



بررسی اثرچیدمان ورق های CFRP در مقاوم سازی دیوارهای بتنی در برابر بار انفجار

محیا فاضلی پور¹، محمدرضا توکلی زاده²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

ma.fazelipour@gmail.com

drt@um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، رفتار غیر خطی دیوارهای بتنی مقاوم سازی شده به وسیله ی پلیمرهای مسلح با الیاف کربنی (CFRP) 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، جنس الیاف و ویژگی های مصالح مورد استفاده یکسان در نظر گرفته شده و تاثیر چیدمان و ضخامت ورق های CFRP در حالت های مختلف بررسی شده است. نخست، میزان جابجایی و چگونگی توزیع تنش و نشانه ی تخریب در دیوارها محاسبه و ناحیه های بحرانی شناسایی شدند. سپس، پاسخ مربوط به دیوارهای مقاوم سازی شده با عملکرد دیوارهای بتنی مسلح با یکدیگر و با دیوار مرجع مقایسه شده و میزان تاثیر استفاده از این روش مقاوم سازی برای دیوارها در برابر بارگذاری انفجاری مشخص گردیده است. در پایان، با توجه به نتایج حاصل از بررسی چیدمان های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار، بکارگیری این روش در مقاوم سازی مناسب ارزیابی شده است.

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

1. پیشگفتار

از پیدایش تکنولوژی انفجار و دانش مربوط به بارهای انفجاری مدت زیادی می گذرد. در این مدت پژوهش های 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 سازه های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آئین نامه های 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 کاربری مناسب آنها در بهسازی سازه های موجود، چشم انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم شده است.

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 کربنی (CFRP) تحت اثر بار انفجاری قرار گرفته است. CFRP های بکار گرفته شده شامل رزین از جنس اپوکسی و الیاف از جنس کربن می باشند. در این پژوهش بار انفجاری، ابعاد دیوار و شرایط تکیه گاهی ثابت فرض شده و تاثیر چیدمان الیاف کربنی و ضخامت ورق CFRP در حالت های مختلف بررسی شده است. برای مدل سازی، تحلیل و پردازش نتایج از نرم افزار Abaqus استفاده شده است. پس از انجام تحلیل، نحوه و مقدار توزیع پارامترهایی نظیر تغییر مکان و تخریب در مدل ها محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته و نواحی بحرانی شناسایی و معرفی شده است. بکارگیری روش چیدمان های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار موثر بوده موجب کاهش در میزان تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت می شود.

2. پژوهش های پیشین

تحلیل های انفجاری سابقه ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل های ابتدایی که با روش های تقریبی انجام می گرفت به قرن های 13 و 14 میلادی باز می گردد. در سال 1919 قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون ارائه شده که پایه ریاضی نداشت ولی از نظر کاربردی بسیار با اهمیت



بود [2]. 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 1926 توسط گرنز ارائه شد [3].

هوراس لمب ریاضیدان دانشگاه منچستر تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [4]. 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 1936 تا 1950 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 [5].

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مصالح شکل پذیر 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 [6]. جین سون و آستانه در این پژوهش عرشه 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 پایین تر و انعطاف پذیری 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 پیشنهادی ایشان که ترکیبی از دیوار برشی فولادی و بتنی می‌باشد [7]. 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.

لوچیونی 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 [8]. وی ابتدا بصورت آزمایشگاهی دال بتنی را تحت اثر بار انفجاری قرار داده است و سپس نتایج بدست آمده را با مدل‌سازی توسط نرم افزار 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 نرم افزارهای 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 شکلهای 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 نرم افزار المان محدود Abaqus شبیه سازی و مقایسه نموده‌اند و عملکرد سازه‌های بتنی را در حالت کلی مناسب تر گزارش کرده‌اند [9]. نگارندگان این پژوهش نیز مقاوم سازی دیوارهای بتنی با انواع ورق‌های FRP در ضخامت‌های متفاوت را در مقابل بار انفجار مورد بررسی قرار داده و تأثیر مقاوم سازی با استفاده از این ورق‌ها را بر کاهش تغییر مکان پیشین، نشانه خسارت و تنش در میلگردهای داخل بتن را در برابر بار انفجاری مناسب ارزیابی کرده که در این میان بکارگیری ورق‌های کربنی در مقایسه با ورق‌های شیشه و ارامید مناسب تر گزارش شده است [10].

