

## بررسی خیز دال‌های بتنی تقویت شده با استفاده از صفحات و

### میلگردهای پلیمری CFRP و GFRP

سید نوید میرهاشمی<sup>\*۱</sup>

دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی مولانا، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

#### چکیده

امروزه افزایش انعطاف‌پذیری و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار، برخورد و ضربه، یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های سازمان‌های دولتی در سراسر دنیا است. توجه به موضوع خرابی پیش رونده در سال‌های اخیر، باعث پررنگ شدن اهمیت مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای ناگهانی مانند انفجار شده است. این در حالی است که اکثر سازه‌های موجود، مقاومت و شکل‌پذیری کافی در برابر انفجار و برخورد و ضربه را ندارند. در این پژوهش برای به‌دست آوردن تغییر مکان دال‌ها، رفتار یک دال بتن مسلح یک طرفه در چهار حالت تقویت نشده و تقویت شده با استفاده از صفحات پلیمری از نوع GFRP در سامانه باربر ثقلی ساختمان از رو و زیر دال تحت بار انفجار تماسی به‌صورت یک سازه یک طبقه با یک دهانه در برابر فشار مستقیم ماده منفجره مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی در این پژوهش با خرج انفجاری از جنس TNT و به شکل مکعبی به مقدار ۰/۵ کیلوگرم جهت ارزیابی خیز دال‌ها با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ANSYS که قابلیت تحلیل سازه تحت بار انفجاری را دارا می‌باشد، انجام گرفته است. شاخص‌های بارگذاری به‌دست آمده با مدل‌سازی هندسی و دیگر شاخص‌های مورد نیاز سازه در نرم‌افزار به‌صورت ساخت اشیاء سه بعدی کامپیوتری از نرم‌افزار می‌باشد. به‌طور خلاصه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ورق‌های تقویت CFRP و GFRP در کاهش مقدار جابه‌جایی دال بر اثر نیروی حاصل از انفجار، جلوگیری از قلوه‌کنی و فروریزش آوار در دال‌ها موثر بوده و موجب کاهش ۶۲ درصدی تغییر مکان دال خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت دال‌ها و قطر میلگردهای GFRP و تعداد لایه‌های CFRP و درصد پوشش آن بر دال‌ها، خیزی که توسط نمونه‌ها تجربه شده است، به شدت کاهش یافته است.

کلید واژه‌ها: انفجار، دال بتنی، مقاوم‌سازی، FRP، نرم‌افزار Ansys Autodyn

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی مولانا، قزوین، ایران - (mirhashemi76@gmail.com) - نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

تحقیق نشان داد که مقاوم سازی با استفاده از صفحه FRP به صورتی که سطح دیوار را به طور کامل بپوشاند، مطمئن ترین روش می باشد.

نیاعمران و گردان، [۱۶] به تحلیل دینامیکی غیر خطی نمونه دال های مسلح شده با کامپوزیت های FRP، تحت بارهای انفجاری پرداختند. در این تحقیق جهت بررسی مقاومت کامپوزیت در پاسخ نمونه تقویت شده، با ثابت نگه داشتن همه مشخصات نمونه و تنها با تغییر نوع کامپوزیت، از دو نوع کامپوزیت پلیمری کربن (CFRP) و کامپوزیت پلیمری شیشه (GFRP) استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که با توجه به این که مقاومت طولی کامپوزیت های الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه بالاتر است، در نتیجه بهبود در عملکرد نمونه های مسلح شده به کامپوزیت CFRP نسبت به GFRP بیشتر حاصل شده است.

یاو و همکاران، [۱۷] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار دال ها با رویکرد مقاوم شده در برابر انفجار پرداختند. معیار درصد آرماتور به کار رفته در دال های بتن آرمه، هدف اصلی بررسی در این پژوهش انتخاب شد و نتایج نشان داد که خیز ایجاد شده در دال ها نسبت عکس با درصد آرماتور به کار رفته در دال ها دارد.

ناصراسدی و همکاران، [۱۸] تاثیر عواملی نظیر تاثیر تعداد لایه های توری فلزی، ضخامت دال ها و مقاومت فشاری بتن بر تغییر مکان، شعاع خرابی و عملکرد دال ها را مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند افزودن تورها به دال با مقاومت و ضخامت های مختلف سبب کاهش شعاع خرابی و تغییر مکان دال ها شده و با افزایش تعداد لایه های شبکه، درصد کاهش خرابی و تغییر مکان دال بیشتر می شود.

هدف از این پژوهش، بررسی رفتار دال های مقاوم سازی شده با استفاده از صفحات و میلگردهای پلیمری GFRP و CFRP تحت اثر نیروی وارد از خرج ماده انفجاری می باشد. همچنین در تحقیق حاضر که به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام شد، به منظور به دست آوردن مقدار خیز دال ها و مقایسه مکان قرارگیری ورق تقویت با استفاده از GFRP و CFRP مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

## ۲- روش تحقیق

**تعریف مواد:** برای به دست آوردن مشخصات مصالح شبیه سازی، از مواد و مصالح تعریف شده توسط کارخانه سازنده نرم افزار استفاده گردید. در کتابخانه نرم افزار، بتن انتخابی با نام CONC-35MPA قابل دسترسی می باشد. دومین ماده به کار رفته در این مدل سازی، فولاد است. این ماده نیز در کتابخانه مواد با نام تجاری Steel 4340 مطرح گردیده است. در این تحقیق ورق های پلیمری GFRP به کار رفته است، این ماده در هنگام نصب نیاز به یک نوع چسب به نام

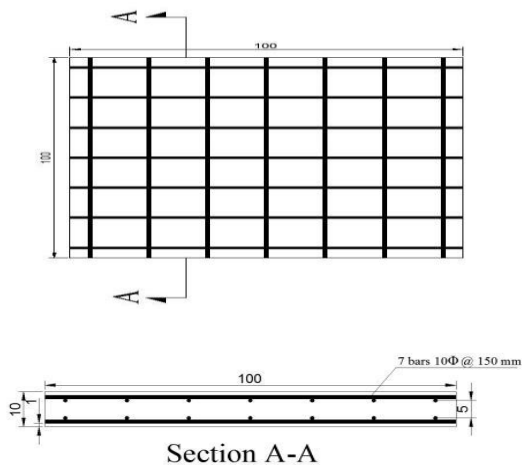
یکی از موثرترین روش ها برای مقاوم سازی سازه ها، استفاده از مواد CFRP و GFRP می باشد. پلیمرهای مسلح به الیاف کربن و شیشه سالیان زیادی است که جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های بتنی استفاده می شود. جهت مقاوم سازی و طراحی سازه ها با این صفحات و میلگردها دستور العمل ها و آئین نامه هایی نیز تهیه شده است. استفاده از انواع مختلف FRP جهت تقویت، مقاوم سازی و به سازی انواع سازه ها در صنعت ساختمان در سال های اخیر رواج پیدا کرده است. اکثر تحقیقات گذشته جهت مقاوم سازی سازه های فولادی به وسیله انواع مختلف FRP، بر روی تیرها و ستون ها و به منظور مقاوم سازی برشی و خمشی انجام شده است. بررسی ها نشان می دهد که تحقیقات محدودی درباره مقاوم سازی انفجاری دال های بتن مسلح انجام شده است [۸-۱].

