

مروري بر روش هاي تخمين بارهاي انفجاري و اثرات اين نوع بارگذاري بر خواص مصالح

جعفر واحدي^۱، جعفر رحمانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

j-civi1982@yahoo.com

خلاصه

وقوع حوادث گوناگون تروریستی در مورد سازه های مهم در سراسر جهان سبب شده است که در سال های اخیر بارهای انفجاری مورد توجه ویژه ای قرار گیرند. حملات اخیر در سراسر جهان مثل حادثه مرکز تجارت جهانی نشان می دهد که متاسفانه فعالیت های تروریستی افزایش یافته است. یک نوع از حملات تروریستی رایج، استفاده از مواد منفجره می باشد.

خطرات انفجاری را می توان به دو نوع تقسیم بندی نمود: بمب های خودرویی و بمب های قابل حمل با دست. از نظر طراحی سازه ای، بمب های خودرویی اهمیت زیادی دارند، چون این نوع بمب ها می توانند حاوی مقدار زیادی مواد منفجره باشند که سبب آسیب شدید سازه ای می شوند. برای بمب خودرویی، موقعیت بحرانی، نزدیکترین نقطه ممکن به ساختمان می باشد. بمب های کوچک قابل حمل با دست، زمانی سبب بیشترین آسیب می شوند که در فضاهای داخلی ساختمان منفجر شوند. این مقاله به معرفی بارهای انفجاری و پارامترهای موج انفجار می پردازد. همچنین به اثرات نرخ کرنش بالا بر رفتار مصالح بتونی و فولادی اشاره شده است.

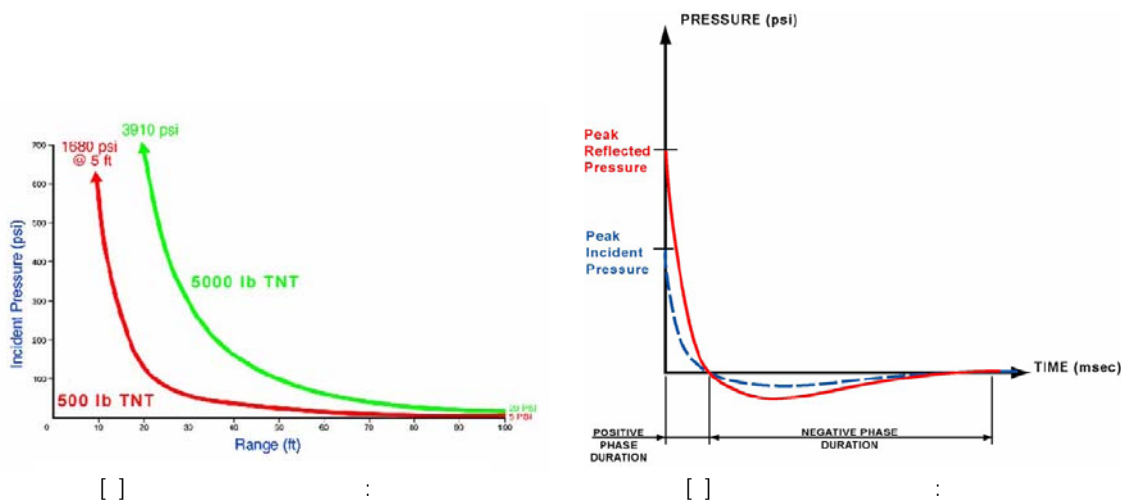
کلمات کلیدی: انفجار، بارگذاری انفجاری، نرخ کرنش بالا، آنالیز کوپله

مقدمه

انفجار، آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صدا و موج ضربه ای می باشد. موج ضربه ای شامل هوای بسیار متراکمی می باشد که به صورت شعاعی از منبع انفجار به سمت خارج با سرعت مافوق صوت در حرکت است. با گسترش موج ضربه ای، مقدار فشار به سرعت کاهش می یابد (متناسب با توان سوم فاصله) و پس از برخورد به یک سطح، منعکس شده و مقدار آن ممکن است تا سیزده برابر افزایش یابد. مقدار ضریب انعکاس تابع نزدیکی ماده منفجره و زاویه موج برخوردی می باشد [۱]. فشار همچنین با گذشت زمان به سرعت کاسته می شود (به صورت نمایی). در بارگذاری انفجاری زمان اعمال بار، بسیار کوتاه می باشد و معمولاً بر حسب هزارم ثانیه (میلی ثانیه) بیان می شود. در آخر پدیده انفجار، موج ضربه ای منفی ایجاد می شود که مکش ایجاد می کند (شکل ۱) و در جایی که خلا ایجاد شده باشد، یک باد قوی یا نیروی کششی بر سطوح ساختمان وارد می شود. این باد، آثار مخروبه به جا مانده از انفجار را برمی چیند و سبب جابجایی آنها می شود. در انفجارهای خارجی بخشی از انرژی به زمین وارد می شود که سبب ایجاد گودال و موج ضربه زمینی می شود که از نظر شدت و مدت زمان شبیه زلزله می باشد.