3. مدل‌سازی و مصالح کاربردی

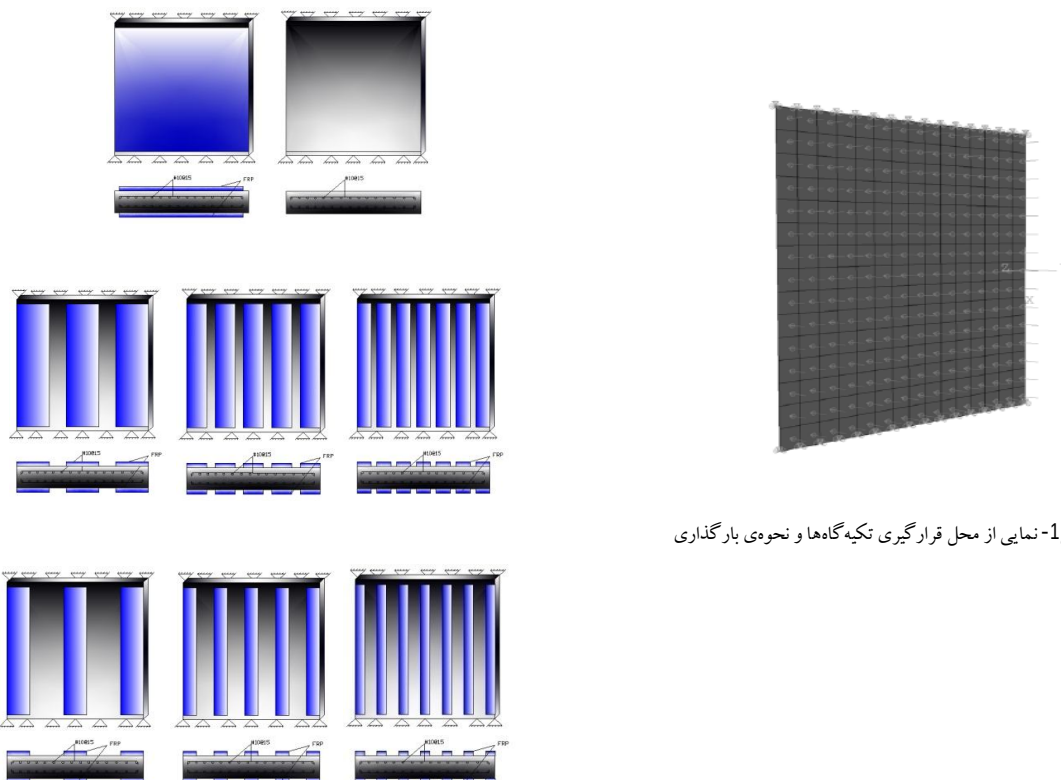
سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش دیوارهای بتنی مسلح به شکل مربع و تقویت شده با ورق‌های CFRP می‌باشند. این دیوارها بر روی دو تکیه‌گاه ساده مقید شده و تشکیل یک دال یکطرفه را می‌دهند. سازه‌ها تحت اثر فشار یکنواخت و تابع زمان ضربه‌ای ناشی از یک انفجار بارگذاری شده، تغییر شکل و میزان خسارت در آنها با توجه به نحوه‌ی چیدمان الیاف و ضخامت الیاف مقایسه می‌شوند.

3-1. مدل‌سازی

سازه‌های مورد بررسی دیوارهای بتنی به ابعاد 3×3 متر مربع و با ضخامت 200 میلیمتر می‌باشند. این دیوارها در دو لایه بوسیله شبکه میلگردهای فولادی به قطر 10 میلیمتر در فاصله‌های 150 میلیمتری مسلح شده‌اند. دیوارهای فوق در دو سمت پشت و رو با ورق‌های CFRP با ضخامت‌های متفاوت

تقویت شده‌اند. با توجه به نسبت کوچک ضخامت به ابعاد سازه برای مدل سازی از المان پوسته S4R استفاده گردیده است [10]. عملکرد دیوارها به صورت یکطرفه فرض شده است. تقویت دیوارها با توجه به درصد پوشش الیاف به سه صورت 100%، 75% و 50% تقسیم بندی شده که در هر حالت این درصد پوشش توسط سه دسته، پنج دسته و هفت دسته نوار مشخص شده‌اند.

