



## مقاوم سازی دیوارهای بتنی یکطرفه با ورق های FRP در برابر بار انفجاری عمود بر دیوار

محمد رضا توکلی زاده<sup>۱</sup>، میثم مجتهد پور<sup>۲</sup>، محیا فاضلی پور<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناس ارشد سازه، واحد طراحی شرکت مشهد عمران ۸

۳- دانش آموخته‌ی کارشناسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

m\_meisam@hotmail.com

ma\_fazelipour@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش، رفتار غیر خطی دیوارهای بتنی مقاوم سازی شده به وسیله‌ی پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) مختلف نظیر شیشه، کربن و آرامید در برابر بار ناشی از موج انفجار به کمک نرم افزار المان محدود Abaqus مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه بار انفجاری، شرایط تکیه گاهی، ابعاد دیوار و ویژگی های مصالح یکسان در نظر گرفته شده و تاثیر جنس الیاف مورد استفاده و ضخامت ورق FRP در حالت های مختلف بررسی شده است. میزان تغییر مکان و نحوه‌ی توزیع تنش و نشانه‌ی تخریب در دیوارها محاسبه و ناحیه‌های بحرانی شناسایی شدند. سپس، پاسخ مربوط به دیوارهای مقاوم سازی شده با عملکرد دیوار بتنی مسلح مرجع مقایسه شده و میزان تاثیر استفاده از این روش مقاوم سازی برای دیوارها در برابر بارگذاری انفجاری مشخص گردیده است. در پایان، با بررسی نتایج حاصل از شرایط مختلف پیشنهاد مناسب برای مقاوم سازی دیوارهای بتنی مسلح ارائه گردیده و در مورد حالت بهینه آن اظهار نظر شده است.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری، دیوار بتنی مسلح، مقاوم سازی، FRP

### ۱. پیشگفتار

با توجه به گسترش ناخوشایند تهدید زندگی بشر توسط انفجار، امروزه تحلیل و طراحی سازه‌های با اهمیت نظیر ساختمان‌های نظامی، دولتی، خدماتی و پر رفت و آمد در برابر بارگذاری انفجاری دیگر نه یک محافظه کاری پرهزینه بلکه یک ضرورت به شمار می‌رود. در بحث تحلیل و طراحی تحت بار انفجار، به دلیل ماهیت این دسته از بارها و نیز رعایت مسایل اقتصادی، با توجه به کارایی ساختمان مورد نظر سطوح مختلفی از عملکرد برای سازه در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر با بکارگیری روش های نوین و مصالح کارا عملکرد سازه بهبود می‌یابد. از پیدایش تکنولوژی انفجار و دانش مربوط به بارهای انفجاری مدت زیادی می‌گذرد. در این مدت پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی بسیاری توسط مهندسان و دانشمندان بر روی مصالح و بارهای انفجاری انجام شده است. امروزه با گسترش تاسف بار حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آئین نامه‌های متعددی توسط مراجع مختلف برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه شده است. از طرفی با پیدایش مصالح نوین، گسترش کاربرد آنها در مهندسی عمران و افزایش کاربری آنها در مقاوم سازی سازه‌های موجود، چشم انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم شده است [۱].

این پژوهش به بررسی کارایی استفاده از مصالح مرکب بر عملکرد دیوارهای بتنی در برابر انفجار پرداخته است. بدین صورت که دیوار بتنی مقاوم سازی شده با پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) تحت اثر بار انفجاری قرار گرفته است. FRP های بکارگرفته شده عموماً شامل رزین از جنس اپوکسی و الیاف از جنس کربن، شیشه و آرامید می‌باشند. در این پژوهش بار انفجاری، شرایط تکیه گاهی و ابعاد دیوار ثابت فرض شده و تاثیر جنس الیاف مورد استفاده و ضخامت ورق FRP در حالت های مختلف بررسی شده است. برای مدلسازی از نرم افزار Abaqus/CAE، برای تحلیل از Abaqus/Explicit و برای پردازش نتایج از Abaqus/Viewer استفاده شده است. پس از انجام تحلیل، نحوه و مقدار توزیع پارامترهایی نظیر تغییر مکان، تنش و تخریب در مدل‌ها محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته و نواحی بحرانی شناسایی و معرفی شده است.



