

تشکیل طیف پاسخ برای بارگذاری ناشی از انفجار و طراحی دیوارهای مقاوم در برابر انفجار

محسن گرامی ۱ - عباس سیوندی پور ۲

۱- Mgerami@semnan.ac.ir

۲- abbas.sivandi@gmail.com

چکیده

مواد منفجره با فشردن مولکول های هوا موجب وارد شدن فشار بسیار زیاد به سازه های اطراف و ایجاد خسارت های زیادی می شوند. نا مشخص بودن ماهیت دینامیکی بارهای انفجاری همواره یکی از مشکلات محققان در طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار بوده است. در این تحقیق به بارگذاری ناشی از انفجار و پاسخ سازه در برابر این بارگذاری و طراحی دیوارهای مقاوم در برابر انفجار پرداخته شده است. پارامترهای حاضر، از تحلیل تاریخچه زمانی (time-history) یک دیوار طره ای شکل (cantilever) تحت بارهای انفجاری و توابع فشار، به دست آمده اند. از دوره تناوب گوشه ی (corner period) طیف سرعت نیز برای کنترل پارامترهای رفتاری دیوار استفاده شده است. در بخش مهمی از این تحقیق به رابطه ی بین دوره تناوب گوشه و زمان انتقال (clear time) برای انفجار پرداخته شده است. و در انتها نیز یک الگوریتم طراحی دقیق برای طراحی دیوارهای مقاوم در برابر بارهای انفجاری استخراج شده است.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجار، طیف پاسخ، دیوار طره، تحلیل تاریخچه زمانی

مقدمه

در نیم قرن اخیر تحقیقات زیادی در مدل کردن بارهای انفجاری و همچنین جلوگیری از تخریب کامل سازه ها در برابر این نوع بارگذاری انجام شده است و نتایجی از رابطه بین ماکزیمم نیروی استاتیکی حاصله از بارهای انفجاری که ماهیتی دینامیکی دارند و طراحی سازه ها بر طبق این ماکزیمم نیروی استاتیکی به دست آمده است. در این تحقیق نشان داده شده است که تاثیر موج های انفجاری روی سازه فقط به ماکزیمم بار استاتیکی حاصله از انفجار وابسته نیست و بلکه عوامل دیگری از قبیل مدت زمان انفجار نیز تاثیر گذار هستند. در این تحقیق دیوارهای مستطیلی شکل تحت بارهای انفجاری تحلیل دینامیکی شده اند و رفتار هر دیوار به عنوان سازه ی یک درجه آزادی مدل شده است. طیف های پاسخ سازه به صورت طیف شتاب، طیف سرعت و طیف جا به جایی نشان داده شده اند. و در طول تحلیل تاریخچه زمانی طیف ظرفیت سازه نیز حاصل شده است. و همچنین در این تحقیق مرحله طراحی سازه نیز در برابر بارهای انفجاری به صورت گام به گام معرفی شده است.

مدل کردن فشار ناشی از انفجار

در این تحقیق Ps_{max} به عنوان حداکثر نیروی استاتیکی حاصله از بارهای انفجاری معرفی شده است که این نیروی حداکثر با فاصله ی محل انفجار تا سازه مورد نظر رابطه ی عکس دارد و فاصله ی مقیاس شده ی معرفی شده در این تحقیق که با Z نشان داده شده است، از رابطه ی زیر به دست می آید [۱].