هو راس لمب [۹]، ریاضیدان دانشگاه منچستر، تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرو دینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد. از اوایل سال ۱۹۹۱ تحقیقات وسیعی برای به دست آوردن راهی جهت بهبود مقاوم سازی بتن و سایر سازه های موجود در مقابل انفجار انجام شد که استفاده از کامپوزیت های FRP مفید بوده است. این روش مقاوم سازی در حال حاضر، یک عامیت جهانی یافته است؛ زیرا با خصوصیتی نظیر مقاومت بالا نسبت به وزن کمش و خوردگی کم، که خصوصیات برتری محسوب می شود، از کارایی بالا حکایت دارد. این بهبودها می تواند به راحتی مورد استفاده قرار گیرد، به طوری که کمترین خسارت به بتن وارد شود و به سرعت اجرای آن امکان پذیر است. این روش همچنین نسبت به سایر روش های تقویت نظیر تقویت با ورق های فولادی کم هزینه تر می باشد [۱۰-۱۲].

جین وونام و همکاران [۱۳] به ارزیابی رفتار دال های بتنی مقاوم سازی شده توسط GFRP در برابر بارهای انفجاری پرداختند. با استفاده از روش اجزاء محدود، مدل مصالح دارای نرخ کرنش بالا، رفتار دینامیکی دال مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با نتایج حاصل از سنجش های آزمایشگاهی پیشین مقایسه و تطابق مطلوبی مشاهده شد.

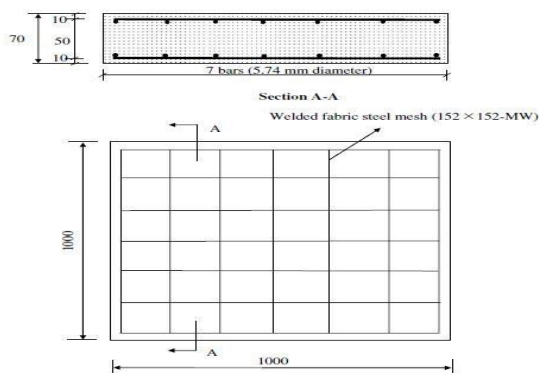
کریملو و همکاران [۱۴]، به مطالعه حالات متعدد مقاوم سازی از لحاظ الگوهای متفاوت آرایش الیاف و ضخامت های مختلف به کمک الیاف FRP پرداختند. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری دال، ۵۰٪ و شکل پذیری آن ۳۰٪ افزایش یافت و همچنین دال های تقویت شده با الیاف FRP توانایی عملکرد مناسبی در شرایط زنجیره ای را دارند و می توانند از خرابی ناشی از بارهای غیرعادی جلوگیری کنند.

اسماعیلی و همکاران [۱۵]، به بررسی اثر چیدمان های مختلف ورق های CFRP جهت مقاوم سازی دیوارها پرداختند. نتایج این



شکل (۱): مشخصات دال های مدل سازی شده.

**مبانی مدل سازی و صحت سنجی:** در جهت راست آزمایی نتایج حاصل از انفجار بر روی دال های بتنی توسط نرم افزار ANSYS AUTODYN، از آزمایشات عملی انجام شده توسط احمد تولبا [۲۴-۲۱] بر روی دال های بتنی استفاده گردید. طبق این آزمایش، شانزده دال مسلح به ابعاد ۷۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی متر و در هر طرف با ۷ میلگرد نمره ۱۲ مسلح شده اند. مقاومت ۲۸ روزه آن در آزمایشگاه با استفاده از نمونه های استوانه ای ۴۰ مگاپاسکال می باشد. اسلامپ ۱۰۰ میلی متر و حداکثر اندازه دانه های استفاده شده ۱۰ میلی متر می باشد. دال با لایه های GFRP به عرض ۵۰۰ میلی متر تقویت شده است. در شکل (۲) هندسه مدل و نحوه آرماتورگذاری مشخص شده است. با تحلیل مدل در نرم افزار، حداکثر جابجایی مرکز دال بدون تقویت ۶/۸ mm و برای دال مقاوم سازی شده با GFRP، ۴/۹ mm با ۲۷٪ کاهش به دست آمد. در جدول (۳) نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که تطابق قابل قبول مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته، نشان دهنده دقت در صحت سنجی می باشد.



شکل (۲): مدل شبکه بندی میلگردها

اپوکسی دارد. یکی از مزیت های کتابخانه نرم افزار این است که ترکیب هر دو مواد را آورده و لحاظ گردیده است. در نرم افزار استفاده از مواد آماده با نام Glass-Epoxy آورده شده است. [۱۹] ماده هوا نیز مانند بقیه مواد از کتابخانه نرم افزار و با انتخاب Ideal Gas (گاز ایده آل) که یکی از ساده ترین فرم های معادله حالت برای گاز پلی تروپیک که در نرم افزار Atudyn استفاده شده است و شامل بررسی حرکت گازها می باشد. در کتابخانه این نرم افزار تعداد زیادی ماده منفجره تعریف شده است. برای تحلیل در این تحقیق از ماده منفجره TNT استفاده شده است. انتخاب این ماده نیز مشابه با بقیه مصالح می باشد. در این مدل سازی مقدار ماده منفجره ۰/۵ کیلوگرم با چگالی ۱/۶۳ گرم بر سانتی متر می باشد که در فاصله ۳ متری از مرکز هندسی دال می باشد. مصالح مورد استفاده در آزمایش به شرح جدول های (۱ و ۲) آورده شده است [۲۰].

جدول (۱): شاخص های در نظر گرفته شده در بتن و فولاد.

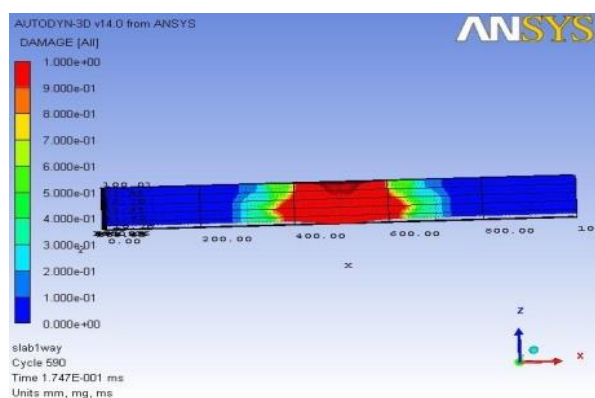
خواص مصالح	فولاد	بتن
تنش تسلیم	۳۵۶ (MPa)	$f'_c = 32 \text{ Mpa}$
مقاومت نهایی	۴۱۲ (MPa)	
کرنش نهایی	۲۲/۲ (%)	
مدول الاستیک	۱۹۴ (GPa)	
ضریب انبساط حرارتی	$11.7 \times 10^{-6} / C$	$7 \text{ to } 11 \times 10^{-6} / C$

جدول (۲): شاخص های در نظر گرفته شده ورق های تقویت GFRP.

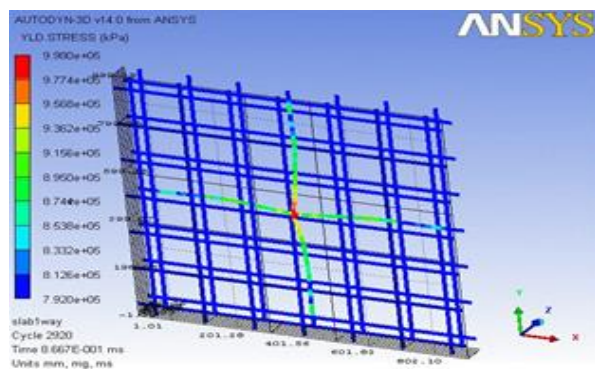
خواص مصالح	GFRP
مدول طولی یانگ	۷۵/۵ (GPa)
مدول عرضی یانگ	۱۷/۶ (GPa)
استحکام کششی طولی	۱/۳۳ (MPa)
استحکام کششی عرضی	۶۸ (MPa)
مقاومت فشاری طولی	۵۴۷ (MPa)
مقاومت فشاری عرضی	۲۶۲ (MPa)

**مدل سازی هندسی:** دال های مورد استفاده در این پژوهش با ابعاد ۱۰۰\*۱۰۰\*۱۰۰ میلی متر با دو ردیف آرماتور از بالا و پایین در ۷ ردیف با فاصله ۱۵۰ میلی متر از یکدیگر و با آرماتور نمره ۱۰ که مشخصات آن در شکل (۱) آورده شده است.

