



تحلیل استاتیکی و دینامیکی درب ضد انفجار

سید علی گله داری^۱، داوود آرزومندی^۲، حسین خدارحمی^۳

تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشگاه امام حسین(ع)، دانشکده فنی، مرکز تحقیقات بالستیک ضربه و انفجار

Ali_ila84@yahoo.com

چکیده

در این مقاله با توجه به شرایط انفجار و بهره گیری از روابط شبیه سازی پدیده انفجار در هوا [1]، نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه به کمک نرم افزار ANSYS، بدست آمده است. وظیفه اصلی این سازه جلوگیری از نفوذ امواج شدید انفجاری به مکان هایی از قبیل زاغه های مهمات، کارخانجات استراتژیک و نظامی و ... است، که برای حفاظت از تجهیزات مهم و همچنین حفظ جان افراد بکار می رود. با توجه به معیارهای موجود و کاربرد این سازه، برای میزان تغییر فرمهای مجاز و در نهایت با توجه به قیود طراحی، بهترین ترکیب تقویت ها برای درب انفجاری ارائه می گردد. در نتیجه طرحی بهینه بمنظور ساخت درب ضد انفجار بدست می آید.

واژه های کلیدی: درب ضد انفجار، موج ضربه ای، فشار دینامیک، فشار انعکاسی، ANSYS

۱- مقدمه

درب انفجاری سازه ای است که با توجه به مفاهیم مربوط به انفجار سعی در کنترل اثرات ناشی از انفجار دارد. موضوع اصلی در سازه های مقاوم در برابر بار انفجاری فراهم نمودن انعطاف پذیری مناسب برای ساخت آن جهت کنترل تغییر شکل و جابجایی می باشد. لازم به ذکر است که میزان تغییر شکل و جابجایی از محدوده مجاز برای خرابی بیشتر نشود. طراحی بر اساس استحکام مواد و انتخاب ضریب اطمینان مناسب انجام شده است. در محاسبات مربوط به طراحی سازه، مقاومت تسلیم فولاد بکار رفته در تحلیل دینامیکی به دلیل اثر نرخ کرنش به میزان ۱۰٪ افزایش داده شده است. معیار ارزیابی در طراحی سازه مقاوم در برابر انفجار معمولاً محدوده تغییر شکل یا جابجایی می باشد [1].

۲- تئوری پدیده

هنگام وقوع انفجار، یک موج ضربه ای ایجاد می شود که برای آن چهار مشخصه می توان تعریف کرد: ۱- فشار مماسی ۲- سرعت موج ۳- پریود موج ۴- ایمپالس. برای ضربه ای که به جسم صلب وارد می شود علاوه بر پارامترهای فوق پارامترهای دیگری بنام فشار دینامیک و فشار انعکاسی را می توان تعریف کرد. بنابراین فشار ورودی به جسم ترکیبی از سه فشار مماسی (رابطه ۱)، دینامیکی (رابطه ۲) و انعکاسی (رابطه ۳) است [2].

در حالت کلی سه فاز برای منحنی توزیع فشار می توان تعریف کرد: ۱- فاز تفرق، ۲- فاز گذرا، ۳- فاز مقاومتی. عموماً در فاز تفرق فشار ماکزیمم فشار انعکاسی است. در فاز گذرا فشاری که بر سازه وارد می شود ترکیبی از فشار مماسی و فشار دینامیکی است

$$P(t) = P^* \cdot e^{\left(\frac{-t}{T_p}\right)} \quad (1)$$

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۳- دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)



$$q(t) = C_D \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{t}{T_q}\right) \cdot e^{\left(\frac{-b \cdot t}{T_q}\right)} \quad (2)$$

