

## طرح تقویت بهینه‌ی دال‌های دوطرفه‌ی بتن آرمه به کمک ورق‌های FRP

ابوالفضل نخعی<sup>۱</sup>، محمدرضا توکلی‌زاده<sup>۲</sup>، حمید شیرازی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup>استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

ab.nakhaee@mail.um.ac.ir<sup>۱</sup>

### خلاصه

دال تخت بتن آرمه یکی از سیستم‌های مرسوم سازه‌ای است که بنا به دلایلی مانند تغییرات آیین‌نامه‌ها، خطاهای ساخت، تغییر در کاربری و ایجاد بازشو ممکن است ظرفیت خمشی ناکافی داشته باشد. از میان روش‌هایی همچون پس کشیدگی، تقویت با صفحات فولادی و افزایش ضخامت بتن، کاربرد FRP در مقاوم‌سازی با توجه به ویژگی‌هایی مانند مقاومت کششی بالا، وزن کم، دوام در شرایط محیطی مخرب و نصب سریع، مورد توجه روزافزون است. این پژوهش به بررسی عددی تاثیر استفاده از ورق‌های FRP بر ظرفیت باربری و خیز نهایی دال‌های دوطرفه‌ی بتن آرمه می‌پردازد. در مرحله اول، الگوی ترک‌ها در دال با استفاده از مبانی تئوری خطوط تسلیم و همچنین به کمک تحلیل اجزای محدود دال‌های مورد نظر در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعیین الگوی ترک‌ها، با توجه به مهمترین ویژگی ورق‌های FRP یعنی مقاومت کششی بالا، نوارهای FRP به صورت عمود بر ترک‌ها در نظر گرفته شده و دال‌های مورد نظر به صورت عددی مدل‌سازی شده است. در مراحل مختلف پژوهش طول مهاري و فاصله‌ی بین نوارهای FRP به کمک بررسی نتایج تحلیل اجزای محدود تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده افزایش بیست درصدی ظرفیت باربری نهایی دال در الگوی تقویت بهینه است.

**کلمات کلیدی:** دال بتن آرمه، مقاوم سازی، تئوری خطوط تسلیم، تحلیل اجزای محدود، FRP

### ۱. مقدمه و پیشینه

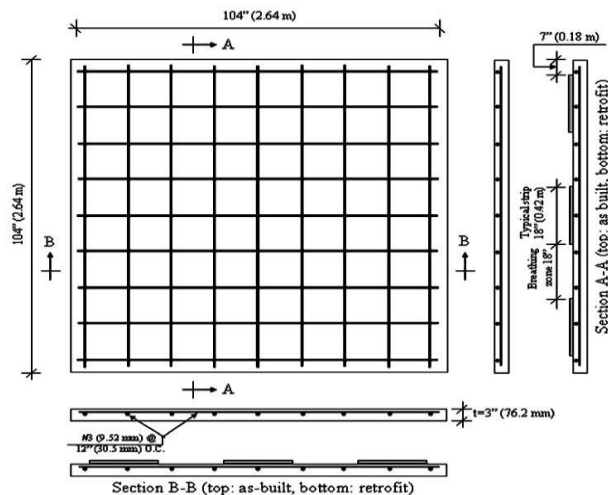
سازه‌های بتن آرمه به عنوان بخش گسترده‌ای از سازه‌ها، چنانچه برحسب محاسبات دقیق و روابط شکل‌پذیری طراحی و اجرا شوند، ساختمان‌های بسیار مطلوبی خواهند بود. اما کیفیت ساخت در برخی ساختمان‌ها به دلایل مختلف بسیار نامطلوب است. کیفیت بد بتن، آرماتورگذاری نامناسب، اجرای بد بتن‌ریزی، مصالح نامرغوب و ... از مشکلات این سازه‌هاست. دال تخت بتن آرمه به عنوان یکی از مرسوم‌ترین سیستم‌های پوشش کف به طور گسترده در سازه‌های بتن آرمه مورد استفاده قرار می‌گیرد، مزایایی مانند عدم وجود تیر، سهولت قالب بندی و اجرا، افزایش سرعت ساخت سازه و افزایش ارتفاع مفید طبقات از جمله عواملی است که دال تخت را برای پوشش کف‌هایی با بار سبک مانند آپارتمان‌های مسکونی به گزینه‌ی ایده‌آل تبدیل کرده است. دال‌های تخت بتن آرمه نیز همچون سایر اعضای بتنی ممکن است در اثر عوامل مذکور و همچنین به دلایل گوناگون از جمله خطاهای محاسباتی، ایرادات ساخت و اجرا، تغییر در آیین‌نامه‌ها، تغییر در کاربری سازه و عوامل مخرب محیطی نظیر خوردگی آرماتورها، ظرفیت باربری کافی را بر اساس آیین‌نامه‌های جدید نداشته باشد. بنابراین پژوهشگران و مهندسان همواره به دنبال راه حلی برای بهبود ظرفیت باربری این سازه‌ها در حداقل زمان و با صرف کمترین هزینه هستند. با توجه به تعدد ساختمان‌های مستعد بهسازی در کشور و اینکه به طور طبیعی آیین‌نامه‌های جدید طراحی ساختمان‌ها جزئیات بسیار و ضوابط فراوانی دارد، حجم عملیات مقاوم‌سازی ساختمان‌های مزبور با روش‌های سنتی، زیاد و هزینه‌های مربوط به قدری گزاف خواهد بود که عملاً قابل تأمین نیست. با توجه به مطالب ذکر شده مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های بتن آرمه با FRP (پلیمرهای مسلح الیافی) به عنوان روشی نوین که دارای کمترین دخالت در وضعیت موجود ساختمان است مطرح می‌شود [۱].