شکل 1 تصویر محل قرارگیری تکیه گاه‌ها و نحوه ی بارگذاری دیوارها را نمایش می‌دهد. جهت ایجاد شرایط تکیه گاهی مناسب، ورق‌های CFRP در فاصله 200 میلیمتری از تکیه گاه‌ها متوقف شده‌اند. ابعاد هر المان مورد استفاده در مش بندی 200×200 میلیمتر مربع می‌باشد. ورق‌های CFRP در دو سطح رو به انفجار و پشت به انفجار بر روی دیوارها قرار گرفته و به صورت کامل (بدون لغزش) در تحمل تنش‌ها شرکت می‌کنند. شکل 2 تصویر انواع چیدمان قرار گیری ورق های CFRP بر روی دیوار بتنی مسلح مرجع را که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، نمایش می‌دهد.



شکل 1- نمایشی از محل قرارگیری تکیه گاه‌ها و نحوه ی بارگذاری

شکل 2- جزئیات مقاطع دیوارهای بتنی مسلح و نحوه ی چیدمان الیاف CFRP

3-2. ویژگی مصالح

CFRP: ماده مرکب بکارگرفته شده در این پژوهش CFRP است. رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی و الیاف از جنس‌های کربن (T300) می‌باشد [11]. به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت بر پارامترها، ضخامت ورق‌های CFRP در نظر گرفته شده 0.5، 1.5 و 6 میلی متر است. CFRP های مورد استفاده دارای رفتار کشسان خطی بوده و ویژگی‌های مکانیکی آنها در جدول‌های 1 تا 3 ارائه شده است.

جدول 1- ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های CFRP

	Density (kg/m ³)	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	ν ₁₂	G ₁₂ (GPa)	G ₁₃ (GPa)	G ₂₃ (GPa)
CFRP	۱.۶	۱۸۱	۱۰.۳	۰.۲۸	۷.۱۷	۷.۱۷	۳.۲۴



جدول 2- مقادیر تنش فروپاشی ورق های CFRP

	Tension	Compression	Tension	Compression	Shear
	σ_{11} (MPa)	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{22} (MPa)	τ_{12} (MPa)
CFRP	۱۵۰۰	-۱۵۰۰	۴۰	-۲۴۶	۶۸

جدول 3- مقادیر کرنش فروپاشی ورق های CFRP

	Tension	Compressive	Tension	Compressive	Shear
	ϵ_{11}	ϵ_{11}	ϵ_{22}	ϵ_{22}	γ_{12}
CFRP	۰.۰۰۸۲۸	-۰.۰۰۸۲۸	۰.۰۰۳۸۸	-۰.۰۲۳۸۸	۰.۰۰۹۴۸

بتن: مقاومت فشاری بتن در پژوهش 35 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 پژوهش های آزمایشگاهی پیشین گرفته شده است [12]. مشخصات مورد استفاده برای مدلسازی بتن در جدول های 4 و 5 ارایه شده است.

جدول 5- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در فشار

Compressive Stress (MPa)	Inelastic Strain	Compressive Damage Parameter
۱۷.۵	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰
۲۵.۷	۰.۰۰۰۳۸	۰.۱۱۲
۳۴.۹	۰.۰۰۱۸۹	۰.۴۲۹
۳۵.۰	۰.۰۰۲۱۸	۰.۴۶۶
۲۸.۰	۰.۰۰۴۵۶	۰.۷۰۱

جدول 4- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در کشش

Tensile Stress (MPa)	Inelastic/Cracking Strain	Tensile Damage Parameter
۵.۳۰	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰
۵.۳۱	۰.۰۰۰۱۷۶	۰.۲۵
۵.۵۸	۰.۰۰۱۵۳۹	۰.۹۹

فولاد: با در نظر گرفتن این مسئله که میلگردهای بکار رفته در دیوارهای بتنی تحت بار انفجار وارد ناحیه مومسانی خود می شوند، 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 در اختیار نرم افزار قرار گیرد [13]. در ناحیه کشسان، ضریب کشسانی 210 گیگاپاسکال، ضریب پواسان 0/3 و چگالی نسبی 7/8 فرض می شود. ویژگی های فولاد در ناحیه مومسان در جدول 6 آورده شده است.

