



## بررسی محافظت سازه‌ای ساختمانها در برابر بارگذاری ناشی از انفجار بمب جاسازی شده در یک وسیله نقلیه

محمد آذربایجانی، کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران<sup>x</sup>

ایرج محمودزاده کنی، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران<sup>xx</sup>

<sup>x</sup> تلفن: ۸۸۸۲۸۹۸، نمابر: ۸۰۴۰۵۰۷، پست الکترونیکی: [mazarba@yahoo.com](mailto:mazarba@yahoo.com)

<sup>xx</sup> تلفن: ۲۳۸۸۳۳۰۲، نمابر: ۶۴۶۱۰۲۴، پست الکترونیکی: [imkani@ut.ac.ir](mailto:imkani@ut.ac.ir)

### چکیده:

با توجه به اینکه حملات تروریستی در سالهای اخیر شکل وسیعتری به خود گرفته و اکثر این حملات بصورت بمبهای حجیم منفجر شده در اطراف ساختمانها میباشد که منجر به خسارات جانی و سازه ای می گردد و نیز از آنجایی که نمی توان بطور کامل از وقوع چنین رخدادهایی جلوگیری کرد؛ در این مقاله سعی گردیده است، راهکارهای کلی سازه ای برای کم کردن خسارتهای جانی و سازه ای در ساختمانها بر اثر این حملات ارائه گردد. از جمله این راهکارهای سازه ای می توان به استفاده از کابلهای تکه دارنده برای جلوگیری از گسیختگی زنجیره ای کفها، استفاده از دیوارهای برشی کامپوزیت و در نهایت طراحی قابهای خمشی با شکل پذیری بالا به نحوی که ساختمان هم در برابر فشار انفجار وارد بر کل ساختمان و هم در برابر شوک زمینی ناشی از انفجار بتواند به نحو مطلوبی عمل نماید؛ اشاره نمود.

در این مقاله با انجام تحلیلهای مختلف بر روی دو دیوار برشی که یکی بصورت دیوار برشی بتن آرمه معمولی و دیگری دیوار برشی کامپوزیت می باشد، به عملکرد این دیوارها در برابر بارگذاری ناشی از انفجار پرداخته شده است.

**کلید واژه:** بارگذاری انفجار، راهکارهای سازه ای، کابلهای تکه دارنده، دیوار برشی معمولی، دیوار برشی کامپوزیت

### ۱- مقدمه

بسیاری از کشورها، قربانی حملات تروریستی به شکل وسیعی هستند. بمبهایی که در اطراف ساختمانها منفجر شده باعث خسارات جانی و سازه ای گشته است. در این مقاله محافظت ساختمانها در برابر حملات ناشی از وسایل نقلیه حامل بمب به کمک فعالیتهای مهندسی مورد نظر می باشد. این محافظت هم بصورت مقاوم کردن اجزاء غیرسازه ای مانند دیوارهای پیرامونی، پنجره ها، درها و غیره و هم بصورت تقویت اجزاء سازه ای مانند تیرها و ستونها و دیوارهای سازه ای و در نهایت قاب ساختمان باید در نظر گرفته شود.

## ۲- مواد منفجره و بارگذاری ناشی از انفجار

### ۲-۱- بمبها و مواد منفجره

مواد منفجره دارای قابلیت وارد سازی فشار ناگهانی بر اطرافشان به هنگام تبدیل سریع ماده منفجره به گازهای داغ هستند. فشار این مواد با تولید گرما در طی انفجار بالا رفته، توازن فشار محیطی اطراف را بر هم زده و باعث تولید امواج شوک می گردد.

در این مقاله هر جا صحبت از انفجار مواد منفجره به میان می آید منظور، مواد منفجره حجیم به لحاظ طبقه بندی ODS<sup>1</sup> [۱] می باشد که تا 2500 kg تری نیترو تولوئن (تی.ان.تی) را شامل می شود. به طور کلی اگر هر ماده منفجره ای غیر از تری نیترو تولوئن (تی.ان.تی) مد نظر باشد، با استفاده از ضریب CF که عبارتست از

$$CF = \frac{\text{مقدار انرژی واحد جرم ماده منفجره}}{\text{انرژی واحد جرم TNT}}$$

به مقدار تی.ان.تی معادل قابل تبدیل است .

### ۲-۲- بارگذاری انفجار بر روی ساختمانها

به طور کلی بارهای ناشی از انفجار دارای مشخصات زیر می باشند:

(۱) اثر تصادفی، بدین مفهوم که قبل از انفجار معلوم نیست بر کدام قسمت سازه بیشترین میزان بار وارد می شود.

(۲) ماهیت گذرا و دینامیکی

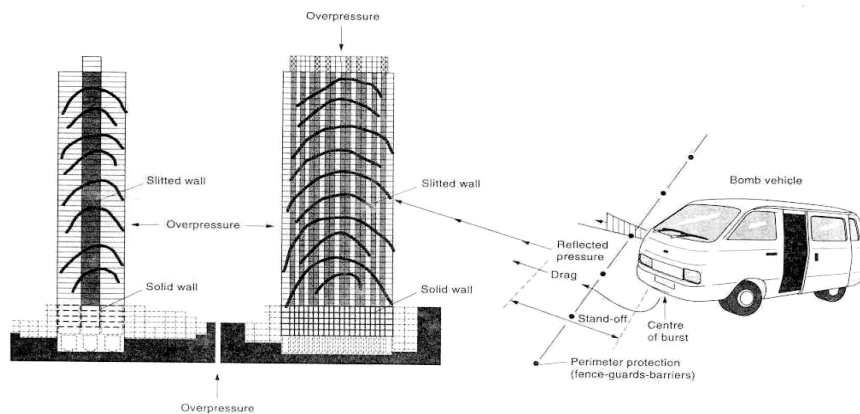
(۳) مدت استمرار کوتاه به همراه تاریخچه زمانی از چند صدم ثانیه تا چند ثانیه

هنگام انفجار یک بمب، آزاد شدن سریع انرژی ذخیره ای با مشخصه انفجار صدا دار صورت می گیرد که این انرژی آزاد شده به دو پدیده مجزا تقسیم می شود: (۱) تشعشع حرارتی و (۲) مخلوط شدن و جفت شدن با هوا و خاک که به ترتیب به نامهای انفجار هوایی و شوک زمینی معروف می باشند.

انفجار هوایی دلیل اصلی خسارت به ساختمانها می باشد؛ بعبارت دیگر موج شوک که با فشردن ساختمان مولکولهای هوا در راهش گسترش می یابد، باعث تولید اضافه فشار محصور می گردد. امواج با سرعت ما فوق صوت گسترش یافته و در نهایت به ساختمان برخورد می کنند. قسمتی از این امواج از روی ساختمان با فشار تشدید یافته منعکس می شوند و قسمتی نیز از طریق پنجره ها و در ها و سایر باز شوها به داخل ساختمان نفوذ می کنند و لذا دالهای طبقات، پارتیشن ها و محتویات داخل ساختمان در معرض این

<sup>1</sup> Observed Damages to Structures

فشارها قرار می گیرند . به علاوه انکسار امواج هنگامیکه شوک در حوالی گوشه های ساختمان گسترش می یابد، باعث افزایش یا کاهش فشار در این نواحی میگردد. این فرآیند ادامه پیدا می کند تا هنگامیکه همه ساختمان بوسیله امواج شوک فرا گرفته شده و تمامی سطوح ساختمان بوسیله اضافه فشار پوشیده شود. شکل ۱ یک تصویر کلی از این روند می باشد.



شکل ۱- بارهای انفجار بر روی ساختمانها: سناریوهای معمول

### ۲-۳- پارامترهای مختلف بیان کننده انفجار و مدل سازی بار انفجار

اندازه فشار  $P$  بطور تقریبی با وزن ماده منفجره  $W$  نسبت مستقیم و با مکعب فاصله از مرکز انفجار  $R$  نسبت عکس دارد.

$$P \propto \frac{W}{R^3} \quad (1)$$

با توجه به اینکه فاصله مقیاس بندی شده بصورت  $Z = \frac{R}{1}$  تعریف می شود؛ لذا

$$P \propto \frac{1}{Z^3} \quad (2)$$

به طور کلی منحنی های مقادیر فشار مازاد بر اتمسفر (اضافه فشار)  $P_B$  در برابر فاصله از مرکز انفجار  $R$  به صورت شکل ۲ [۱] می باشند. در این شکل اندیسه های مختلف  $P_B$  نشان دهنده اضافه فشار در فواصل مختلف،  $t_x$  زمانیکه طول می کشد تا اولین موج ناشی از انفجار به مانع برخورد کند که این زمان به سرعت موج انفجار و فاصله مانع بستگی دارد و  $t_d$  مدت زمان استمرار فاز مثبت موج ناشی از انفجار می باشد. همچنین در این شکل  $P_x$  نمایانگر فشار اتمسفر و  $P_y$  نشانگر کل اضافه فشار (با در نظر گرفتن

فشار اتمسفر) برای اولین موج انفجار برخورد کننده می باشد. در نهایت مدلسازی بار برای یک انفجار خارجی بصورت زیر انجام می گیرد:

فشار ماکزیمم ناگهانی  $P_{SO}$  (Incident Pressure) که بصورت دینامیکی بر دیوار ها و وجوه جلویی ساختمان ( نزدیک به محل انفجار) وارد می شود، مطابق رابطه تجربی زیر بیان می شود [۲]:

$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left( \frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در این رابطه  $W$  وزن ماده منفجره بر حسب معادل کیلوگرم تی.ان.تی و  $R$  فاصله مانع نسبت به مرکز انفجار بر حسب متر و  $P_{SO}$  اضافه فشار بر حسب بار<sup>۲</sup> می باشد. در حقیقت محاسبه  $P_{SO}$  برای بدست آوردن مقدار ماکزیمم فشار موج انعکاسی است که با ساده سازی بطور مثلی بر ساختمان وارد می شود. مقدار ماکزیمم فشار موج انعکاسی بصورت زیر بیان می شود [۲]:

$$P_R \begin{cases} 2P_0 + \frac{6}{7P_0 + P_{SO}} & P_{SO} < 10bar \\ 4\text{Log}_{10}P_{SO} + 1.5 & P_{SO} \geq 10bar \end{cases} \quad (5)$$

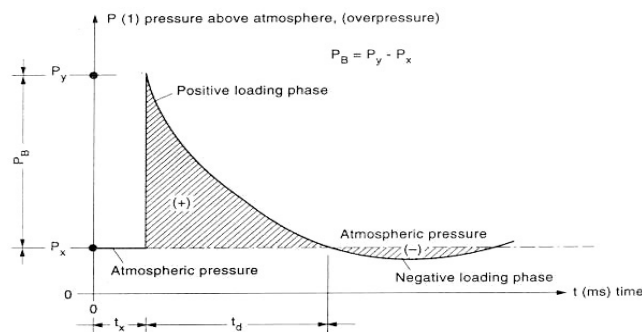
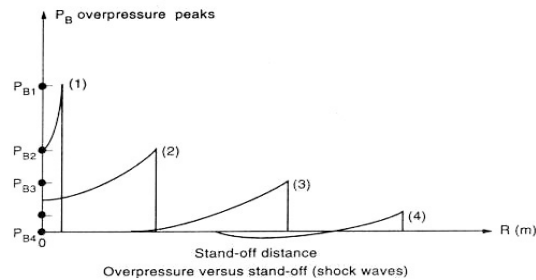
که در این رابطه  $P_0$  فشار محیط می باشد که برابر  $1 \text{ bar}$  در نظر گرفته می شود. همچنین مدت زمان استمرار فاز مثبت موج ناشی از انفجار بر حسب ثانیه با رابطه زیر بیان می شود [۲]:

$$t_d \begin{cases} 10.23 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} < 70bar \\ 20.77 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{P_{SO}} & P_{SO} \geq 70bar \end{cases} \quad (6)$$

بدین ترتیب مدلسازی بار انفجار برای یک انفجار خارجی بطور کامل و دقیق قابل حصول است.

---

<sup>2</sup> 1 bar = 100 kN/m<sup>2</sup>



شکل ۲- منحنی اضافه فشار - زمان برای انفجار خارجی

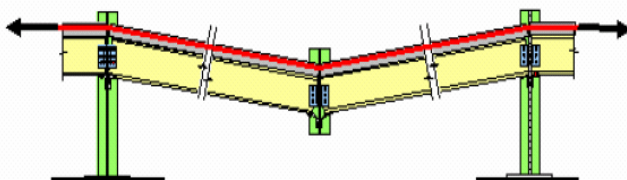
### ۳- محافظت اجزای سازه ای یک ساختمان در برابر انفجار

#### ۳-۱- استفاده از کابلهای با عملکرد نگه دارنده برای جلوگیری از گسیختگی زنجیره ای کفها

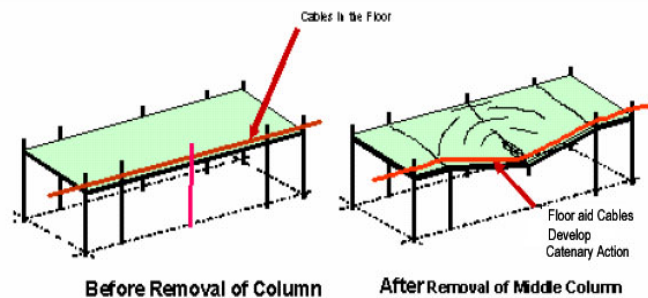
گسیختگی زنجیره ای عبارتست از، از بین رفتن ظرفیت باربری یک قسمت محدودی از سازه بعلت بار غیرمعمول وارده که منجر به گسیختگی بخش اعظم سازه می شود. ساختمانهای فراوانی از قبیل ساختمان مورا (Murrah) در اوکلاهما (سال ۱۹۹۵) و ساختمانهای مرکز تجارت جهانی (سال ۲۰۰۱) در اثر حملات تروریستی بدین دلیل فرو ریختند. درسهایی که از این رویدادها گرفته شد باعث گردید توجه ویژه ای به رفتار المانهای سازه ای به منظور افزایش درجه نا معینی، چقرمگی و شکل پذیری آنها مبذول شود. در بسیاری از موارد اثر انفجار ناشی از بمب موجود در وسیله نقلیه باعث از بین رفتن یک ستون بحرانی در پیرامون ساختمان می شود و پس از برداشته شدن این ستون باری که توسط این ستون حمل می شد نمی تواند بین ستونهای دیگر باز پخش گردد و همین امر موجب فروپاشی سازه یا بخشی از آن می گردد.

مفهوم مقاوم سازی یک ساختمان با استفاده از عملکرد نگهدارنده کابلهای فولادی شامل قرار دادن کابلها در داخل دالهای طبقات در هنگام ساختن این دالها یا اضافه کردن کابلها در زیر سازه های موجود به عنوان ابزاری برای بهتر کردن وضع این قسمتها می باشد. نقش اساسی این کابلها جلوگیری از گسیختگی زنجیره ای کف طبقات در هنگام از دست دادن یکی از ستونها می باشد. شکل های ۳ و ۴ [۳] نحوه عملکرد این مفهوم را در یک ساختمان نشان می دهد. هنگامیکه یک ستون برداشته می شود و کف طبقه شروع به فروریختن می نماید، عملکرد نگه دارنده کابل از گسیختگی جلوگیری کرده و بار

کف را به ستونهای مجاور و بقیه قسمتهای ساختمان منتقل می کند. با بکارگیری این کابلها در همه طبقات، بارهای همه طبقات بالای ستون برداشته شده به ستونهای مجاور منتقل می شود. در نتیجه اگر چه کفها تغییر شکلهای نسبتاً بزرگی در حدود ۴۰ تا ۶۰ سانتی متر می دهند؛ از گسیختگی زنجیره ای و فروپاشی کامل آنها جلوگیری بعمل می آید.



شکل ۴- افتادن طبقه و گسترش نیروی نگه دارنده در کابل



شکل ۳- یک کف عادی با کابل نگه دارنده قبل و بعد از برداشتن ستون میانی

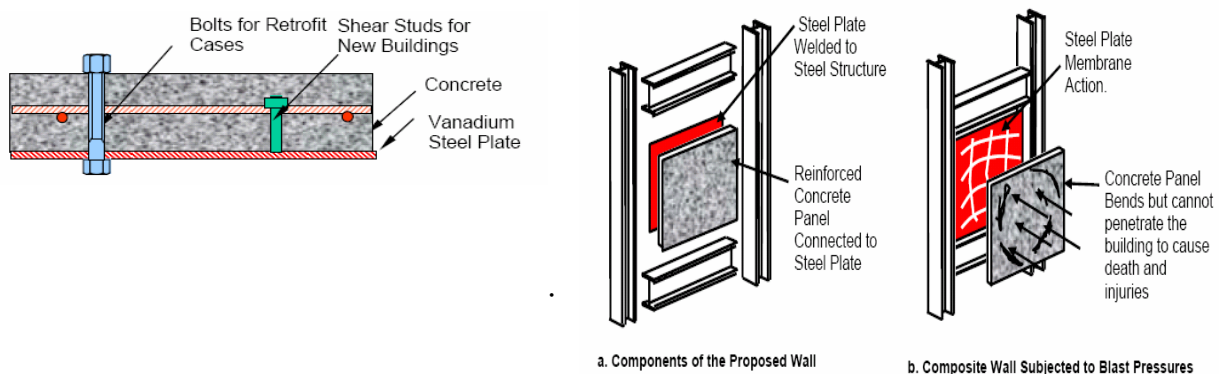
### ۳-۲- استفاده از قابهای خمشی با شکل پذیری بالا

عموماً یک ساختمان با قاب خمشی ویژه که دارای شکل پذیری بالایی می باشد، می تواند بصورت کلی و با حفظ عملکرد قابی خود در برابر بسیاری از بارهای انفجاری که ناشی از بمبهای تعبیه شده در وسایل نقلیه می باشند، مقاومت مناسبی از خود نشان دهد. آنچه عموماً موجب فروپاشی ساختمانها در چنین رویدادی می گردد کمبود مسیرهای انتقال نیرو پس از گسیختگی ها و خرابیهای محلی می باشد، به همین دلیل در استاندارد ANSI [۴] در بخش حداقل بارهای طراحی برای ساختمانها و دیگر سازه ها؛ روش مسیر جایگزین پیشنهاد گردیده است که در آن اجازه وقوع به گسیختگی محلی داده می شود اما مسیر جایگزین در اطراف المانهای سازه ای باید تعبیه گردد. به طور کلی عملکرد کلی یک ساختمان در برابر بار ناشی از انفجار عموماً به قابلیت اعضاء سازه ای آن برای تغییر شکل دادن غیر الاستیک تحت اضافه بارهای ناشی از چنین رویدادی بستگی دارد تا از این طریق قبل از گسیختگی، مقدار زیادی از انرژی مستهلک گردد. به علاوه، هنگامی می توان از گسیختگی زنجیره ای جلوگیری کرد که تیرها و ستونهای نزدیک و موجود در قسمتهای گسیخته شده ظرفیت انحنای خیلی بالایی با توجه به بارهای اضافی بتوانند از خود نشان دهند.

### ۳-۳- استفاده از دیوارهای برشی کامپوزیت

عملکرد اصلی دیوارهای سازه ای در ساختمانها، کاربری آنها در سیستم مقاوم در برابر بار جانبی و برش افقی طبقه می باشد. تا سال ۱۹۷۰ دیوارهای برشی مقاوم در برابر بار جانبی بصورت بتن مسلح بودند. از سال ۱۹۷۰ به تدریج دیوارهای برشی فولادی نیز در ساختمانهای مهم در ژاپن، کانادا و آمریکا مورد استفاده قرار گرفتند. نوع سوم دیوارهای برشی که بطور گاه و بیگاه در گذشته استفاده می شد دیوار برشی کامپوزیت بود که ترکیبی از بتن مسلح و ورقهای فولادی می باشد. شکل ۵ المانهای موجود در

یک دیوار کامپوزیت را به همراه قرار گرفتن چنین دیواری در برابر بارهای انفجار نشان می دهد [۵]. برای اینکه ورق فولادی و بتن بتوانند در یک حالت کامپوزیت با هم عمل نمایند، متصل نمودن آنها بهم مورد نیاز می باشد که عمل اتصال را معمولاً برشگیرهای جوش داده شده فولادی برای ساختمانهای در حال احداث و دیوارهای اجرا شده در محل و یا بولتها برای ساختمانهای موجود و دیوارهای پیش ساخته شده انجام می دهند. شکل ۶ این ابزارها را برای اتصال ورق فولادی به بتن مسلح دیوار نشان می دهد. ذکر این نکته لازم است که استفاده از آرماتور در دیوار بصورت حداقل می باشد تا اینکه بتوان جلوی ترکهای مربوط به انقباض و خزش بتن را گرفت. ضخامت ورقهای فولادی مورد استفاده در چنین دیوارهایی به ضخامت بتن و نیز شرایط اجرایی بستگی دارد.



a. Components of the Proposed Wall

b. Composite Wall Subjected to Blast Pressures

شکل ۶ - گل میخ و بولت برای اتصال ورق فولادی به دیوار بتنی

شکل ۵ - اجزای دیوار برشی کامپوزیت در برابر انفجار

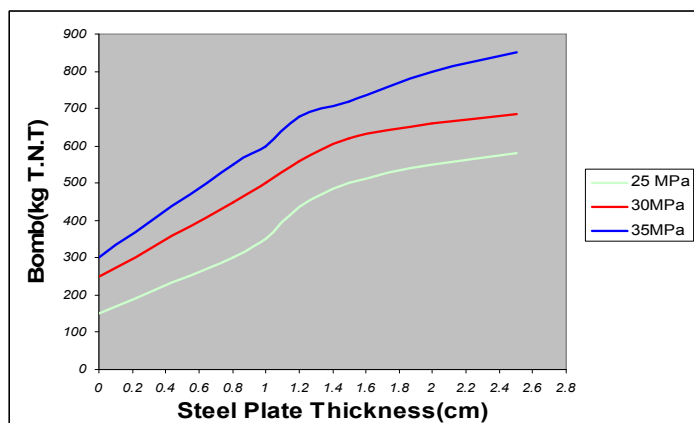
۳-۳-۱- مدلسازی و مقایسه یک دیوار برشی معمولی و یک دیوار برشی کامپوزیت در برابر بار ناشی از انفجار در این بخش دو دیوار برشی که یکی از نوع دیوارهای برشی معمولی است و دیگری از نوع دیوار برشی کامپوزیت می باشد در برابر بارهای انفجار یکسان با هم مقایسه شده اند. در دیوار برشی کامپوزیت از ورقهای فولاد معمولی با ضخامت  $0/8$  سانتی متر استفاده گردیده است که این ورقها مانند شکل ۵ در پشت دیوار بتنی قرار گرفته اند. بتن مورد استفاده در هر دو دیوار نیز بتن با مقاومت فشاری  $30 \text{ MPa}$  می باشد. ارتفاع هر دو دیوار  $20/5$  متر و ضخامت بتن در آنها  $30$  سانتی متر می باشد. ضمناً دهانه دیوارها  $4/65$  متر بوده و این دیوارها مربوط به یک ساختمان شش طبقه می باشند. برای تحلیل مساله از برنامه کامپیوتری ANSYS [۶] که امکان تحلیل غیر خطی را فراهم می کند، استفاده گردیده و تحلیلها بصورت غیر خطی دینامیکی انجام شده اند. ضمناً در مدلسازی غیر خطی مصالح تنشهای تسلیم مصالح را  $20\%$  افزایش داده ایم که این امر بدلیل ضربه ای بودن بارهای وارده انجام گرفته است. مدلسازی این دو دیوار برشی با استفاده از المان SHELL91 که یک المان لایه لایه بوده و تا  $16$  لایه می توانیم برای این

المان، مصالح با ضخامتهای مختلف تعریف نماییم؛ انجام شده است. این المان یک المان سه بعدی هشت گرهی بوده که در هر گره این المان شش درجه آزادی وجود دارد. ضمناً این المان قابلیت استفاده در تحلیلهای غیر خطی را دارا می باشد. اتصال دیوار به پی را بصورت گیردار در نظر گرفته ایم. همچنین لازم به توضیح است که سختی قاب ساختمانی قرار گرفته در پشت دیوارها، برای انفجار ایجاد شده در جلوی دیوار محاسبه گردیده و این سختی بوسیله المانهای LINK8 مدل سازی شده است. در نهایت با توجه به تحلیلهای فراوانی که بر روی دیوارهای برشی معمولی و کامپوزیت با ضخامت ورقهای فولادی مختلف در برابر بارهای ناشی از انفجارهای متفاوت در فاصله ۱۰ متری از ساختمان صورت گرفته است، جدول ۱ ارائه گردیده است. همچنین در ادامه تحلیلهای دیگری با توجه به انفجار بمبهای مختلف در فاصله ۱۰ متری از ساختمان، برای بتنهای با مقاومتهای فشاری ۲۵، ۳۰ و ۳۵ مگا پاسکال که در دیوارهای برشی معمولی و کامپوزیت استفاده شده اند، انجام گرفته است و نهایتاً نمودار شکل ۷ بدست آمده است. ضمناً این نکته قابل ذکر است که با توجه به نکات بدست آمده از جدول ۱ که در بخش نتیجه گیری آمده اند و پی بردن به اهمیت استفاده از فولادهای پر مقاومت نظیر فولاد وانادیوم در دیوارهای کامپوزیت، از این نوع فولاد که خواص آن در جدول ۲ آمده است، در تحلیلهای اخیر استفاده کرده ایم.

#### جدول ۱- مقایسه دیوارهای برشی معمولی و کامپوزیت با ضخامت ورقهای مختلف فولادی در انفجار بمبهای مختلف

در فاصله ۱۰ متری ساختمان

Plate Thickness(cm)	Bomb(kg T.N.T)	Pressure(MPa)	Von Mises Stress in Steel Plate(MPa)	Principle Compressive Stress in Concrete(Mpa)
0	300	1	0	40
0	500	1.69	0	60
0.8	200	0.8	180	25
0.8	300	1	225	30
0.8	500	1.69	370	38
1	500	1.69	360	36
1.2	500	1.69	340	33
1.5	500	1.69	325	30
2	500	1.69	287	28
2	1000	3	500	45



Properties		A572 Gr. 50	
		US (ksi)	SI (N/mm <sup>2</sup> )
Modulus	E	29000	199955
	E <sub>s</sub>	72	497
	E <sub>s</sub> /E (%)	0.25	0.25
Stress	F <sub>y</sub> (0.2%)	50	345
	F <sub>u</sub>	65	448
Strain	ε <sub>y</sub>	0.00172	0.00172
	ε <sub>u</sub>	0.21	0.21

Notations:  
 E= Modulus of Elasticity  
 E<sub>s</sub>= Strain Hardening Modulus  
 E<sub>s</sub>/E (%) = Ratio of strain hardening modulus to elastic modulus  
 F<sub>y</sub> = Yield stress. For Vanadium steel it is established based on 0.2% line  
 F<sub>u</sub> = Tensile Strength  
 ε<sub>y</sub> = Yield Strain= F<sub>y</sub> / E  
 ε<sub>u</sub> = Ultimate strain= % of Elongation

شکل ۷- نمودار تغییر ضخامت ورق با بمب منفجر شده در فاصله ۱۰ متری ساختمان

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد وانادیوم



#### ۴- نتیجه گیری

۱- تحلیلهای انجام گرفته نشان می دهند که با استفاده از دیوارهای کامپوزیت مقاومت در برابر انفجار ساختمان به طور قابل توجهی افزایش می یابد، در حالیکه از نظر هزینه افزایش آنچنانی در سازه صورت نمی گیرد.

۲- افزایش ضخامت ورقهای فولادی باعث افزایش مقاومت دیوار در برابر انفجار می گردد، اما این افزایش خیلی چشمگیر نیست و با توجه به افزایش هزینه های ناشی از استفاده از ورقهای با ضخامت زیاد و بخصوص مشکلات اجرایی که استفاده از این ورقها در پی خواهد داشت، می توان بیان کرد که ضخامت ۱۲ میلیمتر بهینه ترین ضخامت برای ورق خواهد بود.

۳- استفاده از فولاد های پرمقاومت در ورقها بسیار مناسب خواهد بود و بدین ترتیب می توان با هزینه قابل قبولی مقاومت دیوار های کامپوزیت را در برابر طیف وسیعی از بمبها افزایش داد.

۴- استفاده از بتنهای پرمقاومت نیز می تواند به نحو موثری بهبود خواص دیوارهای برشی را در برابر بارهای انفجاری باعث گردد، بخصوص هنگامیکه از فولادهای پرمقاومت به جای فولاد معمولی نرمه استفاده می شود، چون در این هنگام مقاومت فشاری بتن تعیین کننده خواهد بود.

#### ۵- مراجع

- 1- M.Y.H Bangash (1999). "Prototype building structures: analysis and design." Thomas Telford.
- 2- M.Y.H Bangash (1993). "Impact and explosion – structural analysis and design." Blackwell Science.
- 3- A.Astaneh-Asl (Dec.2003). "Progressive collapse prevention in new and existing buildings." Proc. of the 9<sup>th</sup> Arab Structural Engineering Conf., Nov.29-Dec.1, 2003, Abu Dhabi,UAE.
- 4- ANSI A58.1 (1982). "Minimum design loads for buildings and structures." American National Standard Institute, New York, NY.
- 5- Abolhassan Astaneh-Asl, Casey Heydari and Qihong Zhao (Oct.2003). "Analysis of car-bomb effects on buildings using MSC-Dytran software and protective measures." Proceedings of the MSC software virtual product development conference, Dearborn, Michigan, October 13-15, 2003.
- 6- ANSYS version 5.4 Registered for Mahab Ghods Company, Tehran, IRAN.