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$$

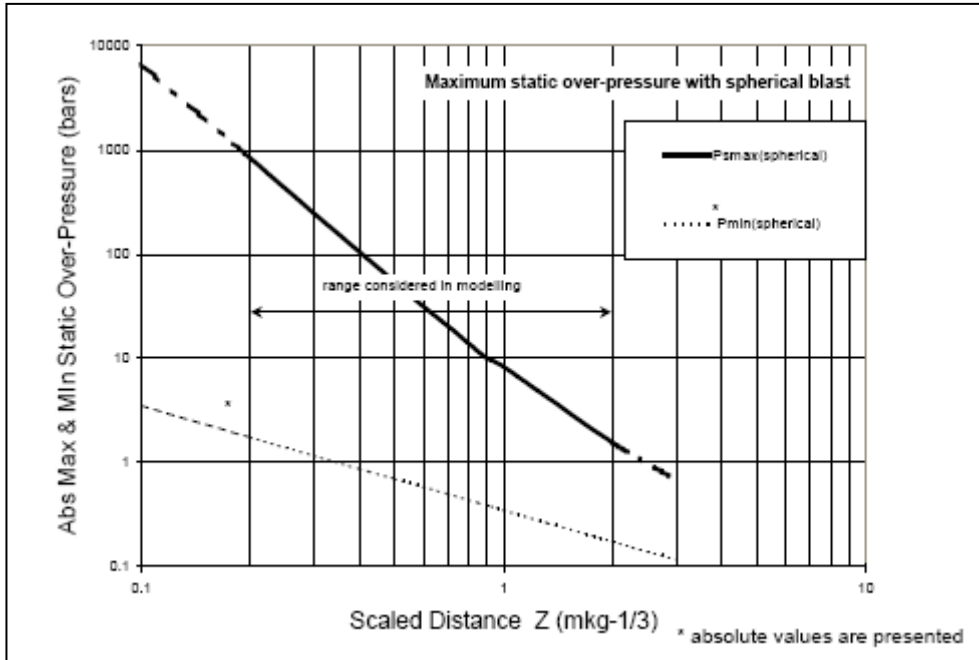
(۱)

که R فاصله مورد نظر برحسب متر و W وزن مواد منفجره (TNT) برحسب کیلوگرم می باشد.

۱- استادیار دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه سمنان

اگر تاثیرات موج های منعکس شده از زمین را نیز در نظر بگیریم باید یک ضریب بزرگنمایی ۱/۸ در رابطه‌ی فوق در نظر گرفته و در آن ضرب کنیم. در واقع انتشار موج انفجار به صورت یک مدل کروی در نظر گرفته می‌شود [۲]. در شکل زیر مقدار حداکثر و حداقل نیروی استاتیکی حاصله از انفجار در مدل کروی نشان داده شده است.

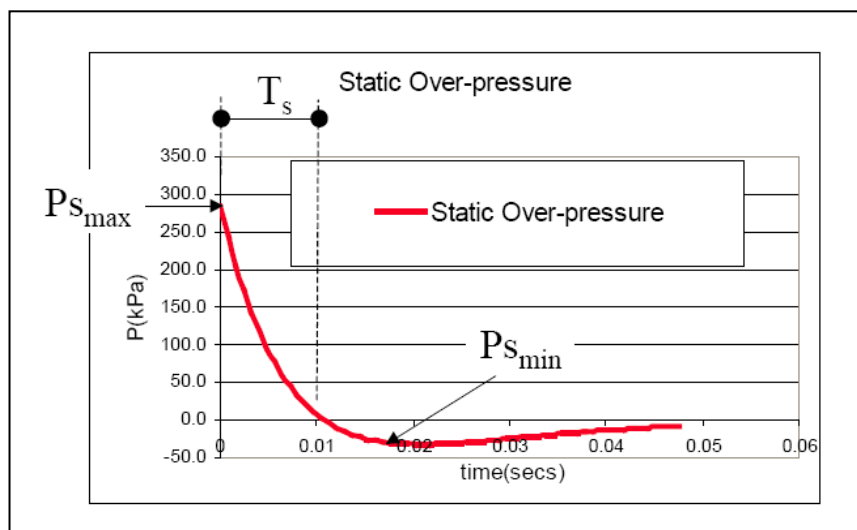


شکل ۱- حداکثر و حداقل نیروی استاتیکی حاصله از انفجار در مدل کروی

برای $z=1$ معادله فردلندر (Friedlander)، که نشان دهنده‌ی بار دینامیکی‌ها حاصل انفجار است در رابطه‌ی ۲ نشان داده شده است [۳].

$$Ps(t) = 1.8Ps_{\max} \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) e^{-\frac{bt}{T_s}} \quad (2)$$

در رابطه فوق ضریب ۱/۸ نشان دهنده‌ی در نظر گرفتن تاثیرات شبه کره‌ای انفجار و پارامتر b ضریب کنترل کننده کاهش دامنه و T_s مدت زمان انفجاری می‌باشد. در شکل ۲، رابطه‌ی فوق برای $w=125kg$, $R=1m$ ، $z=2$ نمایش داده شده است.



