f_y \text{ بر حسب } Mpa)$$

در روابط بالا f_{cs}' و f_{ys} به ترتیب مقادیر f_c' و f_y در حالت بارگذاری استاتیکی و متناظرا f_{ca}' و f_{ya} مقادیر مربوطه در حالت دینامیکی (اعمال بارگذاری با نرخ کرنش بالا) هستند.

۳. آنالیز اقتصادی سازه تحت بارگذاری انفجاری

عموماً به منظور کمک به مقامات مسئول در نگهداری سازه‌های زیربنایی در تصمیم‌گیری برای انجام هزینه‌های (هنگفت) برای تقویت سازه‌های موجود و یا طراحی سازه‌های در حال طراحی برای مقاومت در مقابل انفجار، آنالیز اقتصادی (آنالیز هزینه-فایده) توسط کارشناسان و تصمیم‌سازان مربوطه از اهمیت شایانی برخوردار است. در این آنالیزها معمولاً گزینه‌های مطرح به لحاظ اقتصادی با یکدیگر مقایسه شده و گزینه برتر برگزیده می‌شود.

اصولاً در یک آنالیز اقتصادی (هزینه-فایده) بایستی همه جنبه‌های سودآور و درآمدزای یک گزینه از یک طرف و نیز تمامی جنبه‌های هزینه‌ای و هزینه‌زای آن از طرف دیگر در آنالیز لحاظ شده و مابه‌التفاوت آنان با دیگر گزینه‌ها مقایسه گردد. در آنچه ذیلا مورد بحث قرار می‌گیرد، باین حال، برای سادگی فرض می‌شود که تمامی فواید مترتب بر تمامی گزینه‌ها یکسان بوده و تنها تفاوتی که میان آنان وجود دارد هزینه‌های ساخت اولیه و نیز هزینه‌های ناشی از خرابی آنان است. بنابراین فقط این عوامل در آنالیز به کار خواهند آمد.

با لحاظ فرض گفته شده یکی از راه‌های مناسب آنالیز، محاسبه هزینه‌های چرخه عمر^۱ (LCC) سازه تحت مطالعه است. برای محاسبه LCC ، استوارت و نرتون [۱۳] با فرض استقلال احتمالاتی اتفاق خرابی‌های محتمل در سال‌های مختلف، رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

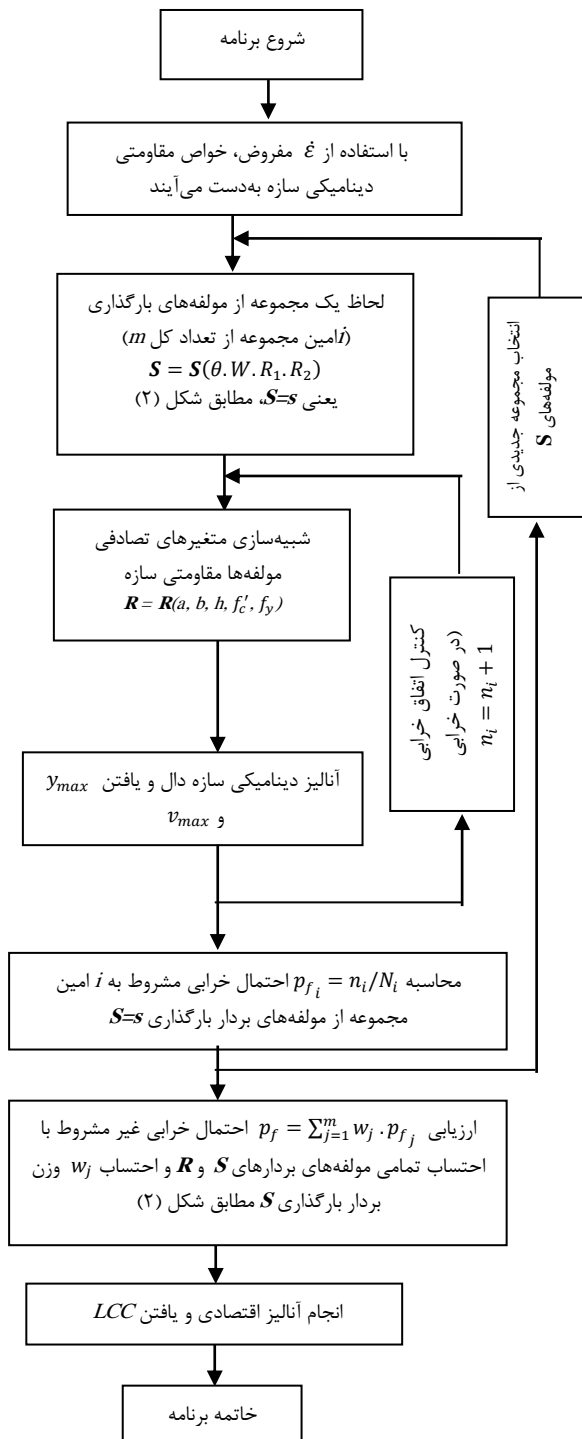
$$LCC = C_R + \sum_{t=1}^T \left\{ (1 - p_f)^{t-1} \cdot p_f \cdot \frac{C_F(t)}{[1 + r]^t} \right\} \quad (20)$$

که در آن C_R هزینه‌های اولیه ساخت سازه (مقاوم به اثر بار انفجار) بوده و p_f احتمال خرابی سالانه سازه و $C_F(t)$ هزینه‌های پیامد خرابی سازه در سال t به شرط وقوع خرابی هستند. ضمناً در رابطه بالا طول زمانی است که این سازه قرار است خدمت دهد (طول عمر در نظر گرفته شده برای سازه)، r نیز اصطلاحاً نرخ تنزیل^۲ سالانه است.

