



بررسی تاثیر انفجار سطحی بر روی دیوارهای بتنی پناهگاه جنگی تقویت شده با ورق‌های GFRP

رضا پورطهماسب^{*}، عادل پوررتقی مرزود^۲، نادر هویدائی^۳

- ۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مرنده، ایران
- ۲- پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران
- ۳- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی:

نرم‌افزار LS-Dyna
پناهگاه جنگی
انفجار سطحی
ورق‌های GFRP
سازه بتنی

خلاصه: اهمیت توسعه سامانه‌های پدافند غیر عامل خصوصا در مناطق جنگی، بررسی و تحلیل سازه‌ها تحت اثر انفجارهای سطحی را ضروری می‌داند. با توجه به موضعی بودن پدیده انفجار، اثرات و ویژگی‌های محیطی و موانع موجود، این پدیده دارای پیچیدگی‌های خاص می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از روش اجزا محدود و با کمک نرم‌افزار LS-Dyna، رفتار غیر خطی دیواره‌های سازه بتنی مقاوم‌سازی شده به وسیله پلیمرهای مسلح با الیاف شیشه (GFRP) در الگویی از پناهگاه جنگی در برابر بار ناشی از تاثیر موج انفجار سطحی، در حالت سه بعدی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه بار انفجاری، شرایط تکیه‌گاهی، ابعاد دیوار، جنس الیاف و ویژگی‌های مصالح مورد استفاده یکسان در نظر گرفته شده و تاثیر حالات مختلف تقویت با ورق GFRP و ضخامت آنها در این حالات بررسی شده است. نخست چگونگی توزیع تنش در دیواره‌های سازه بتنی مرجع محاسبه شده و ناحیه‌های بحرانی سازه شناسایی شدند. سپس پاسخ مربوط به دیواره‌های سازه مقاوم‌سازی در ناحیه بحرانی با ضخامت‌های متفاوت، با یکدیگر و با سازه مرجع مقایسه شده و میزان تاثیر استفاده از این روش مقاوم‌سازی برای دیواره‌های سازه در برابر بارگذاری انفجار سطحی مشخص گردیده است. در پایان میزان تغییر مکان و چگونگی توزیع تنش برای حالت‌های مختلف جانمایی ورق‌های GFRP محاسبه و با توجه به استخراج حالت بهینه تقویت در در مقایسه با پوشش کامل دیواره‌های سازه، بکارگیری این روش مناسب ارزیابی شده است.

۱- مقدمه

مدل ماده و ۱۱ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح راهکار مناسبی برای تحلیل مسائل انفجار می‌باشد که در مطالعه حاضر مد نظر قرار گرفته است. تحلیل‌های انفجاری ۹ سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که با روش‌های تقریبی انجام می‌گرفت به قرن‌های سیزده و چهارده میلادی باز می‌گردد. در ادامه به چند نمونه از پژوهش‌های پیشین که در این راستا انجام گرفته اشاره می‌شود [۱].

در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون ارائه شده که پایه ریاضی نداشت ولی از نظر کاربردی بسیار با اهمیت بود [۱]. وی ادعا نمود که اگر دو ساختمان با شکل و مصالح مشابه ولی در اندازه‌های مختلف ساخته شوند و سپس تحت اثر انفجار قرار گیرند مقدار ماده منفجره مورد نیاز برای ایجاد تاثیرات مشابه با توان سوم ابعاد ساختمان‌ها نسبت مستقیم دارد. این قانون به طور کامل و در سال ۱۹۲۶ توسط گرنز ارائه شد [۲]. هوراس لمب ریاضیدان دانشگاه منچستر تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [۳]. تیلور دانشمندی بود که مطالعاتش بر روی دینامیک موج‌های انفجار ناشی از مواد منفجره نقش

انجام یک طراحی ایمن و بهینه که با حداقل هزینه، حداکثر کارایی را فراهم نماید نیازمند شناخت دقیق اثرات انفجار و ضربه بر سازه و همچنین رفتار سازه در برابر اثرات وارد شده می‌باشد. قطعا کسب چنین اطلاعاتی جز با انجام یک شبیه‌سازی نزدیک به شرایط واقعی میسر نخواهد بود. هدف اصلی در مهندسی ضربه و انفجار شناخت دقیق پدیده انفجار، رفتار موج‌های مختلف ناشی از انفجار، اندرکنش سازه با موج‌های برخوردی، نحوه حرکت و عملکرد پرتابه‌ها، نحوه استهلاک انرژی در حین برخورد و به طور مختصر کلیه موارد و مسائل مرتبط با انفجار و ضربه می‌باشد. با توجه به وجود پیچیدگی‌های بسیار زیاد انجام تحلیل‌های مورد نظر در حیطه مهندسی ضربه و انفجار نیازمند استفاده از نرم افزارهایی با قابلیت‌ها و توانمندی‌های ویژه می‌باشد. یکی از این هیدروکدهای توانمند در زمینه انفجار نرم‌افزار LS-DYNA می‌باشد که قابلیت‌های بسیار بالایی در حل مسائل دینامیک غیرخطی دارد. استفاده از نرم افزار LS-DYNA با داشتن تقریباً ۲۲۲ نوع

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Reza.pourtahmaseb@gmail.com



متداول در طبقه‌بندی انفجارها، طبقه‌بندی بر اساس محیط وقوع انفجار است. در این طبقه‌بندی انفجارها به دو دسته اصولی، انفجار غیرمحصور و انفجار محصور تقسیم می‌شوند. انفجارهای غیرمحصور سه نوع، انفجار در هوای آزاد، انفجار در هوا و انفجار سطحی را شامل می‌شود. و انفجار محصور نام عمومی سه دسته انفجار به نام‌های انفجار تخلیه شونده، انفجار نیمه محصور و انفجار کاملاً محصور می‌باشد.

برای محاسبه‌ی بار ناشی از انفجار روش‌های زیادی ارائه شده است، در واقع همه کمیت‌های مربوط به انفجار وابسته به دو کمیت مستقل، میزان انرژی آزاد شده در هنگام انفجار و فاصله بین مرکز انفجار تا محل اثر موج انفجار هستند. قدرت تخریبی یک بمب نیز به واسطه همین دو کمیت بسیار مهم مورد محاسبه قرار می‌گیرد. برهم کنش دو کمیت وزن مواد منفجره (W) که بر حسب وزن TNT معادل‌سازی می‌شود و فاصله اثر مواد منفجره (R) تحت عنوان فاصله مقیاس شده (Z) و به صورت زیر بیان می‌شود [۸].

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

در رابطه بالا R بر حسب متر و W بر حسب کیلوگرم بکار می‌روند. متغیرهای موثر در پدیده انفجار و همچنین روابط مناسب جهت تخمین فشار ناشی از انفجار، هدف تعداد بسیاری از تحقیقات علمی در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بوده است. نخستین بار بیشینه فشار انفجار (P_{so}) با استفاده از فاصله مقیاس شده، Z توسط بورد (Borde) در سوال ۱۹۵۵ به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) بیان شد [۹].

$$P_{so} = \frac{97.5}{Z} + \frac{145.5}{Z^2} + \frac{585}{Z^3} - 1.9 \text{ KP} \quad (2)$$