منظم و یکنواخت می‌باشد، این حاکی از آن است که توزیع بار به‌صورت یکسان می‌باشد.



شکل (۳): شروع تخریب و جابجایی در مرکز دال در اثر انفجار.



شکل (۴): کنترل تنش تسلیم آرماتورهای مدفون در بتن.

جهت پیگیری روند تخریب دال در اثر بارگذاری انفجاری، می‌توان آن را در چند مرحله نمایش داد. در مرحله اول که مدت زمان در حدود ۲-۰ میلی‌ثانیه از انفجار گذشته است و موج انفجار به علت تماس مستقیم با دال بر روی آن کامل اثر گذاشته و به علت داشتن حرارت زیاد شروع به ذوب و تخریب عناصر سازه می‌نماید. با نگاهی به شکل (۳) مشخص می‌شود که شروع ترک خوردگی و قلوله کنی از ناحیه وسط دال می‌باشد که البته در لبه‌های تکیه گاهی دال نیز ترک خوردگی‌ها دیده می‌شود. شکل (۳) مدت زمان حدود ۱/۷۴۷ میلی‌ثانیه پس از انفجار می‌باشد؛ که متوجه خواهیم شد آثار تخریب در سمت دیگر دال نمایان گشته و تغییر شکل در ضلع زیرین صورت پذیرفته است. باید این نکته را ذکر نمود که البته ترک‌های ریزی نیز در قسمت‌های دیگر دال به‌وجود آمده‌اند ولی در مقایسه با شدت تخریب مرکز گسترش نیافته‌اند. از این مرحله به بعد تخریب در قسمت مرکز دال گسترش یافته و به وضوح قابل رویت است. ضمن آن که تخریب به‌وجود آمده در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و تجمع تنش آشکار گشته و با گذر زمان بزرگتر می‌شوند. پس از گذشت حدوداً ۸ میلی‌ثانیه گسترش تخریب و ذوب عناصر در وسط دال مشخص شده است و به‌صورت تصویر نشان داده در آخرین

مقدار خیز دال‌ها (mm)			
نتایج صحت‌سنجی	نتایج آزمایشگاهی		
۶/۸	۷/۵	بدون تقویت	دال
۴/۹	۳/۷	تقویت با GFRP	

جدول (۳): مقایسه نتایج با مطالعات آزمایشگاهی

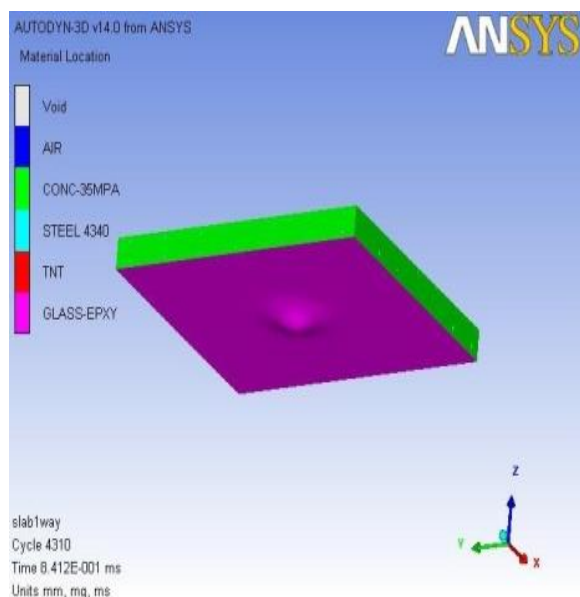
پس از اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، مدل بتنی مورد نظر را با لایه‌هایی از صفحات کامپوزیتی از GFRP به‌صورت پوشش کامل جهت تقویت دال انجام داده و شاخص مورد نظر (بیشینه جابجایی قطعه بتنی در اثر انفجار) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. تقویت دال‌های بتنی با استفاده از کامپوزیت‌ها می‌تواند به‌صورت‌های مختلف انجام گیرد ولی در این شبیه‌سازی و همچنین در آزمایشات مشابهی که به‌صورت عملی در این زمینه انجام گرفته است ثابت شده است که قسمت وسط دال باید به‌طور کامل تقویت گردد.

### ۳- مدل‌سازی دال‌ها

#### ۳-۱- دال بتن مسلح بدون تقویت GFRP

در این قسمت از مواد منفجره TNT که مقدار آن ۰/۵ کیلوگرم بود، در تماس مستقیم با دال استفاده گردید. در یک انفجار، تمام یا بخش عمده ماده منفجره تغییر حالت داده و به گاز تبدیل می‌شود، همچنین مقدار زیادی حرارت تولید می‌شود که باعث انبساط گازها شده و به دیوار محیط اطراف فشار وارد می‌کند؛ در واقع قدرت ماده منفجره به دو عوامل موثر، حجم گاز و حرارت انفجار بستگی دارد. هرچه حرارت تولید شده بیشتر باشد، قدرت ماده منفجره بیشتر است. نتیجه خرج ۰/۵ کیلوگرمی این بود که دال کاملاً آسیب دید و در مرکز دال ضلع زیرین حفره‌ای به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر پس از گذشت حدود ۸ میلی‌ثانیه به‌وجود آمد. حداکثر خیز وسط دهانه دال در حدود ۶/۸ میلی‌متر قابل رویت می‌باشد. مشاهده ترک و قلوله کنی در بتن از شرایط بارز در بتن است که در این وضعیت می‌توان آن را به خوبی مشاهده نمود. کنترل رنگی تنش تسلیم نشان داد که تجمع تنش‌ها در میانه دال و به سمت تکیه‌گاه‌ها در حال گسترش است و بیشتر ترک خوردگی‌های کششی در پایین سطح نشان می‌دهد، در این کنترل اشکال و الگوهای تولید شده بسیار

استفاده شده است این مواد مزیت قابل توجهی را دارند که کمپانی سازنده نرم افزار Autodyn ماده‌ای ارائه نموده و مصالح مخلوط با اپوکسی را معرفی می‌نماید که در امر شبیه‌سازی بسیار موثر است.

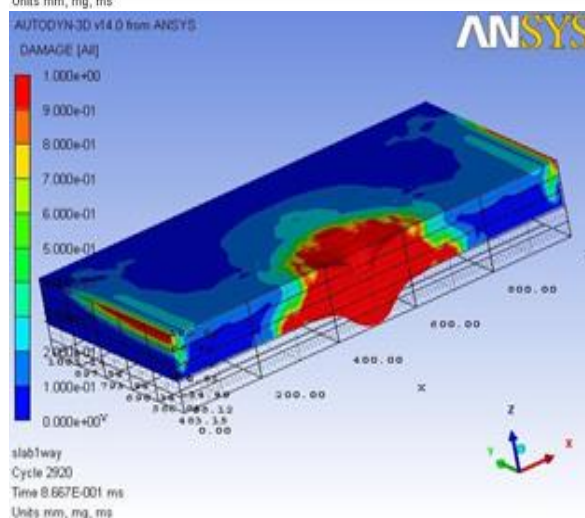
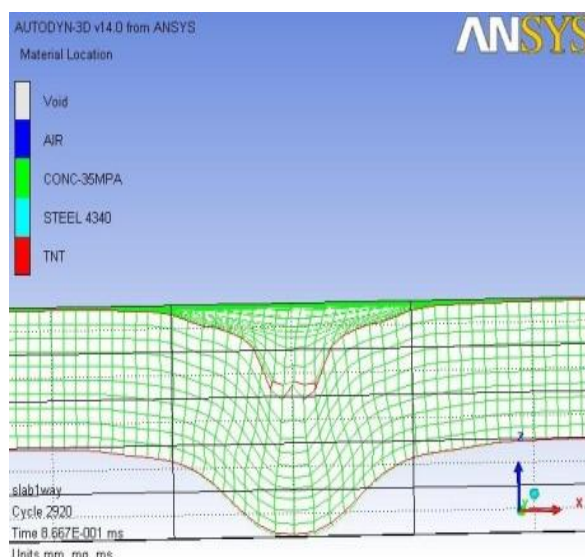


شکل (۶): وضعیت قرارگیری GFRP در دال.