^۱ Life Cycle Cost

^۲ Discount Rate

به‌منظور شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی پارامترهای مقاومتی (یعنی a, b, h, f'_c, f'_y)، از آنجا که این متغیرها دارای توزیع نرمال با خواص احتمالاتی مذکور در جدول (۱) هستند، این عمل بسادگی صورت می‌گیرد.



شکل ۴. فلوچارت فرآیند آنالیز قابلیت اعتماد و آنالیز اقتصادی

با در اختیار داشتن ترکیب مقادیر متغیرهای بارگذاری و نیز مقادیر شبیه‌سازی شده متغیرهای مقاومتی، آنالیز دینامیکی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در آنالیز دو تابع حالت حدی (۱۶) و (۱۷) (کنترل خمشی یا تغییر شکل و نیز کنترل برشی دال) به‌کار گرفته می‌شوند. در این مثال حداکثر تغییرشکل مجاز $\frac{1}{360}$ مقدار بعد کوچکتر دال یعنی b در نظر گرفته می‌شود. نیز تنش مجاز برشی از رابطه پیشنهادی [۲۳] محاسبه می‌گردد:

$$v_{allow} = 0.04f'_c + 7.7 \quad (\text{بر حسب } \psi \text{ و } f'_c)$$

همچنین برای محاسبه مقدار تنش برشی موجود از رابطه $v_{موجود} = \max\left[\frac{8}{7} \frac{V_A}{ad}, \frac{8}{7} \frac{V_B}{bd}\right]$ استفاده می‌گردد که در آن V_A و V_B نیروی برشی کل محاسبه شده در تکیه‌گاه‌های دال به ترتیب در راستاهای ابعادی a و b هستند. برای مدل‌سازی دال تحت مطالعه به عنوان یک سیستم یک‌درجه آزادی، با توجه به آنکه نسبت میانگین ابعادی دال a/b برابر 0.18 است از ضرائب تبدیل مربوطه استفاده می‌گردد (ضمیمه مقاله و [۱۵] برای جزئیات بیشتر ملاحظه گردند). بعلاوه برای آنالیز همگی لنگرهای نهایی ظرفیت (لنگرهای پلاستیک) در جهات مختلف (ضمیمه ملاحظه گردد) مساوی فرض می‌گردند ($m_{p_{fb}}, m_{p_{fa}}, m_{p_{sb}}, m_{p_{sa}}$ برابر گرفته می‌شوند).

وزن حجمی بتن مسلح نیز $w_c = 2500 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب مدول الاستیسته (مدول یانگ) بتن از رابطه $E_c = 5375\sqrt{f'_c}$ (E_c بر حسب Mpa) به‌دست می‌آید. نیز در طول تمامی این مثال، مقدار نسبت فولاد، ρ ($\rho = A_s/bh$ یا $\rho = A_s/ah$) با احتساب A_s به‌عنوان سطح فولاد به‌کار رفته) برابر 1% در نظر گرفته می‌شود.

در مثال حاضر همچنین نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 100$ بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. با این نرخ مقادیر تقویت شده f'_c و f'_y با استفاده از ضریب افزایش دینامیکی حاصل از روابط (۱۸) و (۱۹) به‌دست می‌آیند.

در این تحقیق برای آنالیز قابلیت اعتماد از تکنیک شبیه‌سازی^۱ برای تخمین احتمال خرابی استفاده می‌گردد. در شکل (۴) فلوچارت ساده‌ای از چگونگی انجام آنالیز با احتساب آنالیز اقتصادی نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این فلوچارت ملاحظه می‌گردد از آنجا که متغیرهای تصادفی بارگذاری (یعنی R_2, R_1, W, θ) دارای توزیع احتمال گسسته لحاظ شده‌اند (شکل (۲) ملاحظه گردد) در هر شبیه‌سازی ترکیبی از مقادیر لحاظ شده در شکل یاد شده در نظر گرفته می‌شود. همچنین

¹ Simulation

پارامترهای بارگذاری خاص) تلاش می‌گردد احتمال خرابی مشروط مربوطه یعنی $p_{f|S=S}$ به دست آید. در شکل (۵) مجموعه‌ای از اینگونه منحنی‌ها برای W برابر ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ کیلوگرم ارائه شده‌اند.