$(10Kpa < P_{so} < 1000Kpa)$

$$P_{so} = \frac{670}{Z^3} + 100 \text{ KP} \quad (P_{so} > 1000Kpa) \quad (3)$$

همچنین رابطه‌ی جدیدتر ارائه شده توسط ایزدی‌فرد و ماهری مطابق

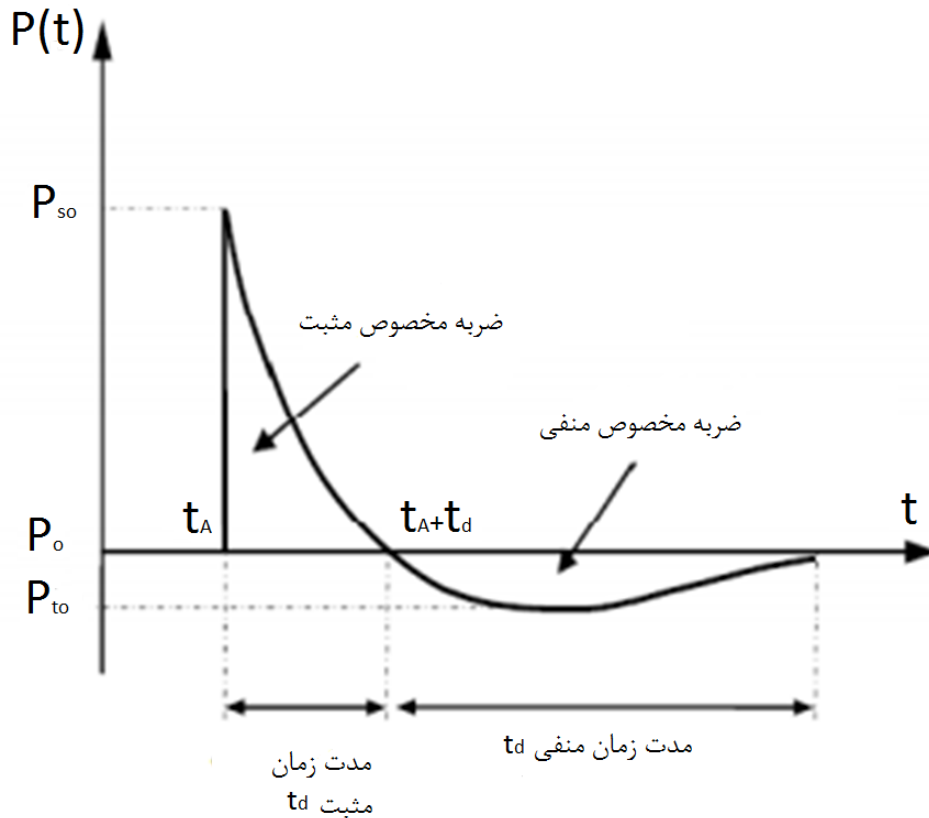
زیر می‌باشد [۱۰].

بسیار زیادی در پیشرفت مرکز تحقیقات وزارت دفاع بریتانیا در سال‌های بین ۱۹۳۶ تا ۱۹۵۰ داشت. مقاله‌های نخست وی در مورد انتشار و استهلاک موج‌های انفجار ناشی از سلاح‌های متعارف بود ولی در مطالعات بعدی وی بر روی رفتار موج‌های انفجار ناشی از نخستین انفجار اتمی در نیومکزیکو متمرکز شد [۴].

در سال ۲۰۱۰ آقایان نوربرت گبکن و تورسن توگه تحقیقاتی بر روی شکل و هندسه ساختمان و همچنین تاثیر محیط پیرامونی ساختمان در جلوگیری از رسیدن امواج انفجار به ساختمان را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در فرم‌های هندسی، بیش از فشارهای حداکثر و تکانه‌های ماکزیم، اساساً به فاصله از محل انفجار و زاویه‌ی برخورد امواج انفجاری و مقاومت در مقابل جریان امواج اشکال سازه‌ای بستگی دارند. همچنین شکل عناصر سازه‌ای یا ساختمانی نیز می‌تواند بارهای انفجاری را کاهش دهد [۵]. در سال ۲۰۱۱ آرسیزوسکی^۱ عملکرد سه نوع اتصال تیر به ستون در برابر بارگذاری انفجاری ناشی از کامیون حامل مواد منفجره را مورد بررسی قرار دادند. اتصالات در دو حالت معمولی و مقاوم‌سازی شده با استفاده از صفحه جانبی مورد بررسی قرار گرفتند. منحنی‌های تاریخچه زمانی با استفاده از نرم‌افزار FEFLO که یک نرم افزار دینامیک سیال محاسباتی است بدست آمد. ملاحظه گردید که رفتار اتصالات تقویت شده با صفحه کناری بهتر از اتصالات بدون تقویت بوده است [۶]. در سال ۲۰۱۱ ساعدی و ضیائی رفتار اتصالات نیمه گیردار نبشی بالا و پایین به همراه نبشی بال را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. برای انجام تحقیق نرم افزار اجزای محدود ANSYS مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش همچنین کیفیت معیارهای ذکر شده در آیین نامه و نیز مودهای خرابی اتصالات ذکر شده مورد مطالعه قرار گرفت [۷].

۲- تعریف انفجار

هر انفجار به صورت آزاد شدن ناگهانی و سریع حجم بسیار زیادی از انرژی تعریف می‌شود که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد و تولید نور، گرما، صدا و موجی به صورت موج ضربه‌ای می‌کند. این موج شامل هوای بسیار متراکمی است که به صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند. انفجارها انواع متفاوتی دارند و به شکل‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های



شکل ۱. تصویر شماتیک تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۲]

Fig. 1. Schematic illustration of the time history of the pressure caused by the explosion

که در آن زمان رسیدن موج انفجار به سازه، t_d زمان بارگذاری و b ضریب کاهش است. فاکتور ضربه به صورت سطح زیر نمودار فشار-زمان می‌باشد (سطح زیر منحنی شکل (۱) در مدت زمان t_d) که رابطه‌ی انتگرالی آن به قرار زیر است [۱۱].

$$i_r = \int_{t_a}^{t_a+t_d} P_s(t) dt \quad (7)$$

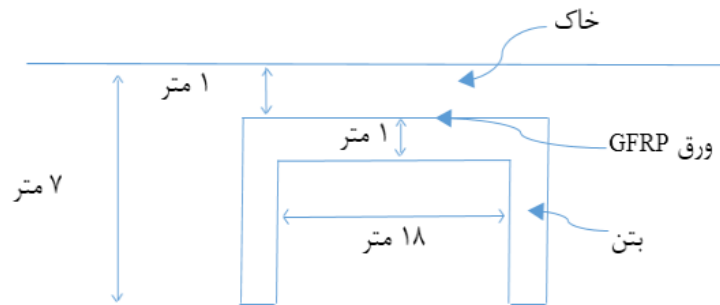
در بسیاری از موارد، برای سهولت، نمودار $P_s(t)$ به صورت مثلثی فرض می‌شود (به عبارت دیگر تغییرات فشار با زمان خطی فرض می‌شود)، که در آن فشار اولیه P_{so} در مدت زمان t_d به صفر می‌رسد. بار انفجار به صورت باری گسترده بر نمای خارجی سازه اعمال می‌شود که مقدار آن با دور شدن

$$\text{Log}_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx 0.28 + 0.3 \text{Log}_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \geq 1/0) \quad (4)$$

$$\text{Log}_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx 0.28 + 2.5 \text{Log}_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \leq 1/0) \quad (5)$$

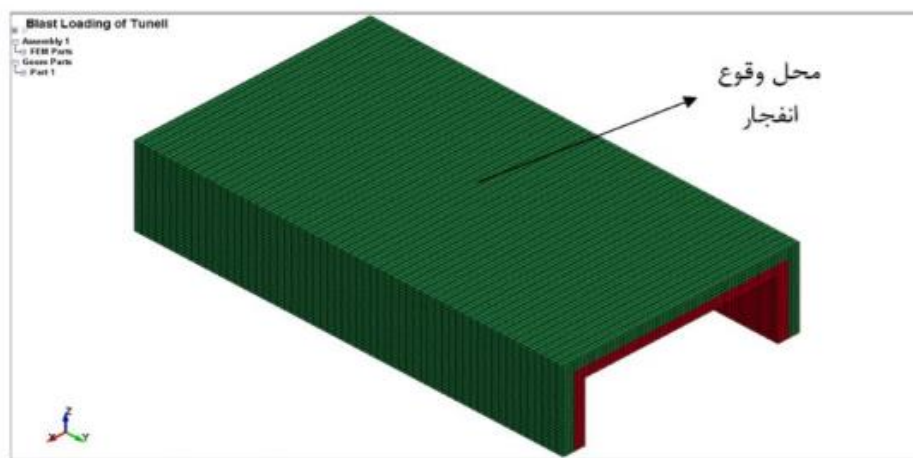
تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار که در شکل (۱) نمایش داده شده است، توسط توابع نمایی فرایدلندر (Friedlander) مطابق رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود [۱۱].

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t-t_a}{t_d}\right) \exp\left(-b \frac{t-t_a}{t_d}\right) \quad (6)$$



شکل ۲. ابعاد هندسی و موقعیت قرارگیری سازه پایین تر از سطح زمین

Fig. 2. Geometric dimensions and location of the structure below the ground level



شکل ۳. مدل سازی و مش بندی سازه

Fig. 3. Modeling and meshing of the structure

عمق ۱ متر مدفون می‌باشد مدل سازی شده و اثر بار انفجار سطحی ناشی از ۱۲ کیلوگرم TNT در روی سطح زمین و دقیقاً در مختصات مرکز هندسی سقف سازه، بر روی آن بررسی خواهد شد. (شکل ۳)

از منبع انفجار کاهش می‌یابد. معمولاً توزیع این بار به صورت گسترده فرض می‌شود که در ارتفاع سازه به صورت خطی تغییر می‌کند. البته در برخی از تحقیقات این بار به صورت بارهای متمرکز در تراز هر ارتفاع (مثلاً تراز هر طبقه ساختمان) قرار داده شده است [۱۱].

۴- انتخاب مواد

سازه تعریف شده برای شبیه‌سازی اثر انفجار از سه بخش تشکیل شده که شامل یک بخش بتنی می‌باشد و بایستی با ورق‌های GFRP تقویت شوند و نیز کل پناهگاه در زیر خاکی به عمق ۱ متر مدفون می‌باشند. برای شبیه‌سازی مساله در نرم‌افزار از مدل ماده‌های بر طبق جدول (۱) استفاده شده است.

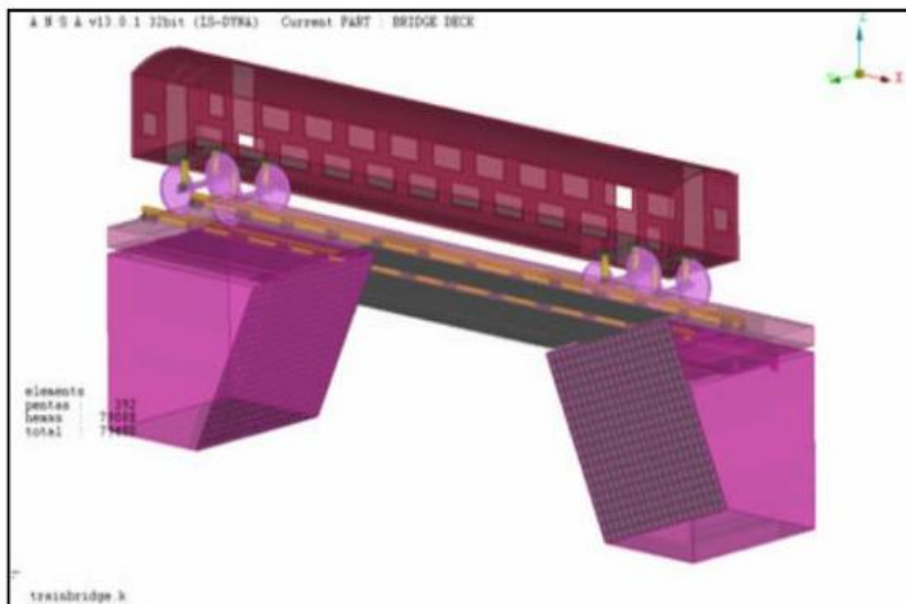
۳- تعریف مساله

همانطور که پژوهش‌های پیشین در زمینه انفجار نشان می‌دهند شکل سازه‌ها در مقاومت آنها در برابر انفجار موثر می‌باشد [۱۳]. اما هدف این پژوهش بررسی نحوه تاثیر استفاده از حالت‌های مختلف جانمایی هندسی و ضخامت ورق‌های GFRP در مقاوم‌سازی سازه‌ها می‌باشد لذا بدین منظور سازه پناهگاه با ابعاد هندسی نشان داده شده در شکل (۲) که در زیر خاکی به

جدول ۱. مدل ماده های انتخاب شده در نرم افزار

Table 1. model of materials selected in the software

مدل ماده استفاده شده	بخش سازه	ردیف
MAT_CSCM_CONCRETE	سازه بتنی	۱
MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC	ورق GFRP	۲
MAT_SOIL_AND_FOAM	خاک	۳



شکل ۴. سطوح انتخاب شده برای اعمال اثر انفجار [۱۰]

Fig. 4. Selected surfaces to apply the explosion effect

۵- روش عددی مورد استفاده در تحلیل

همانطور که در پژوهش‌های پیشین ارائه شده است روش‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی انفجار در نرم افزار LS-DYNA وجود دارد. از بین روش‌های ارائه شده روش کوپل شده دیدگاه اوپلری و لاگرانژی برای شبیه‌سازی مسائلی مناسب است که در آن یک محیط واسط مانند آب بین نقطه انفجار و سازه وجود داشته باشد [۱۴]. ولی برای مسائلی که شبیه‌سازی اثر انفجار بر روی مدل جامدات که در اعمال بارگذاری با تغییر فرم‌های کمتر همراه است (مانند سازه بتنی حجیم)، استفاده از روش دیدگاه لاگرانژی با استفاده از توابع انفجار تعریف شده در نرم‌افزار، روشی مناسب می‌باشد [۱۵]. در پژوهش حاضر نیز از این روش در شبیه‌سازی استفاده خواهد شد [۱۶].

۶- مدل سازی و راست‌آزمایی تحلیل‌ها

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی و تحلیل‌ها و با توجه به کمبود امکانات جهت انجام آزمایشات انفجار و سنجش تنش‌های اعمالی از طرف انفجار بر روی سازه از نتایج مقاله شبیه‌سازی اثر انفجار بر روی عملکرد ریل و پل که از روش لاگرانژی برای استخراج توزیع تنش بر روی ریل‌های فولادی یک پل که مخصوص عبور واگن می‌باشد، استفاده شده است. در پژوهش ذکر شده مدل‌سازی مساله در نرم افزار ANSA صورت گرفته و با استفاده از اعمال موج انفجار ناشی از وقوع انفجار در زیر پل به سطوح نشان داده شده در شکل (۴) شبیه‌سازی صورت گرفته است و نتایج آن در نرم افزار LS-DYNA استخراج شده است [۱۶].

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی پایه بتنی پل [۱۶]

Table 2. Physical properties of bridge concrete foundation

چگالی	$2400 \frac{Kg}{m^3}$
مدول برشی	$1/710 e + 009 \frac{N}{m^2}$
ضریب پواسون	۰/۲
تنش بحرانی شکست	$4/000 e + 007 \frac{N}{m^2}$
درصد تقویت کننده	۸٪
مدول تقویت کننده	$2/180 e + 011 \frac{N}{m^2}$
ضریب پواسون تقویت کننده	۰/۲۸
تنش تسلیم تقویت کننده	$5/10 e + 008 \frac{N}{m^2}$
مدول تانژانت	$2/9 e + 008 \frac{N}{m^2}$

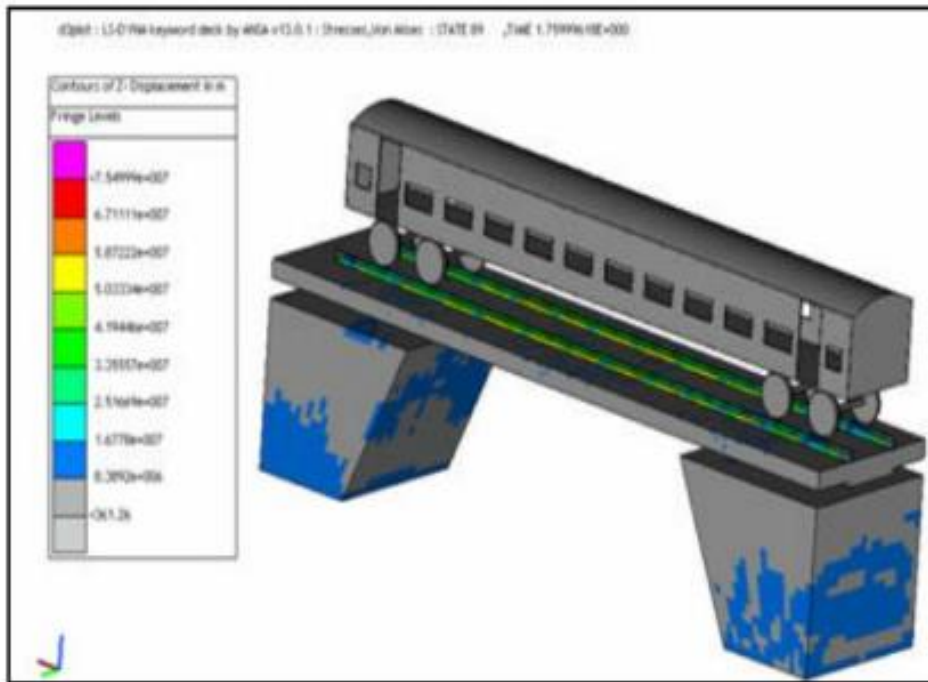
جدول ۳. خصوصیات فیزیکی ریل [۱۰]

Table 3. Physical properties of bridge concrete foundation

چگالی	$7800 \frac{Kg}{m^3}$
مدول یانگ	$1/85 e + 011 \frac{N}{m^2}$
ضریب پواسون	۰/۱۷
تنش تسلیم	$4/000 e + 008 \frac{N}{m^2}$
کرنش تسلیم	۰/۰۲
مدول تانژانت	$1/680 e + 011 \frac{N}{m^2}$

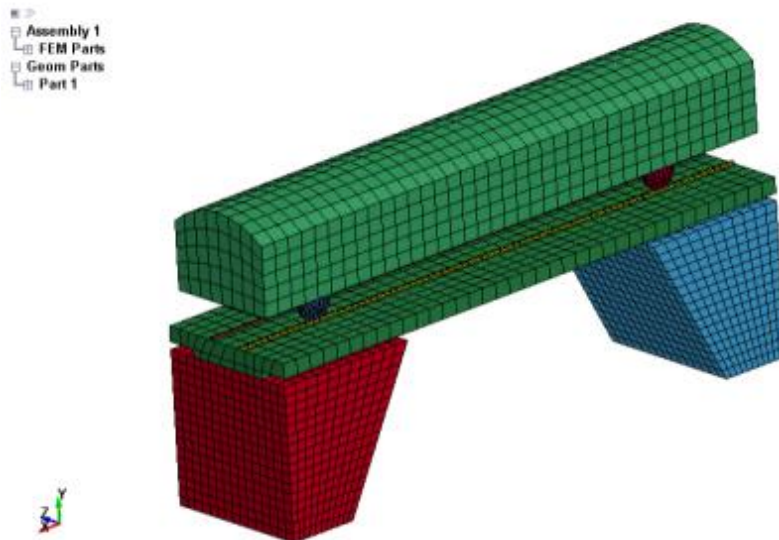
پل. همچنین وزن واگن ۲۲ تن می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط فوق توزیع تنش ایجاد شده بر روی ریل‌ها بصورت شکل (۵) استخراج شده است [۱۶]. با وارد کردن مشخصات هندسی سازه و با تعاریف مدل ماده مورد استفاده برای شبیه‌سازی پایه بتنی پل و مدل ماده مورد استفاده برای شبیه‌سازی ریل با خصوصیات ذکر شده مطابق جداول مقاله صحت سنجی، حالت مشابه مدل‌سازی مسئله در نرم افزار LS-DYNA با توجه به شکل (۶) صورت می‌گیرد.

مدل ماده مورد استفاده برای شبیه‌سازی پایه بتنی پل -MAT_PSU DO_TENSOR (مدل ماده ۱۶) با خصوصیات فیزیکی ذکر شده در جدول (۲) و مدل ماده مورد استفاده برای شبیه‌سازی ماده ریل -MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (مدل ماده ۲۴) با خصوصیات فیزیکی ذکر شده در جدول (۳) می‌باشد [۱۶]. در مطالعه مذکور مشخصات هندسی تحلیل انجام گرفته عبارتند از: طول پل ۲۲ متر، ارتفاع پل ۲/۵ متر، عرض پل ۲/۱ متر و مشخصات بارگذاری انفجاری عبارت است از موج فشار ناشی از انفجار ۱۲ کیلوگرم TNT در زیر



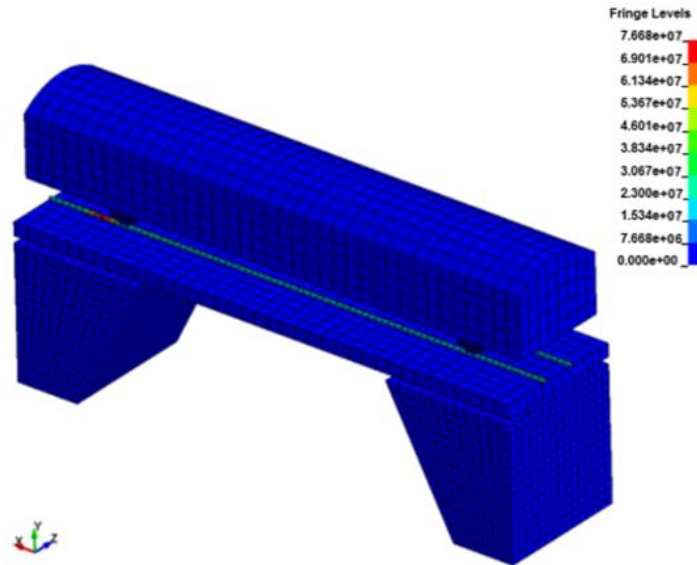
شکل ۵. توزیع تنش ناشی از انفجار در ریل [۱۶]

Fig. 5. Stress distribution contour due to explosion in rail



شکل ۶. مدل سازی قطار و پل جهت اعتبار سنجی

Fig. 6. Train and bridge modeling for validation



شکل ۷ توزیع تنش روی ریل مدلسازی شده.

Fig. 7. Stress distribution contour on the modeled rail

جدول ۴. مشخصات و تعداد المان‌های سازه

Table 4. Specifications and number of structural elements

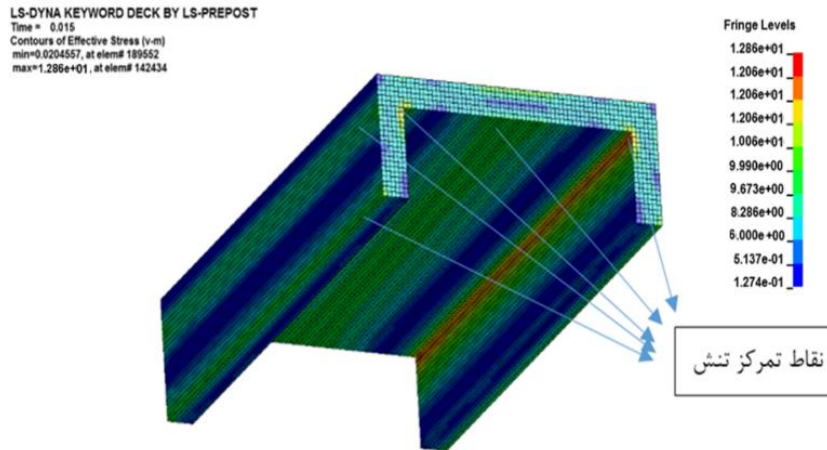
نوع المان	قسمت‌های سازه	تعداد المان	ردیف
Solid Element	بتن	۳۴۵۶۰	۱
Solid Element	ورق GFRP	۴۱۹۹	۲
Solid Element	خاک	۳۸۸۸۰	۳

بسیار کمتر می‌باشد لذا ورق GFRP بایستی به صورت پوسته^۱ مدل شود، و برای مدل‌سازی بتن و خاک از المان سالید^۲ استفاده شده است. به منظور دستیابی به نتایج بهتر نقطه‌های المان‌هایی از مدل‌سازی سه قسمت سازه شامل ورق GFRP، بتن و خاک که بر روی هم افتاده‌اند به هم متصل شده‌اند. تعداد المان‌های هر یک از قسمت‌های سازه در جدول (۴) آورده شده است.

با توجه به توزیع تنش استخراج شده برای حالت مدل‌سازی شده مسئله مورد تحلیل مقاله که برای ریل‌ها نشان داده شده است. کانتور تنش در ریل‌های مقاله استناد شده حداکثر تنش ۲۵ MPa را نشان می‌دهد که این عدد در کانتور تنش حالت مشابه مدل‌سازی شده مطابق شکل (۷) برابر ۲۷/۵ MPa (میانگین تنش ۲۳ MPa تا ۳۰ MPa) که با توجه به شرایط شبیه‌سازی درست و قابل اعتماد می‌باشد.

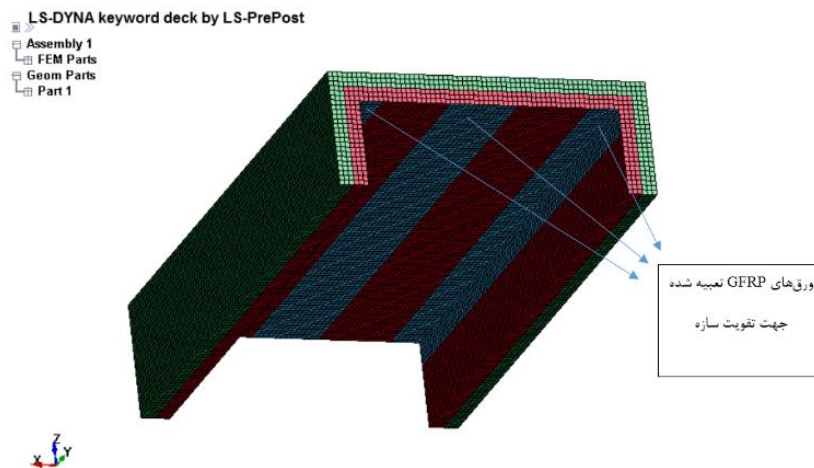
با توجه به این که ضخامت ورق GFRP در مقایسه با سایر ابعاد سازه

1 shell
2 solid



شکل ۸. کانتور تنش در سازه مرجع

Fig. 8. Stress contour in the reference structure



شکل ۹. موقعیت هندسی استفاده از ورق‌های GFRP در سازه

Fig. 9. The geometric position of using GFRP sheets in the structure

۷- کانتور تنش سازه مرجع

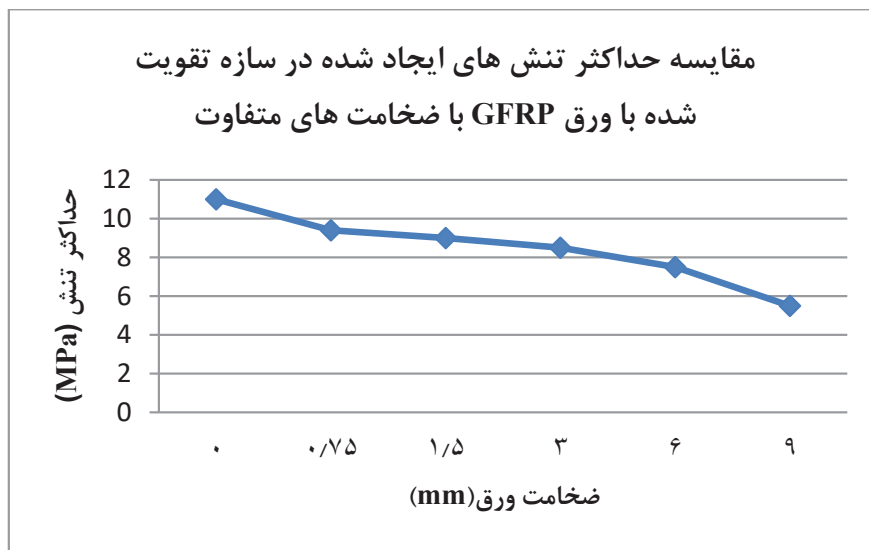
اطراف در تماس می‌باشند به وجود آمده است و جزء هدف ما برای تقویت سازه نمی‌باشد. اما از سازه هدف سه ناحیه وجود دارد که بایستی حتما تقویت شوند. این نواحی عبارتند: از گوشه‌های بالایی داخل سازه و وسط سقف سازه حداکثر تنش در این نواحی بحرانی تقریباً برابر با ۱۱ Mpa می‌باشد که در کانتور تنش نیز نمایش داده شده است.

همانطور که در کانتور تنش سازه مرجع در شکل (۸) نشان داده شده است تنش در چند ناحیه از سازه به دلیل تمرکز تنش افزایش یافته است. از بین این نواحی در گوشه‌های پایینی که در سمت بیرونی سازه هدف قرار دارند، تمرکز تنش به خاطر گیردار فرض کردن دیواره‌های کناری که با خاک

جدول ۵. حداکثر تنش‌های بدست آمده با انواع ضخامت‌ها

Table 5. Maximum stresses obtained with various thicknesses

ردیف	ضخامت ورق تقویت کننده	حداکثر تنش
۱	سازه مرجع بدون تقویت	۱۱ MPa
۲	۰/۷۵	۹ MPa / ۲۰۶
۳	۱/۵	۸ MPa / ۹۷۱
۴	۳	۸ MPa / ۶۴۱
۵	۶	۷ MPa / ۲۱۹
۶	۹	۴ MPa / ۱۸۴۵



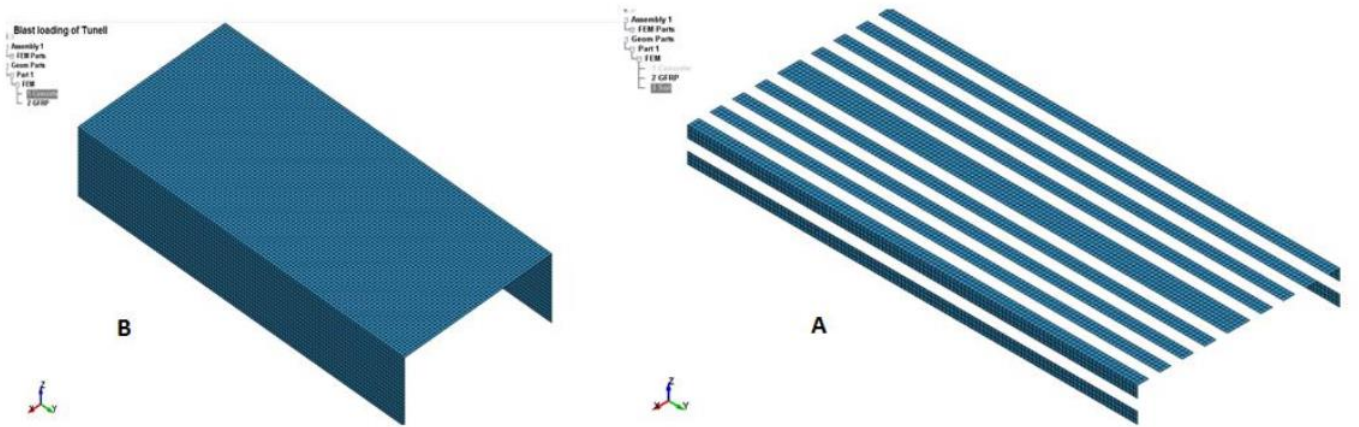
شکل ۱۰. مقایسه حداکثر تنش‌های ایجاد شده در سازه تقویت شده با ضخامت‌های متفاوت ورق

Fig. 10. Comparison of the maximum stresses created in the reinforced structure with different sheet thicknesses

مطابق شکل (۱۰) در نمودار بدست آمده از تحلیل تنش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ورق GFRP با ضخامت ۵ میلی‌متر تنش حداکثر در ناحیه‌های بحرانی سازه را تا ۲ برابر کاهش داده است. همانطور که در نمودار مشخص است تغییر قابل ملاحظه در استفاده از ورق‌های ۰/۷۵ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر اتفاق نمی‌افتد لذا جهت انتخاب ضخامت مناسب ورق‌ها در اجرای پروژه‌های تقویت سازه بایستی پارامتر صرفه اقتصادی نیز مد نظر قرار داده شود.

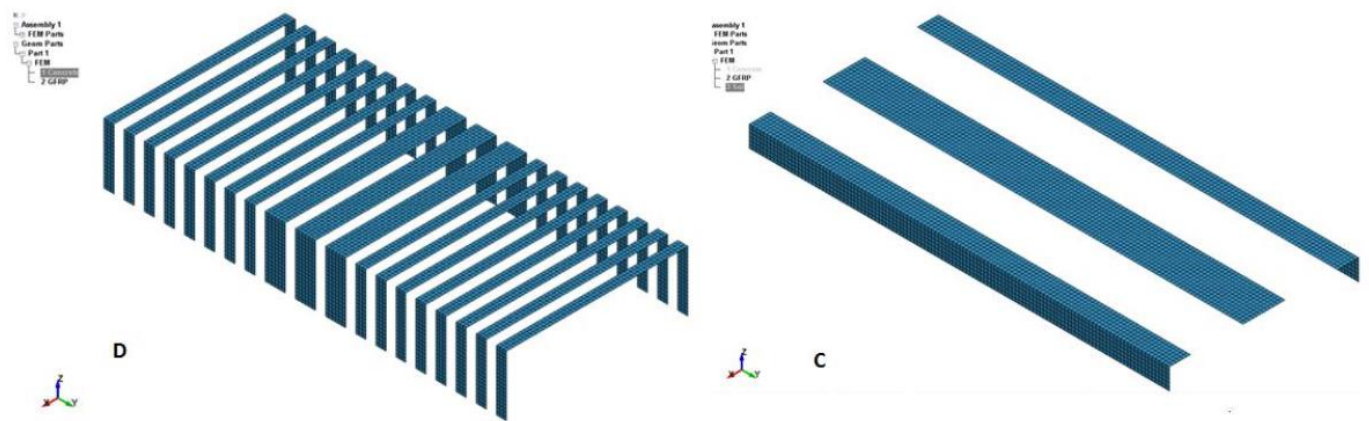
۸- کانتور تنش استخراج شده سازه برای ورق‌های GFRP با ضخامت‌های متفاوت

برای استخراج کانتور تنش، سازه به صورت سه بعدی و با مشخصات المان‌های ذکر شده در جدول (۵) و در پنج ضخامت متفاوت مدل‌سازی شده و پس از اعمال بارگذاری انفجاری، نتایج بدست آمده هم در جدول مذکور و هم به صورت توضیح متنی در ادامه بررسی و همچنین نمودار نتایج تحلیل نیز مطابق شکل (۱۰) استخراج شده است.



شکل ۱۱. جانمایی هندسی حالت اول (A) و دوم (B)

Fig. 11. Geometric placement of the first (A) and second (B) states



شکل ۱۲. جانمایی هندسی حالت سوم (C) و چهارم (D)

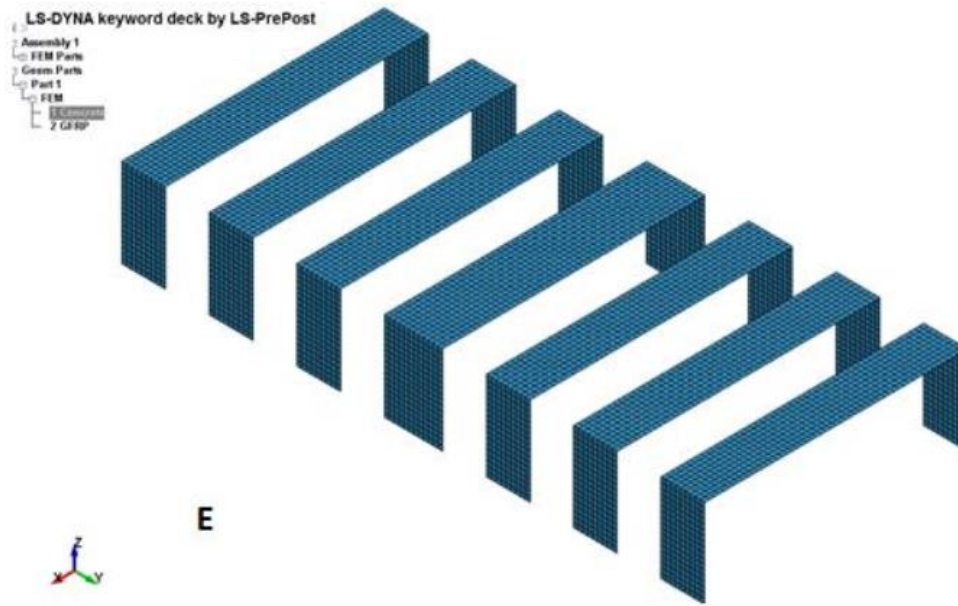
Fig. 12. Geometric placement of the third (C) and fourth (D) modes

همانطور که در شکل (۱۴) مشخص شده است با تغییر حالت از نوع اول تا پنجم حداکثر تنش رو به افزایش می‌باشد و تفاوت چشمگیری از تغییر وضعیت حالت سوم و چهارم مشاهده نمی‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت جانمایی هندسی برای تقویت، حالت یک می‌باشد که حتی از حالت پوشش‌دهی کامل با ورق‌ها نیز نتیجه بهتری بدست می‌دهد که این امر به خاطر اجازه آزاد سازی انرژی کرنشی می‌باشد. با توجه به اینکه نرم‌افزار سازه را با سیستم جرم و فنر معادل سازی می‌کند لذا استفاده از پوششی که در نوارهای باریک دارای فضای خالی می‌باشد (حالت جانمایی هندسی اول) امکان آزاد شدن انرژی تجمع یافته در سازه به خاطر اثر بارگذاری انفجاری

۹- بررسی اثر حالت‌های مختلف جانمایی هندسی ورق‌های GFRP

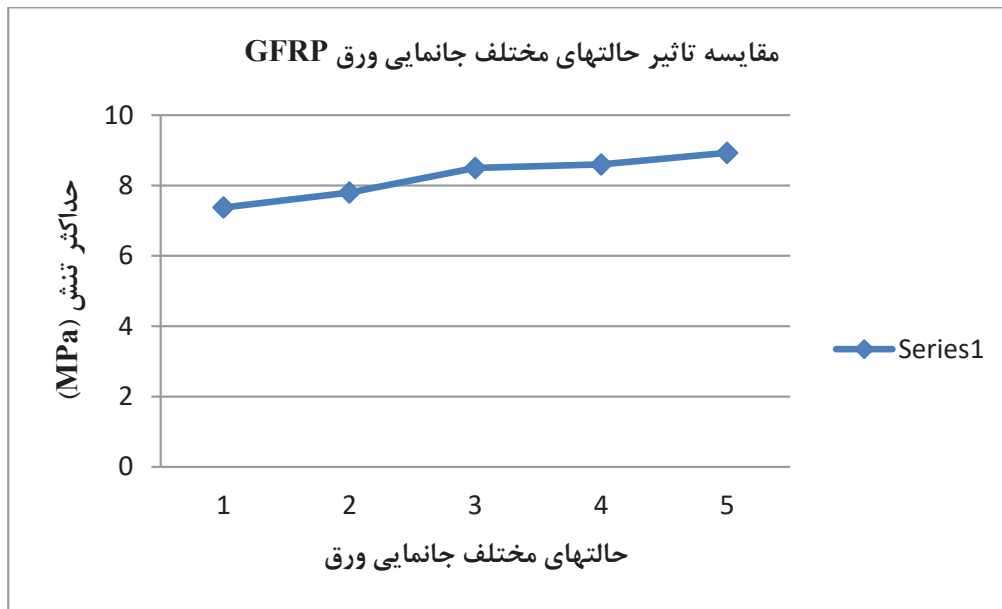
به منظور بررسی اثر حالت‌های مختلف جانمایی هندسی ورق‌های GFRP، پنج حالت متفاوت جانمایی هندسی، در ادامه با توضیحات کامل بررسی شده و کانتور توزیع تنش سازه در هر یک از حالت‌ها به صورت مجزا استخراج شده است.

نتایج بدست آمده برای حداکثر تنش برای حالت‌های مختلف جانمایی هندسی در جدول (۶) تنظیم شده و همچنین در شکل (۱۴) به صورت نمودار آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۳. جانمایی هندسی حالت پنجم (E)

Fig. 13. Geometric placement of the fifth mode (E)



شکل ۱۴. مقایسه تاثیر حالت‌های مختلف جانمایی ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر

Fig. 14. Comparison of the effect of different geometric placement modes of 1 mm thick sheet

جدول ۶. حالت‌های جانمایی هندسی و میانگین حداکثر تنش در هر حالت به همراه حداکثر تغییر مکان

Table 6. Geometric placement modes and average maximum stress in each mode along with maximum displacement

حالات جانمایی هندسی	ابعاد هندسی	میانگین حداکثر تنش	حداکثر تغییر مکان
جانمایی هندسی حالت اول	عرض ورق‌های کناری ۱ متر عرض ورق وسط ۲ متر در تمام طول پناهگاه، ضلع ورق L شکل ۱ متر و در تمام طول پناهگاه، فاصله هر دو ورق ۱ متر	۷/۳۸۰MPa	۰/۱۱۲ mm
جانمایی هندسی حالت دوم	پوشش کامل	۷/۷۲۲MPa	۰/۱۲۶ mm
جانمایی هندسی حالت سوم	ضلع ورق L شکل ۲ متر، عرض ورق وسط ۴ متر و در راستای طول پناهگاه، فاصله ورق‌ها ۵ متر	۸/۶۴۱MPa	۰/۱۴۸ mm
جانمایی هندسی حالت چهارم	عرض ورق‌های کناری ۱ متر و عرض ورق‌های وسطی ۲ متر، و فاصله بین هر نوار ۱ متر، پوشش در راستای عرض پناهگاه	۸/۸۵۶MPa	۰/۱۷۸ mm
جانمایی هندسی حالت پنجم	عرض ورق وسطی ۴ متر، عرض ورق‌های کناری ۳ متر، فاصله ورق‌ها ۳ متر، جانمایی در راستای عرض پناهگاه.	۸/۹۸۸MPa	۰/۲۰۰ mm

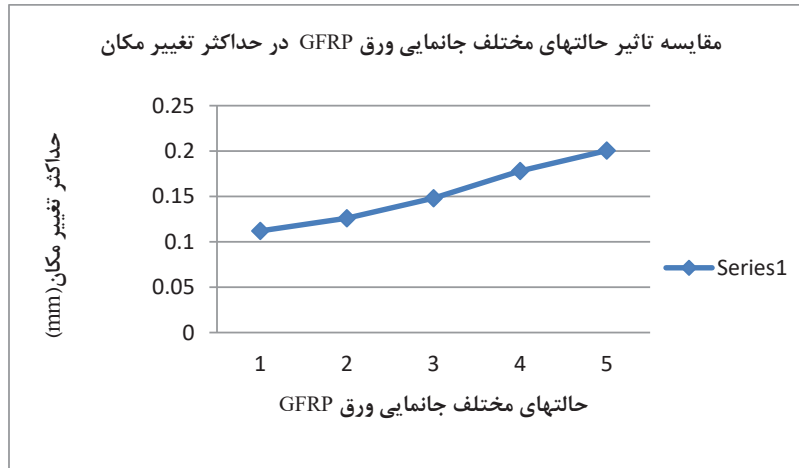
آن و در نقاط متصل شده به سقف می‌باشد لذا حداکثر تغییر مکان سازه نیز در نقطه‌هایی از المان‌ها اتفاق خواهد افتاد که در یکی از این نواحی قرار داشته باشد کانتورهای تغییر مکان سازه در حالت‌های مختلف جانمایی ورق‌ها گواه این مطالب توضیح داده شده می‌باشد. در شکل (۱۵) که نتایج تحلیل به صورت نمودار بیان شده است مقایسه تاثیر پنج حالت جانمایی با هندسه‌های متفاوت و با ابعاد ذکر شده مطابق جدول (۶) نشان می‌دهد که از حالت پنجم جانمایی هندسی به سمت حالت اول جانمایی، با در نظر گرفتن قسمت نزولی نمودار از سمت راست به چپ، به تدریج حداکثر تغییر مکان سازه کمتر می‌شود تا جایی که در حالت اول جانمایی هندسی، پارامتر تغییر مکان در سازه نسبت به حالت پنجم جانمایی هندسی، حداکثر تا مرز ۲ برابر کاهش می‌یابد.

همانطور که در نمودار مشخص است بهترین شکل تقویت برای نتیجه‌گیری کمترین تغییر مکان، بین حالت اول و حالت دوم جانمایی هندسی می‌باشد و بیشترین تقویت مورد نیاز برای شکل حالت سوم و حالت چهارم جانمایی هندسی می‌باشد. شکل (۱۶) و شکل (۱۷) کانتورهای توزیع تنش و تغییر مکان را در حالت‌های مختلف تقویت سازه نمایش می‌دهد.

از طریق کرنش ایجاد شده افزایش می‌یابد. در مواردی از سازه‌ها که امکان ایجاد کرنش در سازه وجود ندارد این امکان وجود نداشته و باعث تمرکز تنش در سازه خواهد شد. اگر حداکثر تنش به وجود آمده در سازه تقویت شده به وسیله ورق GFRP با ضخامت ۳ میلی‌متر با جانمایی هندسی حالت اول را با حداکثر تنش به وجود آمده در سازه تقویت شده به وسیله ورق GFRP با ضخامت ۶ میلی‌متر با جانمایی هندسی حالت سوم، مقایسه کنیم، می‌توان دریافت که با تغییر جانمایی هندسی و با استفاده از نصف ضخامت مورد نظر، حداکثر تنش نزدیک به ضخامت ۶ میلی‌متر بدست می‌آید.

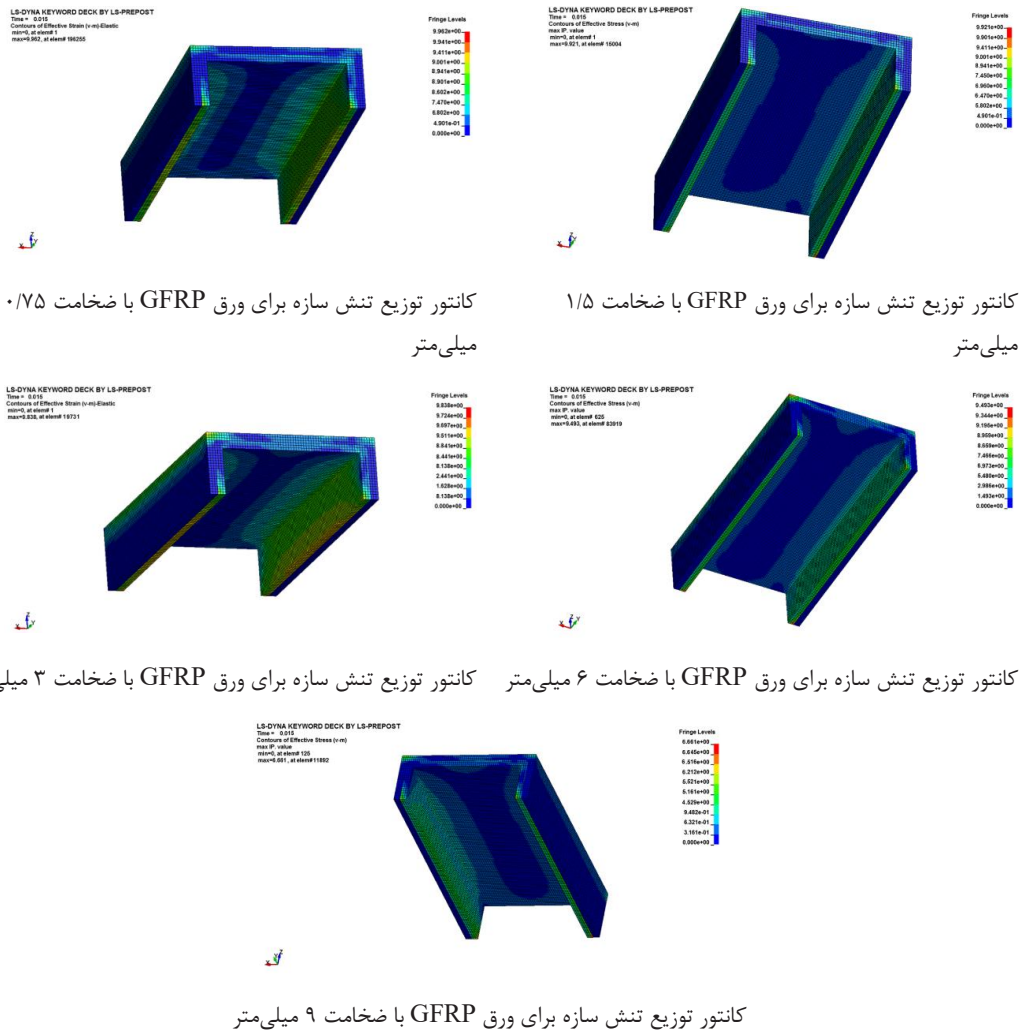
۱۰- بررسی اثر جانمایی هندسی ورق‌ها در حداکثر تغییر مکان سازه

به منظور بررسی اثر جانمایی‌های مختلف ورق GFRP در حداکثر تغییر مکان سازه، در پنج حالت مختلف جانمایی هندسی که برای بررسی اثر حداکثر تنش در ورق GFRP با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد، کانتور توزیع تغییر مکان در سازه استخراج شده و نمودار حداکثر تغییر مکان در پنج حالت ذکر شده رسم خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل تنش سازه مرجع حداکثر تنش در وسط سقف سازه و انتهای دیواره‌های



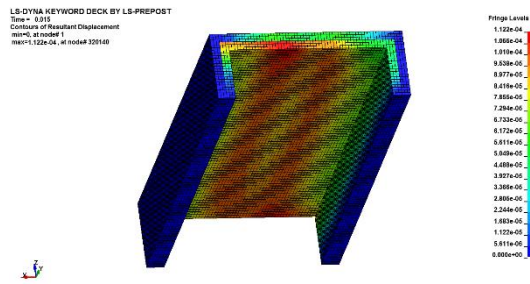
شکل ۱۵. مقایسه تاثیر حالت‌های مختلف جانمایی هندسی ورق GFRP در حداکثر تغییر مکان سازه

Fig. 15. Comparison of the effect of different geometric positioning modes of the GFRP sheet on the maximum displacement of the structure