$$P_r = 2 P_s \left| \frac{7 P_0 + 4 P_0}{7 P_0 + P_s} \right| \quad (3)$$

۳- پاسخ سازه به بار انفجاری

در بررسی رفتار یک سازه تحت بار انفجار اغلب حالتی پیش می آید که تنها محاسبات حالت نهایی، اساس طراحی می باشند و یک طراح کافی است این رفتارها را بداند و تحلیل کند، برای برآورد و تخمین بیشتر این تحلیل پاسخ یک جسم با یک درجه آزادی مورد بررسی قرار می گیرد و ارتباط بین تداوم بار انفجاری و فرکانس طبیعی یک سازه در حال ارتعاش محاسبه می شود. این موضوع وابسته به مفهوم پیش رانشی و شبه استاتیکی رژیم های پاسخ سازه و نمونه این پاسخ بر روی دیاگرام فشار - ضربه برای سازه های تاسیساتی و ساختمانی و همچنین دیگر اهداف مانند حفاظت از پرسنل، مناسب می باشد. آنالیزهای اصلی برای سیستم های یک درجه آزادی انجام می شوند، خصوصاً برای یک سازه خاص که می توان آن را به صورت یک جسم متمرکز در نظر گرفت. مقاومت نهایی سازه را میتوان بصورت مجموع یک ترم اینرسی (بر اساس جرم سازه) به اصطلاح یک تابع مقاومت (که بر اساس خواص مواد و شکل هندسی می باشد) نشان داد که با هم در جهت خلاف موج انفجار عمل می کنند.

۴- طراحی سازه

موضوع اصلی در سازه های مقاوم در برابر بار انفجاری عبارت است از فراهم نمودن انعطاف پذیری مناسب برای اجزاء آن جهت میزان تغییر شکل و جابجایی که از محدوده مجاز برای خرابی بیشتر نشود، که این مستلزم این است که یک طراحی ابتدایی بر اساس تغییر شکل زیاد و پلاستیک انجام گیرد. بطوریکه با این تغییر شکل آن جزء با توجه به تاثیرات دیگر از قبیل بی ثباتی موضعی نباید دچار خرابی زودرس گردد.

۴-۱- طراحی استحکام

طراحی عموماً باید بر اساس خصوصیت استحکام مواد و با یک ضریب اطمینان مناسب انجام گیرد. برای مثال شاخصه تنش تسلیم برای فولادهای ساختمانی باید در محاسبات مربوط به طراحی باره های انفجاری حدود ۱۰٪ افزایش یابد. تاثیرات آن در مقایسه با باره های استاتیکی به صورت زیر خلاصه شده است :

الف: تنش تسلیم فولاد های ساختمانی و یا دیواره های تقویتی فولادی σ_y بطور قابل ملاحظه ای به تنش تسلیم دینامیکی σ_{dy} افزایش می یابد.

ب: مقاومت کششی نهایی فولاد های ساختمانی و یا نوار های تقویتی فولادی σ_u به مقاومت کشش نهایی دینامیکی σ_{du} افزایش می یابد.

ج: مقاومت فشاری بتون σ_{cu} بطور چشمگیری به مقاومت فشاری دینامیکی σ_{dcu} افزایش می یابد.

د: مدول الاستیسیته E فولاد و بتون با توجه به تغییرات بار ثابت می ماند.

ضریبی که مقاومت استاتیکی را به دینامیکی تبدیل می کند، ضریب افزایش دینامیکی (DLF) نامیده می شود. مقادیر نمونه DLF برای سازه های فولادی و نوارهای تقویتی فولادی آورده شده است (جدول (۱)).

مینیمم تعیین شده σ_y برای فولاد های گرید ۵۰ یا کمتر حدود ۱/۱ برابر متوسط مقاومت افزایش می یابد.

مقاومت های دینامیکی مورد استفاده در بتونهای تقویت شده و اجزای فولادی سازه های ساختمانی بستگی به تغییر شکل یا حدود خسارت اعمال شده دارد [3].



جدول ۱: ضریب افزایش تنش دینامیکی [3]

نوع تنش	بتون		بتون با میله های فولادی		
	f_{dcu} / f_{du}	f_{dy} / f_y	f_{du} / f_u	f_{dy} / f_y	f_{du} / f_u
Bending	1.25	1.2	1.05	1.2	1.05
Shear	1	1.1	1.00	1.2	1.05
Compression	1.15	1.1	—	1.1	—

۴-۲- حدود تغییر شکل

معیار کنترل در طراحی سازه مقاوم در برابر انفجار معمولاً محدوده تغییر شکل یا جابجایی می باشد. در این روش میزان خسارت‌های اعمال شده به عنصر باید کنترل شود، میزان خسارت مجاز با توجه به هر موقعیتی بستگی به حفاظت خود سازه، پرسنل و یا تجهیزات درون ساختمان خواهد داشت. بطور کلی از روش زاویه تحمل برای سازه های بتونی تقویت شده و از روش میزان انعطاف پذیری برای سازه های فولادی استفاده میشود. برای حفاظت اجزاء سازه از فروپاشی تحت اعمال بار انفجار حدود تغییر شکل پیشنهاد شده است. لازم به تذکر است که این حدود بر تغییر شکل زیاد پلاستیک اجزاء اشاره دارد و حاکی از آن است که اجزاء نیاز به تعمیرات متعاقب یا جایگزینی قبل از استفاده مجدد دارد. برای موقعیتهایی که نیاز به استفاده مجدد بدون تعمیر است، باید تغییر شکلها در حدود الاستیک نگه داشته شود.

۵- مدلسازی و حل مساله

تحلیل اجزاء محدود که توسط نرم افزار انجام می شود شامل سه قسمت است: الف-پیش پردازش ب-حل مدل ج-پس پردازش در مرحله پیش پردازش مدل سه بعدی هندسی با استفاده از امکانات نرم افزار مدلسازی ایجاد، خواص فیزیکی ماده تعریف، نوع المانها تعیین و مش بندی انجام می گیرد.

ابعاد اصلی درب ضد انفجار به ارتفاع ۴ متر و عرض ۱/۵ متر در نظر گرفته می شود. درب برای تحمل بار انفجاری ناشی از ۱۱۱۸ کیلوگرم ماده منفجره TNT طراحی می شود. مدل طراحی شده درب با تقویت های افقی و عمودی در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از ساخت مدل و بارگذاری، پارامترهای حل مدل استخراج و تنظیمات لازم با توجه به نوع تحلیل انجام می گیرد. در تحلیل درب انفجاری دو نوع حل مورد استفاده قرار می گیرد: ۱- حل استاتیکی ۲- حل دینامیکی گذرا

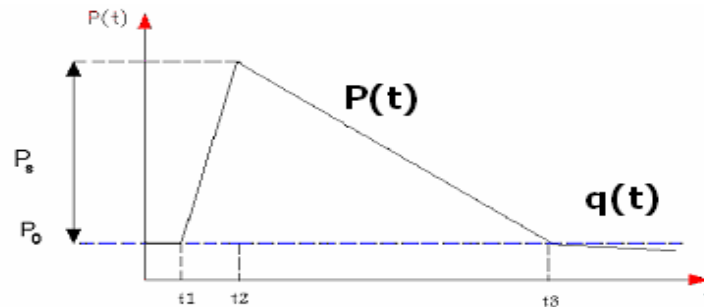
تحلیل استاتیکی مستقل از زمان بوده و رفتار سازه را در اثر اعمال نیروهای خارجی (مانند فشار) و یا نیروهای حجمی (مانند نیروی وزن و یا اینرسی) نشان می دهد. در مورد این آنالیز دو نوع تحلیل وجود دارد: ۱- تحلیل خطی ۲- تحلیل غیرخطی در ادامه با فرض زیاد نبودن تغییر شکل (تحلیل خطی)، آنالیز خطی در نظر گرفته می شود.

دانشیته، ضریب پواسون و مدول یانگ فولاد، خواص هستند که برای انجام تحلیل استاتیکی در قسمت خواص مواد نرم افزار وارد می شود و سپس در قسمت SOLUTION فشار ماکزیمم ۵۹۸ KPa که با توجه به رابطه (۱) محاسبه شده است، برروی صفحه قرار داده می شود. این فشار در قسمت بارگذاری به صورت گسترده برروی کل صفحه قرار می گیرد. در تحلیل دینامیکی، نمودار فشار-زمان با استفاده از روابط (۱) و (۲) (مقادیر فشار مماسی و دینامیکی) مشخص می شود.

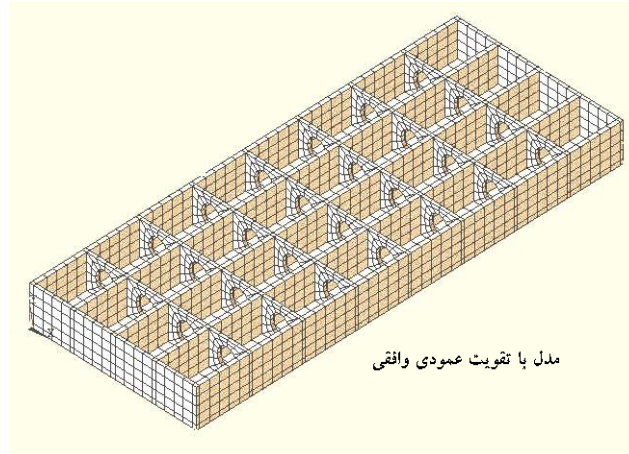
مقادیر فشار-زمان مطابق جدول ۲ برای بازه های زمانی مختلف، با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [2] بدست می آید و از منحنی ساده شده آن طبق شکل ۱ استفاده می شود.

جدول ۲: مراحل بارگذاری دینامیکی

مرحله	نحوه تغییر فشار	زمان پایان مرحله	مقدار فشار در پایان مرحله	مقدار substep
1	Stepped	$T_1=11.9e-3$	$P_1=P_a$	1
2	Ramped	$T_2=13.22e-3$	$P_2=598kpa$	13
3	Ramped	$T_3=46.28e-3$	$P_3=P_a$	15



شکل ۱: منحنی ساده شده فشار-زمان



مدل با تقویت عمودی واقعی

شکل ۲: مدل درب با تقویت های عمودی و افقی

۶- مقایسه نتایج

در این قسمت ابتدا نتایج بدست آمده از آنالیز بوسیله نرم افزار ذکر میگردد، سپس بر روی هرمدل و نتایج آنها بطور جداگانه بحث میشود. در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی بر روی مدل‌های مختلف ذکر میشود و پس از آن به بحث بر روی نتایج حاصل از تحلیل مودال و دینامیکی میپردازیم. برای نتایج فقط به ذکر تنش وون میز و جابجائی متوسط بسنده می‌کنیم.

۶-۱- آنالیز استاتیکی

در این قسمت بطور کلی دو نوع مدل داریم که یکی از آنها دارای تقویت عمودی است و دیگر تقویت افقی نیز دارد.

۶-۱-۱- مدل دارای تقویت عمودی

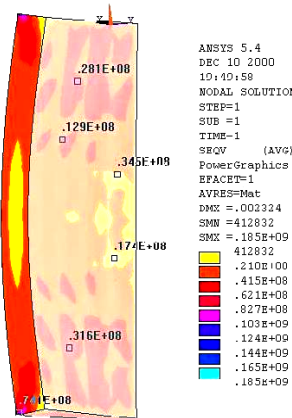


درابتدای طراحی این مدل دربالاوپایین درب هیچگونه صفحه ای قرارداده نشدوتنش وجابجایی بدین صورت بدست آمدند.

$$S_{\max} = 404 \quad MPa$$

$$D_{\max} = 4.2 \quad mm$$

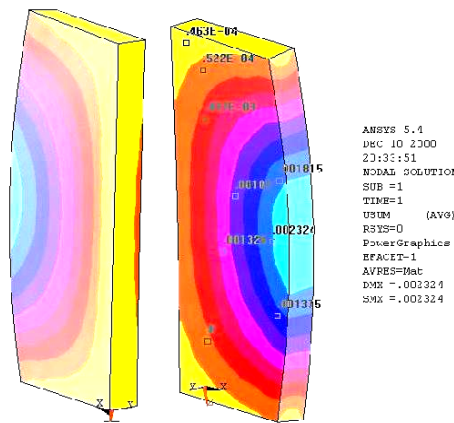
دراین مدل همانطور که مشخص است جابجایی درحد قابل قبول میباشد و تنش ماکسیم بیشتر ازتنش تسلیم فولاد میباشد یعنی چیزی درحدود ۱/۵ برابر، این حالت به این خاطر است که درائر نبود دو صفحه بالا وپایین وقتی فشار وارد میشود تقویتها میل به کج شدن وانحراف زیاد دارند که این امر باعث میشود که تنش شدیدی درریشه ونوک این تقویت ها بوجود آید. با قراردادن دو صفحه بالایی وپایینی مقدار تنش به مقدار قابل ملاحظه ای پایین آمد واین دو صفحه نقش خود را در پایین آوردن تنش بسیار خوب ایفاء کردند. همچنین جابجایی متوسط ماکسیمم نیز درحدود ۱ میلیمتر کمتر شد، که نشان دهنده مناسب بودن دو صفحه ۳ سانتی متر میباشد. نتایج حاصل از تحلیل مدل مذکور در شکل ۳ آمده است.



نمودار تنش

$$S_{\max} = 208 \quad MPa$$

$$D_{\max} = 3.2 \quad mm$$



نمودار جابجایی

شکل ۳: توزیع تنش و جابجایی مدل دارای تقویت عمودی در تحلیل استاتیکی

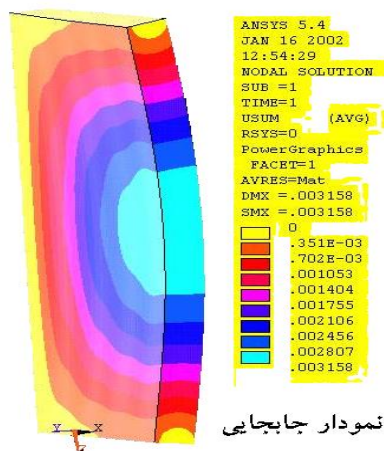
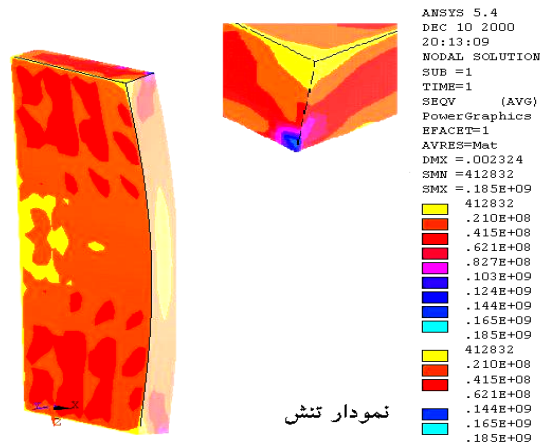
۶-۱-۲- مدل دارای تقویت افقی وعمودی

این مدل علاوه برداشتن تقویتهای عمودی، ۷ ردیف تقویتهای سوراخداربه قطر ۱۹ سانتیمتر نیزدارد، علت سوراخدار بودن این تقویتها، ایجاد امکان بتون ریزی درون درب است. این تقویتها نیز نقش زیادی درکمر کردن تنش ها وجابجایی ها دارند ودر واقع سطح

$$S_{\max} = 164 \text{ MPa}$$

$$D_{\max} = 2.3 \text{ mm}$$

البته سوراخهای این تقویت ها در مراحل بعدی به ۱۲ سانتیمتر رسید که این امر نتایج قابل قبولی در تحلیل دینامیکی را باعث شد و قطعاً در مقادیر تنش و جابجایی در حالت استاتیکی نیز بی تأثیر نبود. نتایج حاصل از تحلیل مدل مذکور در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴: توزیع تنش و جابجایی مدل دارای تقویت عمودی افقی در تحلیل استاتیکی

۲-۶- آنالیز دینامیکی

در انفجاری با تقویت عمودی و تقویت های افقی- عمودی تحت آنالیز دینامیکی قرار گرفته و نتایج آن در زیر آورده شده است.

۲-۶-۱- سازه دارای تقویت های عمودی و افقی

این سازه نیز زمانی که تقویت های افقی دارای قطر ۱۹ سانتیمتر بودند، جوابهای قابل قبولی نداد ولی با کمتر کردن قطر و رساندن آن به ۱۲ سانتیمتر جوابها قابل قبول بود. علت این تغییر را میتوان این گونه بیان نمود؛ زمانی که قطر تقویتها ۱۹ سانتیمتر باشد به دلیل نازک



Load step 1:

$$S_{\max} = 0 \quad \text{MPa}$$

$$D_{\max} = 0 \quad \text{mm}$$

این Load step مربوط به زمان آغاز انفجار میباشد و هنوز سازه اثر انفجار را درک نکرده است و در واقع نقطه شروع انفجار میباشد.

Load step 2:

$$S_{\max} = 42.3 \quad \text{MPa}$$

$$D_{\max} = 2.4 \quad \text{mm}$$

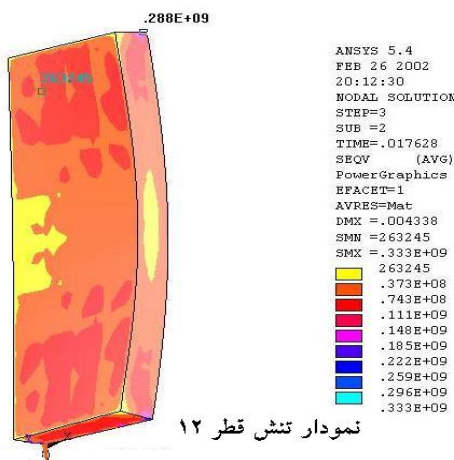
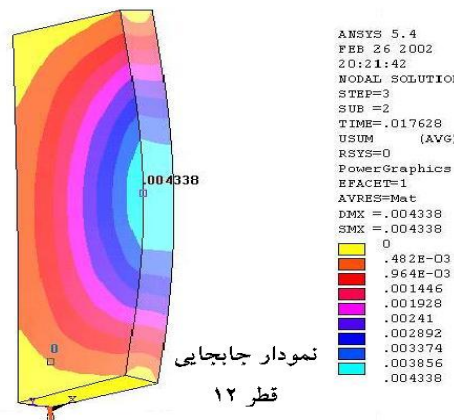
این Load step مربوط به زمان رسیدن سازه به بیشتر فشار $P_s = 598 \text{ KPa}$ بدست آمده است.

Load step 3:

$$S_{\max} = 300 \quad \text{MPa}$$

$$D_{\max} = 4.3 \quad \text{mm}$$

این تنش ماکزیمم در Load step 2 اتفاق میافتد. یعنی زمان بسیار کوتاهی پس از رسیدن انفجار به فشار ماکزیمم و بیشترین جابجایی را نیز طبیعتاً در همین مرحله داریم. البته این تنش در نقاط بسیار کوچکی از سازه اتفاق میافتد. نتایج حاصل از تحلیل مدل مذکور در شکل ۵ آمده است.



شکل ۴: توزیع تنش و جابجایی مدل دارای تقویت عمودی و افقی در تحلیل دینامیکی



۶-۴-۱۰- سازه دارای تقویتهای فقط عمودی

در این سازه دارای تقویتهای عمودی هستیم نتایج حاصله در هر load step به قرار زیر میباشد.

Load step 1:

$$S_{\max} = 0 \quad MPa$$

$$D_{\max} = 0 \quad mm$$

این مقادیر مانند قسمت ۱ در زمان آغاز انفجار بوده و سازه هنوز اثر انفجار را درک نکرده است.

Load step 2:

$$S_{\max} = 179 \quad MPa$$

$$D_{\max} = 2.7 \quad mm$$

ماکسیمم تنش در لحظه رسیدن به حداکثر فشار موج اتفاق میافتد یعنی در Load step 3 دارای بیشترین تنش و جابجایی هستیم.

Load step 3:

$$S_{\max} = 181 \quad MPa$$

$$D_{\max} = 2.8 \quad mm$$

با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل مدل با تقویتهای عمودی و مدل با تقویتهای عمودی و افقی میتوان به این نتیجه رسید که هر دو سازه مناسب میباشد. وضعیت تنش در بیشتر قسمتهای از مدل با تقویتهای عمودی از ۱۸۰ مگا پاسکال تجاوز نمیکند و میزان جابجاییها در مدل با تقویتهای عمودی و افقی کمتر میباشد، لذا پیشنهاد میشود نهایتاً این درب مورد استفاده قرار گیرد. برای اینکه تنشهای وارده در نقاط اطراف سوراخها را کم کنیم میتوانیم از فیلتر کردن گوشه ها و لبه ها استفاده کنیم. با این عمل این تنشها تا حد زیادی کم میشوند. ضمناً با بتون ریزی داخل تقویت ها میزان جابجاییها و تنشها از این مقادیر هم کمتر میشود.

۷- نتیجه گیری

در طراحی یک درب ضد انفجار به ابعاد ۳*۴ متر، تحلیل تنش دو درب با تقویت عمودی و با تقویت های عمودی و افقی تحت بار انفجاری، در دو وضعیت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به کمک نرم افزار Ansys انجام شده است. با توجه به محدودیت های موجود در نرم افزار مشاهده می شود که برای هندسه های ساده (تقویت عمودی) مقادیر ماکزیمم تنش ون میز در حالت استاتیکی و دینامیکی اختلافی در حدود ۲۰MPa وجود دارد، که با صرف نظر کردن از اینرسی و اثرات میرائی در تحلیل استاتیکی، پیش آمده است. با این فرض می توان بجای نتایج تحلیل دینامیکی از نتایج تحلیل استاتیکی با اعمال فشار پیک در طراحی سازه مقاوم نیز استفاده نمود.

۸- مراجع

- [1] Bulson, P.S., "Explosive Loading of Engineering Structures", Chapman & Hall, London SE 8HN, UK, July, 1997
- [2] Mays, G.C., Smith., "Blast effect on building", Thomas Telford Publication, London 1995
- [3] Shigley, J.E., "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill, 1986