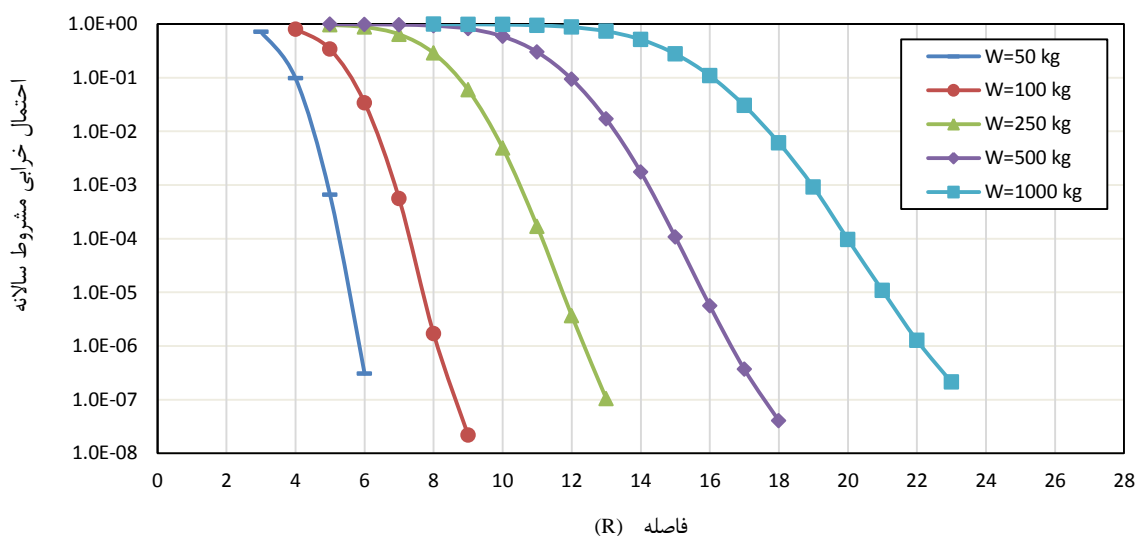
منحنی‌های شکنندگی در طراحی سازه‌های مقاوم در مقابل انفجار می‌توانند بسیار سودمند باشند. با استفاده از این منحنی‌ها:

اولاً، اگر وزن ماده منفجره طراحی معلوم باشد می‌توان بسادگی مقدار فاصله حداقلی را که سبب می‌شود احتمال خرابی از یک مقدار قابل قبول بیشتر نشود را یافت. برای مثال با استفاده از منحنی‌های شکل (۵) می‌توان اظهار داشت که اگر $W=500kg$ باشد آنگاه برای آنکه احتمال خرابی بیشتر از 10^{-6} نشود بایستی حداقل مقدار فاصله R (فاصله ایمن) برابر ۱۶/۵ متر باشد. این مطلب می‌تواند برای طراحی جانمایی موانع احتمالی برای ساختمان‌های مهم برای جلوگیری از حملات تروریستی به کار گرفته شود.

صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی پارامترهای مقاومتی برای ترکیب بارگذاری یادشده به دفعات صورت گرفته و تعداد موارد نقض حالات حدی شمرده می‌شود. در انتها احتمال خرابی مشروط (به متغیرهای بارگذاری) از رابطه ساده $p_{f_i} = n_i/N_i$ تخمین زده می‌شود که در آن N_i تعداد کل شبیه‌سازی‌ها برای i امین ترکیب بارگذاری است. این عمل برای تمام ترکیبات بارگذاری در شکل (۲) (تعداد این ترکیبات m فرض می‌گردد) تکرار می‌گردد. حال می‌توان احتمال خرابی غیر مشروط را از رابطه $p_f = \sum_{j=1}^m w_j \cdot p_{f_j}$ به دست آورد که در آن w_j وزن Z امین ترکیب بارگذاری است.

ذیلاً خروجی‌هایی که از برنامه گرفته می‌شود در سه گام تشریح می‌شوند:

در گام اول آنالیز سازه دال، تلاش می‌گردد که منحنی‌های شکنندگی برای این دال استخراج گردند. برای دستیابی به این منحنی‌ها، همانطور که تشریح شد به ازاء مقادیر خاصی از W و R (و یا به عبارت دیگر با فرض یک سناریوی تهدید خاص و بالتبع



شکل ۵. منحنی‌های شکنندگی $R - p_{f|S=S}^{attack}$ بازاء مقادیر مختلفی از W

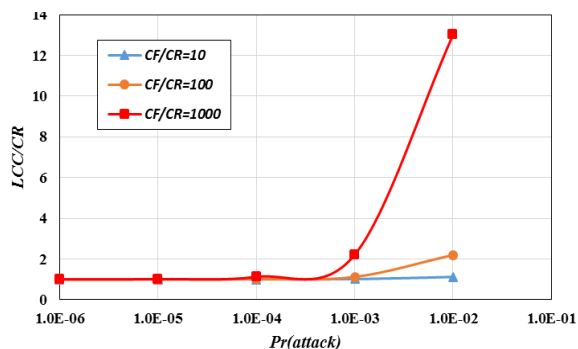
هم ارتفاع احتمال خرابی را برای W و R های معلوم به دست آورد. در شکل (۶) مجموعه‌ای از اینگونه منحنی‌ها برای یک $p_{f|S=S}^{attack}$ معلوم نشان داده شده است. این منحنی‌ها علاوه بر ارائه مزیت‌های گفته شده می‌توانند در برآورد احتمال خرابی سازه‌هایی که برای W و R های خاصی طراحی گشته‌اند به کار گرفته شوند. بعنوان نمونه با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در شکل (۶)، می‌توان براحتی دریافت که اگر سازه‌ای برای $R=15m$ و $W=500kg$ طراحی شده است احتمال خرابی آن حدود 10^{-4} است.

ثانیا، بعکس اگر در محل ساخت سازه مورد توجه، یک مانع (مثلا طبیعی) وجود داشته باشد و بنابراین R طراحی معلوم باشد و قصد آنست که احتمال خرابی بیشتر از یک مقدار مشخص نباشد می‌توان W لازم برای استفاده در طراحی را به دست آورد. به عنوان مثال اگر مانع موجود در فاصله ۱۵ متری از ساختمان قرار دارد و قصد آنست که ساختمان به نوعی طراحی گردد که حداکثر مقدار احتمال خرابی 10^{-6} باشد آنگاه حداکثر وزن مواد منفجره قابل تحمل توسط این ساختمان حدود $W=400kg$ است.