## ۲. پژوهش‌های پیشین

تحلیل‌های انفجاری سابقه ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که با روش‌های تقریبی انجام می‌گرفت به قرن‌های ۱۳ و ۱۴ میلادی باز می‌گردد. در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون ارائه شده که پایه ریاضی نداشت ولی از نظر کاربردی بسیار با اهمیت بود [۲]. 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 تأثیرات مشابه با توان سوم ابعاد ساختمان‌ها نسبت مستقیم دارد. این قانون بطور کامل و در سال ۱۹۲۶ توسط گرنز ارائه شد [۳].

هوراس لمب ریاضیدان دانشگاه منچستر تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [۴]. تیلور دانشمندی بود که مطالعاتش بر روی دینامیک موج‌های انفجار ناشی از مواد منفجره نقش 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 نیو مکزیکو متمرکز شد [۵].

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مصالح شکل‌پذیر حتی با مقاومت کمتر عملکرد بسیار بهتری در برابر بارهای انفجاری دارند. یکی از مطالعه‌هایی که در این زمینه انجام شده است بررسی عملکرد عرشه پل‌ها با مصالح مختلف در برابر بار ناشی از انفجار وسیله نقلیه می‌باشد [۶]. جین سون و آستانه در این پژوهش عرشه‌ی پل‌ها را در دو حالت شامل قوطی‌های فولادی و نیز بصورت کامپوزیت تحت بررسی قرار دادند. در حالت قوطی فولادی رفتار سه نوع فولاد مختلف و در حالت کامپوزیت رفتار بتن معمولی و مقاومت بالا مورد بررسی قرار گرفت و جالب آنکه نتایج حاصله حاکی از این است که مصالح فولاد و یا بتن با مقاومت پایین‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر عملکرد به مراتب بهتری دارند. پژوهش دیگری که توسط آستانه در این زمینه انجام شده است، مربوط به بررسی تأثیر انفجار ناشی از وسیله نقلیه بر روی دیوار پیشنه‌های ایشان که ترکیبی از دیوار برشی فولادی و بتنی می‌باشد [۷]. این دیوار از صفحه‌ای فولادی که به اسکلت جوش داده می‌شود و سپس دالی از بتن مسلح بوسیله پیچ و مهره بر روی آنها نصب می‌شود، تشکیل شده است. نقطه ضعف دیوارهای بتنی معمولی در این است که این دیوارها تحت اثر انفجار خرد شده و ذرات آن با سرعت بسیار بالایی در محیط حرکت می‌کنند که خود این ترکش‌ها می‌توانند باعث بوجود آمدن خسارات و تلفات شدیدی گردند. اما در این نوع دیوار وجود صفحه فولادی در پشت دیوار مانع پرواز ذرات بتن شده و در واقع این خطر را از بین می‌برد.

لوچینیو یکی دیگر از پژوهشگرانی است که در زمینه انفجار مطالعات بسیاری انجام داده است. در یکی از این پژوهش‌ها، رفتار دال بتنی تحت اثر بار انفجار بررسی شده است [۸]. وی ابتدا بصورت آزمایشگاهی دال بتنی را تحت اثر بار انفجار قرار داده است و سپس نتایج بدست آمده را با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Abaqus و ANSYS مقایسه نموده است و پس از نمایش صحت مدل‌سازی، کوشیده است رابطه‌ای بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن مواد منفجره و محل انفجار ارائه نماید و در پایان مقایسه‌ای بین مدل‌ها و نرم‌افزارهای استفاده شده انجام داده و در هر مورد نقاط ضعف و قوت آنها را تشریح نماید.

فیوض و همکاران نیز رفتار سازه‌های فولادی و بتنی را با شکل‌ها و شرایط مختلف تحت اثر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار داده‌اند و تأثیر شکل و سایر ویژگی‌ها را بر روی عملکرد سازه برای هر دو نوع فولادی و بتنی بوسیله نرم‌افزار المان محدود Abaqus شبیه‌سازی و مقایسه نموده‌اند و عملکرد سازه‌های بتنی را در حالت کلی مناسب‌تر گزارش کرده‌اند [۹].