جدول 6- 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

3-3. 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 مدل ها 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 می توان با استناد به آیین نامه انفجار انجمن ساخت سازه های فولادی آمریکا (AISC) مورد قبول دانست [14]. بر طبق این آیین نامه، اگر فاصله محل انفجار تا سازه از نصف کوچکترین بعد سازه بیشتر شود می توان با فرضی مناسب فشار



وارد بر دیوار را به صورت یکنواخت در نظر گرفت. در این مطالعه، فشار اعمالی هم ارز با فشار ناشی از انفجار 9/5 کیلوگرم TNT در فاصله 2/5 متر از سازه در نظر گرفته شده است. فشار وارده در طول زمان کل 0/02 ثانیه به شکل دوزنقه اعمال شده که در جدول 7 نمایش داده شده است.

جدول 7- دامنه زمانی بارگذاری مدل و فشار وارده

Duration (Sec)	Pressure (kPa)
0.000	0
0.001	700
0.010	700
0.020	0

4. تحلیل و بررسی یافته‌ها

برای تحلیل مدلها از تحلیلگر صریح (Explicit) نرم افزار Abaqus استفاده شده است [10]. 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 0/05 ثانیه ثبت گردیده است. بیشینه پارامترهای مورد نظر در هر مدل محاسبه و نتایج مربوطه در مدل‌های تقویت شده با چیدمان‌های مختلف CFRP در ضخامت‌های ورق متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای تغییر مکان، تخریب بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

4-1. تحلیل

ابتدا دیوار بتنی مسلح مرجع مدلسازی شد، پس از تحلیل میزان تغییر مکان بیشینه به همراه حداکثر خسارت در بتن تعیین گشت. سپس دیوارهای تقویت شده با ورق‌های CFRP در چیدمان‌ها و درصد پوشش‌های متفاوت در ضخامت‌های مختلف مدلسازی و تحلیل شد. با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده پس از تحلیل دیوارهای تقویت شده با دیوار مرجع، کارایی روش مقاوم سازی و پارامترهای بهینه حاصل می‌شود.

4-2. بررسی یافته‌ها

پارامترهایی که برای مقایسه بین رفتار دیوارهای مقاوم سازی شده انتخاب شدند عبارت است از: تغییر مکان بیشینه و نشانه تخریب. بدیهی است که یک سامانه مقاوم سازی مطلوب می‌بایست تغییر شکل سازه را محدود نموده اثرات تخریب در بتن را کاهش دهد.

تغییر مکان بیشینه: با بررسی مقادیر ارائه شده در جدول‌های سه گانه‌ی 8، اثر بکارگیری ورق‌های CFRP با ضخامت‌های مختلف و درصد پوشش متفاوت با توجه به تعداد لایه‌ها، در مقاوم سازی دیوار بتنی واضح است. تاثیر روش مقاوم سازی بگونه‌ای است که تغییر مکان بیشینه دیوار - که مربوط به منطقه میانی آن می‌باشد- در حالت مقاوم سازی نشده از حدود 95 میلیمتر به 0/5 میلیمتر در بهترین حالت مقاوم سازی کاهش می‌یابد. با مقایسه مقادیر تغییر مکان و ضخامت ورق CFRP استفاده شده رابطه وارونه میزان ضخامت با مقادیر بیشینه تغییر مکان مشخص می‌شود که با افزایش ضخامت ورق CFRP بیشینه تغییر مکان حاصل کاهش می‌یابد.

تغییرات بیشینه‌ی تغییر مکان به صورت مشهودی با درصد پوشش الیاف متغیر است این اثر با افزایش ضخامت نمایان تر است به طوری که بیشینه‌ی تغییر مکان در ضخامت 1.5 میلی متر در پوشش 100% از حدود 35.1 میلی متر به 77.4 میلی متر در پوشش 50% افزایش می‌یابد.

تغییرات بیشینه‌ی تغییر مکان در در صدهای پوشش متفاوت می‌تواند با تغییر در ضخامت جبران شود. بگونه‌ای که بیشینه‌ی تغییر مکان در در صد پوشش 100% در ضخامت 0.5 میلی متر در حدود 74 میلی متر بوده که این تغییر مکان در پوشش 50% با افزایش ضخامت 1.5 میلی متر به 77.4 میلی متر، و در همان درصد پوشش با ضخامت 6 میلی متر به حداقل مقدار 64.3 میلی متر کاهش می‌یابد.

در بررسی رفتار چیدمان نواری بکار گرفته شده مشاهده می‌شود که افزایش تعداد نوارها در بهبود عملکرد دیوار موثر است. تاثیر بکارگیری این روش مقاوم سازی بگونه‌ای است که در تمام درصدهای پوشش رایج شده با افزایش تعداد نوارها و بطبع آن کاهش عرض نوار تغییر مکان بیشینه دیوار کاهش می‌یابد.