ثالثا، با استفاده از منحنی‌های شکنندگی می‌توان منحنی‌های

در گام سوم آنالیز، حال می‌توان از نگاه اقتصادی سازه را به‌ازای مقادیر مختلف کمیت‌های مطرح در مسئله ارزیابی نمود. همانطور که قبلاً نشان داده شد احتمال خرابی به‌دست‌آمده در بالا مشروط به احتمال وقوع سالانه حملات تروریستی، $P_r(attack)$ ، به سازه تحت مطالعه می‌باشد (عبارت (۱) ملاحظه گردد). نیز تذکر داده شد که این احتمال، عمدتاً به شرایط سیاسی، اجتماعی، فرهنگی و نیز امنیتی جامعه مورد نظر بستگی دارد و اصولاً یک پارامتر مهندسی نیست. در آنالیزی که ذیلاً ارائه می‌گردد تلاش می‌شود که با استفاده از رابطه (۲۰) نشان داده شود که چگونه هزینه‌های چرخه عمر سازه مورد نظر یا LCC با تغییرات مقدار $P_r(attack)$ تغییر می‌کنند. برای نیل به این مقصود، نرخ تنزیل $r=5\%$ در نظر گرفته می‌شود. نیز برای سهولت محاسبات اولاً LCC به‌عنوان ضریبی از مقدار هزینه‌های اولیه ساخت یا C_R یافت می‌گردد (در واقع LCC/C_R ها تخمین زده می‌شوند) و ثانیاً $G_F(t)$ ها مقادیر ثابتی در سال‌های مختلف لحاظ شده و برای C_F/C_R یعنی نسبت هزینه‌های پیمان خرابی به هزینه‌های اولیه ساخت مقادیری مثل ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته می‌شوند. در شکل (۷) حاصل این آنالیز نمایش داده شده است.

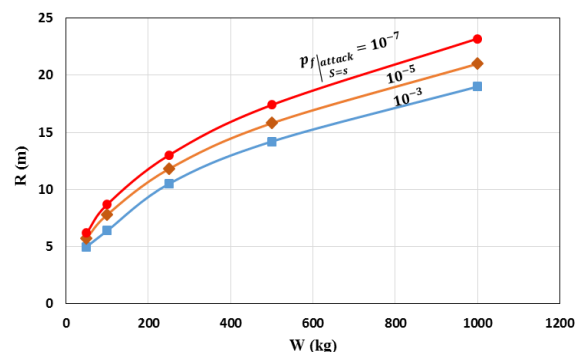
از شکل (۷) ملاحظه می‌گردد که همان‌طور که انتظار می‌رود هرچه $P_r(attack)$ در یک جامعه بزرگتر باشد هزینه‌های چرخه عمر سازه افزایش می‌یابند. با این حال در سازه فعلی این احتمال تا مقدار 10^{-4} تاثیر بزرگی در افزایش هزینه‌های یادشده ندارد اما با فزونی گرفتن این احتمال از مقدار گفته شده به‌سرعت هزینه‌های چرخه عمر بویژه برای G_F/C_R های بزرگ افزایش می‌یابند (در شکل ملاحظه می‌شود در حالت $C_F/C_R = 1000$ ، LCC برای $P_r(attack) = 10^{-2}$ تا حدود ۱۳ برابر هزینه‌های ساخت افزایش می‌یابد). نیز می‌توان ملاحظه کرد که اگر نسبت هزینه‌های ناشی از خرابی به هزینه‌های اولیه یعنی C_F/C_R کمتر و مثلاً ۱۰ باشد آن‌گاه LCC تنها ۲/۵ برابر هزینه‌های اولیه افزایش یافته و بدین ترتیب می‌تواند گزینه بهتری (در صورت وجود) نسبت به گزینه با $C_F/C_R = 1000$ باشد.



شکل ۷. هزینه‌های چرخه عمر سازه بعنوان تابعی از احتمال سالانه حملات تروریستی، $P_r(attack)$ ، برای مقادیر مختلف C_F/C_R

از نکات جالب دیگری که از این منحنی‌ها می‌توان ملاحظه کرد آنست که در مثال حاضر فاصله محل انفجار تا محل سازه بسیار کمیت حائز اهمیتی در یافتن احتمال خرابی است بطوریکه اندکی فاصله بیشتر می‌تواند مقدار زیادی از این احتمال را کاهش دهد. به‌عنوان مثال می‌توان دید که اگر $W=500kg$ باشد به‌ازاء $R=14m$ احتمال خرابی 10^{-3} است اما اگر همین فاصله به مقادیر ۱۶ و یا ۱۷/۵ متر (به ترتیب ۱۴/۳٪ و ۲۵٪ افزایش طول) افزایش یابد احتمال خرابی به ترتیب به مقادیر 10^{-5} و 10^{-7} کاهش می‌یابد.

شدت تغییرات احتمال خرابی، با این حال، نسبت به تغییرات W به اندازه R نیست. شکل (۶) نشان می‌دهد که وقتی $R=15m$ باشد برای کاهش احتمال خرابی از مقدار 10^{-3} برای $W=600kg$ به مقادیر 10^{-5} و 10^{-7} بایستی به ترتیب وزن مواد منفجره به مقادیر حدود ۴۶۰ و ۳۴۰ کیلوگرم (به ترتیب ۲۳/۳٪ و ۴۳/۳٪ کاهش وزن) کاهش یابند. بنابراین برای حفاظت از سازه‌های زیربنایی بایستی تلاش کرد موانعی ایجاد نمود که در صورت حملات تروریستی، انفجار در فاصله دورتری (حتی به‌مقدار اندک) صورت گیرد.