## ۳. مدل‌سازی و مصالح

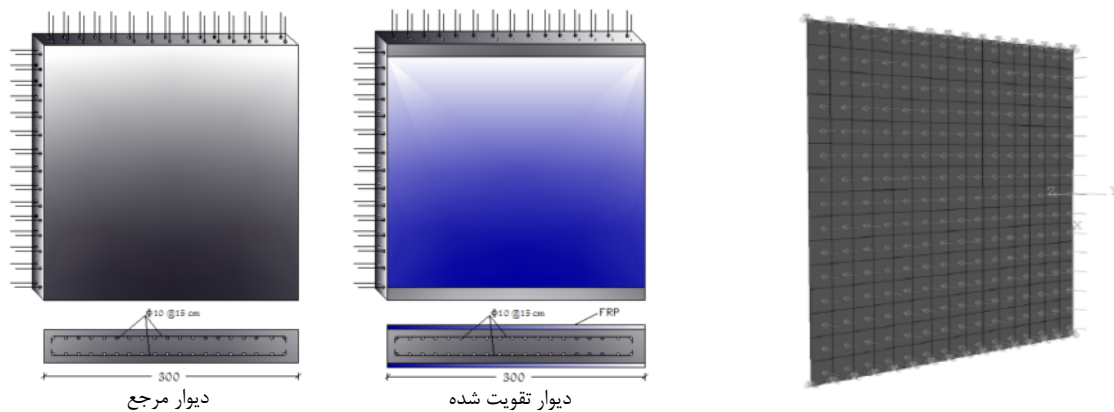
سازه مرجع در این پژوهش یک دیوار بتنی مسلح به شکل مربع می‌باشد. این دیوار بر روی دو تکیه‌گاه ساده مقید شده و تشکیل یک دال یکطرفه را می‌دهد. سازه تحت اثر فشار یکنواخت ضربه‌ای ناشی از یک انفجار بارگذاری شده، تغییر شکل و میزان خسارت در آن با مقادیر متناظر در دیوار تقویت شده با ورق‌های FRP مقایسه می‌شود.

### ۳-۱. مدل‌سازی

سازه مورد بررسی دیواری بتنی به ابعاد ۳×۳ متر مربع و با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این دیوار در دو لایه بوسیله‌ی شبکه میلگردهای فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر در فاصله‌های ۱۵۰ میلی‌متری مسلح شده است. دیوار فوق در دو سمت پشت و رو با ورق‌های FRP با ضخامت‌های متفاوت تقویت شد. با توجه به نسبت کوچک ضخامت به ابعاد سازه برای مدل‌سازی از المان پوسته S4R استفاده گردیده است [۱۰]. عملکرد دیوار به صورت یکطرفه فرض شده و تکیه‌گاه‌ها بصورت مفصل در دو سمت و بدون قید در دو امتداد دیگر قرار گرفتند. شکل ۱ تصویر محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها و نحوه‌ی بارگذاری



دیوارها را نمایش می دهد. جهت ایجاد شرایط تکیه گاهی مناسب، ورق های FRP در فاصله ۲۰۰ میلیمتری از تکیه گاه ها متوقف شده اند. ابعاد هر المان مورد استفاده در مش بندی ۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر مربع می باشد. ورق های FRP در دو سطح رو به انفجار و پشت به انفجار بر روی دیوار قرار گرفته و به صورت کامل (بدون لغزش) در تحمل تنش ها شرکت می کنند. شکل ۲ تصویر دو دیوار بتنی مسلح مرجع و تقویت شده ای را که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، نمایش می دهد.



شکل ۲- ابعاد و جزئیات مقطع دیوار بتنی مسلح مرجع و تقویت شده

شکل ۱- نمایی از محل قرارگیری تکیه گاه ها و نحوه ی بارگذاری

### ۲-۳ ویژگی مصالح

**FRP:** سه نوع ورق کامپوزیتی در این پژوهش بکار گرفته شده است. رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی و الیاف از جنس های کربن (T300)، شیشه (S-Glass) و آرامید (Kevlar49) می باشد [۱۱]. به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت بر پارامترها، ضخامت ورق های FRP بین ۰/۵ تا ۹ میلیمتر تغییر داده شده است. FRP های مورد استفاده دارای رفتار کشسان خطی بوده و ویژگی های مکانیکی آنها در جدول های ۱ تا ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی های مکانیکی ورق های FRP