نتایج دال های تقویت شده با استفاده از GFRP تحت بار انفجار ۰/۵ کیلوگرم ماده منفجره شبیه‌سازی گردید، همانند وضعیت قبلی دال دچار تخریب و فرو ریزش گردیده است؛ ولی به علت وجود ورق GFRP در زیر دال پدیده قلوه کنی و فرو ریزش آوار و جدا شدن قطعات بتن اتفاق نیفتاده است. همچنین در قسمت زیر دال هیچ گونه پارگی در ورق تقویت به وجود نیامد. از آن جا که دال از دو سمت گیردار بوده، در نتیجه دو سمت تکیه‌گاهی توزیع فشار و تنش دیده می‌شود. به نظر می‌رسد مقاومت‌سازی یک‌طرفه دال نتوانسته از میزان تخریب در لبه‌ها در قسمت بالایی دال جلوگیری نماید.

همان‌گونه که در شکل (۷) دیده می‌شود، پس از ۸/۴۵ میلی‌ثانیه از انفجار در زیر دال تخریبی به صورت متقارن در وسط به سمت لبه‌های تکیه‌گاهی دال به وجود آمده است اما در لایه GFRP ترک نخورده و پارگی صورت نگرفته است. تخریب را پس از گذشته ۱۳۰۰ سیکل و ۱/۴۶ میلی‌ثانیه از شروع انفجار؛ دال مقاومت خود را برای پایین آمدگی از سطح تراز حفظ نموده و از این مرحله به بعد جابجایی در جهت منفی محور Z رخ می‌دهد که نسبت به حالت قبل ۶۵۰ سیکل استقامت بیشتری نموده است. دال تقویت شده با GFRP تک لایه از زیردال با خرج مساوی در حالت قبل (۰/۵ کیلوگرم TNT) مدل‌سازی شده است. مقدار خیز حداکثر آن ۴/۹۶- میلی‌متر در جهت منفی محور Z نمایش داده شده است.

سیکل تعریف شده که شکل (۵) می‌باشد، در می‌آیند. دال توسط خرج ۰/۵ کیلوگرمی TNT آزمایش گردیدند که در اثر این انفجار دچار گسیختگی زیادی گردید. مقدار خیز پایدار (بیشینه جابجایی) آن ۶/۸- میلی‌متر در جهت منفی محور Z نمایش داده شد. لازم به ذکر است تخریب و توزیع فشار در لبه‌های آزاد دال به صورت محسوسی مشاهده نگردیده است.

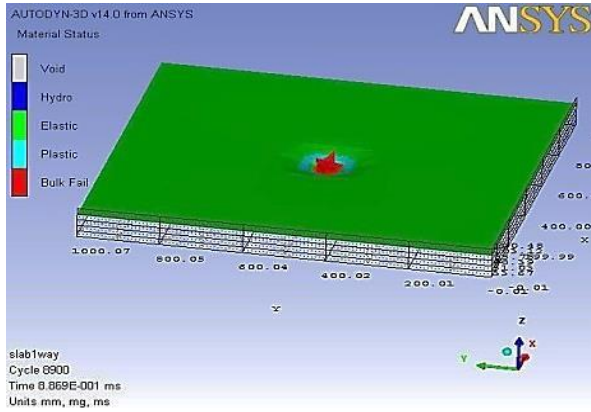


شکل (۵): تغییر شکل عناصر سازه در اثر بار انفجار.

### ۲-۳- تقویت GFRP تک لایه از زیردال

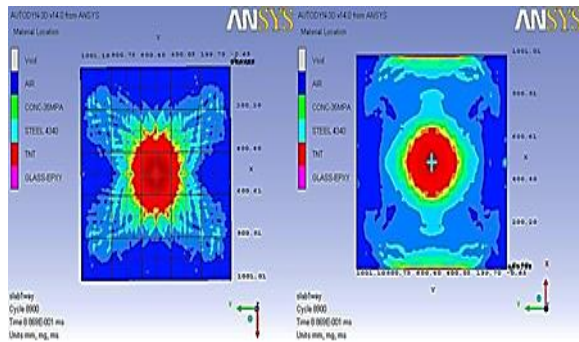
دال های بتنی که توسط E-Glass (الیاف شیشه) در سطح زیرین تقویت گردید، در این وضعیت ورق تقویت تمام سطح دال و لبه‌های دال را نیز می‌پوشاند. دال تقویت شده توسط GFRP مدل‌سازی گردیده است که در شکل (۶) چگونگی قرارگیری GFRP در دال بتنی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی لایه GFRP از مواد و مشخصات معرفی شده در کتابخانه نرم‌افزار

تقویت GFRP در روی دال هیچ تأثیر در مقاومت و جلوگیری از ریزش آوار (پدیده قلوه کنی و فروریزش) نداشته است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، ورق تقویت دچار ذوب و پارگی در ناحیه تماس با ماده منفجره شده است.



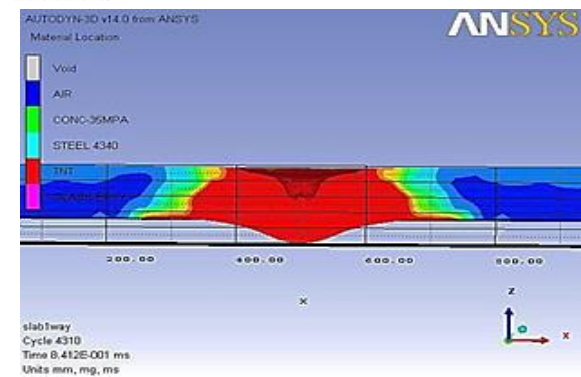
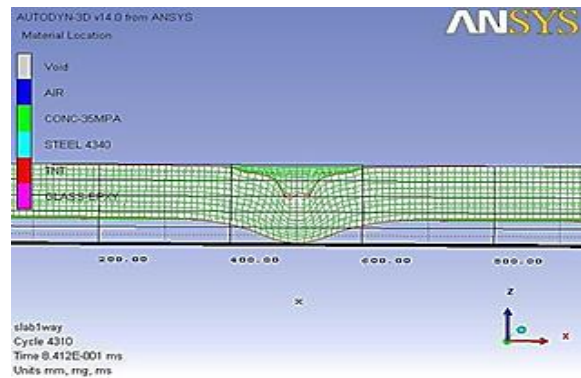
شکل (۹): وضعیت ذوب و پارگی ورق GFRP.

به نظر می‌رسد میزان جابجایی ناحیه مرکزی زیر دال همانند مدل دال بدون تقویت می‌باشد. مقاومت‌سازی لایه GFRP در روی دال مانع از تخریب نگردیده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل (۱۰) توزیع تنش از سمت روی دال بیشتر متمایل به تکیه‌گاه‌ها می‌باشد و از سمت زیر دال تخریب به سمت گوشه‌های دال گرایش دارد. در نتیجه در دو سمت تکیه‌گاهی توزیع فشار و تنش دیده می‌شود.