شکل ۶. منحنی‌های هم‌ارتفاع احتمال خرابی

در گام دوم آنالیز، چنانچه خواص احتمالاتی پارامترهای بارگذاری نیز در محاسبات وارد گردند (به‌عبارت دیگر اگر اوزان مندرج در شکل (۲) برای سناریوهای مختلف تهدید در محاسبات لحاظ گردند) می‌توان احتمال خرابی غیر مشروط به این پارامترها یعنی $p_{f|attack}$ (احتمال خرابی تنها مشروط به وقوع حمله) را به‌دست آورد. در سازه دال این مثال، این احتمال که همه سناریوهای تهدید را شامل می‌شود برابر مقدار $p_{f|attack} = 0.6640 \times 10^{-1}$ تخمین زده شده است. این مقدار در صورتی که از رویکرد حمله به ساختمان با وسایل نقلیه سنگین‌تر استفاده شود (استفاده از اعداد وزنی داخل پرانتز در شکل (۲)) به‌مقدار $p_{f|attack} = 0.21559$ افزایش می‌یابد.

جدول ۲. اثر ارتفاع دال بر هزینه‌های چرخه عمر سازه

| μ_H (m) | $P_{f attack}$ | C_R/C_R^* | LCC/C_R |
|-------------|-------------------------|-------------|-----------|
| ۰/۱۰ | ۰/۱۴۱۵ | ۰/۸ | ۲۱ |
| ۰/۱۵ | $۰/۶۶۴۹ \times 10^{-1}$ | ۱/۰ | ۱۳ |
| ۰/۱۸ | $۰/۴۶۲۱ \times 10^{-1}$ | ۱/۱ | ۱۰/۳ |
| ۰/۲۰ | $۰/۳۷۸۴ \times 10^{-1}$ | ۱/۱۵ | ۹ |
| ۰/۲۵ | $۰/۱۸۹۹ \times 10^{-1}$ | ۱/۲ | ۵/۴ |

تذکر: C_R^* هزینه‌های اولیه حالت $\mu_H = 0.15$ m و C_R هزینه‌های مربوط به ارتفاعات دیگر هستند. ضمناً: $r=5\%$ ، $r'=0$ ، $P_r(attack) = 10^{-2}$ و $C_F/C_R = 1000$

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد اگر ارتفاع دال از ۰/۱۵ متر به ۰/۲۵ متر افزایش یابد هرچند فرض شده است که ۲۰٪ هزینه‌های اولیه ساخت افزایش می‌یابد با این حال هزینه‌های چرخه عمر به حدود کمی بیشتر از یک سوم کاهش می‌یابند. در این حالت می‌توان تصور نمود که مقامات مسئول ممکن است تصمیم بگیرند که برای احداث سازه دال ۲۰٪ هزینه‌های بیشتر را تحمل نمایند اما ریسک خرابی و تلفات احتمالی متعاقب آن را بسیار کاهش دهند.

۵. نتیجه‌گیری

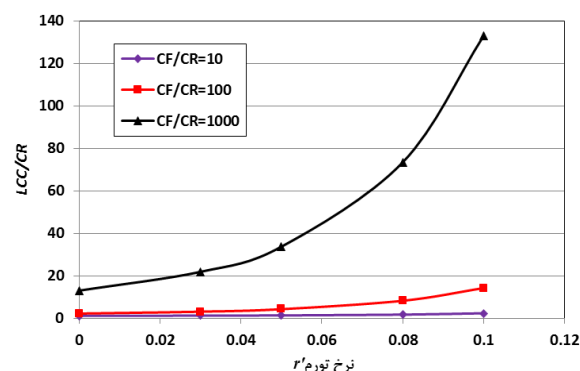
در این مقاله یک فرمول‌بندی مناسب برای آنالیز ریسک سازه‌های در معرض بارهای انفجاری ناشی از عملیات تروریستی ارائه شده است. از آنجا که مقوله ریسک عموماً ترکیبی از کمیت احتمال خرابی و نیز هزینه‌های پیامد خرابی است، فرمول‌بندی یادشده ابتدا به‌طور مفصل به محاسبات مربوط به احتمال خرابی و یا p_f پرداخته است و سپس محاسبات مربوط به هزینه‌های چرخه عمر را برای ایجاد چارچوبی مناسب برای تصمیم‌گیران برای انتخاب گزینه برتر در میان گزینه‌های محتمل ارائه کرده است.

برای استفاده از مباحث این مقاله، با این حال نکات زیر بایستی مد نظر قرار گیرند:

الف) همان‌طور که اشاره شد آنالیز پیشنهادی بسیار متأثر از شرایط امنیتی جامعه‌ای است که سازه مد نظر در آن بنا شده است. این شرایط امنیتی در کمیت احتمالاتی $p_r(attack)$ و یا احتمال حمله منعکس شده است. کاملاً واضح است که در جامعه‌ای که این کمیت مقدار بزرگی دارد (احتمال حمله تروریستی بالا است) لاجرم برای ایمن نگاه داشتن سازه‌های زیربنایی مهم بایستی هزینه‌های بسیاری را تحمل کرد تا این سازه‌ها در حد معقولی ایمن بمانند. این مطلب کاملاً از مباحث این مقاله قابل نتیجه‌گیری است.