جدول 8- مقادیر تغییر مکان بیشینه دیوار مرجع و دیوارهای تقویت شده

		Thickness (mm)	Displacement (mm)
Reference	-	----	۹۴.۵
۱۰۰% CFRP	-	۰.۵۰	۷۳.۹
۷۵% CFRP	۳layers	۰.۵۰	۸۶.۶
۷۵% CFRP	۵layers	۰.۵۰	۸۳.۲
۷۵% CFRP	۷layers	۰.۵۰	۷۹.۴
۵۰% CFRP	۳layers	۰.۵۰	۹۳.۶
۵۰% CFRP	۵layers	۰.۵۰	۹۲.۶
۵۰% CFRP	۷layers	۰.۵۰	۹۰.۴

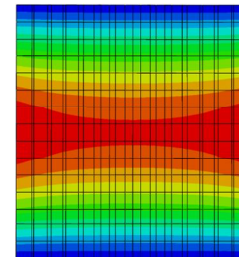
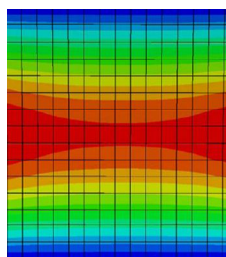
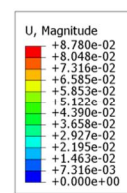
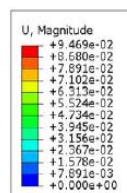
		Thickness (mm)	Displacement (mm)
Reference	-	----	۹۴.۵
۱۰۰% CFRP	-	۱.۵۰	۳۵.۱
۷۵% CFRP	۳layers	۱.۵۰	۶۳.۲
۷۵% CFRP	۵layers	۱.۵۰	۵۸.۸
۷۵% CFRP	۷layers	۱.۵۰	۵۴.۶
۵۰% CFRP	۳layers	۱.۵۰	۹۲
۵۰% CFRP	۵layers	۱.۵۰	۸۷.۸
۵۰% CFRP	۷layers	۱.۵۰	۷۷.۴

جدول 8-الف مقادیر تغییر مکان بیشینه دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP به ضخامت 0.5 mm

		Thickness (mm)	Displacement (mm)
Reference	-	----	۹۴.۵
۱۰۰% CFRP	-	۶.۰۰	۰.۵
۷۵% CFRP	۳layers	۶.۰۰	۴۹.۷
۷۵% CFRP	۵layers	۶.۰۰	۴۰.۲
۷۵% CFRP	۷layers	۶.۰۰	۳۵.۱
۵۰% CFRP	۳layers	۶.۰۰	۸۸.۵
۵۰% CFRP	۵layer	۶.۰۰	۷۹.۵۳
۵۰% CFRP	۷layers	۶.۰۰	۶۴.۳

جدول 8-ب مقادیر تغییر مکان بیشینه دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP به ضخامت 1.5 mm

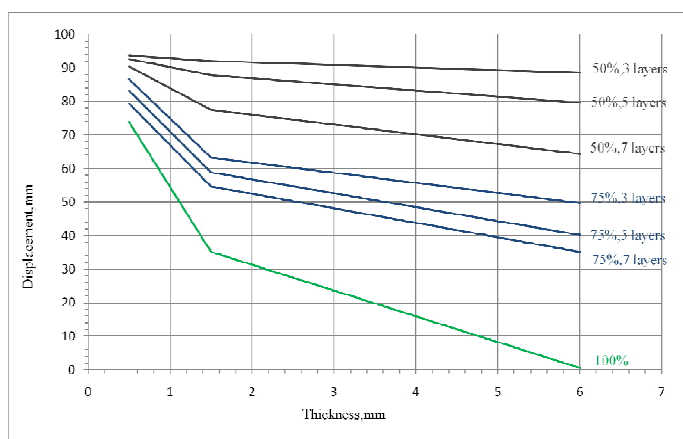
جدول 8-ب مقادیر تغییر مکان بیشینه دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP به ضخامت 1.5 mm



دیوار مرجع

دیوار با 50% پوشش در 5 نوار با ضخامت 1.5 میلی متر CFRP

شکل 3- نوارهای هم تغییر مکان بیشینه دیوار مرجع و تقویت شده



شکل 4- تغییرات تغییر مکان نسبت به ضخامت در دیوارهای مقاوم سازی نشده

نشانه تخریب: مقادیر تخریب دیوارهای مدل سازی شده در جدول‌های سه گانه 9 آمده است. نشانه تخریب را می توان به عنوان نسبت مساحت آسیب دیده به مساحت سالم دیوار تعریف نمود که با این توصیف این نشانه می تواند 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 ناپایداری‌های عددی نرم افزار مقدار تخریب را بیش از 0/99 گزارش نمی‌نماید.

همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر تخریب ارایه شده با ضخامت ورق‌های CFRP نسبت وارونه دارد و با افزایش آن میزان تخریب به صورت مشهودی کاهش می‌یابد. تخریب گزارش شده برای دیوار بتنی مرجع برابر 83 درصد می‌باشد که می‌توان آن را یک تخریب نسبتاً زیاد در نظر گرفت درحالی‌که با استفاده از ورق‌های CFRP این میزان تخریب را می‌توان تا مقدار نسبتاً اندک 19 درصد کاهش داد. بکارگیری روش مقاوم‌سازی به صورت نواری منجر به بهبود عملکرد رفتار دیوار می‌شود به گونه‌ای که با افزایش تعداد نوارها در هر درصد پوشش میزان خسارت کاهش می‌یابد.

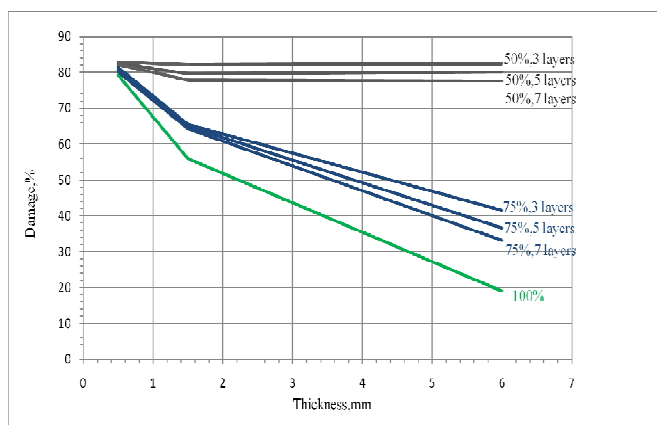
جدول 9- مقادیر نشانه تخریب دیوارهای مرجع و تقویت شده

		Thickness (mm)	Damage (%)
Reference	-	----	۸۳
۱۰۰% CFRP	-	۰.۵۰	۷۹.۲۴
۷۵% CFRP	۳layers	۰.۵۰	۸۱.۴۲
۷۵% CFRP	۵layers	۰.۵۰	۸۰.۷۴
۷۵% CFRP	۷layers	۰.۵۰	۸۰.۱۲
۵۰% CFRP	۳layers	۰.۵۰	۸۲.۹۳
۵۰% CFRP	۵layers	۰.۵۰	۸۲.۵۷
۵۰% CFRP	۷layers	۰.۵۰	۸۲.۲۳

جدول 9-الف مقادیر نشانه تخریب دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP
به ضخامت 0.5 mm

		Thickness (mm)	Damage (%)
Reference	-	----	۸۳
۱۰۰% CFRP	-	۶.۰۰	۱۹.۰۸
۷۵% CFRP	۳layers	۶.۰۰	۴۱.۵۵
۷۵% CFRP	۵layers	۶.۰۰	۳۶.۶۵
۷۵% CFRP	۷layers	۶.۰۰	۳۳.۱۵
۵۰% CFRP	۳layers	۶.۰۰	۸۲.۴۵
۵۰% CFRP	۵layers	۶.۰۰	۸۰.۱۵
۵۰% CFRP	۷layers	۶.۰۰	۷۷.۶۴

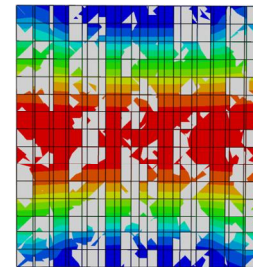
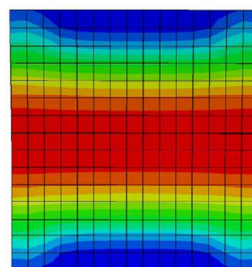
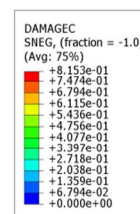
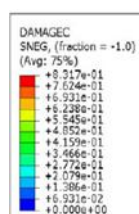
جدول 9-ب مقادیر نشانه تخریب دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP
به ضخامت 6 mm