شکل (۱۰): (الف) کنتور تخریب سطح بالای دال و نمایش چاله انفجار (ب) کنتور تخریب سطح زیرین دال.

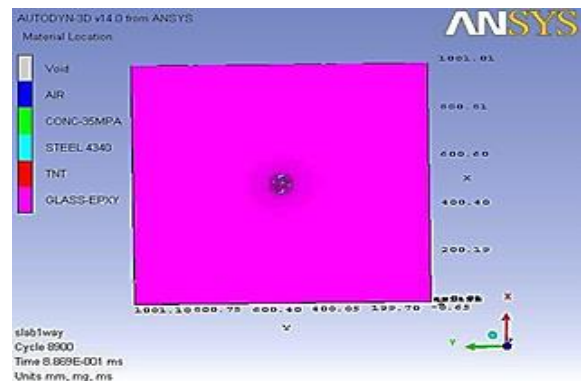
همان‌گونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود پس از گذشت ۸/۸۶ میلی‌ثانیه از انفجار الگوی تخریب در زیر دال برابر ۶/۹۷- میلی‌متر می‌باشد که این مقدار با مقدار به دست آمده در وضعیت یک مشابه است. با توجه به بررسی‌های انجام شده آثار فروریزش از سیکل ۱۴۴۰ در ۱/۴۵ میلی‌ثانیه بعد از شروع انفجار نمایان می‌گردد و تا این مرحله مقاومت خود را جهت پایین آمدگی از سطح تراز را حفظ نموده است.



شکل (۷): تغییر شکل عناصر سازه در اثر بار انفجار.

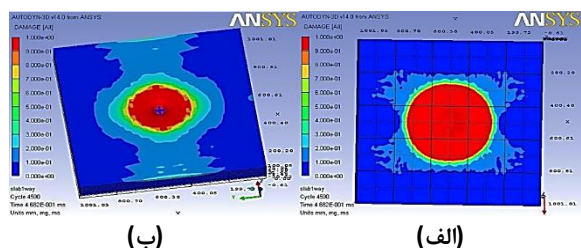
### ۳-۳- تقویت GFRP تک لایه از روی دال

در وضعیت سوم، دال بتنی با ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر از ضلع بالایی دال به صورت تک لایه توسط ورق GFRP با چسب ملاتی Epoxy مخلوط و تقویت گردیده است، در این وضعیت سطح بالایی دال کاملاً پوشیده و ضلع زیرین بدون تقویت می‌باشد. در شکل (۸) چگونگی قرارگیری ورق GFRP بر روی دال نشان داده شده است. برای مدل‌سازی لایه GFRP همانند حالت قبل در نرم‌افزار عمل شده است.



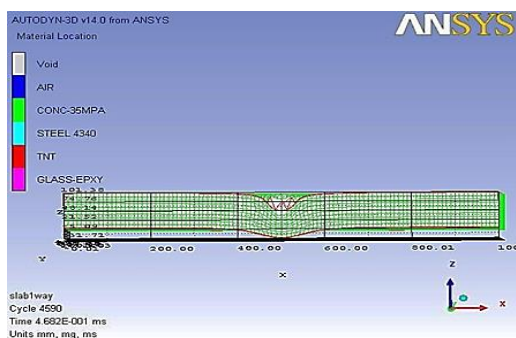
شکل (۸): وضعیت قرارگیری GFRP در دال.

نتایج به دست آمده همانند وضعیت یک می‌باشد که در آن دال مورد شبیه‌سازی دچار تخریب و فروریزش آوار گردیده و حضور ورق



شکل (۱۳): (الف) کنتور تخریب Damage در سطح روی دال  
تخریب (ب) کنتور Damage بدون نمایش ورق تقویت در سطح زیر دال.

به نظر می‌رسد میزان جابجایی مرکزی در ناحیه زیر دال از نحوه مقاوم‌سازی با لایه GFRP در زیر دال تبعیت می‌کند، زیرا میزان جابجایی مرکز دال کمتر از حالات قبلی می‌باشد. میزان گسترش ترک‌ها به سمت گوشه‌ها نیز کمتر می‌باشد. دو سمت تکیه‌گاهی گرایش به توزیع بیشتر فشار و تنش دیده می‌شود اما آن‌چه در این مورد مهم به نظر می‌رسد آن است که مقاوم‌سازی یک‌طرفه دال نتوانسته به‌طور کامل از میزان ترک خوردگی در لبه‌ها در قسمت بالایی دال جلوگیری نماید.



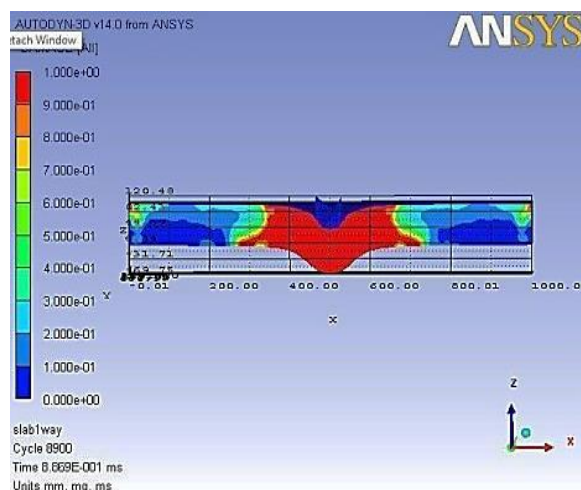
شکل (۱۴): تغییر شکل دال در اثر انفجار.

همان‌گونه که در شکل (۱۴) دیده می‌شود، پس از گذشت ۸/۴۵ میلی‌ثانیه از انفجار دال بیشترین تغییر شکل ادر عناصر دیده می‌شود. پس از گذشت ۱۴۰۰ سیکل و ۱/۴۱ میلی‌ثانیه از شروع انفجار دال مقاومت خود را در جهت پایین آمدگی از سطح تراز حفظ نموده و بعد از این مرحله شروع جابجایی در جهت منفی محور Z رخ می‌دهد. این دال توسط خرج مساوی با حالات قبل آزمایش گردیده که در اثر این انفجار دچار گسیختگی زیادی شده است. مقدار خیز حداکثر آن ۳/۱۷- میلی‌متر در جهت منفی محور Z نمایش (اندازه‌گیری) داده شد. لازم به ذکر است تخریب و توزیع فشار در لبه‌های آزاد دال به‌صورت محسوسی مشاهده نگردیده است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- پیشینه فشار وارده

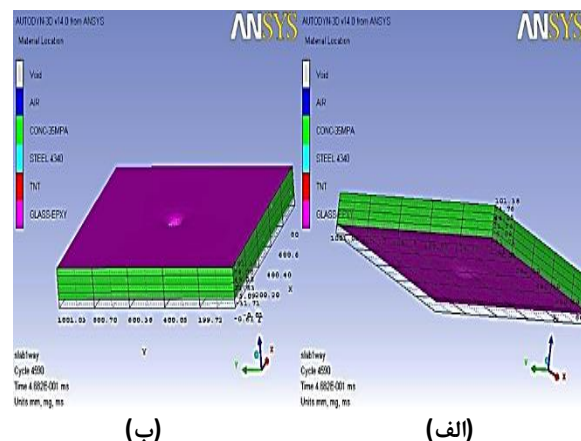
با دقت در شکل (۱۵) خواهیم دید؛ میزان فشار بیشینه در دال‌هایی که از سطح زیرین تقویت گردیده‌اند، بیشتر است. ولی در دال‌هایی



شکل (۱۱): تغییر شکل دال در اثر بار انفجار.