ب) از آنجا که شرایط امنیتی در یک جامعه در طول عمر سازه (برای مثال ۳۰ سال) می‌تواند بسیار متغیر باشد به این معنا که در دوره‌ای جامعه مورد نظر می‌تواند تحت بحران‌های سیاسی، اجتماعی و بالطبع امنیتی قرار گرفته و $p_r(attack)$ مقدار

محاسبات و نتایج بالا با فرض عدم وجود تورم در سال‌های عمر سازه در جامعه مورد نظر است. با استفاده از رابطه (۲۱)، حال می‌توان اثر وجود نرخ تورم با مقادیر متفاوت (نسبت به مقدار نرخ تنزیل r) را مورد مطالعه قرار داد. اگر همه فرضیات اخذ شده در مطالعه بالا همچنان معتبر باشند، شکل (۸) تغییرات LCC/C_R را نسبت به تغییرات نرخ تورم r' برای مقادیر مختلف C_F/C_R نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در همه حالات (غیر از نرخ تورم برابر صفر) این نرخ اثر تشدیدکننده روی مقدار LCC/C_R دارد و این اثر در حالاتی که C_F/C_R بزرگ است بسیار بزرگتر است. برای مثال زمانی که $C_F/C_R = 1000$ است اگر نرخ تورم ۱۰٪ باشد هزینه‌های چرخه عمر به مقداری حدود ۱۳۳ برابر هزینه‌های اولیه بالغ خواهد شد. اگر این مقدار با حالتی که محاسبات در وضعیت بدون تورمی صورت می‌گیرد مقایسه گردد که در آن $LCC/C_R = 13$ است می‌توان نتیجه گرفت که این نرخ چگونه می‌تواند نقش بسیار فزاینده‌ای روی هزینه‌های چرخه عمر داشته باشد.



شکل ۸. تغییرات هزینه‌های چرخه عمر با تغییرات نرخ تورم

برای سازه مورد مطالعه حاضر، ضمناً طی یک آنالیز حساسیت مقدماتی، نتیجه گرفته شد که در میان پارامترهای مختلف دخیل در مسئله (مثل μ_H ، μ_{f_c} ، μ_{f_y} ، d ، ρ ، w_c و ϵ)، علیرغم وجود حساسیت‌های متفاوت هر یک بر مقدار احتمال خرابی $p_{f|attack}$ ، بیشترین حساسیت به مقدار ارتفاع دال نشان داده می‌شود. در آنالیزی که ذیلاً انجام می‌گیرد تاثیر مقدار میانگین ارتفاع دال، μ_H ، روی هزینه‌های چرخه عمر مورد تحقیق قرار می‌گیرد. در این مطالعه $r=5\%$ ، $P_r(attack) = 10^{-2}$ و $C_F/C_R = 1000$ در نظر گرفته می‌شوند. برای انجام این آنالیز، از آنجا که افزایش ارتفاع دال خود سبب افزایش هزینه‌های اولیه C_R می‌گردد، برای سادگی محاسبات و مقایسه حالات مختلف فرض می‌گردد نسبت C_R/C_R^* هزینه‌های اولیه در حالت $\mu_H = 0.15$ m و C_R هزینه‌های مربوط به ارتفاعات دیگر) مطابق آنچه در جدول آمده است تغییر کند.

می‌گردد. با صرف‌نظر از میرایی در چنین سیستمی، معادله دینامیکی حاکم بر سیستم عبارت است از [۱۵]:

$$M_e \ddot{y} + K_e y = F_e(t) \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن M_e ، K_e و $F_e(t)$ به ترتیب جرم، سختی و بارگذاری معادل در سیستم یک درجه آزادی (نسبت به سیستم واقعی که عموماً چند درجه آزادی است) هستند. همچنین y و \dot{y} به ترتیب تغییر شکل و شتاب سیستم در نظر گرفته شده‌اند. معادله (الف-۱) همچنین می‌تواند به شکل زیر نیز نوشته شود:

$$K_M \cdot M \cdot \ddot{y} + K_S \cdot Ky = K_L \cdot F(t) \quad (\text{الف-۲})$$

که در آن، K_M ، K_S و K_L به ترتیب ضرایب تبدیل جرم، سختی و بارگذاری هستند و رابطه میان جرم، سختی و بارگذاری واقعی سیستم (یعنی M ، K و $F(t)$) را با مقادیر معادل آنان (بیان شده در (الف-۱)) تعریف می‌کنند. به این معنا که:

$$K_M = \frac{M_e}{M} \quad K_S = \frac{K_e}{K} \quad K_L = \frac{F_e(t)}{F(t)}$$

از آنجا که می‌توان نشان داد که مقادیر K_S و K_L بسیار نزدیک به هم هستند ([۱] ملاحظه گردد)، بنابراین، می‌توان نوشت:

$$K_{LM} \cdot M \cdot \ddot{y} + Ky = F(t) \quad (\text{الف-۳})$$

که در آن، $K_{LM} = \frac{K_M}{K_L}$ ضریب بار-جرم خوانده می‌شود.