دال‌های تخت بتن آرمه عملاً وظیفه‌ی تحمل بارهای قائم را دارا می‌باشند، ولی به این علت که عملکرد دیافراگمی افقی نیز دارند، باید با اعضای مقاوم جانبی سازه اتصال داشته و از سختی و مقاومت کافی برخوردار باشند. در صورتی که مقاومت دال به هر دلیل کمتر از مقاومت مورد انتظار باشد، دال را می‌توان با افزایش ضخامت و قرار دادن آرماتور در وجه زیرین و سپس بتن‌پاشی وجه زیرین آن تقویت کرد. همچنین روش‌هایی مانند

اضافه کردن تیرک فولادی، اضافه نمودن نوارهای فولادی در وجوه دال و استفاده از FRP نیز برای تقویت دال‌ها وجود دارد. کاربرد مصالح پلیمری به جای مصالح سنتی و شیوه‌های موجود روشی است که امروزه در دنیا متداول می‌باشد. مصالح FRP ضمن سبکی از مقاومت کششی بالایی برخوردار می‌باشند. با وجود قیمت بالای مصالح FRP نحوه‌ی اجرای آن بسیار ساده و ارزان است. برای مقاوم‌سازی دال‌ها می‌توان FRP را به صورت نوارها یا صفحاتی بر روی سطوح تحت کشش اجرا نمود. دال‌های یکطرفه با تکیه‌گاه ساده را می‌توان با جسیباندن نوارها یا صفحات FRP در سطوح تحتانی آن‌ها و در راستای طولی مقاوم‌سازی نمود. در دال‌های دوطرفه مقاوم‌سازی در هر دو جهت صورت می‌گیرد، چنانچه دال دارای تکیه‌گاه گیردار باشد، نوارهای FRP باید در قسمت فوقانی دال نیز اجرا شود [۲].

پژوهش‌های فراوانی در زمینه‌ی تقویت دال‌های دوطرفه‌ی بتن آرمه به کمک FRP انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها به طور خلاصه اشاره می‌شود: پژوهش عبید و مرزوک در سال ۲۰۰۲ شامل ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از دال‌های بتن آرمه مربعی با تکیه‌گاه‌های ساده در چهار طرف، بارگذاری متمرکز در مرکز و نصب نوارهای CFRP و GFRP به شکل متعامد مرکز‌گذر، همچنین ایجاد مدل اجزای محدود از دال‌های مورد آزمایش در نرم‌افزار ABAQUS و مطالعه‌ی آماری تاثیر نوع و مساحت کامپوزیت، درصد فولاد، طول دهانه و ضخامت دال بر افزایش باربری خمشی دال بوده است. نتیجه پژوهش بیانگر افزایش ۴۰ درصدی باربری نهایی دال بتن آرمه‌ی تقویت شده با CFRP است [3]. پژوهش مسلم در سال ۲۰۰۳ شامل ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار DIANA است. دال‌ها مربعی و دارای تکیه‌گاه‌های ساده در چهار طرف می‌باشند؛ دال‌های ساخته شده در دو دسته‌ی بدون آرماتور (غیر مسلح) و دارای آرماتور (مسلح) قرار دارد. مقاوم‌سازی به صورت شبکه‌های سرتاسری CFRP و GFRP روی دال و اعمال بار گسترده یکنواخت در زیر دال است. ظرفیت باربری نهایی برای دال‌های غیرمسلح تا ۵ برابر و برای دال‌های مسلح تا ۲ برابر افزایش یافته است [4]. در سال ۲۰۰۵ لیام و همکاران پژوهش خود را بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی دال بتن آرمه دوطرفه دارای تکیه‌گاه ساده و تقویت شده با FRP انجام دادند. طرح تقویت مشتمل بر شبکه‌ی متعامد FRP در وجه کششی دال و اعمال بارگذاری متمرکز در مرکز دال است. نتایج پژوهش بیانگر افزایش ۲/۵ برابری باربری نهایی دال تقویت شده در مقایسه با نمونه‌ی شاهد است [5]. در سال ۲۰۰۸ آمین اگیوسو و همکاران پژوهش آزمایشگاهی بر روی ۱۶ دال مربعی با تکیه‌گاه ساده و بارگذاری متمرکز در مرکز دال را انجام دادند، نمونه‌های مختلف دارای ضخامت‌های متفاوت و تعداد لایه‌های مختلف FRP و همچنین مقدار فولاد متفاوت بوده است. نتایج پژوهش نشان دهنده‌ی گسیختگی بر اثر برش پانچ در نمونه‌های تقویت نشده دارای درصد فولاد بالا و شکست خمشی در نمونه‌های تقویت نشده با درصد فولاد اندک است. همچنین پس از تقویت نمونه‌ها با FRP به صورت یک شبکه متعامد در وجه کششی دال، حالت شکست دال‌های با میزان فولاد اندک از شکست خمشی به گسیختگی بر اثر برش پانچ تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است تقویت دال‌های مذکور با FRP منجر به افزایش بار نهایی تا ۳ برابر نمونه‌ی تقویت نشده خواهد شد [6]. فلورات و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی آزمایشگاهی ۴ دال مستطیلی با بازشو و بدون آن و دارای تکیه‌گاه‌های ساده پرداخته است. تقویت دال‌ها در راستای طولی به صورت پیوستگی خارجی و در جهت عرضی به صورت نصب نزدیک سطح انجام شده است. در نمونه‌ی بدون بازشو میزان CFRP برابر مقدار فولاد کششی و در دال‌های دارای بازشو مقدار CFRP برای یک نمونه برابر با مقدار فولاد از دست رفته و برای نمونه‌ی دیگر برابر کل میزان فولاد کششی دال است. نمونه‌ها تحت بارگذاری متمرکز در میانه‌ی دهانه قرار گرفته و میزان باربری نهایی، خیز وسط دهانه و الگوی ترک‌های تشکیل شده ثبت شده است. نتایج نشانگر افزایش دوبرابری باربری برای نمونه‌ی بدون بازشو و نمونه‌ی دارای بازشو و مقدار CFRP برابر کل فولاد مقطع است. در نمونه‌هایی که میزان CFRP برابر فولاد از دست رفته در بازشو است تغییری در باربری مشاهده نشده است [7]. از پژوهشگران ایرانی مجتبی لیب زاده در سال ۱۳۹۶ در پژوهش خود تاثیر بازشو و همچنین تاثیر نحوه‌ی قرارگیری نوارهای CFRP روی ظرفیت خمشی دال‌ها بررسی کرده است. دال‌های دارای بازشوی مرکزی، کناری و گوشه در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. تقویت برای هر بازشو با الگوهای متفاوتی مثل موازی و مورب و الگوی توام انجام شده است. نتایج این پژوهش به شرح زیر می‌باشد: در گروه با بازشوی مرکزی افزایش مقاومت از ۷ تا ۴۱ درصد، در گروه با بازشوی کناری افزایش مقاومت از ۱۲ تا ۳۰ درصد و در گروه با بازشوی گوشه افزایش مقاومت از ۱ تا ۱۰ درصد مشاهده شده است؛ لذا بیشترین کارایی مقاوم‌سازی به ترتیب در دال‌های با بازشوی مرکزی، کناری و گوشه رخ می‌دهد [8]. از میان پژوهش‌های بررسی شده مدل ساخته شده توسط مسلم برای صحت سنجی برگزیده شده است. این نمونه با توجه به بارگذاری گسترده یکنواخت مدل ایده‌آلی برای بررسی ترک‌های ایجاد شده در دال بر اساس تئوری خطوط تسلیم است. مدل مورد بررسی در این پژوهش آزمایشگاهی، یک دال بتن آرمه به شکل مربع می‌باشد. طول دهانه‌ی دال برابر ۲۶۷۰ میلیمتر و ضخامت آن برابر ۷۶ میلیمتر است. دال دارای میلگردهای فولادی در وجه کششی بوده و در فاصله‌ی ۳۰۵ میلیمتری در دو جهت متعامد قرار دارد (میلگرد گذاری ایزوتروپ). قطر میلگرد ۹/۵ میلیمتر و پوشش بتن برابر ۱۳ میلیمتر است. دال دارای تکیه‌گاه‌های ساده در چهار طرف بوده و بارگذاری به صورت گسترده یکنواخت بر سطح دال اعمال شده است. دال تقویت شده دارای مشخصات مشابهی با دال نمونه‌ی شاهد است و به کمک نصب ورق‌های FRP در وجه کششی تقویت شده است. ورق‌های FRP از جنس کربن بوده و با رزین اپوکسی به سطح بتن متصل