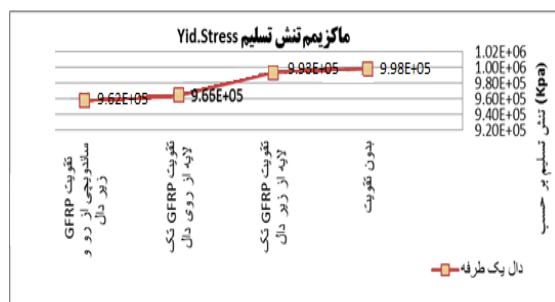
##### ۳-۴- تقویت GFRP ساندویچی از رو و زیر دال

دال بتنی که توسط ورق‌های پلیمری از نوع E-Glass یا الیاف شیشه به‌حالتی که هر دو سطح دال بتن مسلح را کاملاً پوشش می‌دهد، اصطلاح دال ساندویچ شده با ورق تقویت می‌گویند؛ این وضعیت شامل ترکیب هر دو حالت قبل با کارایی بهتر می‌شود. دال تقویت شده توسط GFRP شبیه‌سازی گردید و در شکل (۱۲) چگونگی قرارگیری GFRP بر روی دال نشان داده شده است.



شکل (۱۲): (الف) وضعیت قرارگیری ورق تقویت در سطح زیرین دال  
(ب) وضعیت قرارگیری ورق تقویت در سطح رویه دال.

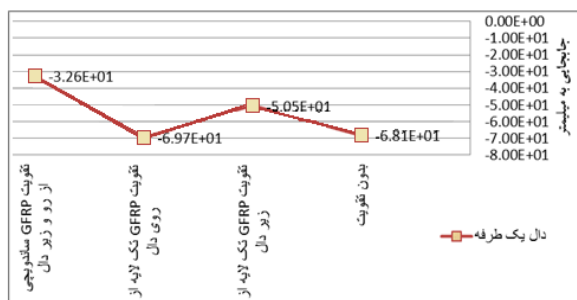
نتایج دال تقویت شده با استفاده از GFRP تحت انفجار نشان می‌دهد همانند وضعیت قبلی، دال دچار تخریب گردیده ولی همانند وضعیت دو، فروریزش اتفاق نیفتاده است. به علت وجود ورق GFRP در زیر دال پدیده قلوه کنی و فروریزش آوار و جداشدن قطعات بتن اتفاق نیفتاده است. در شکل (b-۱۳) می‌توان نمای زیر دال بتنی بدون وجود ورق تقویت را مشاهده نمایم و نحوه توزیع کنتور تنش و تخریب در دال‌های بتنی را تشخیص بدهیم.



شکل (۱۷): نمودار تطبیقی بیشینه تنش تسلیم دال.

#### ۴-۴ - حداکثر خیز پایدار در مرکز دال

مقایسه چهار گروه دال یک طرفه در شاخص مورد مطالعه در این پژوهش به صورت نمودار خطی برای چهار گروه تحلیلی در شکل (۱۸) نمایش داده شده است؛ با توجه به این نمودار میزان بیشینه جابجایی مرکز دال بتنی مسلح در حالت بدون GFRP در کنار شاخص ذکر شده برای GFRP در وضعیت‌های مختلف نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده مقدار خیز پایدار تفاوت محسوسی در هر چهار حالت دارد، در حالتی که تقویت به صورت ساندویچی انجام گرفته است، مقدار جابجایی نسبت به سه حالت دیگر کمتر بوده است تا آنجا که در وضعیت ۴ تفاوت مقدار جابجایی به بیش از ۵۲٪ بیشترین خیز کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این پژوهش تفاوت ناچیز میان تقویت دال از رو و دال تقویت نشده می‌باشد که می‌تواند در انجام پروژه‌ها راهگشا باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت این نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی‌های انجام گرفته بر اساس فاکتورهای انتخابی دال یک طرفه تغییرات جابجایی در نمونه‌هایی که ورق به صورت ساندویچی برای دال استفاده شده تاثیر قابل توجهی را داشته است ولی در نمونه تقویت از روی دال، چندان تأثیری در افزایش مقاومت دال نداشته و نمی‌تواند مانع از گسیختگی دال گردد.

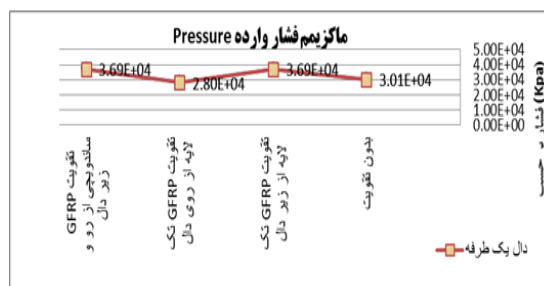


شکل (۱۸): نمودار بیشینه جابجایی دال.

#### ۴-۴-۱ - تاثیر افزایش ضخامت و قطر میلگرد بر خیز دال

به‌منظور بررسی تاثیر افزایش ضخامت و قطر میلگرد پلیمری GFRP بر عملکرد دال، از سه دسته دال با ضخامت‌های ۱۰۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ با قطر میلگرد ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶

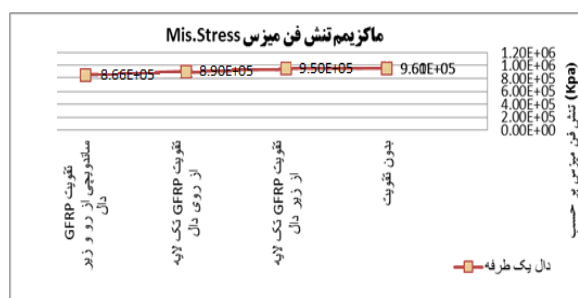
که تقویت در ضلع زیرین ندارند، توقف فشار ثبت شده زودتر اتفاق افتاده است. در نمونه تقویت از روی دال مشاهده می‌شود که ورق تقویت هیچ مقاومتی نداشته و در فشار وارده دچار پارگی و بی‌تأثیری گشته است. اما در بقیه دال‌های تقویت شده با افزایش تقویت، فشار تحمل شده بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۵): نمودار مقایسه‌ای فشار وارده بر دال.

#### ۴-۲ - بیشینه تنش فن میزس

در شکل (۱۶) بیشینه تنش فن میزس مشاهده می‌شود. معادله فن میزس برای تشخیص جاری‌شدگی بر اساس ترکیب تنش‌های اصلی به‌کار برده می‌شود. در اینجا بیشینه تنش وارده به همه مصالح به‌کار رفته در مدل‌سازی آورده شده است. با دقت در این نمودار میزان تنش در نمونه‌ها در یک تراز می‌باشد و اختلاف کمی مشاهده می‌شود. دلیل آن میزان بار وارده و فاصله از جسم است و اختلاف موجود به علت تغییر در وجود تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.



شکل (۱۶): نمودار تطبیقی بیشینه تنش فن میزس.

#### ۴-۳ - بیشینه تنش تسلیم

در شکل (۱۷) بیشینه تنش تسلیم مشاهده می‌شود. در تفسیر این نمودار می‌توان گفت که همانند نمودار تنش فن میزس شباهت و میزان اعداد به‌دست آمد مشابه بوده اما هرچه مقدار تقویت بیشتر می‌شود، این اختلاف کمتر می‌شود. این موضوع نشان دهنده آن است که استفاده از لایه‌های تقویت در افزایش مقاومت دال موثر باشد اما در مقادیر تغییر نوع تقویت تقریباً تأثیر خاصی در افزایش شباهت میزان تنش دال ندارد.