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	ν <sub>12</sub>	G <sub>12</sub> (GPa)	G <sub>13</sub> (GPa)	G <sub>23</sub> (GPa)
CFRP	1.6	181	10.3	0.28	7.17	7.17	3.24
AFRP	1.5	76	5.5	0.34	2.30	2.30	2.00
GFRP	2.0	43	8.9	0.27	4.50	4.50	3.18

جدول ۲- مقادیر تنش فرورپاشی ورق های FRP

	Tension	Compression	Tension	Compression	Shear
	σ <sub>11</sub> (MPa)	σ <sub>11</sub> (MPa)	σ <sub>22</sub> (MPa)	σ <sub>22</sub> (MPa)	τ <sub>12</sub> (MPa)
AFRP	1400	-235	12	-53	34
CFRP	1500	-1500	40	-246	68
GFRP	1280	-690	49	-158	69



جدول ۳- مقادیر کرنش فروپاشی ورق‌های FRP

	Tension	Compressive	Tension	Compressive	Shear
	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{22}$	$\epsilon_{22}$	$\gamma_{12}$
AFRP	0.01840	-0.00309	0.00218	-0.00963	0.01478
CFRP	0.00828	-0.00828	0.00388	-0.02388	0.00948
GFRP	0.29767	-0.16000	0.00550	-0.02870	0.03000

**بتن:** مقاومت فشاری بتن در پژوهش ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن (Concrete Damage Plasticity) استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش پلاستیک مورد نیاز در این مدل از گزارش نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین گرفته شده است [۱۲]. مشخصات مورد استفاده برای مدلسازی بتن در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر تنش و کرنش و تخریب پلاستیک بتن در فشار

Compressive Stress (MPa)	Inelastic Strain	Compressive Damage Parameter
17.5	0.00000	0.000
25.7	0.00038	0.112
34.9	0.00189	0.429
35.0	0.00218	0.466
28.0	0.00456	0.701

جدول ۴- مقادیر تنش و کرنش و تخریب پلاستیک بتن در کشش

Tensile Stress (MPa)	Inelastic/Cracking Strain	Tensile Damage Parameter
5.30	0.000000	0.00
5.31	0.000176	0.25
0.58	0.001539	0.99

**فولاد:** با در نظر گرفتن این مسئله که میلگردهای بکار رفته در دیوارهای بتنی تحت بار انفجار وارد ناحیه مومسانی خود می‌شوند، در مورد شبیه سازی رفتار فولاد بایستی هر دو ناحیه کشسان و مومسان را در نظر گرفته و اطلاعات مورد نظر در هر دو ناحیه به نرم افزار داده شود [۱۳]. در ناحیه کشسان، ضریب کشسانی ۲۱۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسان ۰/۳ و چگالی نسبی ۷/۸ فرض می‌شود. ویژگی های فولاد در ناحیه مومسان در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- مقادیر تنش و کرنش واقعی فولادی

True Stress (MPa)	Plastic Strain
300	0.000
350	0.025
375	0.100
394	0.200
400	0.350

### ۳-۳. بارگذاری

بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. در این پژوهش برای ساده سازی و کاهش زمان عملیات شبیه سازی رایانه ای مدل‌ها از وابستگی مکانی بارگذاری صرف نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شده است. به سخن دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یکنواخت ولی تابع زمان بر روی سطح دیوار اعمال شد. این امر را می‌توان با استناد به آیین‌نامه انفجار انجمن ساخت سازه‌های فولادی آمریکا (AISC) مورد قبول دانست [۱۴]. بر طبق این آیین‌نامه، اگر فاصله محل انفجار تا سازه از نصف کوچکترین بعد سازه بیشتر شود می‌توان با فرضی مناسب فشار وارده بر دیوار را به صورت یکنواخت در نظر گرفت. در این مطالعه، فشار اعمالی هم ارز با فشار ناشی از انفجار ۹/۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۲/۵ متری از سازه در نظر گرفته شده است. فشار وارده در طول زمان کل ۰/۰۲ ثانیه به شکل دوزنقه اعمال شده که در جدول ۷ نمایش داده شده است.