شکل 6- تغییرات خسارت بیشینه نسبت به ضخامت

		Thickness (mm)	Damage (%)
Reference	-	----	۸۳
۱۰۰% CFRP	-	۱.۵۰	۵۵.۹۷
۷۵% CFRP	۳layers	۱.۵۰	۶۵.۵
۷۵% CFRP	۵layers	۱.۵۰	۶۴.۹۸
۷۵% CFRP	۷layers	۱.۵۰	۶۴.۳۲
۵۰% CFRP	۳layers	۱.۵۰	۸۲.۱۳
۵۰% CFRP	۵layers	۱.۵۰	۷۹.۶۴
۵۰% CFRP	۷layers	۱.۵۰	۷۷.۸۱

جدول 9-ب مقادیر نشانه تخریب دیوارهای تقویت شده با الیاف CFRP
به ضخامت 1.5 mm



دیوار با 50% پوشش در 5 نوار با ضخامت 1.5 میلی متر CFRP
دیوار مرجع

شکل 5- نوارهای هم خسارت بیشینه دیوار مرجع و تقویت شده



5. نتیجه گیری

- از بررسی رفتار دیوارهای بتنی مسلح تقویت شده با ورق های CFRP در برابر انفجار بوسیله نرم افزار المان محدود، نتایج زیر قابل بیان می باشد:
- مقاوم سازی با استفاده از ورق های CFRP تاثیر قابل توجهی بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجاری داشته و تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت را کاهش می دهد.
- بکارگیری چیدمان های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار موثر بوده و در کاهش تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت موثر است.
- کاهش سطح پوشش الیاف همراه با افزایش ضخامت می تواند عملکرد مشابهی از جهت تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت در مقایسه با پوشش کامل سطح با ضخامت نازک تر داشته 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 بالا رفتن دقت محاسبات خواهد شد.

6. منابع

1. توکلی زاده، م. و یعقوبی، ص.، (1388)، "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 1388
۲. Baker, J.F., Leader Williams, E. and Lax, P. (۱۹۴۸), "The design of framed buildings against high explosive bombs", The Civil Engineer in War, UK Institution of Civil Engineers, London, p. ۸۰.
۳. Brode, H.L. (۱۹۵۹), "Blast wave from a spherical charge, The Physics of Fluids", ۲(۲), March/April.
۴. Lamb, H. (۱۸۹۵) "Hydrodynamics", Cambridge Press.
۵. Taylor, G.I. (۱۹۳۹) "The Propagation and Decay of Blast Waves", UK Home Office, ARP Dept. RC ۳۹.
۶. Jin Son, Abolhassan Astaneh-Asl, Marcus Rutner, (۲۰۰۵), "Performance of Bridge Decks Subjected to Blast Load", the ۶th - Japanese-German - Bridge - Symposium, Munich, Germany
۷. Astaneh-A., Heydari Casey and Zhao, Qiuhong, (۲۰۰۳), "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 ۱۳-۱۵
۸. Luccioni B.M., Rougier V.C., (۲۰۰۶), Article "Concrete pavement slab under blast loads", International Journal of Impact Engineering, ۱۲۴۸-۱۲۶۶
9. فیوض، ع.، مجتهد پور، م. و توکلی زاده، م.، (1388)، "بررسی تاثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، اردیبهشت 1388
10. توکلی زاده، م.، مجتهد پور، م. و فاضلی پور، م.، (1389)، "مقاوم سازی دیوارهای بتنی یکطرفه با ورق های FRP در برابر بار انفجاری عمود بر دیوار"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت 1389
۱۰. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (۲۰۰۰) "ABAQUS/Explicit User's Manual, Version ۶.۹", V I & II.
۱۱. Springer, George S. (۲۰۰۳) "Mechanics of Composite Structures", Cambridge Press.
12. نجومی، سیدعلی. پایان نامه کارشناسی ارشد، (1387)، "بهبود رفتار لرزه ای دیوارهای برشی با استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی"، دانشگاه تهران
۱۳. Kirk A. Marchand, Walter P. Moore and Associates, Inc. Farid Alfawakhiri, (۲۰۰۴), "Facts for Steel Buildings, Blast and Progressive Collapse", American Institute of Steel Construction AISC, Inc.