شکل ۲- معادله فردلندر برای بار انفجار

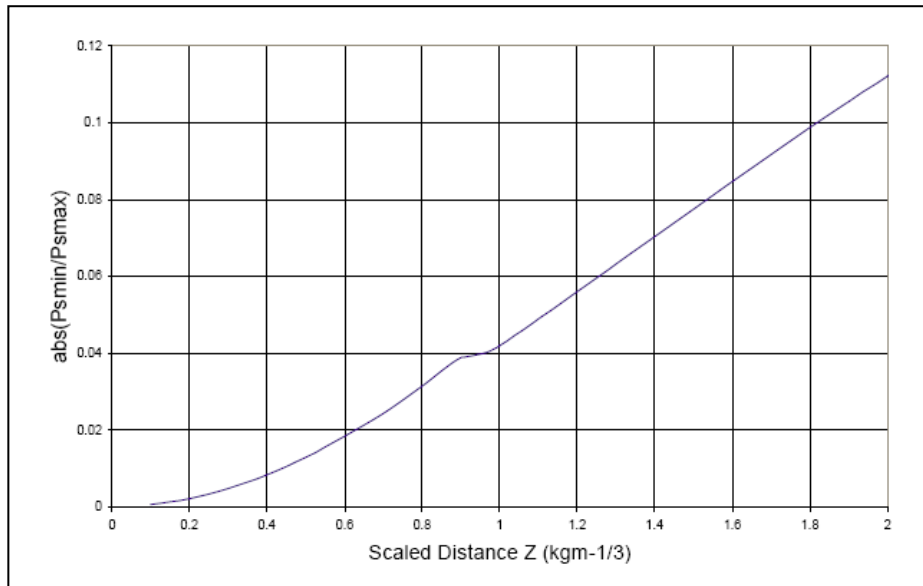
T_s با فاصله R کنترل می شود که در معادله ی ۳ رابطه ی بین R و T_s آمده است.

$$\log_{10}\left(\frac{R}{W^3}\right) = -2.75 + 0.27 \log_{10}\left(\frac{T_s}{W^3}\right) \quad (3)$$

به عنوان مثال برای $R=10m, W=100kg$ برابر T_s برابر 0.18 ثانیه حاصل می شود.

پارامتر b در معادله ی ۲ نیز با نسبت $P_{s_{min}}/P_{s_{max}}$ رابطه دارد. که در معادله ی ۴ آمده است.

$$\ln\left(b \frac{P_{s_{min}}}{P_{s_{max}}}\right) + b + 1 = 0 \quad (4)$$



شکل ۳- رابطه ی بین b و قدر مطلق $P_{s_{min}}/P_{s_{max}}$

رابطه بین b, Z نیز در معادله زیر آمده است:

$$b = z^2 - 3.7z + 4.2 \quad (5)$$

امواج انفجار با سرعت مافوق صوت گسترش یافته و به سازه برخورد می کنند. قسمتی از این امواج از طریق بازشوها به درون سازه منقل و قسمتی دیگر از روی سازه با فشار تشدید شده منعکس می شوند، که این فشار منعکس شده (P_r) از فرمول اسمیت (Smith 1994) حاصل می شود. در رابطه ی ۶ آورده شده است. [۳]

$$\begin{aligned} Pr_{max} &= Cr \cdot Ps_{max} \\ Cr &= 3 \left(\sqrt[4]{Ps_{max}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

که Ps_{max} بر حسب واحد بار ($bars$) و Cr ضریبی برای فشار منعکس شده است.

یک پارامتر مهم در تعیین فشار منعکس شده زمان انتقال (T) باشد که می توان آن را از رابطه ی زیر به دست آورد.