جدول ۷- دامنه زمانی بارگذاری مدل و فشار وارده

Duration (Sec)	Pressure (Pa)
0.000	0
0.001	700000
0.010	700000
0.020	0

#### ۴. تحلیل و بررسی یافته‌ها

برای تحلیل مدلها از تحلیلگر صریح (Explicit) نرم افزار Abaqus استفاده شده است [۱۰]. از این تحلیلگر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمان بسیار اندک مورد نظر باشد، استفاده می‌گردد. در طی تحلیل رفتار دیوار برای مدت ۰/۰۵ ثانیه ثبت گردیده است. بیشینه پارامترهای مورد نظر در هر مدل محاسبه و نتایج مربوطه در مدل‌های تقویت شده با FRP های مختلف با ضخامت های ورق متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای تغییر مکان، تخریب بتن و تنش موجود در میلگردها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۱. تحلیل

ابتدا دیوار بتنی مسلح مرجع مدلسازی شد و پس از تحلیل میزان تغییر مکان بیشینه به همراه خسارت بتن و تنش در میلگردهای مسلح کننده تعیین گشت. سپس دیوارهای تقویت شده با ورق های FRP به ضخامت های مختلف و جنس الیاف متفاوت مدلسازی و تحلیل شد. جدول ۸ مشخصات تقویت دیوارهای مختلف را نمایش می‌دهد. با مقایسه نتایج بدست آمده پس از تحلیل دیوارهای تقویت شده با دیوار مرجع، کارایی روش مقاوم سازی و پارامترهای بهینه حاصل می‌شود.

جدول ۸- ضخامت ورق های FRP مختلف

Composite Laminate	Thickness (mm)					
	0.50	0.75	1.50	3.00	6.00	9.00
AFRP	----	0.75	1.50	3.00	6.00	9.00
CFRP	0.50	0.75	1.50	3.00	6.00	----
GFRP	----	0.75	1.50	3.00	6.00	9.00

#### ۴-۲. بررسی یافته‌ها

پارامترهایی که برای مقایسه بین رفتار دیوارهای مقاوم سازی شده با دیوار مرجع انتخاب شد عبارت بود از: تغییر مکان بیشینه، نشانه تخریب و تنش در میلگردهای فولادی. بدیهی است که یک سامانه مقاوم سازی مطلوب می‌بایست تغییر شکل سازه را محدود نموده اثرات تخریب در بتن را کاهش دهد. جلوگیری از جاری شدن میلگردها و یا محدود نمودن کرنش‌ها در آن نیز بیانگر کارایی روش می‌باشد.

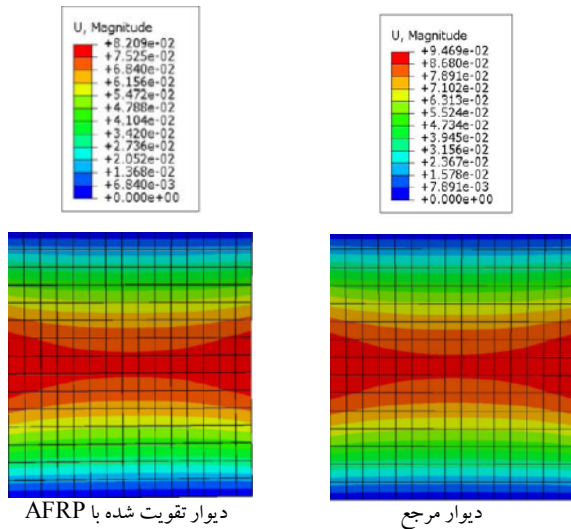
**تغییر مکان بیشینه:** با بررسی مقادیر ارائه شده در جدول ۹، اثر بارگیری ورق های FRP با الیاف آرامید، کربن و شیشه با ضخامت های مختلف برای مقاوم سازی دیوار بتنی واضح است. تاثیر روش مقاوم سازی بگونه ای است که تغییر مکان بیشینه دیوار- که مربوط به منطقه میانی آن می باشد- در حالت مقاوم سازی نشده از حدود ۹۵ میلیمتر به ۰/۵ میلیمتر در بهترین حالت مقاوم سازی کاهش می یابد. با مقایسه مقادیر تغییر مکان و ضخامت ورق FRP استفاده شده صرف نظر از جنس آن رابطه معکوس میزان ضخامت با مقادیر بیشینه تغییر مکان مشخص می‌شود که با افزایش ضخامت ورق FRP بیشینه تغییر مکان کاهش می‌یابد. انواع مختلف FRP نیز به دلیل دارا بودن ویژگی های متفاوت علی رغم اثرات مقاوم سازی از نظر شدت و مقدار مقاوم سازی اختلافات قابل ملاحظه ای با یکدیگر دارند. پلیمرهای مسلح با الیاف کربن (CFRP) بیشترین کارایی را در تقویت دیوارها دارند، به صورتی که با چسباندن یک ورق ۶ میلیمتری از آن میزان تغییر مکان بیشینه دیوار به ۰/۵ میلیمتر کاهش یافته است. از طرف دیگر پلیمرهای مسلح با الیاف شیشه (GFRP) کمترین اثر گذاری را در تقویت دیوارها دارند، به صورتی که با چسباندن یک ورق ۹ میلیمتری از آن میزان تغییر مکان بیشینه