شده است. ورق‌های FRP در دو راستای متعامد و در جهت اضلاع دال با پهنای ۴۵۷ میلیمتر و فاصله‌ی ۴۵۷ میلیمتر از یکدیگر نصب شده‌اند. ضخامت لایه‌های FRP برابر ۰/۵۸ میلیمتر و دو لایه‌ی تقویت اجرا شده است. ابعاد و جزئیات نمونه در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۱- جزئیات دال مورد بررسی

در سال ۲۰۰۸ کبیر و قانندیا پژوهش خود را بر اساس مدل مسلم و با تغییر دادن نسبت آرماتور، زاویه‌ی الیاف FRP و تعداد لایه‌های تقویت به انجام رساندند [9]. نتیجه‌ی این پژوهش عددی در نرم‌افزار ANSYS بیانگر افزایش ظرفیت باربری در اثر افزایش نسبت آرماتور و افزایش تعداد لایه‌های تقویت و تعیین زاویه‌ی ۴۵ درجه به عنوان زاویه‌ی بهینه برای قرارگیری الیاف از میان زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه و افزایش ۱۶ درصدی ظرفیت باربری است. در سال ۲۰۱۴ Hu و Lesmana پژوهشی بر اساس مدل مسلم انجام دادند [10,11]. پروژه‌ی آنها مشتمل بر سنجش تاثیر مقاومت فشاری بتن، نسبت آرماتور، نوع آرماتور مصرفی، تعداد لایه‌های تقویتی و مقاومت کششی FRP بر ظرفیت خمشی دال به کمک تحلیل اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS است. نتایج این پژوهش حاکی از افزایش ظرفیت باربری دال بر اثر افزایش مقاومت فشاری، نسبت آرماتور و تعداد لایه‌های تقویت است. همچنین استفاده از فولاد با تنش تسلیم و تنش نهایی بالاتر و استفاده از FRP با مقاومت کششی بالاتر نیز موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش خیز دال شده است.