فشار حداکثر، تابع میزان مواد منفجره و توان سوم فاصله است (شکل ۲). برای یک خطر انفجاری که بر حسب وزن ماده منفجره و فاصله بیان می شود، فشار حداکثر برخوردی و انعکاس یافته موج ضربه ای و سایر پارامترها مثل مقدار ضربه برخوردی و

انعکاس یافته، سرعت ضربه و زمان رسیدن موج را می توان با استفاده از چارت هایی که در برخی منابع مثل TM5-1300 [۲] ارائه شده است، استخراج نمود.



پارامترهای جبهه موج انفجار^۱

پارامترهای جبهه موج انفجار از اهمیت ویژه ای برخوردارند. حل تحلیلی این پارامترها ابتدا توسط Hugoniot و Rankine برای توصیف شوک ها در گاز ایده آل بیان شد. این معادلات برای سرعت جبهه موج انفجار U_s و ماکزیم فشار دینامیکی q_s به صورت زیر بیان می شود [۳]:

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

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_o)} \quad (۲)$$

که p_s اضافه فشار استاتیکی، p_o فشار اتمسفر و a_o سرعت صوت در هوا در فشار اتمسفر می باشد. Brode برای بدست آوردن اضافه فشار استاتیکی در یک انفجار کروی، معادلات زیر را ارائه کرده است [۳]:

$$p_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (p_s > 10\text{bar}) \quad (۳)$$

$$p_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad (0.1 < p_s < 10\text{bar}) \quad (۴)$$

فاصله مقیاس بندی $Z^۲$ به صورت زیر تعریف می شود:

1- Blast wavefront
2- Scaled distance

$$Z = R/W^{1/3} \quad (5)$$

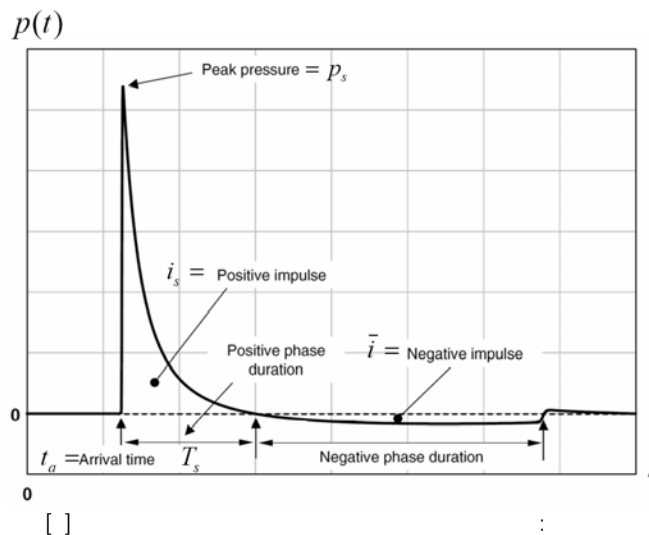
که R فاصله واقعي از مرکز ماده منفجره تا نقطه مورد نظر و W جرم خرج انفجاري^۱ بر حسب کیلوگرم TNT معادل می‌باشد. استفاده از Z این امکان را می‌دهد که بیان خلاصه و موثري از موج انفجاري براي محدوده وسيعي از حالات داشته باشیم.

قبل از اینکه پارامترها براي یک انفجار استخراج شوند، جرم TNT معادل مورد نیاز هست. چندین روش براي بیان TNT معادل وجود دارد، ولي ساده ترین آنها به صورت نسبت انرژی ویژه جرمي مواد منفجره واقعي به انرژی ویژه جرمي TNT می‌باشد. انرژی ویژه جرمي TNT برابر ۶۷۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم (kJ/kg) می‌باشد.