دیوار حدود ۴۲ درصد دیوار مرجع کاهش می‌یابد. برای ورق‌های FRP مختلف با یک ضخامت یکسان (برای نمونه ۱/۵ میلیمتر) ورق‌های کربنی، آرامیدی و شیشه‌ای به ترتیب سبب کاهش تغییر مکان بیشینه در دیوار به میزان‌های ۶۳، ۲۵ و ۷ درصد می‌گردد.

جدول ۹- مقادیر تغییر مکان بیشینه دیوار مرجع و دیوارهای تقویت شده

	Thickness (mm)	Displacement (mm)
Reference	----	94.5
AFRP	0.75	82.0
AFRP	1.50	71.0
AFRP	3.00	48.4
AFRP	6.00	18.9
AFRP	9.00	9.96
CFRP	0.50	73.9
CFRP	0.75	66.3
CFRP	1.50	35.1
CFRP	3.00	12.6
CFRP	6.00	0.5
GFRP	0.75	93.8
GFRP	1.50	87.9
GFRP	3.00	66.2
GFRP	6.00	54.7
GFRP	9.00	39.5



دیوار تقویت شده با AFRP

دیوار مرجع

شکل ۳- نوارهای هم تغییر مکان بیشینه دیوار مرجع و تقویت شده

**نشانه تخریب:** مقادیر تخریب دیوارهای مدل سازی شده در جدول ۱۰ آمده است. نشانه تخریب را می‌توان به عنوان نسبت مساحت آسیب دیده به مساحت سالم دیوار تعریف نمود که با این توصیف این نشانه می‌تواند مقداری بین صفر و یک را دارا باشد. صفر مربوط به محیط کاملاً سالم و یک م‌تعلق به محیط کاملاً تخریب دیده می‌باشد. معمولاً به جهت جلوگیری از ناپایداری های عددی نرم افزار مقدار تخریب را بیش از ۰/۹۹ گزارش نمی‌نماید.

همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر تخریب ایجاد شده در دیوارهای تقویت شده، مشابه تغییر مکان با ضخامت ورق FRP نسبت معکوس دارد و با افزایش آن میزان تخریب به صورت مشهودی کاهش می‌یابد. تخریب گزارش شده برای دیوار بتنی مرجع برابر ۸۳ درصد می‌باشد که می‌توان آن را یک تخریب کامل در نظر گرفت درحالی‌که با استفاده از ورق‌های FRP این میزان تخریب را می‌توان تا مقدار نسبتاً اندک ۱۹ درصد کاهش داد. برای نمونه، دیوار تقویت شده با ورق ۶ میلیمتری کربنی کمترین میزان تخریب (۱۹ درصد) و دیوار تقویت شده با ورق ۹ میلیمتری شیشه‌ای، میزان تخریب معادل ۵۲/۸ درصد را داراست. برای ورق‌های FRP مختلف با یک ضخامت یکسان (برای نمونه ۳ میلیمتر) ورق‌های کربنی، آرامیدی و شیشه‌ای به ترتیب میزان تخریب‌های ۳۷، ۵۷ و ۶۲ درصد می‌گردد.