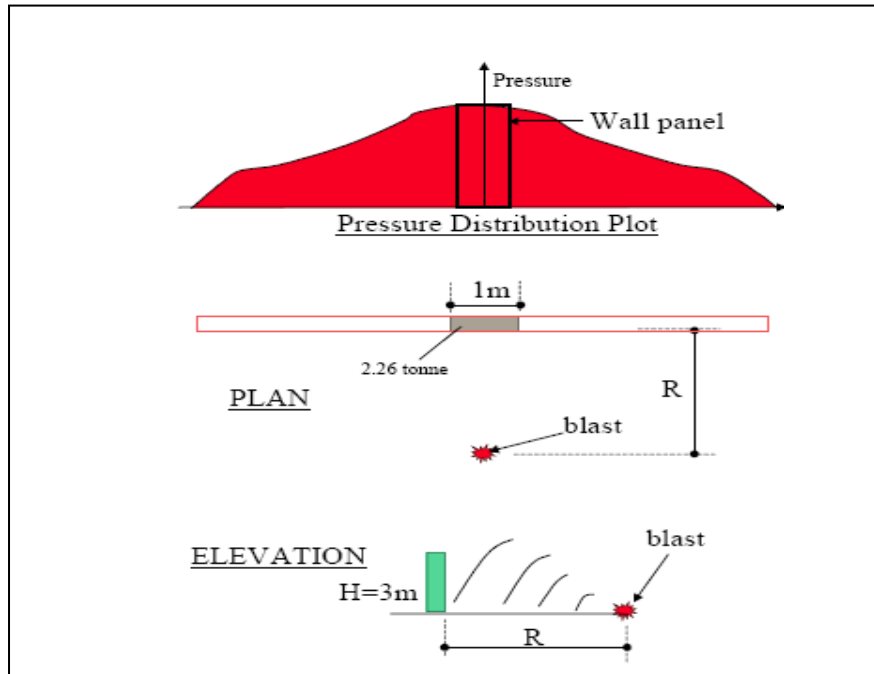
$$T = \frac{3s}{U} \quad (7)$$

در رابطه ی فوق S کمترین بعد سطح مقابل انفجار و U سرعت موج انفجار می باشد که از رابطه ی ۸ قابل محاسبه است. [۴]

$$U = \sqrt{\frac{6Ps_{max} + 7P_0}{7P_0}} \cdot a_0 \quad (8)$$

که P_0 فشار محدود کننده ($Ibar$) و a_0 سرعت صوت ($335m/s$) می باشد.

پاسخ سازه های یک درجه آزاد فشار استاتیکی واحد و فشار منعکس شده ($Ps+Pr$) بر پایه ی حداقل فاصله و زاویه بر خورد موج انفجار بر دیوار (شکل ۴) هستند. و نیروی کل انفجار از رابطه ی ۹ قابل محاسبه است. [۴]

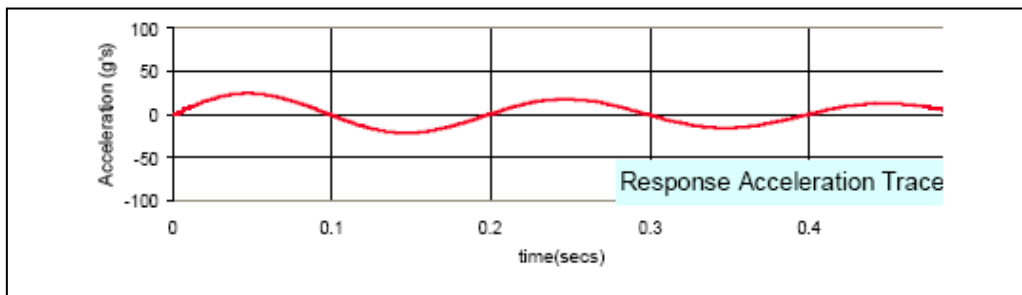
$$F(t) = (Ps + Pr)H = 3(Ps + Pr) \quad (9)$$


شکل ۴- مدل دیوار و انفجار

طیف شتاب بوسیله روش مدل کردن دینامیکی که در مهندسی زلزله رایج است و در آئین نامه *ATC40* نیز معرفی شده است بدست می آید. با روش فوق دیوار کنسولی شکل مانند یک سازه ی یک درجه آزاد عمل می کند که زمان تناوب (T_e) آن از رابطه ی ۱۰ قابل محاسبه است. [۵]

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_e}{K_e}} \quad (10)$$

که M_e جرم موثر سازه که برابر $\frac{3}{4}$ و جرم کل سازه و K_e سختی موثر سازه می باشد. [۴]
 به طور مثال ۱۲۵ کیلوگرم *TNT* ($W=125kg$) در فاصله ی ۱۰ متری ($R=10m$ یا $Z=2$) دارای حداکثر نیروی انفجاری وارده برابر $1100kPa$ می باشد که برای دیوار مورد نظر طیف شتاب سازه در شکل ۵ برای دوره تناوب 0.2 ثانیه رسم شده است.



شکل ۵- طیف شتاب دیوار

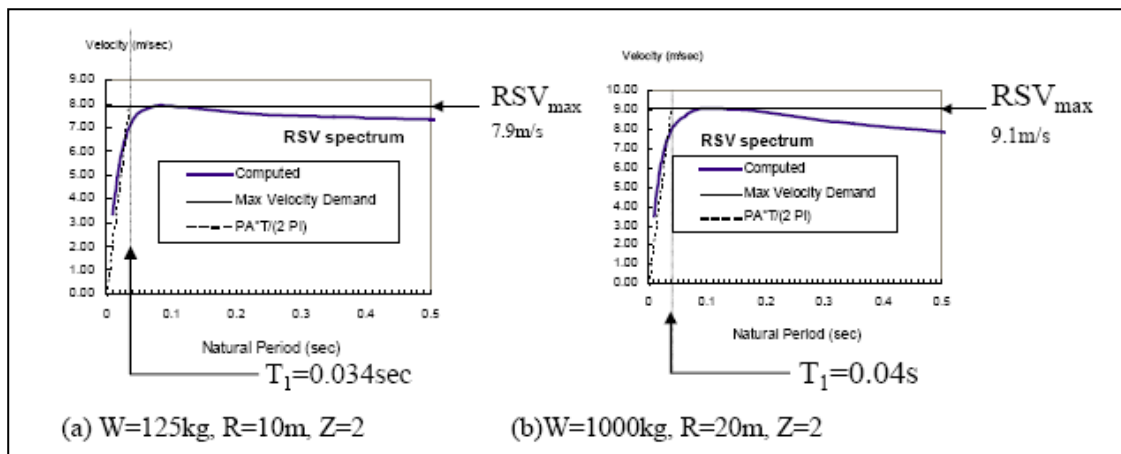
تعیین طیف پاسخ سرعت

سرعت طیفی (RSV) response spectra velocity که نشان دهنده ی همگرایی ناگهانی امواج انفجار می باشد و از رابطه ی ۱۱ به دست می آید، برای دو نمونه با مشخصات ذکر شده در شکل ۶ نشان داده شده است. [۴]

$$RSV = PA \cdot \frac{T}{2\pi} \quad (if \quad T \leq T_1) \quad (11)$$

$$RSV = PA \cdot \frac{T_1}{2\pi} = RSV_{max} \quad (if \quad T > T_1)$$

که T_1 دوره تناوب گوشه می باشد.



شکل ۶- طیف پاسخ سرعت دیوار

مرکزیت ساختار طیف پاسخ سرعت دوره تناوب گوشه T_1 است که دوره تناوب گوشه برای هر انفجاری حتی با مقدار فشار ماکزیمم یکسان، متفاوت است. در واقع مقدار حداکثر سرعت طیفی RSV_{max} با افزایش T_1 افزایش می یابد. مدت زمان انفجار T_s ، با مقدار فاصله ی مقیاس شده Z افزایش می یابد (بر طبق رابطه ی ۲) پس T_1 نیز با Z افزایش می یابد. از طرفی T_1 وابسته به ابعاد سطح جلویی که در مواجهه با انفجار است می باشد. حداقل ابعاد وجه جلویی (S) با زمان انتقال T فشار انفجاری منعکس شده کنترل می شود. (طبق رابطه ی ۷)

یک رابطه ساده برای نسبت زمان تناوب گوشه (T_1/T) در معادله ی ۱۲ بر پایه درون یابی خطی بین نسبت هایی که شامل $S=3$ و $S=1$ متر می باشند ارائه شده است. [۴]

$$\frac{T_1}{T} = 3.25 - 0.25(s-1) \quad (12)$$

رابطه ی ۱۲ امکان محاسبه دوره تناوب گوشه T_1 و همچنین تعیین سرعت پاسخ طیفی که وابسته به زمان انتقال T می باشد را می دهد. حداکثر انرژی جنبشی ناشی از انفجار که در دیوار ایجاد می شود از رابطه ی زیر حاصل می شود.

$$KE = \frac{1}{2} Me(RSV)^2 \quad (13)$$

طیف پاسخ جابجایی - شتاب

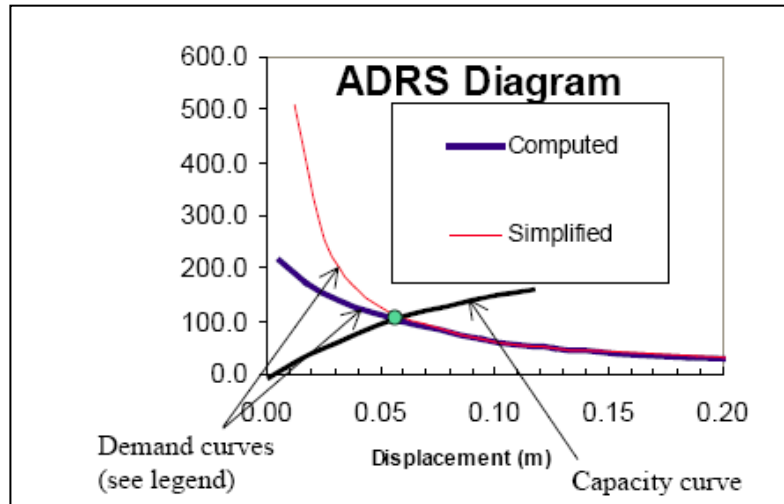
یک روش مستقیم برای مقایسه ی تقاضا در برابر ظرفیت، استفاده از طیف پاسخ جا به جایی شتاب ($acceleration-displacement$ response $ADRS$ diagram) می باشد که به نام طیف ظرفیت شناخته می شود.

بر طبق اصل بقای انرژی می توان معادله ی ۱۴ را به صورت زیر حاصل می شود.

$$\frac{1}{2} Me(RSV_{max})^2 = \frac{1}{2} F\Delta \quad (14)$$

$$a = \frac{F}{Me} = \frac{(RSV_{max})^2}{\Delta}$$

در مراحل طیف ظرفیت از تقاطع منحنی ظرفیت که از تحلیل پوش آور (استاتیکی غیر خطی) دیوار به دست آمده است با منحنی تقاضا که از رابطه ۱۴ بدست می آید، نقطه ی عملکرد (*Performance point*) به دست می آید که این مسئله در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- طیف ظرفیت و تعیین نقطه عملکرد

با ایجاد طیف پاسخ و نمودار *ADRS* در تحلیل برای بارگذاری انفجار برای تعیین اصول عملکرد بر پایه طراحی و تحلیل برای نیروی زلزله می باشد.

نتیجه

در انتها مراحل گام به گام تعیین طیف پاسخ برای طراحی دیوار مقاوم در برابر انفجار همراه با حل یک مثال عددی در زیر آورده شده است.

الف- تعیین حداکثر شتاب P_A

- تعیین فاصله ی مقیاس شده Z از رابطه ۱
- محاسبه ی حداکثر فشار استاتیکی P_{smax} شده از شکل ۱
- محاسبه ی حداکثر فشار منعکس شده P_{rmax} از رابطه ی ۶
- محاسبه ی نیروی کل انفجار
- محاسبه ی شتاب حداکثر P_A (نیروی کل انفجار تقسیم بر جرم کل)

ب- تعیین اولین دوره تناوب گوشه T_i و RSV_{max}

- تعیین زمان انتقال T از رابطه ۷
- تعیین نسبت دوره تناوب گوشه T_i/T با استفاده از رابطه ۱۲
- تعیین RSV_{max} با استفاده از معادله ۱۱

ج- تعیین جا به جایی و شتاب تقاضا در نقطه ی عملکرد

- رسم منحنی تقاضا برای نمودار *ADRS* با استفاده از رابطه ی ۱۴
- رسم منحنی ظرفیت براساس تحلیل پوش آور
- تقاطع دادن منحنی ظرفیت و تقاضا برای تعیین نقطه ی عملکرد

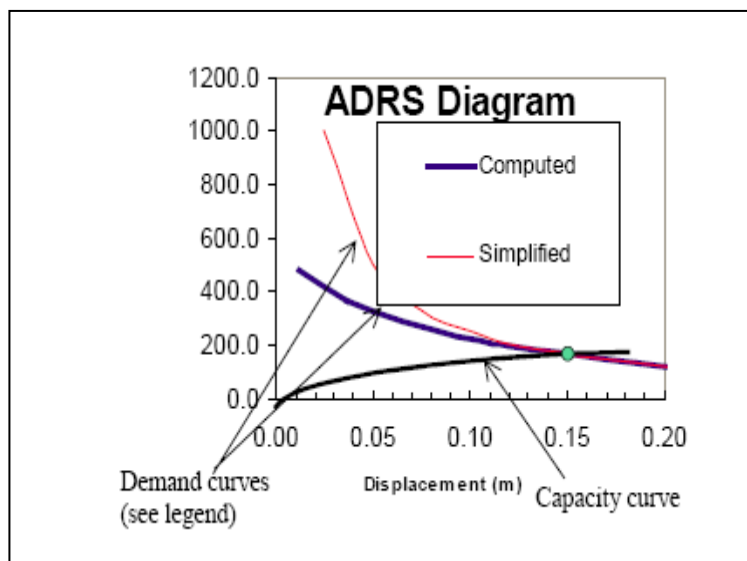
مراحل بالا بوسیله یک مثال کاربردی نشان داده شده اند.

وزن مواد منفجره TNT برابر 500 kg و حداقل فاصله ی دفع کردن امواج ۱۲ متر از دیواره است دیوار دارای جرمی برابر $2/2$ تن است و دوره تناوب آن $0/05$ ثانیه می باشد.

فاصله ی مقیاس شده از رابطه ی ۱ برابر $1/5$ به دست می آید. و حداکثر فشار وارده (P_{smax}) با توجه به شکل ۱ برابر $5/4$ بار (40 kpa) محاسبه می شود مقدار ضریب انعکاس (C_r) از معادله ی ۶ برابر $4/6$ ، فشار کل هم که از ضرب P_{smax} در C_r حاصل می شود، برابر 250 kPa می باشد نیروی نهایی انفجار برابر است با 75000 کیلو نیوتن ($3 \times 25000 \times 1$) و حداکثر شتاب (P_A) برابر با 332 m/s دست می آید.

منحنی تقاضا طبق معادله ی ۱۴ (با RSV_{max} برابر $15/9\text{ m/s}$) در شکل ۸ رسم شده است منحنی ظرفیت نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. از

تقاطع دو منحنی نقطه ی عملکرد در حدود 150 mm (در ارتفاع موثر) به دست می آید پس جا به جایی نسبی دیوار برابر است با 5% ($3=15$)



شکل ۸- تعیین نقطه عملکرد برای مثال عددی

مراجع

- [1]-A. Astaneh-Asl , Progressive collapse prevention in new and existing buildings , *Proc. of the 9th Arab Structural Engineering Conf., Nov. 29 – Dec. 1, 2003, Abu Dhabi, UAE*
- [2]-Brode HL, Numerical solution of spherical blast waves, *Journal of Applied Physics*
- [3]-Nelson Lam, Priyan Mendis, Tuan Ngo, Response Spectrum Solutions for Blast Loading, *Electronic Journal of Structural Engineering, 4*
- [4]-Smith PD and Hetherington, JG Blast and Ballistic Loading of Structures, *Butterworth-Heinemann, Oxford 1994.*
- [5]- ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vols.1&2. Redwood City, CA: Applied Technology Council,
- [6]-Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks (FEMA 427)