سایر پارامترهاي موج انفجار عبارتند از: مدت زمان فاز مثبت T_s ، ضربه مثبت i_s که سطح زیر نمودار فشار-زمان از زمان t_a تا انتهاي فاز مثبت می‌باشد:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+T_s} p_s(t) dt \quad (6)$$

یک نمونه از نمودار فشار-زمان در شکل ۳ نشان داده شده است.



یک روش رایج براي استخراج پارامترهاي موج انفجار استفاده از گراف هايی است که در برخی مراجع مثل TM5-1300 نیز ارائه شده است.

قانون مقیاس انفجار^۲

ویژگی هاي موج انفجاري هم به انرژی آزاد شده از ماده منفجره و هم به محیط انتشار امواج بستگی دارد. این خواص را تحت شرایط کنترل شده در آزمایش ها می‌توان اندازه گیری نمود و به عنوان مبنا براي بدست آوردن اطلاعات در مورد سایر انفجارها با استفاده از قانون مقیاس انفجار استفاده نمود. رایج ترین قانون براي مقیاس بندی موج انفجار قانون Hopkinson می‌باشد. این قانون بیان می‌کند دو خرج انفجاري

1- Charge mass
2- Blast scaling law

با اندازه متفاوت از یک ماده منفجره زمانی اضافه فشار (p_s) مشابه ایجاد می کنند که فاصله مقیاس بندی شده (Z) یکسان داشته باشند و البته در مکان و فشار اتمسفری یکسان باشند [۳]. یعنی:

$$\frac{R_1}{W_1^{1/3}} = \frac{R_2}{W_2^{1/3}} \quad (7)$$

یعنی خرج انفجاری W_2 در فاصله زمانی اضافه فشاری برابر با اضافه فشار خرج انفجاری W_1 در فاصله R_1 ایجاد خواهد کرد که رابطه فوق صدق کند.

پروفیل فشار موج انفجار

تاریخچه زمانی فشار موج انفجار اغلب با توابع نمایی مثل معادله Frialander بیان می شود:

$$p(t) = p_0 + p_s \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -b \frac{t}{T_s} \right\} \quad (8)$$

که t زمان، p_0 فشار اتمسفر، p_s اضافه فشار حداکثر، T_s مدت زمان فاز مثبت و b ثابت مثبتی می باشد که پارامتر شکل موج نامیده می شود و وابسته به فشار حداکثر می باشد. معمولاً از پروفیل های ایده آل برای تحلیل و طراحی استفاده می شود.

انعکاس موج انفجاری

زمانی که موج انفجار به یک سطح صلب بسیار بزرگ با زاویه برخوردی صفر درجه برخورد می کند، جهت جریان هوا در موج انفجار به تدریج معکوس می شود و فشار استاتیکی روی سطح تا فشار انعکاس یافته افزایش می یابد که این بارگذاری face-on نامیده می شود. زمانی که فرآیند انعکاس کامل شد، موج انعکاس یافته در خلاف جهتی که از آن آمده، انتشار می یابد. حداکثر فشار منعکس شده p_r را می توان با استفاده از رابطه Rankin برای گاز ایده آل بدست آورد [۳]:

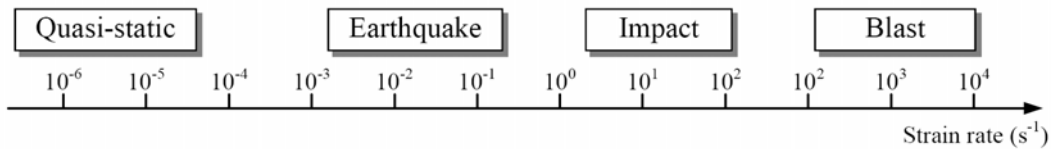
$$p_r = 2p_s \left[\frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right] \quad (9)$$

اگر ضریب C_r نسبت p_r به p_s تعریف شود، می توانیم مقادیر حداکثر و حداقل C_r را تعیین کنیم. زمانی که p_s فقط کمی بیشتر از فشار اتمسفر باشد، حد پایین C_r برابر ۲ خواهد بود. زمانی که p_s خیلی بیشتر از فشار اتمسفر باشد، حد بالا برای C_r برابر ۸ خواهد بود. ولی به دلیل اثرات اغتشاش گاز در فواصل نزدیک، مقدار C_r می تواند تا ۲۰ نیز برسد.