در کتاب مقدمه‌ای بر دینامیک سازه‌ها [۱۵]، آنالیز دینامیکی دال‌های با تکیه‌گاه‌های مختلف (ساده و گیردار) بحث شده و ضرایب بالا برای دال با چهار تکیه‌گاه گیردار برای یک سیستم الاستو-پلاستیک در بازه‌های الاستیک، الاستو-پلاستیک و پلاستیک ارائه شده‌اند (شکل ۳). در جدول ضمیمه، برای نمونه، برای حالتی که $a/b=0.8$ است این ضرایب و اطلاعات دیگری که در آنالیز مورد نیاز هستند ارائه شده‌اند:

با این تذکر که به طور کلی، m_p مقاومت خمشی نهایی و یا پلاستیک مقطع المان سازه‌ای است، پارامترهای به‌کاررفته در جدول ضمیمه دارای تعاریف زیر هستند:

m_{pfa} : لنگر ظرفیت نهایی کل مثبت در امتداد مقطع وسط دهانه در امتداد لبه کوتاه،

m_{pfb} : لنگر ظرفیت نهایی کل مثبت در امتداد مقطع وسط دهانه در امتداد لبه بلند،

m_{psa} : لنگر ظرفیت نهایی کل منفی در امتداد لبه کوتاه،

m_{psb} : لنگر ظرفیت نهایی کل منفی در امتداد لبه بلند،

m_{psb}^0 : لنگر ظرفیت نهایی منفی در واحد عرض در مرکز لبه بلند،

V_A : عکس‌العمل تکیه‌گاهی دینامیکی در امتداد لبه کوتاه،

V_B : عکس‌العمل تکیه‌گاهی دینامیکی در امتداد لبه بلند،

بزرگی به خود گیرد و در دوره‌ای دیگر این کمیت به‌علت آرامش در آن جامعه بسیار پایین آید، بدین ترتیب در یک آنالیز کاملاً معقول، بایستی با توجه به واقعیت‌های اجتماعی، سیاسی و امنیتی و نیز مشاورت با نهادهای امنیتی مقدار مناسبی را برای $p_r(attack)$ در نظر گرفت.

ج) در یک آنالیز دقیق‌تر قابلیت اعتماد سازه، علاوه بر متغیرهای تصادفی مربوط به بارگذاری (که در این مقاله ذکر شده‌اند) می‌توان پارامترهای دیگر نامطمئن که در اینجا لحاظ نشده‌اند را داخل آنالیز نمود. به عنوان مثال نااطمینانی‌های مربوط به مدل‌سازی بارگذاری انفجاری می‌تواند حائز اهمیت باشد. در یک تحقیق فراگیرتر می‌توان این مهم را نیز در نظر گرفت.

د) در این مقاله برای ساده ساختن آنالیز و نیز به‌منظور صرفه‌جویی زمانی به‌علت استفاده از روش شبیه‌سازی در آنالیز قابلیت اعتماد سازه، مدل ساده یک درجه آزادی در مدل‌سازی سیستم سازه استفاده گردید. در خصوص اعتبار استفاده از این مدل، تحقیقات بسیاری صورت گرفته است ([۷] و نیز [۲۵-۲۳]) برای نمونه ملاحظه گردند. در این تحقیقات جنبه‌های گوناگون قوت و ضعف این روش در حالات مختلف (نظیر پاسخ خمشی و برشی سازه و نیز بزرگی بارگذاری انفجاری که عموماً با Z سنجیده می‌گردد) مورد بحث قرار گرفته و بعضی نتیجه‌گیری‌ها به‌دست آمده است. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که جمع‌بندی فراگیری که منجر به دستورالعمل‌های الزامی آئین‌نامه‌ای قرار گیرد هنوز در دسترس کاربران قرار ندارد. در این تحقیق با استناد به نتایجی که توسط لو و هائو [۷] با مقایسه مدل یک درجه آزادی و نتایج کاربرد اجزاء محدود مبنی بر تطابق خوب آنان در آنالیز قابلیت اعتماد دال‌های تحت بار انفجار گرفته‌اند، نتایج اخذشده در این مقاله فعلاً کافی دانسته می‌شود. با این حال از اهداف این تحقیق استفاده از نرم‌افزارهای قدرتمند موجود برای آنالیز اجزاء محدود سازه‌ها در آنالیز قابلیت اعتماد آنان تحت بار انفجار در آینده و صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله است.

علیرغم نکاتی که در بالا ذکر شد مقاله حاضر با استفاده از روابط ارائه‌شده می‌تواند چارچوب مناسبی برای بررسی و مطالعه قابلیت اعتماد سازه‌ها از جمله دال‌های بتن مسلح در عمل ارائه نماید.

۶. ضمیمه: ضرایب و روابط لازم برای آنالیز دینامیکی

یک سیستم یک درجه آزادی الاستو-پلاستیک

همان‌طور که در متن مقاله آمده است به‌منظور آنالیز دینامیکی دال تحت مطالعه، از مدل ساده یک درجه آزادی استفاده

R: مقاومت در مقطعی سازه که با زمان تغییر می‌کند. بار کل وارده بر دال که با زمان تغییر می‌کند.