در پژوهش کنونی دال ساخته شده توسط مسلم به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب شده است و صحت سنجی برای نمونه‌ی تقویت نشده و تقویت شده در نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است. سپس الگوی ترک در دال تقویت نشده بر اساس پارامتر خرابی بتن در سطح زیرین دال ایجاد شده و با الگوی ترک حاصل از تئوری خطوط تسلیم مطابقت داده شده است. برای دست‌یابی به الگوی بهینه‌ی تقویت، دال مزبور به کمک ورق‌های FRP نصب شده در جهت عمود بر ترک‌ها تقویت شده است. در گام‌های مختلف تحلیل پهنای صفحات تقویت تعیین شده و پس از یافتن پهنای بهینه، صفحات FRP متصل شده و فاصله‌ی بهینه بین آنها برای دستیابی به بیشینه‌ی ظرفیت خمشی دال و حفظ شکل‌پذیری آن انتخاب شده است.

## ۲. مشخصات مصالح و مدل‌سازی در نرم‌افزار

### ۲.۱. بتن

بتن یکی از پیچیده‌ترین مصالح برای مدل‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود است. شناساندن رفتار بتن در فشار و کشش به نرم‌افزار در حالت ارتجاعی و خمیری تاثیر بسزایی در نتایج تحلیل دارد؛ به نحوی که چنانچه پژوهشگر در مرحله مدل‌سازی به جزئیات رفتار بتن توجه نکند احتمال خطا در نتایج حاصل از نرم‌افزار وجود دارد. در این پژوهش از مدل خسارت مومسانی بتن (concrete damage plasticity) در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این مدل که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل برای رفتار بتن است قابلیت استفاده در هر دو حلگر صریح و ضمنی را دارا می‌باشد. در این مدل فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جنبه‌ی اصلی مکانیزم گسیختگی بتن می‌باشد و برای مدل‌سازی شکست مصالح ترد تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای طراحی شده است به طوری که امکان بازیابی سختی در بارگذاری‌های رفت و برگشتی وجود دارد. این مدل سه ویژگی اصلی بتن را در محاسبات لحاظ می‌کند: ۱- مقاومت فشاری بزرگتر از مقاومت کششی ۲- کاهش سختی با ورود به ناحیه غیر الاستیک ۳- امکان بازیابی سختی با تبدیل بارگذاری از کششی به فشاری. لازم به ذکر است معیار خرابی این مدل Drucker Prager و تابع تسلیم Lubliner است.

با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی دقیق برای نمودار تنش-کرنش بتن در فشار و کشش برای دال مورد بررسی، روابط گوناگون ارائه شده توسط محققان برای دستیابی به نمودارهای تنش-کرنش در فشار و کشش مورد بررسی قرار گرفت. از میان روابط مورد بررسی رابطه‌ی ارائه شده توسط Wahalathantri و همکاران از دقت مناسبی برخوردار بوده و برای ادامه‌ی پژوهش به کار رفت [12]. رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری به شرح زیر است:

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = \frac{\beta \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)}{(\beta-1) + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^\beta} \quad (1)$$

$$\epsilon_{c1} = 8.9 \times 10^{-5} f'_c + 2.114 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$E_0 = 1.2431 \times 10^2 f'_c + 3.28312 \times 10^3 \quad (3)$$

$$1 \text{MPa} = 0.145037743 \text{kip/in}^2 \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق  $\sigma_c$  تنش فشاری،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن،  $\epsilon_c$  کرنش کلی بتن در فشار،  $\epsilon_{c1}$  کرنش کلی متناظر با مقاومت فشاری بتن

و  $\beta$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{1}{1 - \left( \frac{f'_c}{\epsilon_{c1} E_0} \right)} \quad (5)$$

لازم به ذکر است مدل خسارت مومسانی بتن از تنش‌های حاصل از رابطه‌ی فوق و کرنش‌های غیرالاستیک استفاده می‌نماید. با توجه به پذیرش اغلب آیین‌نامه‌های بتن آرمه در رابطه با حد ۴۰ تا ۵۰ درصد از مقاومت فشاری بتن به عنوان حد خطی نمودار تنش-کرنش، داده‌های نمودار از ۵۰ درصد مقاومت فشاری بتن به بعد به عنوان قسمت غیر خطی انتخاب شده است و کرنش‌های غیرالاستیک تا این نقطه برابر صفر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه‌ی کرنش غیرالاستیک مقدار کرنش الاستیک به ازای هر داده‌ی تنش از کرنش کلی کاسته شده و حاصل کرنش غیرالاستیک است [۱۳]. همچنین پارامتر آسیب فشاری به عنوان معیاری از خرابی بتن، بر اساس رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (6)$$

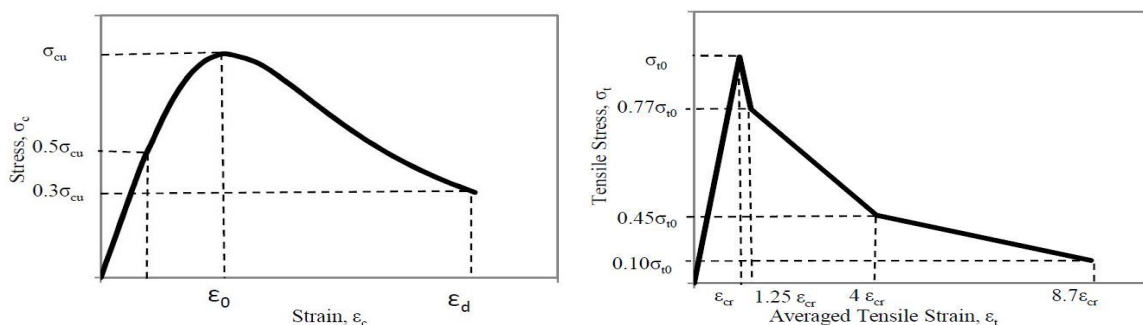
$$\epsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (7)$$

$$E_0 = E = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (8)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f'_c} \quad (9)$$