**تنش در میلگردهای فولادی:** امکان ثبت و ضبط تنش موجود در میلگردهای فولادی بتن مسلح یکی از قابلیت‌های جدید نسخه ۶.۹ نرم افزار Abaqus می‌باشد. برای بررسی شرایط میلگردهای فولادی پس از انفجار، تنش‌های موجود در آن‌ها ثبت گردیده است که مقادیر این تنش‌ها را برای میلگردهای پشت (Bar B) و میلگردهای رو (Bar F) در جدول ۱۱ می‌توان مشاهده نمود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، امتداد میلگردها عمود بر امتداد تکیه‌گاه‌ها می‌باشند. از طرفی مقادیر تنش موجود در میلگردهای قرار گرفته به موازات تکیه‌گاه‌ها در مقایسه با تنش تسلیم تعریف شده برای فولاد ناچیز می‌باشد (۲ تا ۱۰ مگاپاسکال). این امر اثباتی بر یکطرفه عمل نمودن دیوارهای مورد بررسی است. بر خلاف آن، میلگردهای موجود در امتداد عمود بر تکیه‌گاه‌ها به دلیل تحمل بار وارده در اثر لنگر داخلی ناشی از اعمال فشار انفجار، کرنش و تنش بالایی را متحمل می‌شوند. همچنین با مقایسه وضعیت تنش بین میلگردهای قرار گرفته در پشت و رو دیوار اختلاف قابل توجه در میزان تنش موجود مشاهده می‌شود. این امر به این دلیل است که آرماتورهای قرار گرفته در سطح روین دیوار، به سمت انفجار بوده و به همراه بتن تنش‌های فشاری را تحمل می‌کنند. در حالیکه، میلگردهای قرار گرفته در پشت، در ناحیه کششی و بتن ترک خورده بوده، به تنهایی نیروهای داخلی کششی را تحمل می‌کنند. در حالت کلی

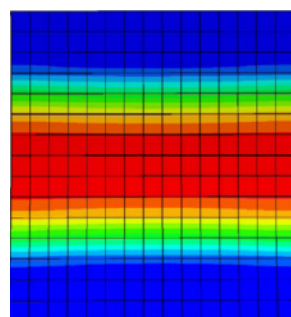
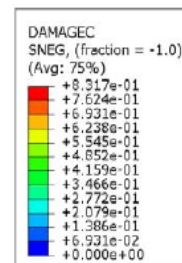
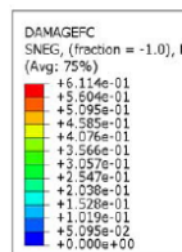


ملاحظه می شود که در ناحیه فشاری هیچ یک از میلگردهای فولادی به تنش تسلیم نرسیده اند در صورتی که در ناحیه کشش تعدادی از میلگردها علی رغم مقاوم سازی دیوار با ورق های FRP جاری شده و وارد ناحیه مومسان خود شده اند. مشابه حالات قبل تاثیر قابل توجه مقاوم سازی به وسیله FRP بر روی تنش موجود در میلگردها در جدول ۱۱ قابل مشاهده است. در این میان FRP های کربنی بهترین عملکرد و FRP های شیشه ای ضعیف ترین کارایی را داشته اند.

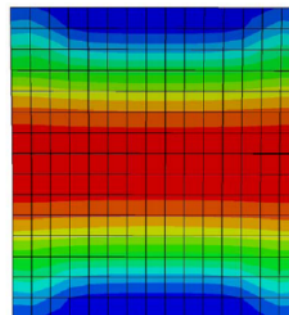
جدول ۱۰- مقادیر نشانه تخریب دیوارهای مرجع و تقویت شده      جدول ۱۱- مقادیر تنش در میلگردهای فولادی دیوارهای مرجع و تقویت شده

	Thickness (mm)	Bar F (MPa)	Bar B (MPa)
Reference	----	264	309
AFRP	0.75	261	302
AFRP	1.50	211	296
AFRP	3.00	191	240
AFRP	6.00	113	113
AFRP	9.00	88	75
CFRP	0.50	251	297
CFRP	0.75	235	287
CFRP	1.50	120	198
CFRP	3.00	111	51
CFRP	6.00	60	12
GFRP	0.75	243	302
GFRP	1.50	239	302
GFRP	3.00	231	302
GFRP	6.00	212	302
GFRP	9.00	193	302