رفتار مصالح در نرخ کرنش های بالا^۲

1- Angle of incidence
1- High strain rates

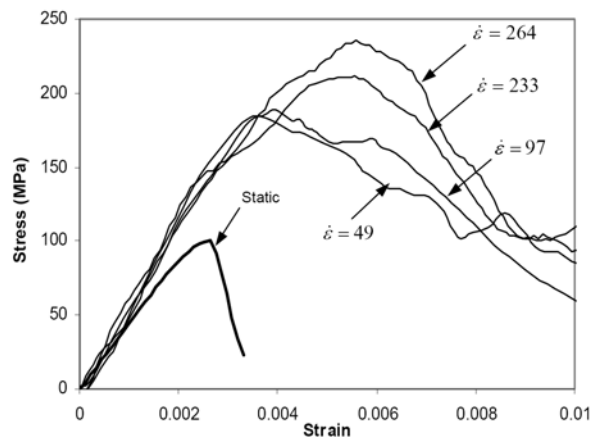
بارهاي انفجاري معمولا نرخ کرنش هاي بسيار بالا در محدوده $10^2-10^4 s^{-1}$ ايجاد مي کنند. اين نرخ کرنش بالا، خواص مکانیکی مصالح در سازه و مکانیسم هاي مورد انتظار را تغيير مي دهد. شکل ۴ محدوده تقریبی نرخ کرنش ها را براي بارگذاري هاي متفاوت نشان مي دهد. مشاهده مي شود که نرخ کرنش استاتیکی معمولا در محدوده $10^{-6}-10^{-5} s^{-1}$ مي باشد، در حالي که فشار انفجار معمولا منجر به نرخ کرنش هاي در محدوده $10^2-10^4 s^{-1}$ مي شود.



[] :

خواص دینامیکی بتون در نرخ کرنش بالا

خواص دینامیکی بتون تحت شرایط بارگذاري دینامیکی مي تواند كاملا متفاوت از بارگذاري استاتیکی باشد. در حالي که سختي دینامیکی تفاوت زيادي با سختي استاتیکی ندارد، ولي تنش ها ممكن است بسيار بالاتر از مقاومت فشاري استاتیکی باشد (شکل ۵).



[] :

ضرایب افزایش مقاومت در فشار تا ۴ و در کشش تا ۶ براي محدوده $10^2-10^3 s^{-1}$ گزارش شده است (Grote et al., 2001) [۶]. براي افزایش تنش فشاري حداکثر (f'_c)، از يك ضریب افزایش دینامیکی (DIF) استفاده مي شود:

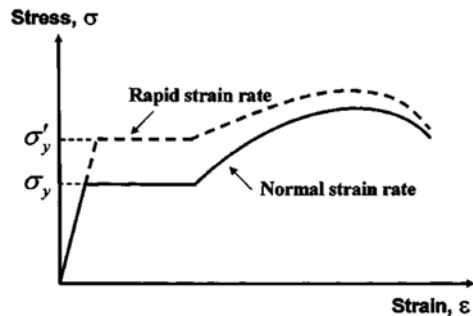
$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha} \quad \dot{\epsilon} \leq 30 s^{-1} \quad (10)$$

$$DIF = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} \quad \dot{\epsilon} > 30 s^{-1}$$

خواص دینامیکی فولاد در نرخ کرنش بالا

به دليل خواص ایزوتوپیک مصالح فولادي، پاسخ الاستیک و غیرالاستیک تحت اثر بارگذاري دینامیکی را به راحتی مي توان بررسی نمود. خواص مکانیکی فولاد در نرخ کرنش هاي بالا به طور قابل توجهی تغيير مي کند.

اگر خواص مکانیکی فولاد تحت اثر بارگذاری استاتیکی را به عنوان مبنا در نظر بگیریم، اثرات افزایش نرخ کرنش طبق شکل ۶ خواهد بود. تنش تسلیم به مقدار تنش تسلیم دینامیکی افزایش می یابد. مدول الاستیسیته معمولاً به نرخ بارگذاری وابسته نیست و مقاومت نهایی کششی اندکی افزایش می یابد. مدل Cowper-Symonds برای فرمول بندی پلاستیسیته وابسته به نرخ^۱ به صورت زیر بیان می شود:



$$\sigma'_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] \sigma_y \quad ()$$

[] :

که σ'_y تنش تسلیم با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل، γ پارامتر ویسکوزیته، m پارامتر سخت شدگی کرنشی، σ_y تنش تسلیم استاتیکی می باشد. زمانی که $\dot{\epsilon}^{pl}$ در بارگذاری با نرخ پایین به سمت صفر یا γ به سمت ∞ میل کند، حل به سمت حل استاتیکی (مستقل از نرخ)^۲ همگرا می شود. مقادیر پیشنهادی برای فولاد نرمه عبارتند از: $\gamma = 40s^{-1}$ و $m = 0.2$.