در روابط فوق  $\bar{\epsilon}_c^{in}$  کرنش غیرالاستیک،  $\epsilon_c$  کرنش کلی بتن،  $\epsilon_{0c}^{el}$  کرنش الاستیک،  $E_0$  مدول الاستیسیته‌ی بتن و  $d_c$  پارامتر خرابی بتن در

فشار است. برای دستیابی به نمودار تنش-کرنش بتن در کشش از نمودار تصویری زیر استفاده شده است:



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش کششی بتن (تصویر راست) و نمودار تنش-کرنش فشاری بتن (تصویر چپ)

بر اساس این نمودار مقاومت کششی بتن برابر  $f_t = 0.3(f_c')^{(2/3)}$  در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی رفتار سخت شوندگی کششی بتن در مدل خسارت مومسانی لازم است مراحل مشابه با رفتار فشاری طی شود [۱۳]:

$$\bar{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (11)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (12)$$

در روابط فوق  $\bar{\varepsilon}_t^{ck}$  کرنش ترک خوردگی بتن،  $\varepsilon_t$  کرنش کلی بتن در کشش،  $\varepsilon_{0t}^{el}$  کرنش الاستیک بتن در کشش،  $E_0$  مدول الاستیسیتهی بتن،  $\sigma_t$  تنش کششی بتن و  $d_t$  پارامتر خرابی بتن در کشش است. در این پژوهش مقاومت فشاری بتن برابر 31.89MPa و سایر مشخصات بتن برای مدل خسارت مومسانی به شرح جدول زیر در نظر گرفته شده است [14]:

جدول ۱- مشخصات بتن مورد استفاده در تحلیل

density(kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus(MPa)	Poisson's ratio	dilation angle	eccentricity	F <sub>bo</sub> /F <sub>co</sub>	k	viscosity parameter
2400	25648	0.16	40	0.1	1.16	0.667	0.001

## ۲.۲.۲ میلگرد فولادی

در این پژوهش برای مدلسازی رفتار میلگرد فولادی از فرضیه انرژی واپیچش (distortion energy) بیشینه استفاده شده است. بر اساس این فرضیه، شکست زمانی به صورت تسلیم رخ می دهد که در هر نقطه از جسم، انرژی واپیچش در واحد حجم در حالت سه بعدی برابر با انرژی واپیچش در نمونه ی آزمایشی تحت کشش در لحظه ی تسلیم باشد. این معیار بر اساس تنش های اصلی به صورت زیر قابل بیان است [۱۵]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_y^2 \quad (13)$$

در رابطه بالا  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  به ترتیب تنش های اصلی در جهت X، Y و Z بوده و  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده است. برای تفسیر معیار تسلیم فون میسر در نرم افزار ABAQUS باید کرنش متناظر با تنش تسلیم فولاد، صفر در نظر گرفته شده و کرنش متناظر با تنش گسیختگی آن، از کسر کرنش الاستیک از کرنش گسیختگی حاصل می شود. مشخصات در نظر گرفته شده برای میلگرد فولادی به شرح جدول زیر است:

جدول ۲- مشخصات میلگرد فولادی مورد استفاده در تحلیل

density(kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus(MPa)	Poisson's ratio
7800	200000	0.3
Yield stress(MPa)	413	620
Plastic strain	0	0.078

## FRP .۳.۲

با توجه به اینکه رفتار FRP معمولاً به صورت ناهمسانگرد (ارتوتروپ) مدل می شود، در این حالت رابطه ی تنش-کرنش صفحه ای به قرار زیر است:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

در این رابطه  $E_1$  مدول الاستیسیتهی طولی،  $E_2$  مدول الاستیسیتهی عرضی،  $G_{12}$  مدول برشی و  $\gamma_{12}$  ضریب پواسون است. در این پژوهش برای تفسیر رابطه ی سختی ارتوتروپیک جهت مدلسازی مشخصات FRP در نرم افزار به ترتیب مدول الاستیسیتهی طولی و عرضی، ضریب پواسون و مدول های برشی وارد می شود. مدول های برشی  $G_{13}$  و  $G_{23}$  برای محاسبه ی تغییر شکل برشی عرضی در پوسته مورد نیاز است. مشخصات استفاده شده برای FRP در این پژوهش به شرح جدول زیر است:

جدول ۳- مشخصات FRP مورد استفاده در تحلیل

density(kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	$\gamma_{12}$	G <sub>12</sub> (MPa)	G <sub>13</sub> (MPa)	G <sub>23</sub> (MPa)
1800	100750	1007.5	0.3	3270	3270	1860

در این پژوهش جزء مورد استفاده برای مدل‌سازی بتن C3D8R، جزء مورد استفاده برای مدل‌سازی میلگرد فولادی T3D2 و جزء مورد استفاده برای مدل‌سازی FRP، S4R است. همچنین برای مدل‌سازی اندرکنش میلگرد فولادی و بتن از قید مدفون شدگی (embedded region) استفاده شده است. برای مدل‌سازی رزین اپوکسی از اندرکنش تماسی و صفحه به صفحه بین سطح FRP و سطح زیرین دال بتنی استفاده شده است. برای محاسبه سختی رزین اپوکسی از رابطه‌ی زیر استفاده شده است [16]:

$$K_{ss} = K_{tt} = 1000 \left( 0.16 \times \frac{G_{epoxy}}{t_{epoxy}} + 0.47 \right) \quad (15)$$