کامپوزیتی می باشد. جداول (۵ و ۶) میزان خیز دال هایی که با یک و دو لایه CFRP مقاوم سازی شده اند، را نشان می دهد. نتایج تحلیل نشان می دهد که با افزایش درصد پوشش CFRP مقدار خیز دال ها کاهش می یابد. حداکثر خیز نهایی برای دال هایی است که پوشش کامپوزیت CFRP در آن ها ۱۰۰٪ می باشد.

**جدول (۵):** نتایج مدل سازی نرم افزاری برای دال های با یک لایه CFRP با پوشش متفاوت.

نامگذاری نمونه ها	تعداد لایه CFRP	درصد پوشش CFRP	مقدار خیز نهایی (mm)
C1-100	۱	۱۰۰	-۲/۲۵
C1-90	۱	۹۰	-۲/۳۲
C1-80	۱	۸۰	-۲/۳۷
C1-70	۱	۷۰	-۲/۴۶
C1-60	۱	۶۰	-۲/۶۳
C1-50	۱	۵۰	-۲/۷۸
C1-40	۱	۴۰	-۲/۹۱
C1-30	۱	۳۰	-۲/۹۸
C1-20	۱	۲۰	-۳/۰۵
C1-10	۱	۱۰	-۳/۱۵
C0	۰	۰	-۳/۲۶

**جدول (۶):** نتایج مدل سازی نرم افزاری برای دال های با دو لایه CFRP با پوشش متفاوت.

نام گذاری نمونه ها	تعداد لایه CFRP	درصد پوشش CFRP	مقدار خیز نهایی (mm)
C2-100	۲	۱۰۰	-۱/۳۵
C2-90	۲	۹۰	-۱/۶۸
C2-80	۲	۸۰	-۱/۸۴
C2-70	۲	۷۰	-۲/۰۳
C2-60	۲	۶۰	-۲/۱۲
C2-50	۲	۵۰	-۲/۲۶
C2-40	۲	۴۰	-۲/۴۳
C2-30	۲	۳۰	-۲/۷۱
C2-20	۲	۲۰	-۲/۹۴
C2-10	۲	۱۰	-۳/۰۲

## ۵- نتیجه گیری

۱- هنگامی که دال های بتنی با لایه GFRP از روی دال تقویت می شوند، چندان تأثیری در افزایش مقاومت دال نداشته و نمی توانند مانع از گسیختگی دال گردند. لذا این روش به هیچ عنوان روش درستی در استفاده از لایه های کامپوزیتی جهت افزایش مقاومت دال های بتنی نمی باشد.

۱۸ میلی متر در حالت تقویت از رو و زیر دال مورد استفاده قرار گرفته اند که نتایج تحلیل در جدول (۴) ارائه شده است.

**جدول (۴):** محاسبه خیز نهایی دال با تغییر در ضخامت دال و قطر میلگردها.

ابعاد دال (mm)	قطر میلگرد (mm)	مقدار خیز نهایی (mm)
۱۰۰۰*۱۰۰۰*۱۰۰	۱۸	-۲/۹۴
	۱۶	-۳/۰۶
	۱۴	-۳/۱۲
	۱۲	-۳/۱۸
	۱۰	-۳/۲۶
۱۰۰۰*۱۰۰۰*۱۵۰	۱۸	-۱/۷۰
	۱۶	-۱/۷۷
	۱۴	-۱/۸۰
	۱۲	-۱/۸۴
۱۰۰۰*۱۰۰۰*۲۰۰	۱۸	-۱/۱۰
	۱۶	-۱/۱۵
	۱۴	-۱/۱۷
	۱۲	-۱/۲۰
	۱۰	-۱/۲۳

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۴)، تأثیر افزایش ضخامت روی کاهش خیز قابل توجه بوده است به گونه ای که با افزایش ضخامت دال از ۱۰۰ به ۱۵۰ میلی متر، حدود ۴۲ درصد و از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی متر حدود ۶۲/۳ درصد کاهش خیز مشاهده شده است. همچنین مقدار خیز ایجاد شده در دال تسلیح شده با میلگرد GFRP در حالتی که ابعاد دال تغییری نداشته با افزایش قطر میلگردها کمتر شده است.

## ۴-۴-۲- دال های تقویت شده با درصد پوشش CFRP متفاوت

دال بتنی که توسط صفحات پلیمری از نوع GFRP به صورت ساندویچی در حالت (۳-۴) بررسی شد با استفاده از یک و دو لایه CFRP با درصد پوشش های متفاوت بر روی صفحات تقویتی GFRP بر دال ها به طوری که تمام سطح آن را پوشش دهد قرار داده شد. نام C که از کلمه لاتین CFRP گرفته شده، تعداد لایه مورد استفاده جهت مقاوم سازی به کار رفته است. سپس درصد پوشش CFRP بیان شده است (اعداد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و...). به عنوان مثال نمونه C1-20 دال تقویت شده ساندویچی با یک لایه CFRP و ۲۰٪ پوشش

۱۱- نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح شده به الیاف کربن نسبت به صفحات الیاف شیشه در دال‌های بتنی از مقاومت بیشتری برخوردار بوده و تاثیر نسبی بیشتری در کاهش خیز و بهبود در عملکرد مدل‌ها تحت بار انفجاری داشته‌اند.

## ۶- مراجع

- [1] Road, "Housing and Urban Development Research Center, Department of Rules and Regulations Compilation," Iranian National Building Code 21: Passive Defense, 1398. (In Persian)
- [2] U. S. Army, U. S. Navy, and U. S. A. Force, "DoD Minimum Antiterrorism Standards For Buildings," U. S. Army Corps of Engineers, 2018.
- [3] A. Vatani Oskouei, "Concrete Structure, reinforced with FRP rebar," Tehran, Shahid Rajaei Teacher Training University, 2017. (In Persian)
- [4] S. Kalavagunta, S. Naganathan, and K. N. Bin Mustapha, "Proposal for Design Rules of Axially Loaded CFRP Strengthened Cold Formed Lipped Channel Steel Sections," J. Th-Wall. Stru., vol. 72, pp. 14-19, Spring, 2013.
- [5] A. M. El-Nemr, "Serviceability of Concrete Members Reinforced with FRP Bars," Ph.D. Dissertation, Sherbrooke University of Technology, Canada, pp. 1-36, 2013.
- [6] A. Arabzadeh, A. Amani Dashlejeh, and I. Mahmoudzadeh Kani, "Experimental Study of Prestressed RC Deep Beams Retrofitted by CFRP," IQBQ, vol. 115, pp. 117-126, 2015.
- [7] M. Bazli, H. Ashrafi, and A. Vatani Oskouei, "Experiments and Probabilistic Models of Bond Strength Between GFRP Bar and Different Types of Concrete Under Aggressive Environments," Constr. Build. Mater., vol. 148, pp. 429-443, 2017.
- [8] A. S. Khshain, M. Alyaa, A. M. Riadh, and S. Jay, "A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures," Constr. Build. Mater., vol. 209, pp. 748-769, 2019.
- [9] H. Lamb, "Hydrodynamics," Cambridge University Press, Cambridge Press, 2010.
- [10] P. A. Buchan and J. F. Chen, "Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonary Structures-A State-of-the-Art Review," J. Comp., vol. 38, pp. 509-522, 2007.
- [11] G. Abhiroop and A. Satadru Das, "Retrofitting Materials for Enhanced Blast Performance of Structures: Recent advancement and challenges ahead," Constr. Build. Mater., vol. 204, pp. 224-243, 2019.
- [12] M. Moarefzadeh, "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Loads and their Economic Assessment," Advanced Defense Sci. & Tech., vol. 9(4), pp. 379-392, 1397. (In Persian)
- [13] Z. Xin, D. Xiuli, C. Zhen, and Z. Fanna, "Possible Collapse Mode for Slender Reinforced Concrete Plates Subjected to Blast Load," J. Mech. Eng., pp. 500-510, 2008.
- [14] M. J. Karimloo, M. R. Sohrabi, and M. Ajdari Moghaddam, "An investigation of Concrete Dalle in Chain Conditions and Their Hardening by FRP Fibers," Passive Defense Quarterly, vol. 2(3), pp. 1-7, 1389. (In Persian)
- [15] A. Esmaili, S. Sh. Emamzadeh, and M. Aamini Mazrea No, "The Study of CFRP Sheet Arrangement in Reinforcing

۲- در نمونه‌ای که ورق به صورت ساندویچی با کامپوزیت GFRP مقاوم‌سازی شده است، مقدار جابجایی دال نسبت به حالتی که تقویت از زیر دال انجام شده است ۳۵٪ کاهش مشاهده می‌شود.