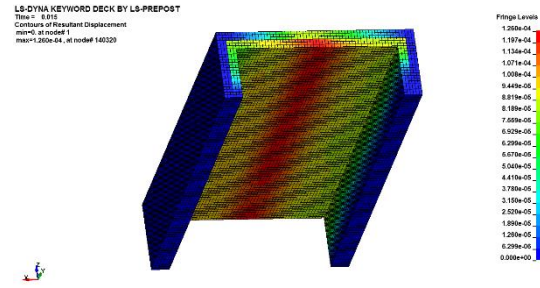


شکل ۱۶. کانتور توزیع تنش در تقویت سازه با ورق‌های GFRP در ضخامت‌های متفاوت

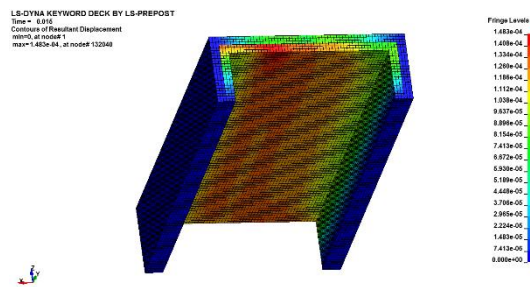
Fig. 16. Stress distribution contour in strengthening the structure with GFRP sheets in different thicknesses



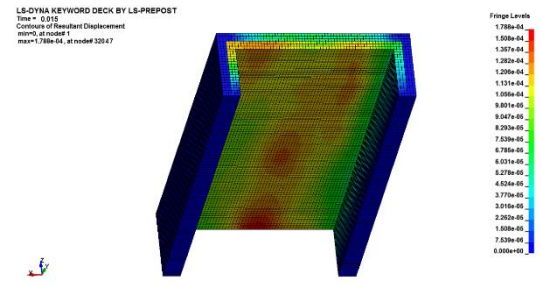
کانتور تغییر مکان سازه برای جانمایی هندسی حالت اول



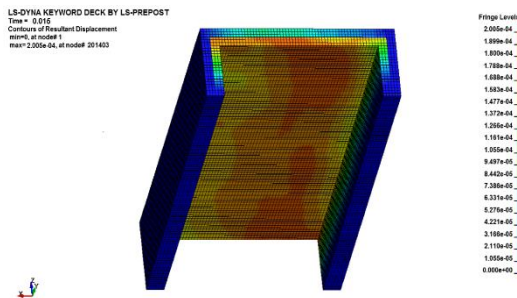
کانتور تغییر مکان سازه برای جانمایی هندسی حالت دوم



کانتور تغییر مکان سازه برای جانمایی هندسی حالت سوم



کانتور تغییر مکان سازه برای جانمایی هندسی حالت چهارم



کانتور تغییر مکان سازه برای جانمایی هندسی حالت پنجم

شکل ۱۷. کانتور تغییر مکان در تقویت سازه با جانمایی های هندسی متفاوت ورق GFRP

Fig. 17. stress distribution Contour in strengthening the structure with different geometric placements of GFRP sheets

۱۱- نتیجه گیری

- بکارگیری حالات مختلف جانمایی هندسی نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار موثر بوده و تغییر مکان بیشینه و حداکثر تنش ایجاد شده در سازه را نزدیک به ۲ برابر کاهش می‌دهد.

- نتایج تحلیل نشان دهنده این است که تنها پوشش نواری سازه در جانمایی هندسی حالت اول با ضخامت ۳ میلی‌متر، بهتر از پوشش کامل دیواره‌های سازه می‌باشد که این امر نیز به دلیل آزاد سازی انرژی کرنشی می‌باشد.

از بررسی رفتار دیواره‌های بتنی تقویت شده پناهگاه تونل با ورق‌های GFRP در برابر انفجار سطحی بوسیله نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA، نتایج زیر قابل بیان می‌باشد.

- مقاوم‌سازی با استفاده از ضخامت‌های مختلف ورق‌های GFRP تاثیر قابل توجهی بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجاری داشته و حالت بهینه ضخامت (ضخامت ۹ میلی‌متر) حداکثر تنش سازه را تا مرز ۲ برابر کاهش می‌دهد.

- [6] G.S. Urgessa, T. Arciszewski, Blast response comparison of multiple steel frame connections, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(7) (2011) 668-675.
- [7] A.S. Daryan, M. Ziaei, S.A. Sadrnejad, The behavior of top and seat bolted angle connections under blast loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10) (2011) 1463-1474.
- [8] C.W. Kauffman, *Explosion hazards and evaluation*: Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ, and Strehlow, RA, Elsevier, Amsterdam, 1983, xxvii+ 807 pp. plus charts, \$159.50, (1985).
- [9] H.L. Brode, Numerical solutions of spherical blast waves, *Journal of Applied physics*, 26(6) (1955) 766-775.
- [10] M. Eskandari, A. Alidoosti, Investigating the Factors That Reduce the Urban Gas Pipeline Vulnerability to Explosion Threats, *Journal of Disaster and Emergency Research*, (2019).
- [11] S. Hosseinipoor, R. Gholamrezaei, M. Akibarian, Study of explosive resistance scaling on reinforced concrete slab under loading, under free-air burst blast, *Indian J. Sci. Res*, 1(2) (2014) 650-659.
- [12] G. Ma, H. Zhou, Y. Lu, K. Chong, In-structure shock of underground structures: A theoretical approach, *Engineering Structures*, 32(12) (2010) 3836-3844.
- [13] A.A.P. Rahim, M. Bitarafan, S.L. Arefi, Evaluation of types of shapes of building roof against explosion, *International Journal of Engineering and Technology*, 5(1) (2013) 1.
- [14] Z.S. Tabatabaei, J.S. Volz, A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE, in: 12th International LS-DYNA Users Conference, 2012, pp. 1-10.
- [15] S.J. Amir Saedi Dariyan, *Blast and Impact Engineering with AUTODYN Applications*, Dariyan Publication, Tehran, 2012(in persian).
- [16] O. Hall, *PROGRAMME & ABSTRACTS*, (2009).

- نتایج مطالعه حاضر نشانگر این امر می‌باشد که افزایش ضخامت ورق تأثیری مستقیم در کاهش حداکثر تنش ایجاد شده در سازه خواهد داشت.
- در مطالعه حاضر دو پارامتر ضخامت و جانمایی‌های مختلف هندسی مورد بحث قرار گرفت که از این بین ضخامت ۹ میلی‌متر و جانمایی هندسی نواری در راستای طول پناهگاه (جانمایی هندسی حالت اول) بهترین شرایط برای تقویت سازه را نتیجه می‌دهند.
- با انتخاب جانمایی هندسی حالت اول در ورق‌های GFRP با ضخامت ۳ میلی‌متر، حداکثر تنش را می‌توان تا نزدیکی حداکثر تنش ورق‌های با ضخامت ۹ میلی‌متر با جانمایی هندسی حالت سوم، کاهش داد.
- نتایج مطالعات نشانگر این امر است که تقویت سازه از سمت داخل پناهگاه نتایج بهتری را رقم خواهد زد.
- تنوع مواد در نرم‌افزار LS-DYNA رابطه مستقیمی با بدست آوردن جواب‌های دقیق‌تر دارد.
- ساخت سازه‌های زیرزمینی مدفون و نیمه مدفون در مقایسه با سازه‌های روی زمین دارای این مزیت است که می‌توان از پتانسیل خاک اطراف سازه به عنوان یک تکیه‌گاه مناسب و پارامتری که در کاهش اثرات انفجاری نقش قابل توجهی دارد، بهره برد.

منابع

- [1] J.F. Baker, E.L. Williams, D. Lax, The Design of Framed Buildings against High-Explosive Bombs, in: *The civil engineer in war: A symposium of papers on war-time engineering problems*, Thomas Telford Ltd, 1948, pp. 3: 80-112.
- [2] H.L. Brode, Blast wave from a spherical charge, *The Physics of Fluids*, 2(2) (1959) 217-229.
- [3] H. Lamb, *Hydrodynamics*, Bull. Amer. Math. Soc, 4 (1897) 73-80.
- [4] G. Taylor, *The Propagation And Decay Of Blast Waves*,” UK Home Office, ARP Dept, in, RC, 1939.
- [5] N. Gebbeken, T. Döge, Explosion protection—architectural design, urban planning and landscape planning, *International Journal of Protective Structures*, 1(1) (2010) 1-21.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. pourtahmaseb, A. pourtaghi Marzrood, N. hoveydaei, Investigation of the effect of surface explosion on the concrete walls of the war shelter reinforced with GFRP sheets , Amirkabir J. Civil Eng., 55(5) (2023) 967-984.

DOI: [10.22060/ceej.2023.5116.7630](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.5116.7630)