	Thickness (mm)	Damage (%)
Reference	----	83.00
AFRP	0.75	61.14
AFRP	1.50	59.67
AFRP	3.00	56.67
AFRP	6.00	49.30
AFRP	9.00	40.40
CFRP	0.50	79.24
CFRP	0.75	73.70
CFRP	1.50	55.97
CFRP	3.00	36.76
CFRP	6.00	19.08
GFRP	0.75	73.56
GFRP	1.50	69.76
GFRP	3.00	61.65
GFRP	6.00	58.08
GFRP	9.00	52.80



دیوار تقویت شده با AFRP



دیوار مرجع

شکل ۴- نوزهای هم خسارت بیشینه دیوار مرجع و تقویت شده



## ۵. نتیجه گیری:

از بررسی رفتار دیوارهای بتنی مسلح تقویت شده با ورق های FRP در برابر انفجار بوسیله نرم افزار المان محدود، نتایج زیر قابل بیان می باشد:

- مقاوم سازی با استفاده از ورق های FRP تاثیری قابل توجهی بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجاری داشته و تغییر مکان بیشینه، نشانه خسارت و تنش در میلگردهای داخل بتن را کاهش می دهد.
- در بین انواع مختلف پلیمرهای مسلح، FRP های کربنی بهترین عملکرد را داشته و پس از آنها FRP های آرامیدی و شیشه ای به ترتیب کارایی کمتری را دارند.
- با در نظر گرفتن جهت بارگذاری در مورد ناحیه ای از دیوار که تحت اثر کشش قرار می گیرد، نیازمند سطح بالاتری از مقاوم سازی در مقایسه با ناحیه فشاری می باشد.
- استفاده از آزمایشات تجربی می تواند ضمن تایید صحت این مدل سازی، در شناسایی خطاها و کم دقتی های احتمالی مفید واقع شود.
- در نظر گرفتن توزیع مکانی بار انفجار در کنار توزیع زمانی موجب بالارفتن دقت محاسبات خواهد شد.

## ۶. مراجع

۱. توکل زاده، م. و یعقوبی، ص.، (۱۳۸۸)، "مبانی بهسازی لرزه ای و کاربرد مواد مرکب در مهندسی عمران" نخستین همایش اصلاح الگوی مصرف در صنعت ساختمان، مرکز تربیت معلم شهید بهشتی، مشهد، مهر ۱۳۸۸
2. Baker, J.F., Leader Williams, E. and Lax, P. (1948), "The design of framed buildings against high explosive bombs", The Civil Engineer in War, UK Institution of Civil Engineers, London, p. 80.
3. Brode, H.L. (1959), "Blast wave from a spherical charge, The Physics of Fluids", 2(2), March/April.
4. Lamb, H. (1895) "Hydrodynamics", Cambridge Press.
5. Taylor, G.I. (1939) "The Propagation and Decay of Blast Waves", UK Home Office, ARP Dept. RC 39.
6. Jin Son, Abolhassan Astaneh-Asl, Marcus Rutner, (2005), "Performance of Bridge Decks Subjected to Blast Load", the 6th - Japanese-German - Bridge - Symposium, Munich, Germany
7. Astaneh-A., Heydari Casey and Zhao, Qihong, (2003), "Analysis of Car-Bomb Effects on Buildings using MSC-Dytran Software and Protective Measures." Proceedings of The MSC Software Virtual Product Development Conference, Dearborn, Michigan, October 13-15
8. Luccioni B.M., Rougier V.C., (2006), Article "Concrete pavement slab under blast loads", International Journal of Impact Engineering, 1248-1266
۹. فیوض، ع.، مجتهدپور، م. و توکل زاده، م.، (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، اردیبهشت ۱۳۸۸
10. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. ( 2000) "ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.5 ", V I & II.
11. Springer, George S. (2003) "Mechanics of Composite Structures ", Cambridge Press.
۱۲. نجومی، سیدعلی. پایان نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۸۷)، "بهبود رفتار لرزه ای دیوارهای برشی با استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی"، دانشگاه تهران
13. Kirk A. Marchand, Walter P. Moore and Associates, Inc. Farid Alfawakhiri, (2004), "Facts for Steel Buildings, Blast and Progressive Collapse", American Institute of Steel Construction AISC, Inc.
۱۴. مجتهدپور، م.، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد "تاثیر شکل ساختمان بر توزیع تنش ناشی از موج انفجار"، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر