

## Assessment of Aircraft Hangar Vulnerability Under Blast Load and Its Retrofitting Using FRP Strips and Auxiliary Frame

Mahdi Yazdani<sup>1</sup>, Seyed Ahmad Hosseini<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. student, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Given the increasing military threats, adhering to passive defense requirements in infrastructure is inevitable. Among the important infrastructures, aircraft hangars, due to the significant investments they house, can be targeted as strategic objectives in military and terrorist operations. Therefore, this study evaluates the vulnerability of aircraft hangars to explosions. The ABAQUS software is used to model the response of the aircraft hangar to blast loads. Additionally, the masonry wall is modeled using the macro method, and for modeling masonry materials, steel sections, and FRP strips, the damaged concrete plasticity model, Johnson-Cook model, and Hashin model are used, respectively. In this research, after validating the proposed numerical model with a credible study, the response of structural and non-structural components in both unreinforced and FRP-reinforced states is examined. As expected, the non-structural components (masonry wall) of the aircraft hangar, unlike its structural components, performed poorly against the explosion and lost their stability. To reinforce them, FRP sheets were adhered to the walls to evaluate their impact on the behavior of the masonry wall and the effect of various parameters such as fiber type, coverage percentage, reinforced side of the wall, width, thickness, and angle of strips. The results showed that the used FRP sheets could reduce wall deformations and significantly increase the energy dissipation from the explosion wave. Ultimately, the proposed optimal arrangement is the use of FRP strips with carbon fibers horizontally, with a thickness of 1 mm, width of 20 cm, and 50% coverage of the wall surface on both sides.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 20 September 2024

Revise Date: 16 November 2024

Accept Date: 28 November 2024

### Keywords:

Aircraft Hangar

Blast

Retrofitting

FRP Composite

Numerical Modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.476828.3512](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.476828.3512)

\*Corresponding author: Seyed Ahmad Hosseini

Email address: [hosseini@mut.ac.ir](mailto:hosseini@mut.ac.ir)

## ارزیابی آسیب پذیری آشیانه هواپیما تحت بار انفجار و مقاوم سازی آن به کمک نوارهای FRP و قاب الحاقی

مهدی یزدانی<sup>۱</sup>، سیداحمد حسینی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### چکیده

با توجه به تهدیدات روزافزون نظامی از طرف دشمن، رعایت الزامات پدافند غیرعامل در زیرساخت‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از میان سازه‌های مهم و زیرساختی، آشیانه‌های تعمیر و نگهداری هواپیما با توجه به سرمایه عظیمی که در خود جای داده‌اند می‌توانند به عنوان یک هدف استراتژیک مورد آماج عملیات نظامی و تروریستی قرار گیرند. فلذا، در تحقیق حاضر ارزیابی آسیب‌پذیری آشیانه هواپیما در برابر انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت مدل‌سازی پاسخ آشیانه هواپیما در برابر بار انفجار، از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی دیوار بنایی به روش ماکرو انجام شده و جهت مدل‌سازی مصالح بنایی، مقاطع فولادی و نوارهای پلیمری مسلح‌شده با الیاف (FRP)، به ترتیب از مدل‌های خمیری بتن آسیب دیده، جانسون کوک و هشین استفاده شده است. در این تحقیق، پس از صحت‌سنجی مدل عددی پیشنهادی با یک پژوهش معتبر، پاسخ اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در دو حالت تقویت‌نشده و تقویت‌شده با پوشش FRP، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اجزای غیرسازه‌ای (دیوار بنایی) آشیانه هواپیما برعکس اجزای سازه‌ای آن در برابر انفجار عملکرد ضعیفی داشته و پایداری خود را از دست دادند که برای مقاوم‌سازی آن‌ها، ورق‌های FRP به دیوارها چسبانده شد تا تاثیر آن‌ها بر رفتار دیوار بنایی و اثر پارامترهای مختلف نظیر جنس الیاف، درصد پوشش، سمت تقویت‌شده دیوار، عرض، ضخامت و زاویه نوار مورد ارزیابی قرار داده شود. نتایج به دست آمده نشان داد که ورق‌های FRP مورد استفاده قادر به کاهش تغییرشکل‌های دیوار و نیز افزایش قابل توجه میزان استهلاک انرژی حاصل از موج انفجار می‌باشند و در نهایت آرایش بهینه پیشنهادی، استفاده از نوارهای FRP با الیاف کربن به صورت افقی، با ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و پوشش ۵۰ درصد سطح دیوار و در هر دو وجه آن می‌باشد.

کلمات کلیدی: آشیانه هواپیما، انفجار، مقاوم‌سازی، کامپوزیت FRP، مدل‌سازی عددی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.476828.3512">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.476828.3512</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.476828.3512">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.476828.3512</a>	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۹/۰۸	۱۴۰۳/۰۹/۰۸	۱۴۰۳/۰۸/۲۶	۱۴۰۳/۰۶/۳۰
سید احمد حسینی hoseini@mut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

با توجه به گسترش تهدیدات انسان‌ساخت نظیر حملات نظامی و اقدامات تروریستی در جهان، بررسی مکانیزم‌های دفاع غیرعامل در جنگ‌های نامتقارن امروزی در جهت مقابله با تهاجمات خصمانه و تقلیل خسارات، موضوعی اساسی است که وسعت و گستره آن، تمامی زیرساخت‌ها و مراکز حیاتی و حساس را در برمی‌گیرد. علاوه بر این، زیرساخت‌های مواصلاتی به دلیل اهمیت اقتصادی و اجتماعی بالایی که دارند از حیث امکان لجستیکی برای مقاصد نظامی اهمیت ویژه‌ای دارند. یک از زیرساخت‌های مواصلاتی حساس، فرودگاه‌ها می‌باشند که با نگرش به اقدامات خرابکارانه گذشته، همواره یکی از اهداف مدنظر دشمنان بوده و در استراتژی انهدام مراکز ثقل واردن در حلقه سوم قرار دارند و در صورت اختلال در عملکرد و یا آسیب به کالبد آن‌ها، امکان حمل‌ونقل، کمک‌رسانی و پشتیبانی از کشور مورد تهاجم، سلب و موجب خسارت‌های هنگفت مادی و معنوی می‌گردد [۱، ۲].

آشیانه هواپیما به عنوان یکی از سازه‌های حساس فرودگاهی، به محل نگهداری هواپیما و یا بالگرد گفته می‌شود که به‌طور کلی موجب می‌گردد هواپیما از تابش مستقیم نور خورشید و از آسیب‌های آن بر روی بدنه و یا دیگر اجزا در امان بماند و محل نگهداری آن‌ها مخفی بماند، هم‌چنین فضایی جهت تعمیر و یا اورهال کردن هواپیما را مهیا می‌سازد. در صورت خرابی این سازه‌ها خسارات جبران‌ناپذیر و تلفات مالی و جانی زیادی به همراه خواهد داشت. آشیانه‌ها به دلیل اهمیت زیادی که دارند همواره جزء اهداف جذاب برای حملات هوایی، تروریستی و خرابکارانه می‌باشند لذا پاسخ این سازه‌ها در برابر تهدیدات تروریستی و به خصوص تحت بارگذاری انفجار می‌بایست مورد کنکاش قرار گیرد تا نقاط ضعف آن‌ها بهتر مشخص گردد. در این پژوهش رفتار سازه مذکور تحت اثر بار انفجاری مورد توجه قرار گرفته است و در ادامه راهکارهایی برای مقاوم‌سازی این سازه‌ها بیان شده است.

## ۱-۱- هدف تحقیق

- ۱- بررسی عملکرد سازه آشیانه هواپیما تحت موج ناشی از انفجار.
- ۲- بررسی پاسخ دیوارهای بنایی آشیانه هواپیما تحت موج ناشی از انفجار و ارزیابی نقاط آسیب‌پذیر.
- ۳- بررسی اثر پارامترهای مختلف مقاوم‌سازی با کمک پوشش FRP (جنس الیاف، درصد پوشش، سمت تقویت‌شده دیوار، عرض، ضخامت و زاویه نوار) از لحاظ تغییر شکل و استهلاک انرژی انفجار.
- ۴- بررسی تاثیر آرایش‌های مختلف نوارهای FRP در بهبود پاسخ دیوار غیرسازه‌ای در برابر انفجار و انتخاب بهترین چیدمان.

## ۱-۲- تاریخچه مطالعات

طبق بررسی انجام‌شده در این تحقیق، پاسخ اجزای سازه‌ای یا غیرسازه‌ای آشیانه هواپیما و سازه‌های مشابه آن مثل سوله صنعتی در برابر انفجار، تاکنون مورد بررسی تفصیلی توسط محققین و مراجع معتبر قرار نگرفته است و تحقیقات انجام‌شده در این حوزه بیشتر در همایش‌ها و کنفرانس‌های علمی ارائه گردیده است که در ادامه به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود. لالی و همکاران [۳] در یک تحقیق با عنوان بررسی اثر انفجار بر روی آشیانه هواپیماهای نظامی و مقاوم‌سازی آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود، به این نتیجه رسیدند که می‌توان با استفاده از مواد کامپوزیتی FRP علاوه بر آن که میزان مقاومت در برابر انفجار را افزایش داد، انسجام کلی سازه را نیز در برابر سایر بارهای دینامیکی وارد بر سازه بهبود بخشید. اعلا و مهیار [۴] در یک پژوهش اثر انفجار بر روی آشیانه هواپیما را در نواحی کویری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تاثیر خاک مناطق کویری بر پاسخ سازه و توزیع تنش و خرابی اعضای آن در برابر بار انفجار مورد ارزیابی قرار گرفت. صالحی [۵] نیز تاثیر بار انفجار بر روی سوله صنعتی، که از نظر سازه‌ای عملکردی نزدیک به آشیانه هواپیما دارد، را بررسی کرد. او پس از طراحی و تحلیل اولیه سازه با نرم‌افزار SAP 2000، نقاط ضعف آن را در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS شناسایی کرد و تاثیر ورق‌های فولادی پوششی در کاهش خرابی سقف و دیوارها را مورد ارزیابی قرار داد. در یک پژوهش دیگر، بیگری و همکاران [۶] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های صنعتی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. آن‌ها تأثیر بارگذاری انفجاری داخلی و خارجی بر عملکرد اتصالات تیر به ستون در سازه‌های فلزی سوله‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بالای ناشی از انفجار و مدل‌سازی ماده منفجره با استفاده مدل ConWep در نرم‌افزار انجام گرفت. ماده

منفجره به صورت وزن معادل TNT مدل سازی گردید. سپس به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی و عملکرد این نوع اتصالات پرداخته شد. در نهایت با استفاده از نمودارهای مناسبی تأثیر پارامترهایی از قبیل وزن و فاصله ماده منفجره بر رفتار غیرخطی، عملکرد و استحکام اتصالات مورد مطالعه قرار گرفت.

با پیدایش مصالح FRP و هم چنین تولید چسب اپوکسی قوی، تکنولوژی مقاوم سازی جدید و پیشرفته ای برای تعمیر و تقویت سازه های بنایی پدید آمده است. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی تقویت اعضا با کمک مواد FRP با الیاف کربن [۷-۹]، الیاف شیشه [۱۰-۱۲]، الیاف بازالت [۱۳، ۱۴] و الیاف آرامید [۱۵-۱۷] انجام شده است. مینافو و همکاران [۱۸] اثر استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف را به عنوان یک استراتژی مقاوم سازی برای بهبود مقاومت در برابر انفجار در دیوارها بررسی کردند که افزایش قابل توجهی در استحکام و سختی و کاهش قابل توجهی در حداکثر جابجایی نمونه های تقویت شده با FRP مشاهده شد. این امر با تقویت رفتار خارج از صفحه دیوارها به دست می آید که برای مقاومت در برابر فشارهای انفجار بسیار مهم است. در یک پژوهش دیگر، بررسی های جکسون و همکاران [۱۹] نشان می دهد که حفظ عملکرد ترکیبی بین FRP و بتن به طور قابل توجهی به استحکام پیوند بین دیوار و پوشش FRP و همچنین تعداد لایه های آن بستگی دارد و نتایج نشان داد که تقویت دیوار بتن آرمه با FRP به طور موثری ظرفیت آن را برای مقاومت در برابر بارهای انفجار افزایش می دهد. کونک و همکاران [۲۰] در یک پژوهش عددی نتیجه گرفتند که لایه های FRP می توانند به عنوان یک سیستم ضربه گیر عمل می کنند و از پرتاب شدن آوارهای بتن در حین انفجار جلوگیری می کنند. این نه تنها از یکپارچگی سازه محافظت می کند، بلکه خطر آسیب ناشی از آوارهای پرتاب شده را نیز به حداقل می رساند.

### ۱-۳- نوآوری تحقیق

در تحقیقات گذشته، پاسخ سازه های بنایی در برابر بار انفجار و مقاوم سازی آن با استفاده از ورق های FRP مورد بررسی اجمالی قرار گرفته است؛ منتها تأثیر توأمان آرایش های مختلف نوارهای FRP و قاب الحاقی، تاکنون در این دیوارها بررسی نشده است. در این پژوهش برای اولین بار تأثیر پارامترهای مختلف ورق FRP نظیر جنس الیاف، درصد پوشش، سمت تقویت شده دیوار، عرض، ضخامت و زاویه نوار به همراه تأثیر قاب الحاقی مورد ارزیابی قرار می گیرد. هم چنین در شکل ۱ روند کلی تحقیق حاضر قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱- روند کلی در این پژوهش

## ۲- مبانی نظری

### ۱-۲- دیوار بنایی

ظرفیت خارج از صفحه دیوارها مخصوصاً دیوارهای بنایی تقویت نشده<sup>۱</sup> (URM) محدود است و هنگام انفجار تحت فشار بسیار زیادی قرار می گیرند. مکانیزم خرابی خارج از صفحه دیوارهای غیرسازه ای علاوه بر این که پایداری کلی سازه را به خطر می اندازد، سبب پرتاب شدن آوار به داخل یا خارج از سازه می شود [۲۱]. به طور کلی پیش بینی پاسخ خارج از صفحه دیوارهای غیرسازه ای به امواج انفجار

<sup>1</sup> Unreinforced Masonry

بسیار چالش برانگیز است زیرا خمش زیادی را همراه با تکان خوردن تجربه می‌کنند [۲۲, ۲۳] که باعث شده پاسخ این دیوارها تحت بارگذاری انفجار پیچیده و غیرخطی باشد و به هندسه دیوار، خواص مصالح بنایی و هم‌چنین شرایط مرزی و بارگذاری بستگی داشته باشد [۲۴, ۲۱]. البته مکانیزم‌های دیگری هم برای خرابی دیوارهای غیرسازه‌ای تحت بار انفجار گزارش شده‌است مانند شکست برشی در تکیه‌گاه‌ها [۲۵] و در برخی شرایط بلندشدن و جداشدن دیوار [۲۶].

دیوار بنایی یک ماده مرکب از بلوک (بلوک سیمانی، آجر فشاری و ...) و ملات است که به دلیل کنار هم قرار گرفتن این مواد، رفتاری ناهمگن و ناهمسانگرد دارد. رفتار غیرخطی بلوک، ملات و اندرکنش بلوک-ملات و هم‌چنین بارگذاری با نرخ کرنش بالا پیچیدگی‌های بررسی پاسخ دیوار بنایی را چندین برابر کرده‌است [۲۷-۲۹]. بنابراین بسیاری از پژوهشگران با یک استراتژی ساده‌کننده، دیوار بنایی را به روش ماکرو مدل‌سازی می‌کنند. مدل‌های ماکرو مدل‌هایی هستند که بلوک‌ها و ملات در یک ماده ارتوتروپیک معادل ادغام می‌شوند و برهم‌کنش آن‌ها با استفاده از یک قانون ساختاری همگن فراخوانی می‌شود. هم‌چنین خواص ماده همگن‌شده معادل را می‌توان با استفاده از روابط همگن‌سازی [۳۰] به دست آورد. استفاده از مدل‌های ماکرو، اطلاعاتی در مورد رفتار بین اجزای بنایی ارائه نمی‌کند، اما یک پیش‌بینی قابل اعتماد از رفتار کلی مصالح بنایی را برای هزینه محاسباتی بسیار معقول‌تر به دست می‌دهد [۳۱, ۳۲].

## ۲-۱- کامپوزیت FRP

مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ تقویت‌کننده‌ها یا الیاف (فیبر) و رزین (ماده زمینه). الیاف که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در مصالح FRP محسوب می‌شوند. بر اساس معیار هشین چهار نوع مود گسیختگی شامل: کشش در الیاف، فشار در الیاف، کشش در ماتریس و فشار در ماتریس بر اساس روابط ۱ تا ۴ محتمل بوده و هرگاه تنش ایجادشده در هریک از قسمت‌های الیاف و ماتریس تحت اثر فشار یا کشش، مساوی یا بیشتر مقدار یک شود مکانیزم خرابی آغاز می‌گردد [۳۳].

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^C}\right)^2 \quad (2)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه‌ها  $F_f^c$  و  $F_f^t$  به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در الیاف و  $F_m^c$  و  $F_m^t$  نیز به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در ماتریس می‌باشد. هم‌چنین اعضای تانسور تنش مؤثر،  $X^C$  و  $X^T$  مقاومت کششی و فشاری در راستای طولی،  $Y^C$  و  $Y^T$  مقاومت کششی و فشاری در جهت الیاف عرضی و  $S^L$  و  $S^T$  مقاومت برشی در جهت طولی و عرضی می‌باشند. زمانی که تنش برابر یا بیشتر از یکی از مقدارهای رابطه ۱ تا ۴ شد مکانیزم خرابی آغاز می‌گردد و با بارگذاری بیشتر، مکانیزم کاهش سختی مصالح شروع می‌شود و پارامترهای خرابی به عنوان کنترل‌کننده کاهش سختی از مقدار صفر (بدون خرابی) شروع شده و تا مقدار یک (خرابی کامل) ادامه می‌یابند.

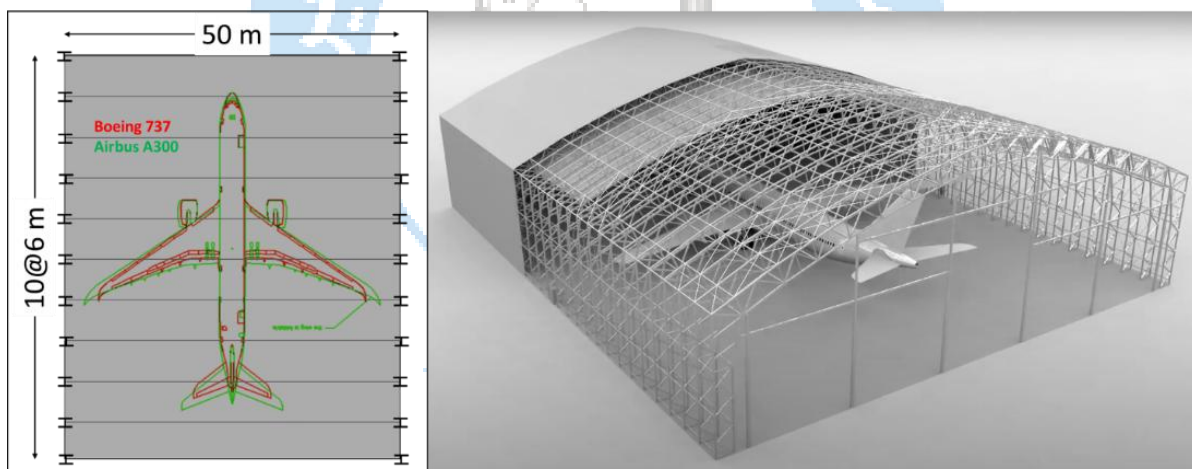
## ۳- روش تحقیق

## ۳-۱- بیان مسئله

در این پژوهش، یک آشیانه که مخصوص تعمیر و نگهداری هواپیماهای Airbus A320-200 و Boeing 737 می‌باشد، تحت بار انفجار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورت لزوم تقویت خواهد شد. جهت نیل به این مقصود، سازه مذکور ابتدا باید در برابر بار لرزه‌ای طراحی شود. در ادامه، سازه طراحی شده در برابر بار انفجاری تحلیل می‌شود و پاسخ قاب‌های فولادی و همچنین میان‌قاب‌های آن (دیوارهای بنایی غیرمسلح) استخراج می‌شود. در ادامه، از آنجایی که انتظار می‌رود برخی از اعضاء آشیانه هواپیما عملکرد ضعیفی از خود نشان دهند، به تقویت آن‌ها با استفاده از پوشش FRP و تحت پارامترهای مختلف (مثل جنس الیاف، درصد پوشش، سمت تقویت شده دیوار، عرض، ضخامت و زاویه نوار) پرداخته می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن مقدار وزنی ماده منفجره‌ای که احتمال می‌رود در یک اقدام خرابکارانه از طریق کوله‌پشتی، کیف یا کیسه حمل شود، مقدار ۵۰ کیلوگرم معادل ماده منفجره TNT در نظر گرفته می‌شود [۳۴]. همچنین، فاصله انفجار برابر با ۵ متر انتخاب می‌شود که برای اتخاذ تدابیر امنیتی و تمهیدات بازدارنده نظیر حصارکشی و ایجاد محوطه قرق، از نظر اقتصادی به صرفه باشد. نهایتاً و پس از تحلیل دیوارهای بنایی مسلح شده با انواع پوشش‌های FRP، بهترین آرایش برای پوشش FRP انتخاب می‌شود.

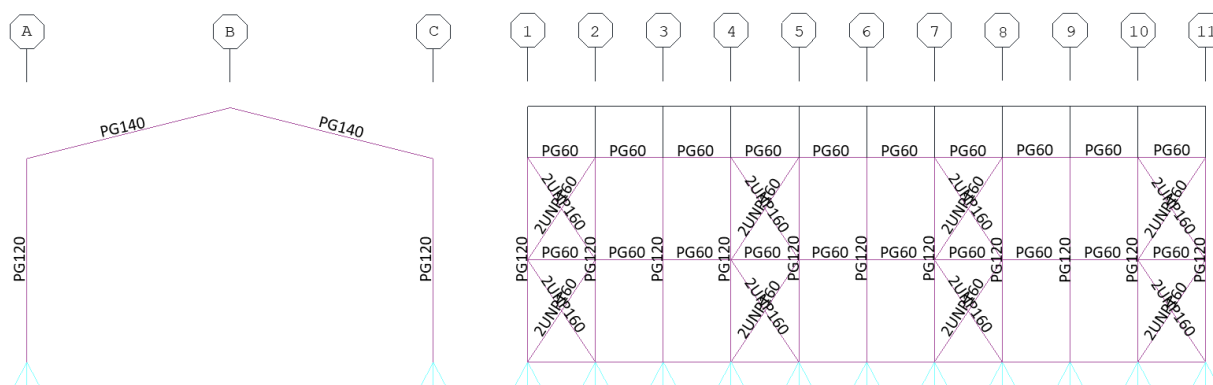
## ۳-۲- طراحی تحت بار زلزله

همانند شکل ۲، آشیانه مورد مطالعه، یک سوله به طول ۶۰ متر و دهانه ۵۰ متر با ارتفاع تاج و شانه به ترتیب ۱۸ و ۱۳.۵ متر، که دیوارهایی از جنس بلوک سیمانی میان‌قاب‌های آن را تشکیل می‌دهند، می‌باشد.



شکل ۲- تصویر شماتیک و پلان آشیانه هواپیما

جهت طراحی لرزه‌ای سازه آشیانه هواپیما، سازه مذکور بر اساس آیین‌نامه بارگذاری مقررات ملی ساختمان (ویرایش چهارم مبحث ۶)، ضوابط طرح و محاسبه ساختمان‌های صنعتی فولادی (نشریه ۳۲۵) و ویرایش چهارم آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰، در نرم‌افزار SAP 2000 مورد تحلیل و طراحی قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۳، سازه آشیانه هواپیما از ۱۱ قاب فولادی به فواصل ۶ متر تشکیل شده‌است که چهار میان‌قاب آن در دیوار و سقف از مهاربندهای ضربدری برای تحمل بار جانبی استفاده شده‌است. ابعاد مقاطع خروجی از نرم‌افزار نیز در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳- مقاطع طراحی شده در نرم افزار SAP 2000

### ۳-۳- تحلیل تحت بار انفجار

در ادامه برای ارزیابی پاسخ اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای آشیانه هواپیما در برابر بار انفجار، از شبیه‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی سازه از معادلات لاگرانژی استفاده شده است و المان‌های فضای لاگرانژی از نوع المان‌های چهارگره‌ای S4R و با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته تعریف شده‌اند. اندازه شبکه‌بندی المان‌ها ۰/۰۴ متر در نظر گرفته شده‌است. حل‌گر مورد استفاده در این تحقیق، حل‌گر از نوع صریح<sup>۲</sup> می‌باشد تا عامل زمان در فرآیند انتگرال‌گیری نرم‌افزار لحاظ شود. زمان در نظر گرفته شده برای کل فرآیند انفجار برابر ۱ ثانیه می‌باشد. اعمال بار انفجاری بر روی سازه نیز با استفاده از روش ConWep صورت گرفته‌است. با توجه به ماهیت بار انفجار و لزوم مدل‌سازی میان‌قاب‌ها، دیوار مصالح بنایی با کنار هم چیدن بلوک‌های سیمانی توخالی (با ابعاد ۲۰×۲۰×۴۰ سانتی‌متر) و فرض اتصال صلب آن‌ها، به صورت ماکرو شبیه‌سازی گردید.

برای مدل‌سازی آسیب و رفتار کشسان-خمیری مصالح تحت بار انفجاری، از مدل‌های خمیری بتن آسیب دیده<sup>۳</sup>، جانسون کوک<sup>۴</sup> و هشین<sup>۵</sup> به ترتیب برای بلوک‌های سیمانی، مقاطع فولادی و نوارهای FRP استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که در این تحقیق با توجه به گستردگی آشیانه مورد نظر و تقلیل زمان و حجم محاسبات، فقط سه قاب از سوله با در نظر گرفتن فرضیات منطقی (نظیر تقارن در سازه، شرایط مرزی و...) مدل‌سازی شده‌است. جداول ۱ تا ۴ به ترتیب مشخصات مکانیکی و پارامترهای مدل CDP برای بلوک سیمانی، مشخصات مکانیکی و پارامترهای مدل JC برای رفتار خمیری و آسیب فولاد ST37، مشخصات رفتار کشسان پوشش‌های FRP و پارامترهای آسیب هشین برای پوشش‌های FRP را نشان می‌دهد. در شکل ۴، سوله شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار ABAQUS، نشان داده شده‌است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و پارامترهای مدل CDP برای بلوک سیمانی [۳۵]

E(MPa)	$\nu$	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\psi$	K	e	( $Fb_0/Fc_0$ )	Viscosity
۷۰۰۰	۰/۱۵	۸/۵	۱/۵	۲۰۰۰	۲۵	۰/۶۷	۰/۱	۱/۱۶	۰/۰۰۱

جدول ۲- مشخصات مکانیکی [۶] و پارامترهای مدل JC برای رفتار خمیری و آسیب فولاد ST37 [۳۶]

<sup>۲</sup> Explicit

<sup>۳</sup> Concrete Damage Plasticity (CDP)

<sup>۴</sup> Johnson-Cook Damage (JC)

<sup>۵</sup> Hashin Damage

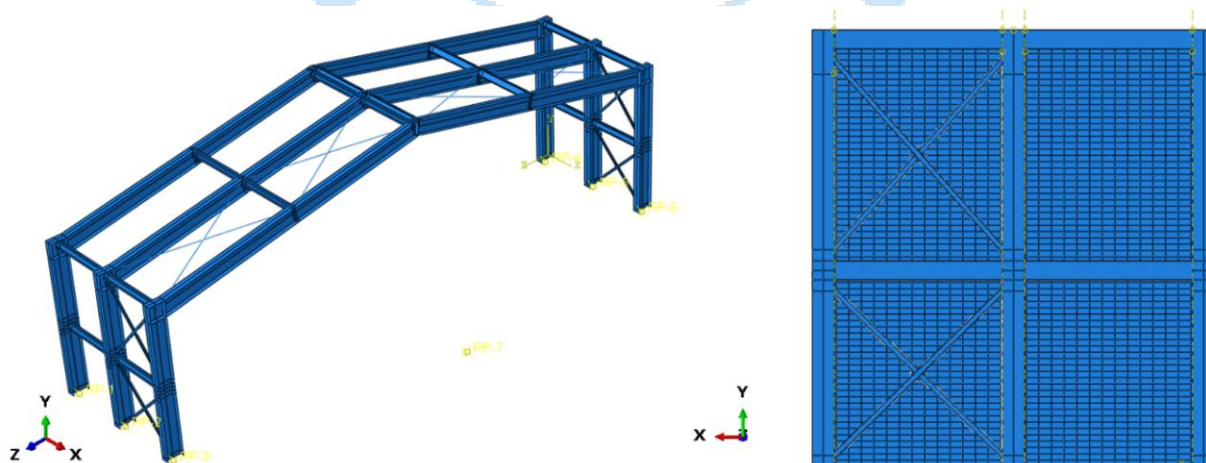
E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$g$ ( $kg/m^3$ )	A (GPa)	B (GPa)	C	m	n	D1	D2	D3	D4	D5
۲۱۰	۰/۳	۲۴۰	۷۸۵۰	۰/۷۹۲	۰/۵۱	۰/۰۱۴	۱/۰۳	۰/۲۶	۰/۰۵	۳/۴۴	-۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۱

جدول ۳- مشخصات رفتار کشسان پوشش‌های FRP [۳۷، ۱۵]

	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
CFRP <sup>6</sup>	۵۴۰۰۰	۲۲۲۷	۰/۳	۱۱۲۷	۱۱۲۷	۱۱۲۷
GFRP <sup>7</sup>	۱۸۰۰۰	۸۱۸	۰/۳	۴۱۴	۴۱۴	۴۱۴
BFRP <sup>8</sup>	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰/۳	۴۸۰۰	۴۸۰۰	۴۸۰۰

جدول ۴- پارامترهای آسیب هشین برای پوشش‌های FRP [۳۷، ۱۵]

پارامتر	CFRP	GFRP	BFRP
Tensile strength in normal dir. of fiber (MPa)	۱۱۸۸	۸۱۰	۴۶۰
Compressive strength in normal dir. of fiber (MPa)	۳/۹۶	۲/۷۰	۲۶۰
Tensile strength in transverse dir. of fiber (MPa)	۳/۹۶	۲/۷۰	۴۵
Compressive strength in transverse dir. of fiber (MPa)	۳/۹۶	۲/۷۰	۶۰
Shear strength in normal dir. of fiber (MPa)	۳/۹۶	۲/۷۰	۳۵
Shear strength in transverse dir. of fiber (MPa)	۳/۹۶	۲/۷۰	۲۰
Fracture tensile energy in fibers' dir. (mJ)	۹۲	۹۲	۷۳
Fracture tensile energy in transverse dir. (mJ)	۱/۱	۱/۱	۰/۶۷
Fracture compressive energy in fibers' dir. (mJ)	۰/۲	۰/۲	۲۶/۷
Fracture compressive energy in transverse dir. (mJ)	۰/۲	۰/۲	۱۳/۳



شکل ۴- سازه سوله و دیوار بنایی مدل شده در ABAQUS

<sup>6</sup> Carbon fiber reinforced polymers<sup>7</sup> Glass fiber reinforced polymers<sup>8</sup> Basalt fiber reinforced polymers

## ۳-۴- اعتبارسنجی مدل سازی

## ۳-۴-۱- مشخصات مدل محاسباتی

برای کنترل پاسخهای نرم افزار ABAQUS ابتدا باید از یک نمونه که پیش تر در بررسی های تجربی و یا عددی مورد تأیید قرار گرفته است یک مدل تهیه و با مقایسه نتایج آن بررسی لازم صورت گیرد. برای اعتبارسنجی مدل سازی در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی و عددی چیکیتو و همکاران [۳۸] استفاده شده است. این محققین به بررسی دیوار بنایی تحت بار انفجار و تقویت آن ها به کمک پوشش FRP در نرم افزار المان محدود LS-DYNA پرداختند و نتایج مدل سازی خود را با تحقیقات آزمایشگاهی (میدانی) مقایسه نموده اند. مشخصات مدل مرجع در جدول ۵ ارائه شده است.

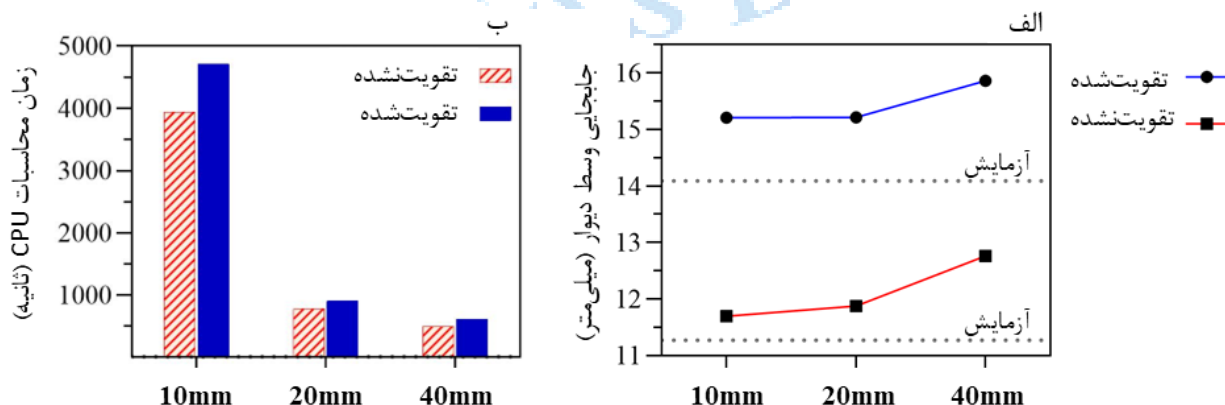
جدول ۵- مشخصات مدل آزمایشگاهی [۳۸]

ابعاد دیوار (m)	مصالح مورد استفاده برای دیوار	روش مقاوم سازی	فاصله مرکز انفجار تا دیوار (m)	ارتفاع مرکز انفجار تا زمین (m)	وزن خرج انفجار (kg)	فاصله مقیاس شده ( $m/kg^{1/3}$ )
۲.۵ × ۲.۵	آجر فشاری	نوار CFRP	۵	۱۰	۳۱/۴	۱/۵۸۵

در مدل چیکیتو و همکاران، اندازه آجر مورد استفاده به صورت  $۷۰ \times ۲۴۰ \times ۱۱۰$  میلی متر و ضخامت ملات بین آجرها ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده و شرایط مرزی دیوار، گیردار مدل شده است.

## ۳-۴-۳- تحلیل حساسیت به مش

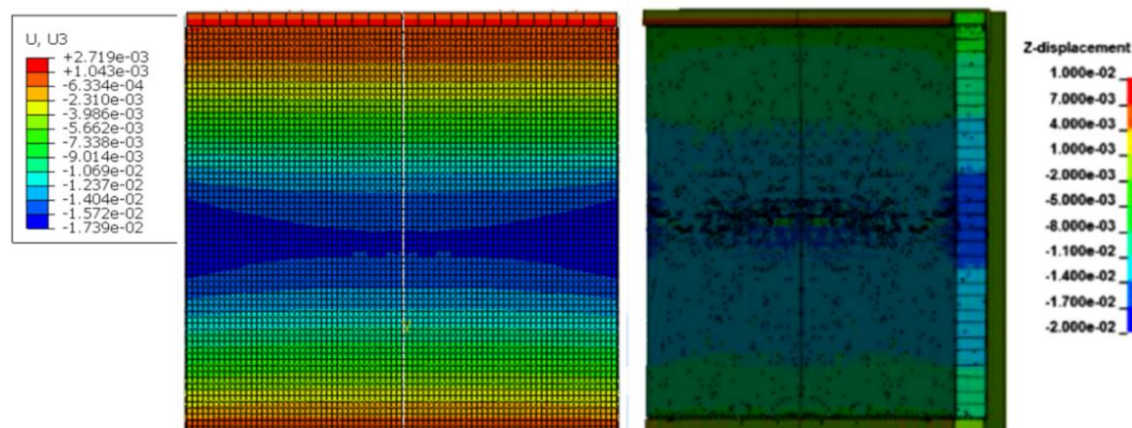
برای انتخاب اندازه مش مورد استفاده در این تحقیق و حصول همگرایی مناسب در نتایج، از مش های با اندازه ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی متر استفاده شد. نتایج جابجایی وسط دیوار با توجه به اندازه مش تحت انفجار  $۳۱/۴$  کیلوگرم تی ان تی در شکل ۵-الف نشان داده شده است. علاوه بر این، حساسیت به مش با لحاظ پارامتر CPU time که معرف هزینه محاسباتی می باشد نیز برای تحلیل های با اندازه مش مذکور محاسبه شده و در شکل ۵-ب به تصویر درآمده است. همان طور که مشخص است، انتخاب مش با اندازه ۲۰ و ۱۰ میلی متر نتایج تقریباً مشابهی را ارائه خواهد کرد، حال آن که هزینه محاسباتی تحلیل با اندازه مش ۲۰ میلی متر بسیار کمتر از مش با اندازه ۱۰ میلی متر باشد لذا برای ادامه پژوهش از مش با اندازه ۲۰ میلی متر استفاده شد.



شکل ۵- تأثیر اندازه های مختلف مش بر الف) جابجایی وسط دیوار ب) هزینه محاسباتی

## ۳-۴-۳- مقایسه نتایج

شکل ۶ کانتور تغییر شکل دیوار را در هر دو مدل نشان می‌دهد. نتایج عددی حاصل از مدل تهیه شده در این تحقیق با دقت قابل قبولی رفتار دیوار را در مقابل بار انفجار پیش‌بینی نموده و میزان انحراف نتایج حاصله و مقایسه با مدل عددی ساخته شده توسط چیکیتو و همکاران در جدول ۶ تنظیم گردیده است.



شکل ۶- کانتور تغییر شکل دیوار در شبیه‌سازی این تحقیق و مقاله مرجع [۳۸]

جدول ۶- خلاصه نتایج جابجایی وسط دیوار پیش‌بینی شده در مدل پیشنهادی و مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی پژوهش مرجع [۳۸]

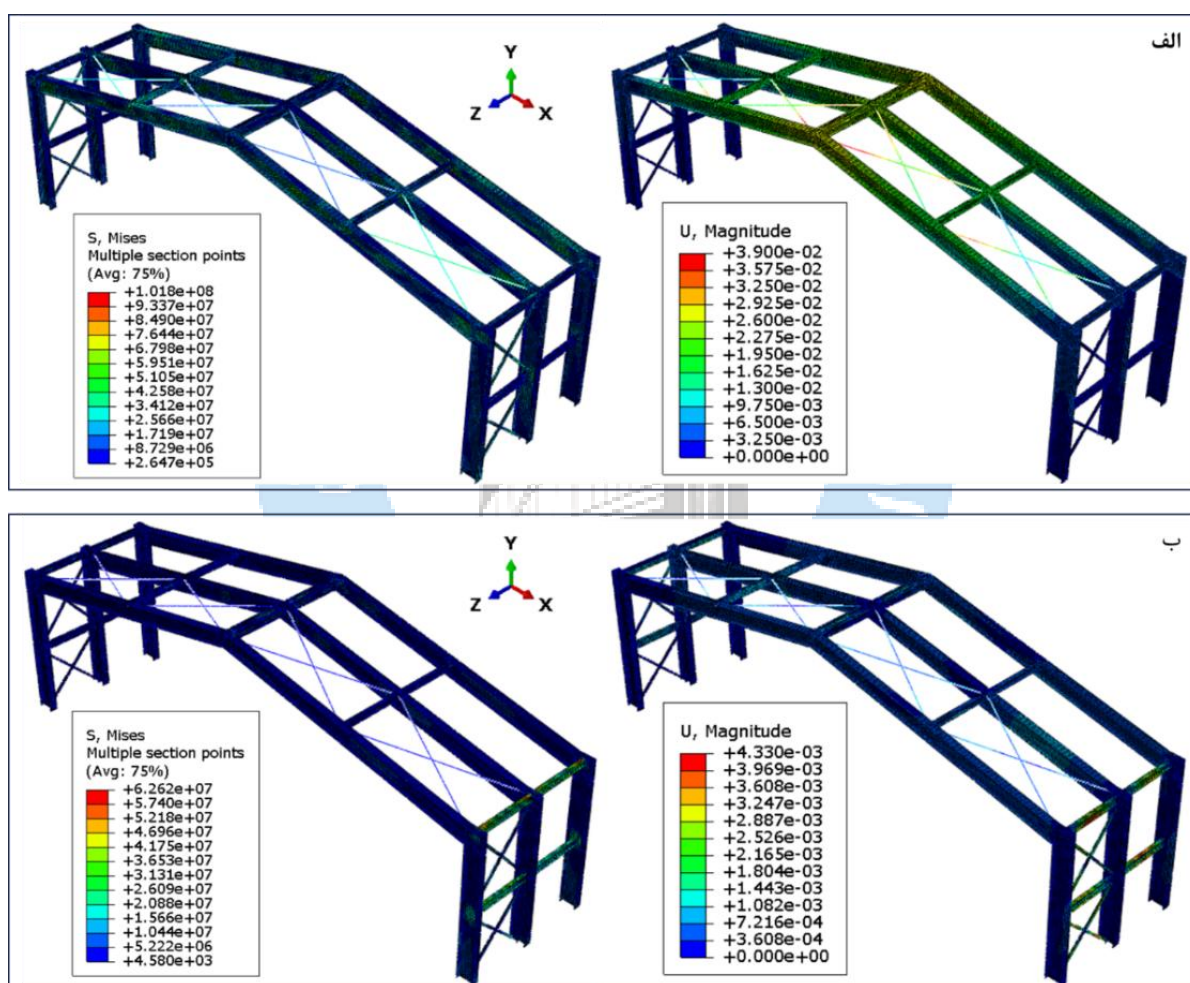
جابجایی وسط دیوار (میلی‌متر)			نمونه
ABAQUS (درصد خطا)	LS-DYNA [38] (درصد خطا)	آزمایش	
۱۵/۲۱ (۷/۹ %)	۱۵/۵۱ (۱۰/۱ %)	۱۴/۰۹	دیوار تقویت‌نشده
۱۱/۸۷ (۵/۳ %)	۱۲/۱۱ (۷/۵ %)	۱۱/۲۷	دیوار تقویت‌شده

جدول ۶ به وضوح نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام‌شده در این تحقیق، با دقت قابل قبولی قادر به مدل‌سازی دیوار تقویت‌نشده و تقویت‌شده تحت بار انفجار را دارد و طبق این جدول، اختلاف نتایج مدل صحت‌سنجی و آزمایش در دیوار تقویت‌نشده و تقویت‌شده، به ترتیب برابر حدود ۸ و ۵ درصد می‌باشد که دقت‌های مناسبی هستند و با نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده در مرجع انجام آزمایش، تطابق بالایی دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل عددی تحقیق حاضر، قابلیت بالایی در پیش‌بینی پاسخ دیوار مصالح بنایی در مقابل بارهای ناشی از انفجار دارد.

## ۴- تجزیه و تحلیل

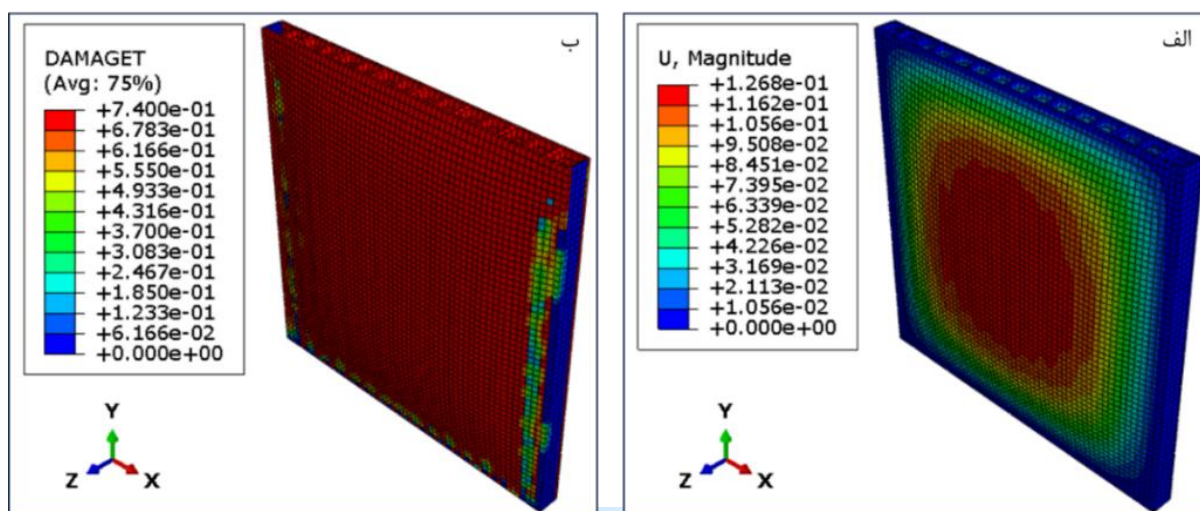
## ۴-۱- ارزیابی آسیب پذیری سازه موجود

در این قسمت بخش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای آشیانه هواپیما به صورت مجزا تحلیل شدند. با توجه به نتایج، بخش سازه‌ای یا همان قاب‌های سوله تحت بار انفجار مفروض، عملکردی قابل قبول از خود نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، جابجایی و تنش ایجاد شده در مقاطع کم می‌باشد. با توجه به این که موج انفجار، مشابه باد، بر سطوح وارد می‌شود؛ هر چه سطح بارگیر کمتر باشد، میزان بار وارده بر آن عضو نیز کمتر می‌شود بنابراین، دلیل عملکرد خوب قاب‌های فولادی آشیانه هواپیما در برابر انفجار، سطح بسیار کم بارگیر (موج‌گیر) ستون‌ها و تیرها در برابر موج انفجار می‌باشد. به بیان دیگر، سازه طراحی شده بر اساس بار زلزله، در برابر بار انفجار با سناریو مفروض، عملکردی قابل قبول داشته است.



شکل ۷- جابجایی و تنش سازه تحت انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متر در راستای (الف) Z (ب) X

برعکس اجزای سازه‌ای که سطح بارگیر کمی دارند، اجزای غیرسازه‌ای مثل دیوار و سقف بنایی، دارای سطح بارگیر زیاد هستند که جذب بالای موج انفجار را به همراه دارند. همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، میان قاب پیرامونی آشیانه هواپیما که از نوع دیوار بنایی غیرباربر می‌باشد، تحت بار انفجار، دچار آسیب شدید شده است به طوری که تقریباً کل دیوار دچار خرابی کششی شده و مرکز آن حدود ۱۲/۷ سانتی‌متر جابجایی تجربه کرده است؛ این یعنی عملاً دیوار قابلیت بهره‌برداری خود را از دست داده است.

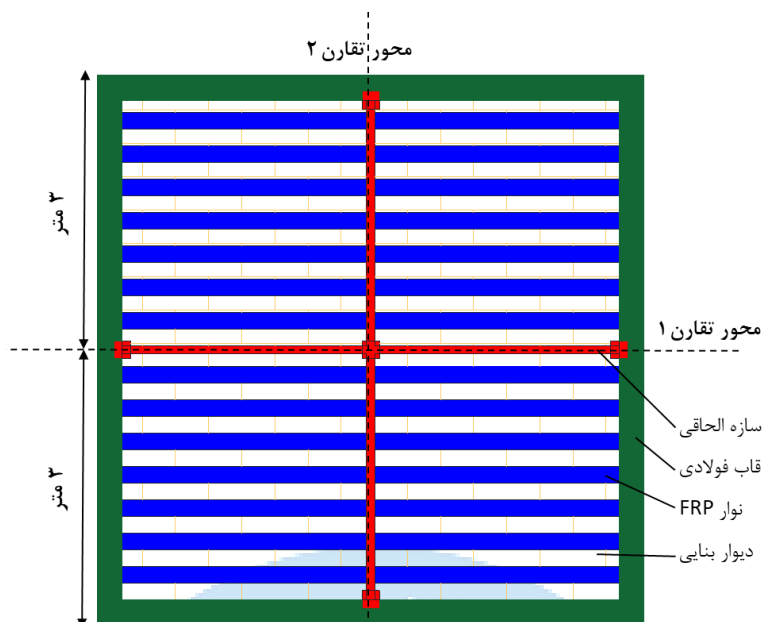


شکل ۸- الف) کانتور جابجایی پیشینه ب) کانتور خرابی دیوار تحت انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متر

#### ۲-۴- مقاومت سازه در برابر انفجار

با توجه به نتایج قسمت قبل، اگرچه بخش سازه‌های آشیانه هواپیما رفتار قابل قبولی از خود در برابر انفجار فرض شده در این تحقیق نشان داد و عملکرد آن حفظ شده بود، اما ضعف بخش غیرسازه‌های آشیانه هواپیما، بهسازی این دیوارهای بنایی پیرامونی را الزام آورده است. اهمیت این موضوع به خاطر سرمایه‌ای است که آشیانه در خود نگهداری می‌کند و باید علاوه بر اطمینان از عملکرد مقاوم اجزای سازه‌های آن، از مقاوم بودن اجزای غیرسازه‌های آن به طور خاص دیوارها نیز اطمینان حاصل کرد و از خرابی کامل و پرتاب آوار دیوارها تحت بار انفجار که می‌تواند موجب خسارات مالی یا جانی شود، جلوگیری به عمل آورد.

با مطالعه ادبیات گذشته، با توجه به خواص کامپوزیت FRP، در این تحقیق، از این مواد برای مقاوم‌سازی دیوارها استفاده می‌شود. مطابق شکل ۹، برای کاهش دهانه بارگیر دیوار و هم‌چنین مهار بهتر خارج از صفحه آن، دو پروفیل فولادی به صورت متعامد در وسط دیوار قرار داده شد. بنابراین با یک‌بار فرض ساده‌کننده و منطقی و به دلیل وجود تقارن در هر دو راستا، به جای دیوار مربعی به ابعاد ۶ متر، دیوار مربعی در ابعاد ۳ متر مدل شده و شرایط مرزی لازم نیز در اطراف دیوار اعمال شده است تا حجم محاسبات و زمان تحلیل کاهش یابد. لازم به ذکر است که برای بررسی پارامتریک عوامل مؤثر بر مقاوم‌سازی به کمک پوشش FRP (مانند جنس الیاف، درصد پوشش، سمت تقویت شده دیوار، عرض، ضخامت و زاویه نوار) و برای حصول نتایج قابل قبول و جلوگیری از پراکندگی، فقط آن پارامتر خاص تغییر می‌کند و دیگر پارامترها ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۹- نحوه مقاوم سازی دیوار بنایی در مقابل انفجار

در این پژوهش دو خروجی مدنظر است:

- ✓ خروجی خیز دیوار: برای این کار، جابه‌جایی نقاط روی مسیر قائم وسط دیوار محاسبه می‌شود.
- ✓ خروجی انرژی اتلاف شده: برای ارزیابی میزان اتلاف انرژی، مقادیر انواع استهلاک انرژی (غیرکشسان<sup>۹</sup>، آسیب<sup>۱۰</sup> و گران‌رو<sup>۱۱</sup>) محاسبه خواهد شد.

یکی از روش‌های بررسی پاسخ موانع سازه‌ای در معرض انفجار، انرژی رسیده به مانع می‌باشد. این انرژی به سه صورت خود را نشان می‌دهد؛ انرژی جنبشی (که سبب سرعت گرفتن المان می‌شود)، انرژی پتانسیل (یا انرژی کرنشی کشسان) و انرژی مستهلاک شده. برای ایجاد بالانس انرژی، با توجه به کار خارجی انجام شده و مقابله با انرژی ورودی در سیستم، سازه با تغییر شکل‌های کشسان، غیرکشسان، میرایی و انرژی جنبشی سعی می‌کند تا تعادل را ایجاد نماید [۳۹]. دیوار از سه طریق می‌تواند انرژی جذب‌شده ناشی از موج انفجار را مستهلاک کند؛ مقداری از انرژی ورودی صرف تغییر شکل دیوار می‌شود (اتلاف انرژی غیرکشسان)، مقدار دیگری از انرژی سبب اصطکاک داخلی مواد شده و به گرما تبدیل می‌شود (اتلاف انرژی گران‌رو) و در آخر مقداری از انرژی نیز به سبب آسیب و خرابی دیوار مستهلاک می‌شود (اتلاف انرژی آسیب).

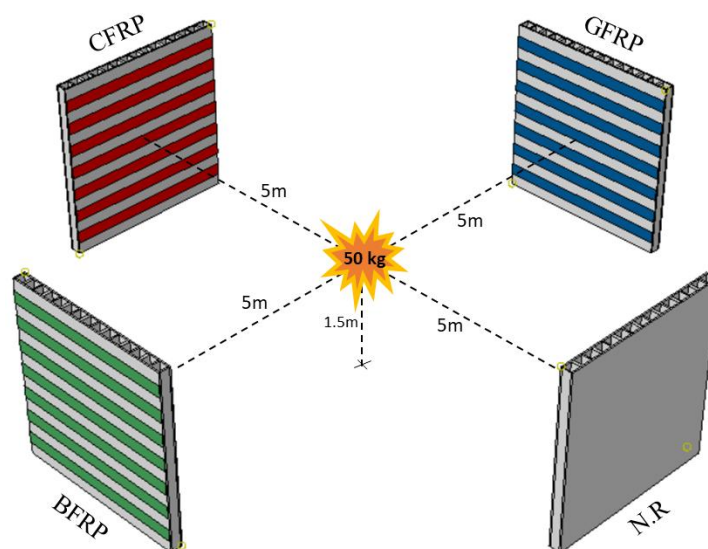
#### ۴-۲-۱- بررسی اثر جنس الیاف

جهت بررسی پارامتریک اثر جنس الیاف، از نوارهای CFRP، GFRP و BFRP جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۱۰، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و چیدمان نوارهای FRP به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد و افقی در هر دو سمت دیوار می‌باشد. میزان انرژی مستهلاک شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف مقاوم‌سازی در شکل ۱۱ ارائه شده‌است.

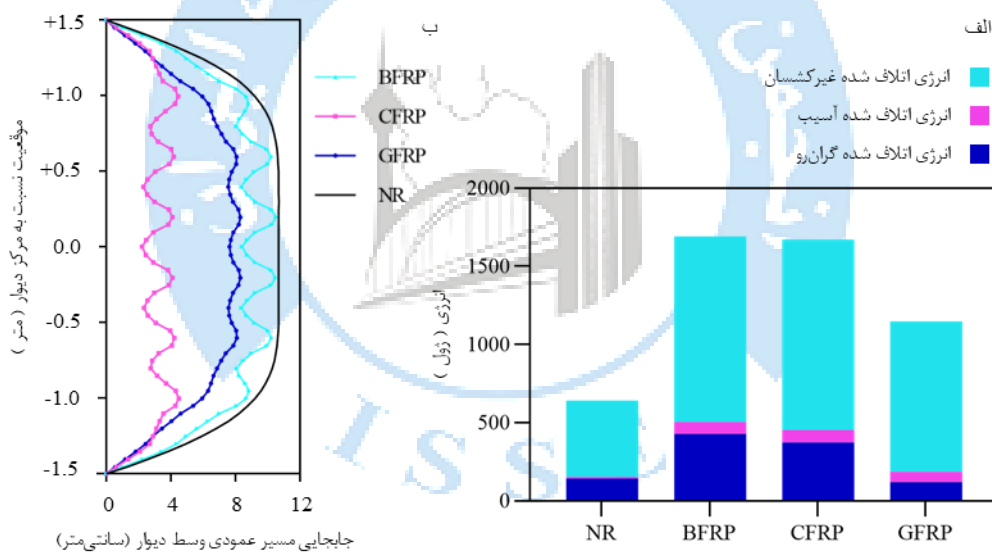
<sup>9</sup> Plastic Dissipation Energy

<sup>10</sup> Damage Dissipation Energy

<sup>11</sup> Viscous Dissipation Energy



شکل ۱۰- سناریو بارگذاری انفجاری و بررسی اثر جنس الیاف



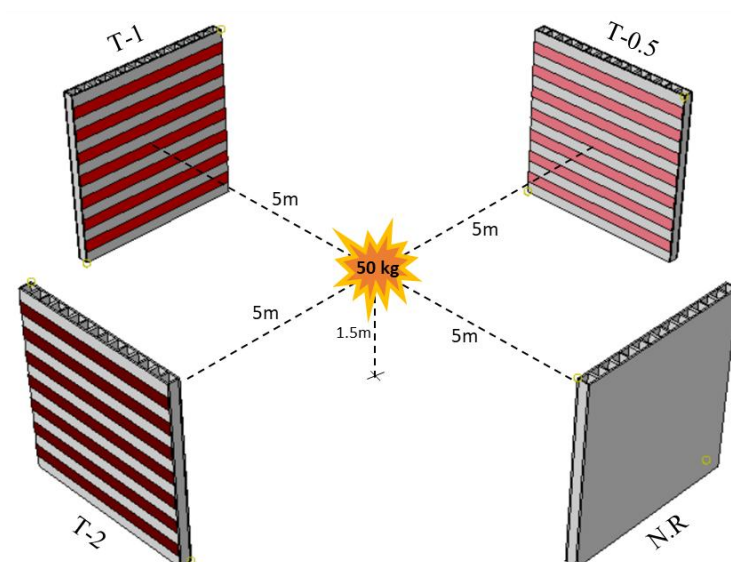
شکل ۱۱- اثر جنس الیاف بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک شده (ب) خیز ماندگار دیوار

از نمودارهای شکل ۱۱ چنین استنباط می‌شود که علی‌رغم کاهش خیز دیوارهای تقویت‌شده، اما همین جابجایی کمتر توانسته انرژی خیلی بیشتری را مستهلک کند (انرژی اتلاف شده غیرکشسان) و این پدیده برای دو حالت دیگر استهلاک انرژی نیز صدق می‌کند که اثر مقاوم‌سازی به کمک نوارهای FRP را بیان می‌کند.

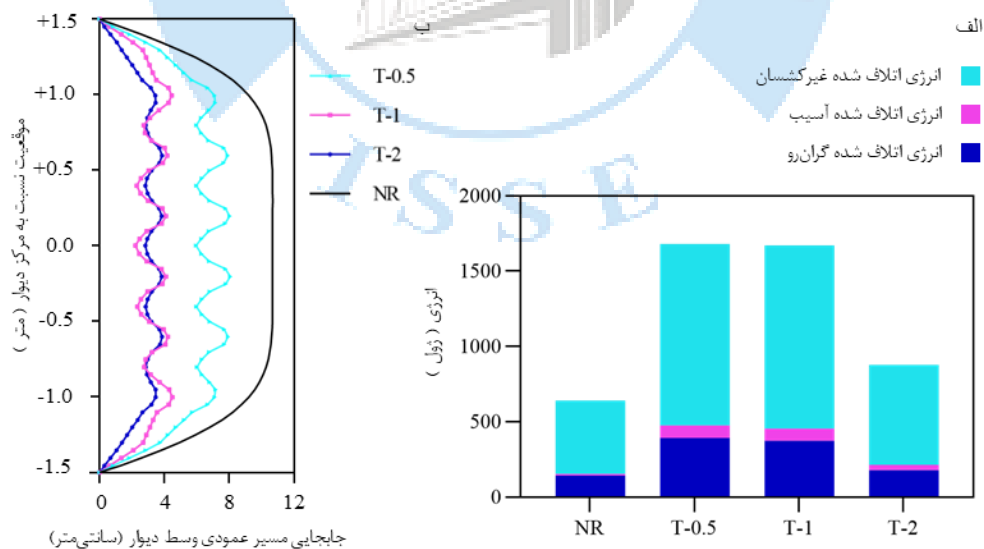
همچنین با توجه به نتایج شکل ۱۱، الیاف کربن عملکردی بهتری را نسبت به الیاف شیشه و بازالت از خود نشان داده‌است به طوری که انرژی مستهلک‌شده توسط دیوار را تا ۱۶۰ درصد افزایش داده و خیز آن هم تا حدود ۴ سانتی‌متر کاهش داشته‌است. دلیل این بهبود رفتار دیوار را می‌توان به مدول الاستیسیته بالاتر CFRP و همین‌طور مقاومت کششی بیشتر الیاف کربن نسبت داد.

## ۴-۲-۲- بررسی اثر ضخامت نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر ضخامت نوار، از ضخامت‌های ۵/۰، ۱ و ۲ میلی‌متر جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۱۲، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی عرض، سطح پوشش، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۵۰ درصد، افقی در دو سمت و کربن می‌باشد. میزان انرژی مستهلک شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف تقویت در شکل ۱۳ نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۲- سناریو بارگذاری انفجار و بررسی اثر ضخامت نوار

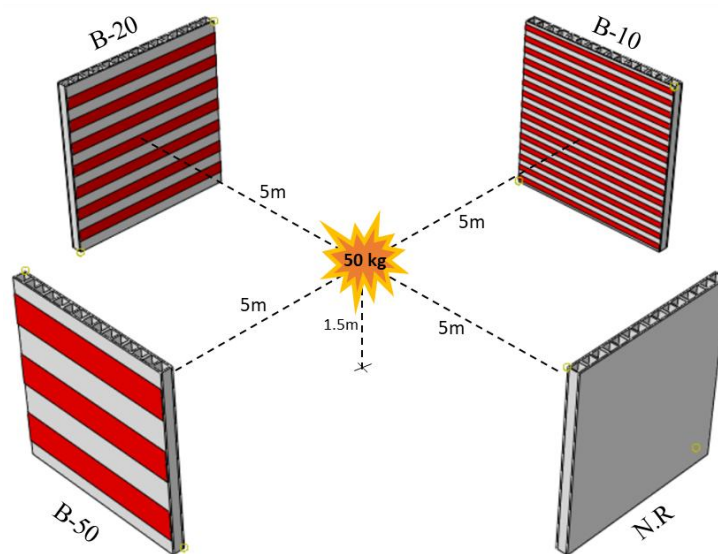


شکل ۱۳- اثر ضخامت نوار بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک‌شده (ب) خیز ماندگار دیوار

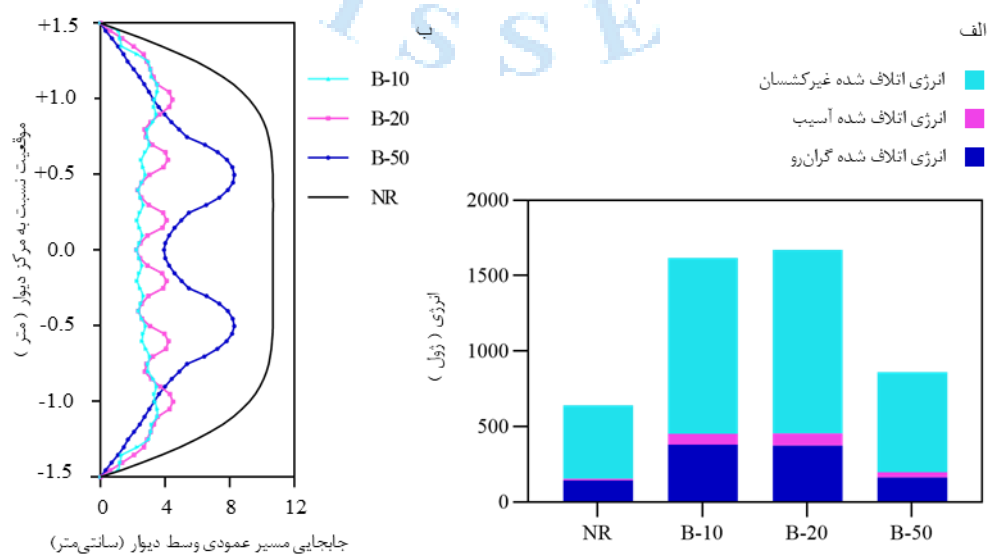
با توجه به شکل ۱۳، با افزایش ضخامت نوار از ۰/۵ به ۱ و ۲ میلی‌متر خیز دیوار به ترتیب ۲۵، ۶۲ و ۶۴ درصد نسبت به حالت تقویت‌نشده کاهش می‌یابد. مقادیر افزایش انرژی مستهلک‌شده توسط دیوار برای همین ضخامت‌ها، به ترتیب ۱۶۳، ۱۶۱ و ۳۷ درصد می‌باشد.

#### ۴-۲-۳- بررسی اثر عرض نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر عرض نوار، از عرض‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متر جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۱۴، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی ضخامت، سطح پوشش، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد، افقی در هر دو سمت و کربن می‌باشد. میزان انرژی مستهلک‌شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف مقاوم‌سازی در شکل ۱۵ نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۴- سناریو بارگذاری انفجار و بررسی اثر عرض نوار

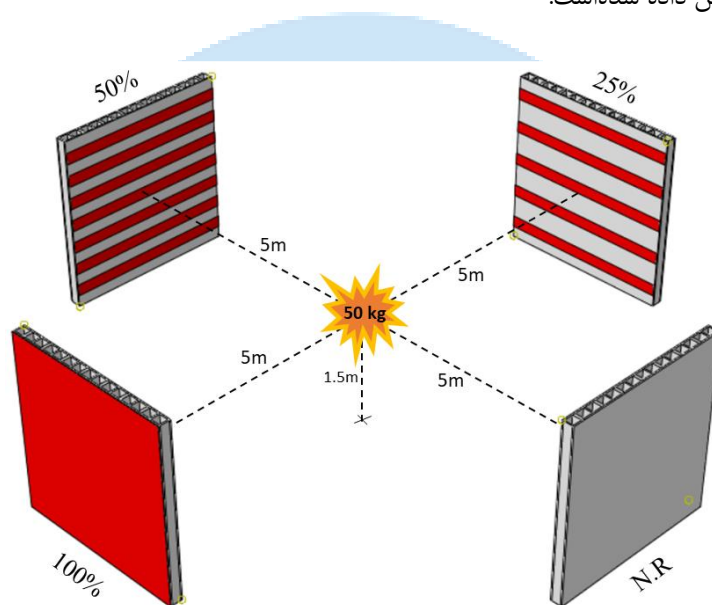


شکل ۱۵- اثر عرض نوار بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک شده (ب) خیز ماندگار دیوار

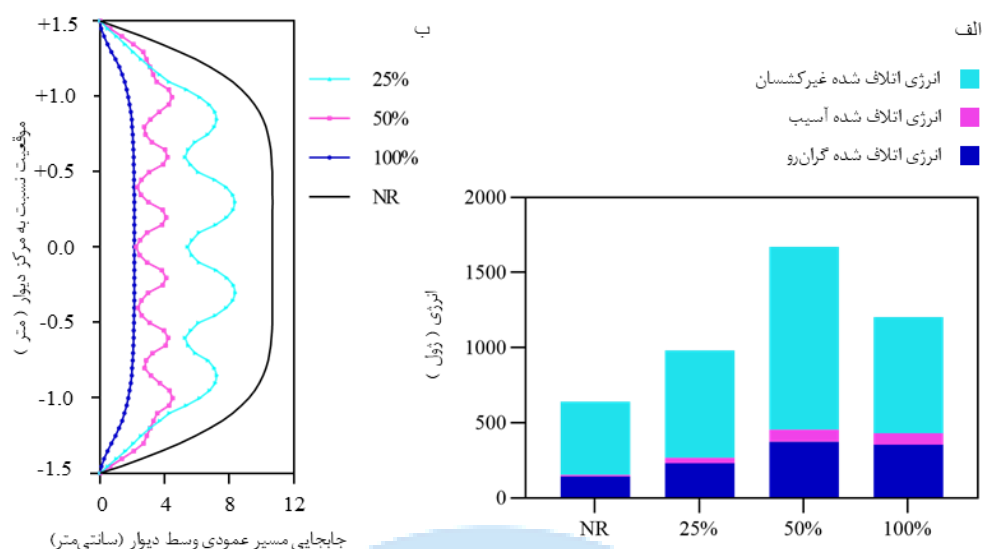
همان طور که از شکل ۱۵ برداشت می‌شود، نوارهای FRP با عرض‌های ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر اثر قابل توجهی بر اتلاف انرژی و خیز دیوار داشتند اما وقتی عرض نوار تا ۵۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد، چون پارامتر سطح پوشش نوارها ثابت و ۵۰ درصد در نظر گرفته شده، نواحی عریض‌تری از دیوار به طور پیوسته تقویت نمی‌شود؛ به طوری که خیز دیوار در نواحی مقاوم‌نشده تا حدود دو برابر نواحی مقاوم‌شده می‌باشد. از نظر استهلاک انرژی نیز با دیوار مقاوم‌نشده تفاوت چندانی ندارد.

#### ۴-۲-۴- بررسی اثر درصد پوشش

جهت بررسی پارامتریک اثر مساحت پوشش، از درصد پوشش‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۱۶، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی عرض، ضخامت، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، افقی در دو سمت و کربن می‌باشد. میزان انرژی مستهلک شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف تقویت در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶- سناریو بارگذاری انفجار و بررسی اثر سطح پوشش



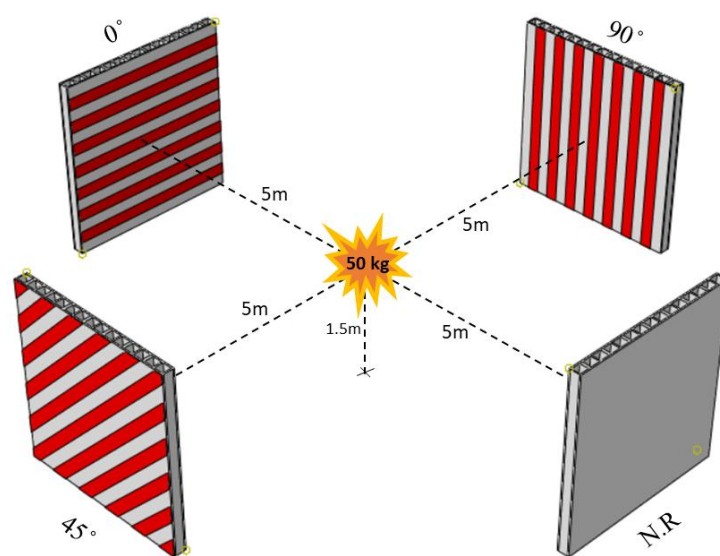
شکل ۱۷- اثر درصد پوشش نوار بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک‌شده (ب) خیز ماندگار دیوار

همان طور که از شکل ۱۷ قابل استنتاج است، درصد پوشش نوارها با جابجایی مرکز دیوار و میزان آسیب آن رابطه معکوس دارد و برای درصدهای پوشش ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جابجایی وسط دیوار به ترتیب تا ۸/۴، ۴/۱ و ۲/۱ سانتی‌متر کاهش یافت اما میزان اتلاف انرژی توسط دیوار، برای حالت ۵۰ درصد پوشش، بیشترین مقدار را داشت که برابر ۱۶۷۱ ژول می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که اگرچه مقدار خیز در دیوار با پوشش صد درصد بسیار کم می‌باشد اما انتخاب این آرایش چندان بهینه و اقتصادی نخواهد بود.

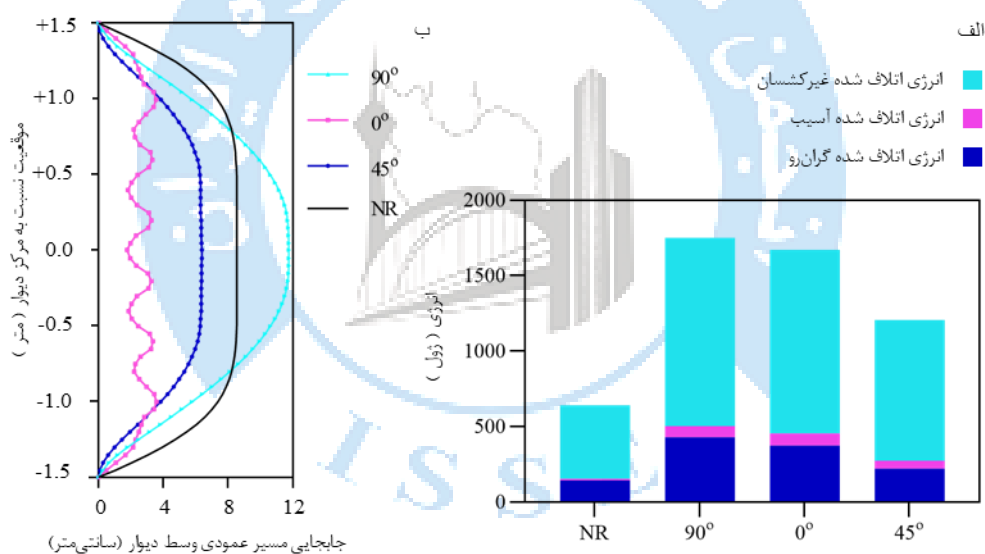
#### ۴-۲-۵- بررسی اثر زاویه نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر زاویه نوار، از آرایش‌های افقی، مورب و قطری جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۱۸، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد و کربن در هر دو سمت دیوار می‌باشد. میزان انرژی مستهلک شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف مقاوم‌سازی در شکل ۱۹ نمایش داده شده‌است.

با بررسی نتایج موجود در شکل ۱۹، می‌توان دریافت که چیدمان افقی بهترین عملکرد را از نظر اتلاف انرژی توسط دیوار و خیز آن از خود نشان داده‌است به طوری که افزایش درصدی و کاهش درصدی را به ترتیب در استهلاک انرژی و خیز دیوار ثبت کرده‌است. اما دیوار مقاوم‌شده با چیدمان عمودی نوارها خیز زیادی را تجربه کرده‌است (بیشتر از حالت مقاوم‌نشده) که به خاطر همین جابجایی زیاد، دیوار توانسته مقدار قابل توجهی از انرژی ورودی خود را مستهلک کند. علت خیز بزرگ دیوار مقاوم‌شده با آرایش عمودی نوارهای FRP می‌تواند به خاطر شکل بلوک‌های سیمانی تشکیل‌دهنده دیوار باشد؛ با توجه به شکل این بلوک‌ها و حفره‌های داخلی آن، ممان اینرسی دیوار در راستای افقی، ضعیف‌تر از راستای عمودی است فلذا، استفاده از نوارهای افقی، این ضعف را تا حدودی جبران کرده و سبب رفتار بهتر دیوار نسبت به چیدمان قائم نوارها می‌گردد.



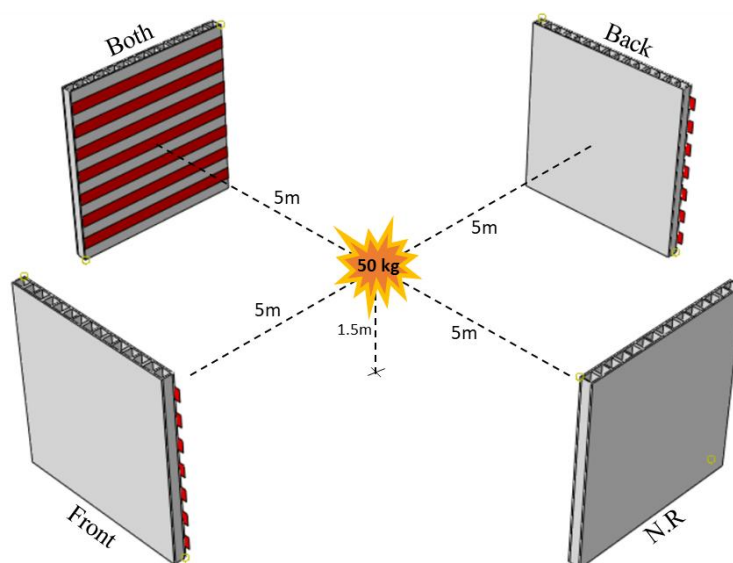
شکل ۱۸- سناریو بارگذاری انفجار و بررسی اثر زاویه نوار



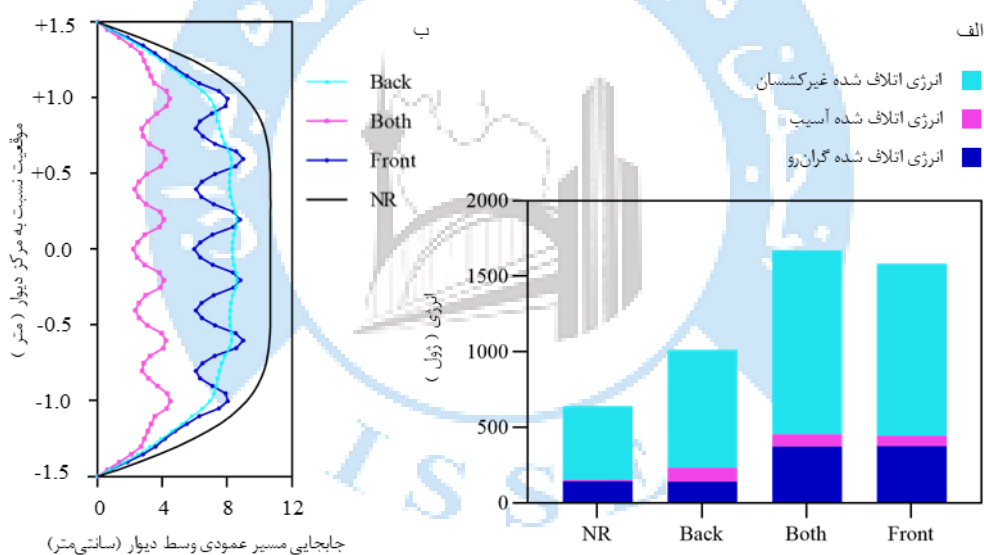
شکل ۱۹- اثر زاویه نوار بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک شده (ب) خیز ماندگار دیوار

#### ۴-۲-۶- بررسی اثر سمت تقویت‌شده دیوار

جهت بررسی پارامتریک اثر سمت تقویت‌شده دیوار، یک‌بار بار سمت رو به انفجار دیوار، یک بار سمت پشت به انفجار و بار دیگر هر دو سمت دیوار جهت مقاوم‌سازی دیوارها استفاده شد و مطابق شکل ۲۰، سایر پارامترها ثابت باقی ماندند؛ یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش، زاویه و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد، افقی و کربن می‌باشد. میزان انرژی مستهلک شده توسط دیوار و جابجایی مسیر عمودی وسط دیوار در حالت‌های مختلف تقویت در شکل ۲۱ نمایش داده شده‌است.



شکل ۲۰- سناریو بارگذاری انفجار و بررسی اثر سمت تقویت شده



شکل ۲۱- اثر سمت تقویت شده دیوار بر (الف) مقادیر انرژی مستهلک شده (ب) خیز ماندگار دیوار

نتایج شکل ۲۱ گواه آن است که تقویت سمت رو به انفجار دیوار با نوارهای FRP، ۸۹ درصد استهلاک بیشتر انرژی را نسبت به دیوار تقویت شده در سمت مخالف دارد ولی خیز هر دو دیوار تقریباً مشابه یکدیگر و برابر ۸/۵ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد استفاده از نوارهای FRP در هر دو سمت دیوار نسبت به حالت مقاوم‌نشده، ۶۲ درصد کاهش در خیز دیوار و ۱۶۱ درصد افزایش در استهلاک انرژی به همراه خواهد داشت.

## ۴-۳- جمع بندی

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در بخش‌های قبل، خلاصه تأثیر پارامترهای پوشش FRP در جدول ۷ آورده شده است. هم‌چنین برای هر پارامتر، بهترین حالت از نظر اتلاف انرژی و خیز دیوار مشخص شده است. انتخاب پارامتر مناسب در واقع به معنای ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری دیوار است. در ادامه، ذکر شده که چرا این تعادل اهمیت دارد و چگونه بر عملکرد دیوار در برابر بار انفجاری تأثیر می‌گذارد:

- نقش سختی در مقاومت در برابر جابجایی و تغییر شکل‌ها: سختی دیوار به میزان مقاومت آن در برابر تغییر شکل و جابجایی تحت بار انفجاری کمک می‌کند. دیواری که به اندازه کافی سخت باشد، می‌تواند از تغییر شکل‌های بزرگ جلوگیری کرده و بارهای انفجاری را بدون ایجاد تغییرات زیاد در ساختار خود تحمل کند. برای مثال، افزایش ضخامت یا استفاده از نوارهای تقویت با درصد پوشش بالا می‌تواند سختی دیوار را افزایش دهد. با این حال، سختی بیش از حد می‌تواند منجر به شکنندگی شود و توانایی دیوار را در جذب انرژی از طریق تغییر شکل‌های کوچک کاهش دهد.

- اهمیت انعطاف پذیری در جذب و مستهلک سازی انرژی: انعطاف پذیری به دیوار این امکان را می‌دهد که بخشی از انرژی وارد شده را از طریق تغییر شکل‌های کوچک و داخلی جذب و مستهلک کند. دیواری که بسیار سخت باشد، ممکن است نتواند این تغییر شکل‌های جزئی را به خوبی مدیریت کند و در نتیجه انرژی انفجاری را به صورت جابجایی‌های متمرکز و آسیب‌های موضعی ذخیره کند. از سوی دیگر، انعطاف پذیری بیش از حد نیز می‌تواند باعث افزایش جابجایی‌ها و کاهش پایداری دیوار شود.

- ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری: پارامترهای مختلفی مانند زاویه نوار، ضخامت و درصد پوشش، به ایجاد این تعادل کمک می‌کنند. به عنوان مثال، زاویه ۴۵ درجه ترکیبی از مقاومت و انعطاف پذیری مناسب را ارائه می‌دهد، زیرا می‌تواند تنش‌ها را در جهات مختلف توزیع کرده و بارهای انفجاری را بهتر جذب کند. ضخامت یا درصد پوشش متوسط نیز می‌تواند به ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری کمک کند؛ برای مثال، ضخامت ۱ میلی‌متر یا پوشش ۵۰ درصدی به دیوار اجازه می‌دهد که بدون ایجاد جابجایی زیاد، بخشی از انرژی را از طریق تغییر شکل‌های داخلی جذب کند.

- اثر تعادل در عملکرد بهینه: دیواری که تعادل مناسبی بین سختی و انعطاف پذیری دارد، می‌تواند انرژی وارد شده را به صورت متوازن توزیع کند. این دیوار قادر است جابجایی‌ها را به حداقل برساند، از شکست‌های ناگهانی جلوگیری کند و تغییر شکل‌های متمرکز را به حداقل برساند. در نتیجه، ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری به عملکرد بهینه دیوار در برابر بارهای ناگهانی و شدید مانند انفجار کمک می‌کند.

جدول ۷- جمع بندی نتایج

پارامتر	شماره مدل	خیز عمودی (سانتی‌متر)	کاهش خیز عمودی (درصد)	انرژی کل اتلاف شده (ژول)	افزایش اتلاف انرژی (درصد)	
مقاوم نشده	۰	۱۰/۷	-	۶۴۰	-	
جنس الیاف	شیشه	۱	۸/۳	۲۲	۱۶۹۱	۱۶۴
	کربن	۲	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	بازالت	۳	۱۰/۴	۳	۱۱۴۸	۷۹
ضخامت نوار	۰/۵	۴	۸/۰	۲۵	۱۶۸۲	۱۶۳

(میلی متر)	۱/۰	۵(۲)	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	۲/۰	۶	۳/۸	۶۴	۸۷۹	۳۷
عرض نوار (سانتی متر)	۱۰	۷	۳/۵	۶۷	۱۶۱۷	۱۵۳
	۲۰	۸(۲)	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	۵۰	۹	۸/۳	۲۲	۸۶۲	۳۵
سطح پوشش (%)	۲۵	۱۰	۸/۴	۲۱	۹۸۱	۵۳
	۵۰	۱۱(۲)	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	۱۰۰	۱۲	۲/۱	۸۰	۱۲۰۴	۸۸
زاویه نوار (درجه)	۹۰	۱۳	۱۴/۷	-۳۷	۱۷۵۲	۱۷۴
	صفر	۱۴(۲)	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	۴۵	۱۵	۸/۰	۲۵	۱۲۰۷	۸۹
سمت تقویت شده	پشت	۱۶	۸/۳	۲۲	۱۰۱۳	۵۸
	هر دو	۱۷(۲)	۴/۱	۶۲	۱۶۷۱	۱۶۱
	جلو	۱۸	۹/۰	۱۶	۱۵۸۳	۱۴۷

به منظور شفاف سازی دقت و کاربرد نتایج، محدودیت هایی در ذیل اشاره می شود و پیشنهاد می شود در استفاده از این نتایج برای سایر سازه ها یا شرایط، به این موارد توجه شود:

- مدل سازی ماکرو میان قاب ها: در این پژوهش، میان قاب ها به صورت ماکرو مدل سازی شده اند و از فرض اتصال صلب بین بلوک ها استفاده شده است. این فرض ممکن است اثرات رفتارهای جزئی مصالح بنایی و اتصالات بین بلوک ها را به طور کامل منعکس نکند.
- شرایط انفجاری خاص: نتایج ارائه شده براساس فرض بار انفجاری معادل TNT و با فاصله ۵ متر به دست آمده اند. هر گونه تغییر در نوع و شدت ماده منفجره یا فاصله انفجار ممکن است منجر به تغییرات قابل توجهی در پاسخ سازه شود و نیازمند بازنگری در تحلیل ها است.
- انتخاب اندازه شبکه بندی و نوع المان ها: دقت نتایج تا حد زیادی به اندازه شبکه بندی و نوع المان های انتخابی وابسته است. در این پژوهش، اندازه شبکه و نوع المان ها برای تعادلی بین دقت و هزینه محاسباتی تعیین شده اند، اما ممکن است در برخی شرایط، شبکه بندی ریزتر نتایج دقیق تری ارائه دهد.
- استفاده از روش ConWep: روش ConWep برای اعمال بار انفجار یک روش معتبر و شناخته شده است، اما ممکن است در برخی سناریوها به ویژه انفجارهای پیچیده تر، نیاز به مدل سازی دقیق تر جریان هوا و امواج انفجاری داشته باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی اجزای سازه ای و غیرسازه ای آشیانه هواپیما در برابر یک سناریو انفجار تروریستی پرداخته شد. برای نیل به این مقصود، ابتدا سازه آشیانه هواپیما با استفاده از نرم افزار SAP 2000 طراحی لرزه ای شد سپس، سازه طراحی شده به همراه میان قاب های غیرمسلح آن در برابر سناریو انفجار با وزن ۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متر، در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مورد تحلیل قرار گرفت. از جمله نتایج حاصل از این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- نتایج نشان داد که اجزای سازه‌ای به علت سختی بالا و هم‌چنین، سطح بارگیر کم در برابر انفجار، عملکرد خوبی در برابر این سناریو انفجاری داشتند. اما همانطور که انتظار می‌رفت، اجزای غیرسازه‌ای آن و به طور خاص دیوارها به دلیل سطح بارگیر زیاد و صلبیت خمشی کم، دچار تغییر شکل‌های زیاد و خرابی شدید شدند که نیاز به مقاوم‌سازی این اعضاء لازم‌الاجرا بود.
- ۲- بیشترین کاهش در جابجایی وسط دیوار نسبت به حالت تقویت‌نشده برای انفجار مفروض، در مدل با پوشش ۱۰۰ درصد رخ می‌دهد که کاهشی برابر با ۸۰ درصد را نشان می‌دهد و بیشترین افزایش در استهلاک انرژی نسبت به حالت تقویت‌نشده برای انفجار مفروض، در مدل با چیدمان عمودی نوارها رخ می‌دهد که افزایشی برابر با ۱۷۴ درصد را نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج تحلیل اتلاف انرژی و جابجایی دیوار لزوماً در یک راستا نمی‌باشد برای مثال در بارگذاری فرض شده برای این پژوهش، اگرچه مدل با چیدمان عمودی نوارها بیشترین میزان اتلاف انرژی را داشته اما مقدار خیز دیوار در مقایسه با حالت مقاوم‌نشده، افزایش یافته‌است.
- ۳- به نظر می‌رسد اثرات ضخامت دیوار و زاویه نوارها نقش پررنگ‌تری بر رفتار دیوار در برابر انفجار داشته‌اند؛ به طوری که به ترتیب تا ۱۲۶ درصد اختلاف استهلاک انرژی و تا ۹۹ درصد اختلاف خیز برای حالت‌های مختلف وجود دارد. هم‌چنین با توجه به حساسیت بالای سرمایه موجود در آشیانه‌های هواپیما، به منظور جلوگیری از آوار شدن و پرتاب ترکش‌های دیوار خردشده، لزوم استفاده از نوارهای FRP در هر دو سمت دیوار محرز است.
- ۴- به طور کلی، بررسی پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که انتخاب پارامتر مناسب، در واقع تلاشی برای یافتن تعادل بین سختی و انعطاف‌پذیری است. دیواری که بیش از حد سخت باشد، ممکن است نتواند انرژی را به خوبی مستهلک کند، و دیواری که بیش از حد انعطاف‌پذیر باشد، ممکن است جابجایی زیادی داشته باشد و پایدار نباشد. بنابراین، انتخاب پارامترهایی که این تعادل را حفظ می‌کنند، بهینه‌ترین راهکار برای طراحی دیوارهایی مقاوم در برابر بارهای انفجاری است.
- ۵- نتایج عددی نشان می‌دهد این روش مقاوم‌سازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل سناریو انفجار فرض شده مفید بوده به طوری که انرژی حاصل از موج انفجار را در همه حالات به طور قابل توجهی مستهلک کرده و خیز دیوار را نیز به جز در یک مورد کاهش داده‌است؛ در نهایت، آرایش بهینه پیشنهادی، استفاده از نوارهای CFRP به صورت افقی، با ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و پوشش ۵۰ درصد سطح دیوار در هر دو سمت آن می‌باشد.

## سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از پروژه کسر خدمت اعطاشده توسط دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر می‌باشد. نویسندگان این مقاله از مساعدت مسئولان مجتمع پدافند غیرعامل دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر و هم‌چنین هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] Jalali, F., Atae, M. H., Atae, M. A. (2018). Vulnerability Assessment of the Critical Infrastructure against Man-Made Threats (Case Study: International Civilian Airports). *Journal of Industrial Engineering & Management Systems*, Vol. 17, pp 136-145.
- [2] Li, S., Xu, X. (2015). Vulnerability Analysis for Airport Networks Based on Fuzzy Soft Sets: from the Structural and Functional Perspective. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, pp 780-788.
- [3]. Laali, N., Joshnani, H., Hadian, M. (1396). Investigating the effect of the explosion on military aircraft hangars and their retrofitting using the finite elementing method. *The 5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*. Tehran, 11 pages.

- [4]. A'la, F., Mahyar, P. (1397). The effect of the explosion on the aircraft hangar structure in the desert and ways to strengthen it. *The First national conference of fundamental research in civil engineering, architecture and urban planning*. Tehran, 20 pages.
- [5]. Salehi, H. (1399). Calculating the blast load on the shed structure and providing a solution to reduce its effects in order to strengthen crisis management sheds. *The 6th International Conference on New Researches in Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment*. Karaj, 15 pages.
- [6]. Biglari, S. Mansouri, A. (1394). Investigating the dynamic behavior of industrial structures under explosive loading. *The First international conference on new findings of science and technology*. Tehran, 9 pages.
- [7] Chen, L., Fang, Q., Fan, J., Zhang, Y., Hao, H., Liu, J. (2014). Responses of Masonry Infill Walls Retrofitted with CFRP, Steel Wire Mesh and Laminated Bars to Blast Loadings. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 17, pp 817-836.
- [8] Azar, A.B., Sari, A. (2024). Blast resistance of CFRP composite strengthened masonry arch bridge under close-range explosion. *Advances in Bridge Engineering*, 5(1), p.26.
- [9] Orton, S. L., Chiarito, V. P., Minor, J. K., Coleman, T. G. (2014). Experimental Testing of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Slab Elements Loaded by Close-in Blast. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 140, pp 04013060.
- [10] Rajput, A., Kaushik, A., Iqbal, M.A., Gupta, N.K. (2023). Non-linear FE investigation of subsurface tunnel with GFRP protection against internal blast. *International Journal of Impact Engineering*, 172, p.104423.
- [11] Pourtahmaseb, R., Pourtaghi Marzrood, R., Hoveydaei, N. (2023). Investigation of the effect of surface explosion on the concrete walls of the war shelter reinforced with GFRP sheets. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(5), pp. 967-984.
- [12] Yan, J., Liu, Y., Bai, F., Ni, X., Xu, Y., Yan, Z., Huang, F. (2022). Dynamic response of GFRP-reinforced UHPC beams under close-in blast loading. *Materials & Design*, 223, p.111140.
- [13] Alsayed, S. H., Elsanadedy, H. M., Al-Zaheri, Z. M., Al-Salloum, Y. A., Abbas, H. (2016). Blast Response of GFRP-Strengthened Infill Masonry Walls. *Construction and Building Materials*, Vol. 115, pp 438-451.
- [14] Li, Z., Chen, L., Fang, Q., Chen, W., Hao, H., Zhang, Y. (2017). Experimental and Numerical Study of Basalt Fiber Reinforced Polymer Strip Strengthened Autoclaved Aerated Concrete Masonry Walls under Vented Gas Explosions. *Engineering Structures*, Vol. 152, pp 901-919.
- [15] Dong, Z., Sun, Y., Zhu, H., Wu, G., Yan, Z., Lu, F. (2022). Behavior and Modeling of Seawater Sea-Sand Coral Aggregate Concrete-Filled BFRP Tubular Columns under Eccentric Compression. *Composite Structures*, Vol. 288, pp 115392.
- [16] Djerrad, A., Fan, F., Zhi, X., Wu, Q. (2024). Experimental and numerical studies on AFRP-reinforced thin-walled tubes under axial impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 190, p.104974.
- [17] Oña, M., Morales-Alonso, G., Gálvez, F., Sánchez-Gálvez, V., Cendón, D. (2016). Analysis of Concrete Targets with Different Kinds of Reinforcements Subjected to Blast Loading. *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 225, pp 265-282.
- [18] Minafò, G., Cucchiara, C., Monaco, A., La Mendola, L. (2017). Effect of FRP strengthening on the flexural behaviour of calcarenite masonry walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(9), pp. 3777-3795.
- [19] Jackson, C.M., Jacques, E., Saatcioglu, M. (2022). Blast retrofit of one-way reinforced concrete members using externally bonded FRP and FRP anchorage. *International Journal of Protective Structures*, 13(2), pp. 209-235.
- [20] Quek, J., Chunlin, L., Musngi, J.V., Malalasekara, P.B. (2020). A comparison of finite element simulation and experimental results from reinforced concrete columns wrapped with fibre-reinforced polymer subjected to blast loading. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 8(3), pp. 233-242.
- [21] Michaloudis, G., Gebbeken, N. (2019). Modeling Masonry Walls under Far-Field and Contact Detonations. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 123, pp 84-97.
- [22] DeJong, M.J., Dimitrakopoulos, E.G. (2014). Dynamically Equivalent Rocking Structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 43, pp 1543-1563.

- [23] Naiknimbalkar, Y.P., Singh, S.B., Matsagar, V.A. (2024). Analytical assessment of dynamic response of fiber-reinforced polymer laminate on concrete wall under blast loads. *Sādhanā*, 49(3), p.218.
- [24] Avgenakis, E., Psycharis, I.N. (2020). An Integrated Macroelement Formulation for the Dynamic Response of Inelastic Deformable Rocking Bodies. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 49, pp 1072-1094.
- [25] Eamon, C.D., Baylot, J.T., O'Daniel, J.L. (2004). Modeling Concrete Masonry Walls Subjected to Explosive Loads. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, pp 1098-1106.
- [26] Masi, F., Stefanou, I., Vannucci, P., Maffi-Berthier, V. (2019). Rocking Response of Inverted Pendulum Structures under Blast Loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 157, pp 833-848.
- [27] Pereira, J.M., Campos, J., Lourenço, P.B. (2015). Masonry Infill Walls under Blast Loading using Confined Underwater Blast Wave Generators (WBWG). *Engineering Structures*, Vol. 92, pp 69-83.
- [28] De, C., Hao, W., Yuehua, C. (2024). Dynamic Behaviors of Unreinforced and Spray Polyurea Retrofitted Brick Masonry Infill Walls under Blast Loads: Shock Tube Test and Analyses. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 190, pp 104975
- [29] Sielicki, P.W., Łodygowski, T. (2019). Masonry Wall Behaviour under Explosive Loading. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 104, pp 274-291.
- [30] Stefanou, I., Sab, K., Heck, J.V. (2015). Three Dimensional Homogenization of Masonry Structures with Building Blocks of Finite Strength: A Closed Form Strength Domain. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 54, pp 258-270.
- [31] Chen, Y.J., Su, J.R., Wang, H.S., Xi, H.L., Gao, D. (2024). Optimizing Blasting Schemes: A Comprehensive Approach through Macro-Micro Simulation and Field Experiment. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1-20.
- [32] Lu, J.X., Wu, H., Chen, D. (2023). Evaluation of collapse resistance of masonry-infilled RC frame building under blast loadings. In *Structures*, Vol. 50, pp. 1126-1146. Elsevier.
- [33] Shin, D.K., Kim, H.C., Lee, J.J. (2014). Numerical Analysis of the Damage Behavior of an Aluminum/CFRP Hybrid Beam under Three Point Bending. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, pp 397-407.
- [34] Karlos, V., Solomos, G. (2013). *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [35] Sümer, Y., Aktaş, M. (2015). Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, Vol. 1, pp 149-155.+
- [36] Rashed, A., Yazdani, M., Babaluo, A.A., Hajizadeh, P. (2016). Investigation on High-Velocity Impact Performance of Multi-Layered Alumina Ceramic Armors with Polymeric Interlayers. *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, pp 3561-3576.
- [37] Raza, A., Ali, B., Nawaz, M.A., Ahmed, I. (2020). Structural Performance of FRP-RC Compression Members Wrapped with FRP Composites. *Structures*, Vol. 27, pp 1693-1709.
- [38] Chiquito, M., Castedo, R., Santos, A. P., López, L. M., Pérez-Caldentey, A. (2021). Numerical Modelling and Experimental Validation of the Behaviour of Brick Masonry Walls Subjected to Blast Loading. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 148, pp 103760.
- [39] Szyniszewski, S., Krauthammer, T. (2012). Energy Flow in Progressive Collapse of Steel Framed Buildings. *Engineering Structures*, Vol. 42, pp 142-153.