۳- استفاده از دو لایه تقویتی متفاوت CFRP و GFRP به صورت ساندویچی در دال‌های بتنی باعث کم کردن خیز جابجایی مرکز دال شد. این تفاوت به حدی است که نسبت به بیشترین خیز ثبت شده، کاهش ۶۱٪ مشاهده گردیده است.

۴- هنگامی که فشار موج انفجار توسط مقدار ۰/۵ کیلوگرم ماده منفجره TNT اعمال گردید، دال‌های کنترل و دال‌های تقویت شده با لایه‌های GFRP که در سطح دال تقویت گردیده بودند، شکست سنگینی را تجربه نمودند که به شکل گسیختگی کامل در بتن و خم‌شدگی در فولاد ظاهر گردید. البته همین مسأله درباره دیگر دال‌ها نیز صادق می‌باشد با این تفاوت که استفاده از ورق‌های تقویتی در زیر دال باعث ریزش و قلوه کنی بتن‌های دال نگردید.

۵- با برداشتن لایه‌های تقویتی FRP و دقت در الگوهای ترک خوردگی در زیر لایه‌های GFRP و CFRP مشخص گردید که الگوهای ترک خوردگی به کار رفته در هر دو نوع پوشش تقویتی یکسان بوده و وسعت منطقه آسیب نیز برابر می‌باشد. با توجه به اینکه لایه‌های تقویتی GFRP تقریباً همان مقدار مقاومت انفجاری را درمقایسه با لایه‌های کربن از خود نشان دادند، بنابراین به نظر می‌رسد که در دسترس بودن و قیمت ارزان این مواد، می‌تواند یک عامل مهم در میزان افزایش استفاده از آن باشد.

۶- در دال‌های مسلح شده با میلگرد کامپوزیت پلیمری GFRP، با افزایش قطر میلگرد از ۱۰ به ۱۸ میلی‌متر، مقدار خیز حدود ۱۱ درصد کاهش پیدا می‌یابد.

۷- در نمونه‌های مشابه با افزایش ضخامت از ۱۰۰ mm به ۱۵۰ mm، میزان خیز حداکثر به میزان قابل توجه حدود ۴۲ درصد کاهش یافت. سطح ترک خوردگی نسبی نیز در این نمونه‌ها کمتر از نصف گردید.

۸- افزایش تعداد لایه‌های CFRP و درصد پوشش آن بر دال‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش مقدار خیز نهایی دارد. دلیل موثر بودن CFRP در این دال‌ها بخاطر این است که مود شکست (کمانش) در ناحیه مقاوم‌سازی اتفاق می‌افتد.

۹- با افزایش تعداد لایه CFRP از یک لایه به دو لایه، در پوشش ۱۰۰٪، مقدار خیز نهایی تا ۴۰٪ نسبت به حالت مشابه تک لایه، کاهش داشت.

۱۰- افزایش درصد پوشش CFRP، در حالت تک لایه از ۱۰٪ به ۱۰۰٪ سبب کاهش ۳۱ درصدی خیز و در حالت دو لایه، ۵۵٪ از مقدار خیز کاسته است.

- National Building Code 9: Design and Execution of Reinforced Concrete Structures, 1399. (In Persian)
- [21] A. Ghani Razaqpur and A. Tolba, "Blast Loading Response of Reinforced Concrete Panels Reinforced With Externally Bonded GFRP Laminates," *J. Els. Comp.*, vol. 38, pp. 535 – 546, 2007.
- [22] A. Tolba, "Response of FRP-Retrofitted Reinforced Concrete Panels to Blast loading," Ph.D. Dissertation, Carleton University, Ottawa, Canada, 2001.
- [23] C. Y. Tham, "Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation Using AUTODYN-3D," *Finite. Elem. Anal. Des.*, vol. 41, pp. 1401-1410, 2005.
- [24] M. Shahbazi and H. R. Karami, "Order a Book to Simulate the Phenomena of Impact, Explosion, Formation and Penetration with the Help of Autodyn Software," Tehran, Sarvnagar, 1393. (In Persian)
- Unarmed Masonry Walls Against Blast Load," *Passive Defense Quarterly*, vol. 5 (4), pp. 1-7, 1393. (In Persian)
- [16] M. Gordan and M. E. Nia omran, "Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for Fiber Reinforced Polymers (FRPS) Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Loading," *IQBQ*, vol. 15, pp. 19-30, 1394. (In Persian)
- [17] S. Yao, D. Zhang, X. Chen, F. Lu, and W. Wang, "Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 120-129, 2016.
- [18] K. Nasseradi, A. tajvar, and J. moradlou, "Analytical Study of Reinforced Concrete Slabs with Ferrocement Under Blast Load," *IQBQ*, vol. 18(1), pp. 31-42, 1397. (In Persian)
- [19] H. Gokkaya and M. Karatasa, "A Review on Machinability of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite Materials," *J. Def. & Tech.*, vol. 14(4), pp. 318-326, 2018.
- [20] Road, "Housing and Urban Development Research Center, Department of Rules and Regulations Compilation," Iranian

---

## Investigating the Deflection of Concrete Slabs Reinforced with CFRP and GFRP Plates and Bars

S. N. Mirhashemi\*

### Abstract

Today, increasing the flexibility and strength of structures against explosions and impacts is one of the main concerns of governmental organizations across the world. The consideration of progressive destruction has added to the importance of structural strength against explosions and impacts in recent years. In this regard, most of the existing structures do not have adequate resistance and flexibility against explosions and impacts. The present study investigates the behavior of a one-sided concrete slab in four cases, including the reinforced and non-reinforced concrete, using glass-fiber-reinforced plastic (GFRP) plates in a gravity bearing building system on and under the slab explosive-loaded as a one-story structure with a span against direct explosive pressure. A TNT explosion model in the form of a 0.5-kg cube was applied to evaluate the deflection of the slabs in the ANSYS software which is capable of analyzing the explosion-load behavior of the structure. The loading parameters obtained from geometric modeling and other parameters required by the structure were modeled as 3D objects. The results indicated that the use of GFRP and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforcement plates were effective in reducing the displacement of the slabs due to the explosion load. They prevented the spalling and collapse of slabs and reduced slab displacement by 62%. In addition, an increase in the thickness of slabs, the diameter of GFRP bars, the number of CFRP layers, and their slab coverage percentage dramatically reduced the deflection of the samples.

**Key Words:** *Explosion, Concrete Slab, Reinforcement, Ansys Autodyn Software*

---

\* Molana Institute of Higher Education, Qazvin, Iran (mirhashemi76@gmail.com)- Writer-in-Charge