برنامه های کامپیوتری برای اثرات انفجار و شوک

در سال های اخیر، شبیه سازی عددی به یک ابزار بسیار مهم در بررسی انفجار در هندسه های پیچیده تبدیل شده است. بسیاری از محققین در سراسر دنیا نتایجی را منتشر کرده اند که موثر بودن این روش را نشان می دهد. کد Air3d برای محاسبه انفجار بر ساختمان ها در خیابان های شهری، استفاده شده است [۸]. روش های محاسباتی در زمینه کاهش اثرات انفجار عموماً به دو نوع تقسیم بندی می شوند: (۱) تخمین بارهای انفجاری، (۲) محاسبه پاسخ سازه ای به بارها. برنامه های محاسباتی برای تخمین انفجار و پاسخ سازه ای از هر دو روش تحلیلی و نیمه تجربی استفاده می کنند. برنامه هایی که از روش های تحلیلی استفاده می کنند، به دو نوع آنالیز کوپله^۳ و آنالیز غیر کوپله^۴ تقسیم بندی می شوند. در آنالیز غیر کوپله بارهای انفجاری با فرض صلب بودن سازه محاسبه می شوند و به مدل سازه ای اعمال می شوند. عیب این روش این است که بارهای وارد بر سازه بیش از مقادیر واقعی تخمین زده می شوند، بویژه اگر حرکت سازه قابل توجه باشد یا در زمان بارگذاری، در سازه خرابی اتفاق افتد.

در آنالیز کوپله، شبیه سازی انفجار مرتبط با پاسخ سازه ای می باشد. در این نوع تحلیل مدل مکانیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تخمین بارهای انفجاری همزمان با مدل

1- Rate-dependent
 1- Rate-independent
 1- Coupled analysis
 2- Uncoupled analysis

مکانیک جامدات محاسباتی (CSM) برای پاسخ سازه ای حل می شوند. با در نظر گرفتن حرکت سازه در زمان محاسبه بارهای انفجاری، فشارهای ناشی از حرکت و خرابی را می توان دقیق تر پیش بینی نمود. نمونه هایی از این نوع کدهای کامپیوتری عبارتند از: ABAQUS ،LS-DYNA ،DYNA3D ،AUTODYN .

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله به روش های اندازه گیری بارگذاری انفجاری و مدل های رایج برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بر خواص مصالح اشاره شده است. همانطور که اشاره شد اثرات انفجار در محیط های پیچیده مثل انعکاس چند موج انفجاری، فاز منفی موج انفجاری و... را می توان به آسانی در کدهای CFD مدل نمود. تکنیک های تحلیلی ساده شده و روش های نیمه تجربی، بیشتر اوقات از این اثرات صرف نظر می کنند. بنابراین مدلسازی گروه های ساختمانی در مراکز شهری متراکم را تنها می توان با کدهای CFD پیشرفته انجام داد.

مراجع

1. Federal Emergency Management Agency, Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, FEMA427, December 2003.
2. US Department of the Army, "Design of structures to resist the effects of accidental explosions", US Department of the Army Technical Manual ,TM 5-1300, 1990.
3. Mays G.C. and Smith P.D., "Blast effects on buildings-Design of buildings to optimize resistance to blast loading", Thomas Telford, London, 1995.
4. Smith P.D. and Rose T.A., "Blast loading and building robustness", Progress in Structural Engineering and Materials, 4(2), pp. 213-223, 2002.
5. Ngo T., Mendis P., Gupta A. and Ramsay J., "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview". Electronic Journal of Structural Engineering, 2007.
6. Grote D., Park S. and Zhou M., "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures", International Journal of Impact Engineering, 25(9), pp. 869-886, 2001.
7. Chen H. and Liew J.Y.R., "Explosion and fire analysis of steel frames using mixed element approach", J. Eng. Mech. (ASCE), 131(6),pp. 606–616, 2005.
8. Rose T.A. and Smith P.D., "Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses", International Journal of Impact Engineering, 27(4), pp. 359-376, 2002.