جدول ضمیمه. ضرایب تبدیل برای دال دو طرفه با تکیه‌گاه‌های گیردار و نسبت ابعادی $a/b=0.8$

| بازه کرنش | K_L | K_M | K_{LM} | مقاومت بیشینه R_m | K ثابت فنر | V_A | V_B |
|----------------|-------|-------|----------|---|------------------------|-------------|-------------|
| الاستیک | 0.36 | 0.25 | 0.69 | $26.4m_{p_{sb}}^p$ | $\frac{705 EI_a}{a^2}$ | 0.08F+0.12R | 0.11F+0.19R |
| الاستو-پلاستیک | 0.49 | 0.35 | 0.71 | $(1/a) [12(m_{p_{fa}} + m_{p_{sa}}) + 10.3(m_{p_{fb}} + m_{p_{sb}})]$ | $\frac{212 EI_a}{a^2}$ | 0.06F+0.14R | 0.08F+0.22R |
| پلاستیک | 0.37 | 0.20 | 0.54 | $(1/a) [12(m_{p_{fa}} + m_{p_{sa}}) + 10.3(m_{p_{fb}} + m_{p_{sb}})]$ | 0 | 0.07F+0.13R | 0.10F+0.20R |

۷. مراجع‌ها

- [16] Izadifard, R. A.; Mollaei, S.; Esmail Nia Omran, M. "Preparing Pressure-Impulse Diagrams for Reinforced Concrete Columns with Constant Axial Load Using Single Degree of Freedom Approach"; Int. J. Adv. Tech. 2016, 7, 1-9.
- [17] Melchers, R. E. "Structural Reliability, Analysis and Prediction"; John Wiley & Sons: Chichester, 1999.
- [18] Kelliher, D.; Sutton-Swaby, K. "Stochastic Representation of Blast load Damage in a Reinforced Concrete Building"; Struct. Saf. 2012, 34, 407-417.
- [19] Hao, H.; Li, Z. X.; Shi, Y. "Reliability Analysis of RC Columns and Frame with FRP Strengthening Subjected to Explosion Loads"; J. Perform. Const. Facil. 2015, 04015017-1 to 04015017-15.
- [20] Gholizad, A.; Abedi Eivrih, E. "Reliability Analysis of Structures under Blast Loading"; Adv. Defence Sci. & Tech. 2017, 4, 19-31 (in Persian).
- [21] Papoulis, A. "Probability, Random Variables and Stochastic Processes"; McGraw-Hill: New York, 1965.
- [22] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures-An Overview"; Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue: Loading on Structures 2007, 76-91.
- [23] EM1110-345-417 "Design of Structures to Resist the Effects of Atomic Weapons"; U.S. Army Corps of Engineers, 1958.
- [24] Elkhakhni, W. W.; Mekky, W. F.; Changiz Rezaei, S. H. "Validity of SDOF Models for Analysing Two-Way Reinforced Concrete Panels Under Blast Loading"; J. Perform. Constr. Facil. 2010, 24, 311-325.
- [25] Yokoyama, T. "Limits to Deflected Shape Assumptions of the SDOF Methodology for Analysing Structural Components Subject to Blast Loading"; J. Perform. Constr. Facil. 2015, 29(5), B4014008-1 to B4014008-7.
- [26] Feldgum, V. R.; Yankelevsky, D. Z.; Karinski, Y. S. "A Nonlinear SDOF Model for Blast Response Simulation of Elastic Thin Rectangular Plates"; Int. J. Impact Eng. 2015, Accepted paper.
- [27] Nasr Shuaib, M. M. "Numerical Modelling of Reinforced Concrete Alabs under Blast Loads"; M.Ed. Thesis, Khartoum University, 2014.
- [28] Carlsson, M.; Kristensson, R. "Structural Response with Regard to Explosion - Mode Superposition, Damping and Curtailment"; M.Ed. Thesis, Lund University, 2012.
- [1] Smith, P.; Hetherington, J. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Butterworth Heinmann, 1994.
- [2] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; E & FN Spon, 1997.
- [3] Bangash, M. Y. H.; Bangash, T. "Explosion-Resistant Buildings; Design, Analysis, and Case Studies"; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2006.
- [4] Krauthammer, T. "Modern Protective Structures"; CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- [5] TM5-1300/NAVFAC P-397/AFR "Structures to Resist Explosive Loading"; Joint Department of the US Army, US Navy and US Air force, 1990.
- [6] Unified Facilities Criteria (UFC4-010-01) "DoD Minimum Antiterrorism Standards For Buildings"; U.S. Army Corps of Engineers, 2013.
- [7] Low, H.; Hao, H. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Explosive Loading"; Strct. Saf. 2001, 23, 157-178.
- [8] Low, H.; Hao, H. "Reliability Analysis of Direct Shear and Flexural Modes of RC Slabs under Explosive Loading"; Eng. Struct. 2002, 24, 189-198.
- [9] Netherton, M. D.; Stewart, M. G. "Probabilistic Modelling of Safety and Damage Blast Risks for Window Glazing"; Can. J. Civil Eng. 2009, 36, 1321-1331.
- [10] Hao, H.; Stewart, M. G.; Zhong-Xian, L.; Yanchao, S. "RC Column Failure Probabilities to Blast Loads"; Int. J. Protective Struct. 2010, 1, 571-591.
- [11] Hadianfard, M.A.; Malekpour, S. "Evaluation of Explosion Safe Distance of Steel Column via Structural Reliability Analysis"; Adv. Defence Sci. & Tech. 2017, 8, 349-359 (in Persian).
- [12] Stewart, M. G.; Melchers R. E. "Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems"; Chapman & Hall: London, 1997.
- [13] Stewart, M. G.; Netherton, M. D. "Security Risks and Probabilistic Risk Assessment of Glazing Subject to Explosive Blast Loading"; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2008, 93, 627-638.
- [14] Stewart, M. G. "Acceptable Risk Criteria for Infrastructure Protection"; Int. J. Protective Struct. 2010, 1, 23-29.
- [15] Biggs, J. "Introduction to Structural Dynamics"; McGraw Hill: New York, 1964.