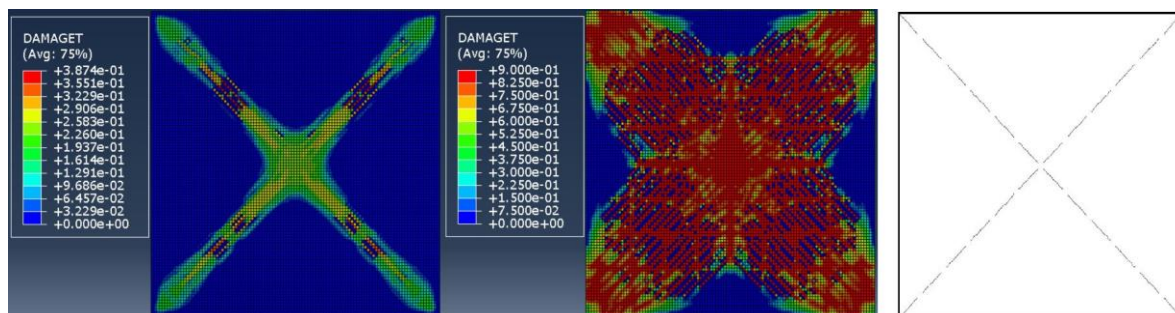
در رابطه‌ی فوق  $t_{epoxy}$  ضخامت اپوکسی بر حسب mm و  $G_{epoxy}$  مدول برشی اپوکسی بر حسب GPa است. مشخصات مفروض برای اپوکسی در جدول زیر خلاصه شده است:

جدول ۴- مشخصات رزین اپوکسی و سطح تماس بتن و FRP

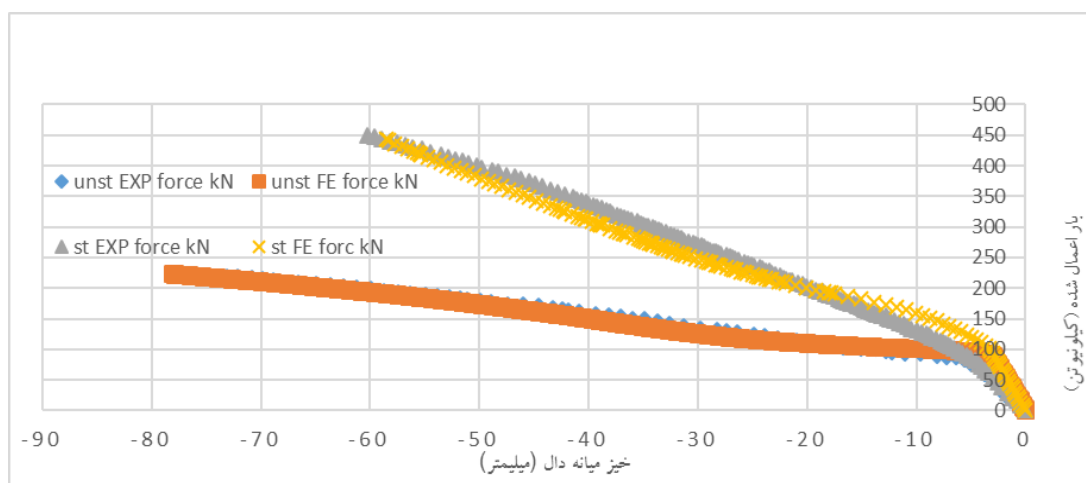
$K_{ss}$	G(MPa)	t(mm)
576	665	1

### ۳. صحت سنجی

در این بخش صحت سنجی مدل‌های ایجاد شده برای دال تقویت نشده و تقویت شده ارائه شده است. نمودارهای زیر حاکی از دقت کافی مدل‌سازی برای ادامه‌ی روند پژوهش بوده و مقایسه بین کانتورهای خرابی کششی بتن و الگوی ترک حاصل از تئوری خطوط تسلیم موید صحت نتایج مدل‌سازی است.



شکل ۳- خرابی کششی بتن در سطح زیرین دال تقویت نشده در ۴۰ درصد بار نهایی (تصویر چپ)، خرابی کششی بتن در سطح زیرین دال تقویت نشده در بار نهایی (تصویر وسط) و الگوی ترک در سطح زیرین دال بر اساس تئوری خطوط تسلیم (تصویر راست)



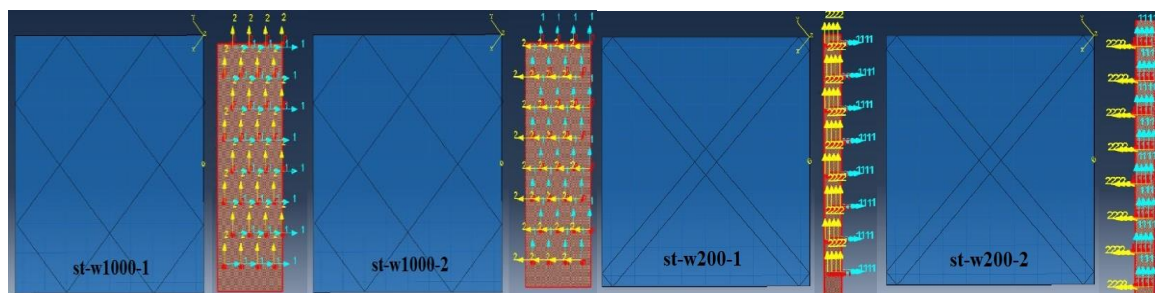
شکل ۴- نمودار خیز میانه‌ی دال در برابر بار برای نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی (unst: نمونه‌ی تقویت نشده و st: نمونه‌ی تقویت شده)



## ۴. تحلیل و بررسی

### ۴.۱. بررسی اثر جهت الیاف

در این قسمت از پژوهش اثر جهت‌های اصلی و فرعی الیاف FRP مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دال مورد نظر به کمک ورق‌های FRP که در راستای ترک‌های قطری مورد انتظار در وجه زیرین دال در نظر گرفته شده، تقویت شده است. برای دستیابی به حالت بهینه برای جهت قرارگیری الیاف دو حالت در نظر گرفته شده است: در حالت نخست جهت اصلی الیاف در راستای عمود بر ترکی قرار گرفته است که صفحه‌ی FRP در امتداد آن نصب شده است، در حالت دوم جهت اصلی الیاف در راستای ترکی است که صفحه‌ی FRP در امتداد آن قرار دارد. نتایج این دو بررسی در جدول شماره ۵ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است در اختصارات به کار رفته st نشان دهنده‌ی دال تقویت شده، w و عدد پس از آن نشان دهنده‌ی عرض نوارهای FRP به میلی‌متر و ۱ و ۲ بیانگر جهت قرارگیری الیاف بر اساس توضیحات پیشین است:



شکل ۵- دال تقویت شده با نوارهای FRP با عرض ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر و جهت‌های اصلی مختلف

جدول ۵- نتایج اثر جهت الیاف بر تقویت دال

نام نمونه	خیز میانه دال (mm)	ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش بار نهایی (%)	حالت گسیختگی
st-w200-1	49	220	1	جدا شدن FRP
st-w200-2	55	218.8	0.3	جدا شدن FRP
st-w1000-1	50	345	58	گسیختگی کششی FRP
st-w1000-2	52	289	32	گسیختگی کششی FRP

همان طور که از نتیجه‌ی تحلیل مشخص است قرارگیری الیاف در راستای عمود بر ترک، منجر به افزایش بیشتر سختی دال و افزایش بار قابل تحمل دال نسبت به حالت هم راستا با ترک است. لازم به توضیح است در موارد st-w200-1 و st-w200-2 گسیختگی بر اثر جدایش FRP و در موارد st-w1000-1 و st-w1000-2 گسیختگی بر اثر پاره شدن FRP روی داده است.

### ۴.۲. بررسی اثر پهنای نوار FRP (طول مهار)

در این بخش اثر پهنای نوارهای FRP مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نخست، حداقل طول مهار FRP بر اساس آیین نامه‌ی ACI 440.2R-17 محاسبه شده است. بر اساس رابطه‌ی شماره‌ی ۱۶ حداقل طول مهار برابر ۱۴۳ میلی‌متر محاسبه می‌گردد که با در نظر گرفتن امتداد نوار در قبل و بعد از ترک، حداقل پهنای نوار برابر ۳۰۰ میلی‌متر خواهد بود [17]. برای یافتن پهنای بهینه‌ی نوار FRP مقدار عرض نوار از عدد ۲۰۰ میلی‌متر شروع شده و تا عدد ۱۰۰۰ میلی‌متر ادامه دارد. نتایج حاصل از تحلیل به صورت جدول شماره‌ی ۶ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است در اختصارات به کار رفته st نشان دهنده‌ی دال تقویت شده، w و عدد پس از آن نشان دهنده‌ی عرض نوارهای FRP به میلی‌متر و c بیانگر تقویت به کمک نوارهای پیوسته می‌باشد.

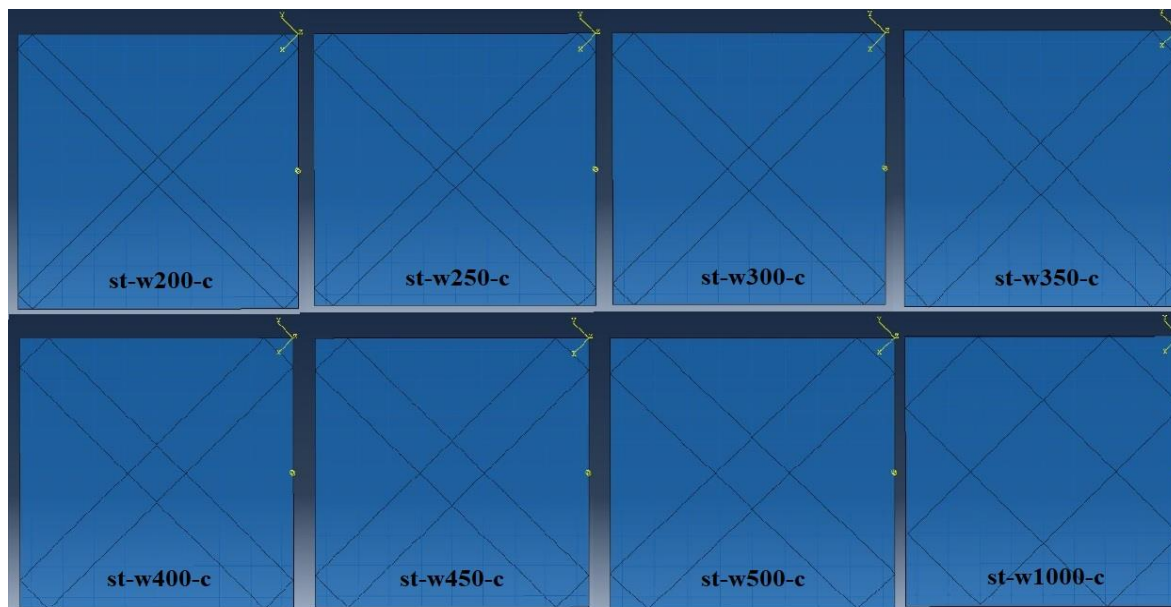
$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (۱۶)$$

در رابطه‌ی ۱۶ تعداد لایه FRP،

$E_f$  مدول الاستیسیته‌ی FRP،

$t_f$  ضخامت FRP

و  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن است.



شکل ۶- دال تقویت شده با نوارهای FRP پیوسته و پهناهای مختلف

جدول ۶- نتایج اثر پهنا نوار FRP بر ظرفیت باربری و خیز میانه‌ی دال تقویت شده

نام نمونه	خیز میانه دال (mm)	ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش بارنهایی (%)	حالت گسیختگی
st-w200-c	49	220	1	جدا شدن FRP
st-w250-c	67	267	22	گسیختگی کششی FRP
st-w300-c	65	274	25	گسیختگی کششی FRP
st-w350-c	60	281	28	گسیختگی کششی FRP
st-w400-c	57	294	34	گسیختگی کششی FRP
st-w450-c	54	305	40	گسیختگی کششی FRP
st-w500-c	52	319	46	گسیختگی کششی FRP
st-w1000-c	50	345	58	گسیختگی کششی FRP

با توجه به جدول ۶ می‌توان دریافت با افزایش سطح تقویت شده‌ی دال مقدار خیز کاهش یافته و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. در تمامی

تحلیل‌های این بخش به جز st-w200 که بر اثر جدایش FRP گسیخته شده، خرابی دال بر اثر گسیختگی FRP روی داده است.

### ۳.۴. یافتن فاصله‌ی بهینه‌ی نوارهای FRP از یکدیگر

در این مرحله با توجه به لزوم برخورداری دال تقویت شده با FRP از شکل‌پذیری کافی در ضمن افزایش قابل قبول ظرفیت باربری و همچنین عدم جدایش نوارهای FRP از سطح دال، نمونه‌های st-w300-c و st-w350-c به عنوان نامزد برای تقویت دال با آرایش منقطع نوارهای FRP انتخاب می‌شوند. در مراحل مختلف فواصل گوناگون نوار برای این دو نمونه با پهنا ۱۵۰ میلی‌متر ساخته و تحلیل انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل به



صورت جدول شماره ۷ مشاهده می شود. لازم به ذکر است در اختصارات به کار رفته st نشان دهنده دال تقویت شده و w و عدد پس از آن نشان دهنده عرض نوارهای FRP به میلیمتر و عدد پس از نشان @ بیانگر فاصله لبه به لبه نوارهای FRP به میلیمتر است.



شکل ۷- دال تقویت شده با نوار FRP به پهنای ۳۰۰ میلیمتر و فواصل مختلف

جدول ۷- نتایج اثر فاصله نوارهای FRP به طول ۳۰۰ میلیمتر و عرض ۱۵۰ میلیمتر بر ظرفیت باربری دال تقویت شده

نام نمونه	خیز میانه دال (mm)	ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش بارنهایی (%)	نسبت سطح FRP به حالت پیوسته	حالت گسیختگی
st-w300@320	80	222	2	0.35	گسیختگی کششی FRP
st-w300@260	79	225	3	0.39	گسیختگی کششی FRP
st-w300@220	77	230	5	0.43	گسیختگی کششی FRP
st-w300@180	74	233	7	0.48	گسیختگی کششی FRP
st-w300@150	72	238	9	0.52	گسیختگی کششی FRP
st-w300@130	71	242	11	0.56	گسیختگی کششی FRP
st-w300@100	70	247	13	0.6	گسیختگی کششی FRP
st-w300@90	68	250	15	0.65	گسیختگی کششی FRP

از ملاحظه جدول ۷ می توان دریافت افزایش فاصله نوارهای FRP منجر به کاهش سختی دال و کاهش ظرفیت باربری و از طرف دیگر باعث افزایش خیز میانه دال به عنوان تعبیری از شکل پذیری آن می گردد. در این مرحله از پژوهش گسیختگی تمامی دال های مورد تحلیل بر اثر گسیخته شدن شدن نوارهای FRP در کشش روی داده است.



شکل ۸- دال تقویت شده با نوار FRP به پهنای ۳۵۰ میلیمتر و فواصل مختلف

جدول ۸- نتایج اثر فاصله نوارهای FRP به طول ۳۵۰ میلیمتر و عرض ۱۵۰ میلیمتر بر ظرفیت باربری دال تقویت شده

نام نمونه	خیز میانه دال (mm)	ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش بار نهایی (%)	نسبت سطح FRP به حالت پیوسته	حالت گسیختگی
st-w350@310	77	224	3	0.35	گسیختگی کششی FRP
st-w350@250	75	228	5	0.39	گسیختگی کششی FRP
st-w350@210	74	233	7	0.43	گسیختگی کششی FRP
st-w350@170	71	239	10	0.48	گسیختگی کششی FRP
st-w350@140	70	243	11	0.52	گسیختگی کششی FRP
st-w350@110	68	248	14	0.56	گسیختگی کششی FRP
st-w350@90	65	255	17	0.6	گسیختگی کششی FRP
st-w350@80	64	262	20	0.65	گسیختگی کششی FRP

از ملاحظه جدول فوق می توان دریافت با افزایش فواصل نوارهای FRP کاهش سختی دال و کاهش ظرفیت باربری و از سوی دیگر افزایش خیز میانه دال به عنوان تعبیری از شکل پذیری آن رخ خواهد داد. در این مرحله از پژوهش گسیختگی تمامی دال های مورد تحلیل بر اثر گسیختگی کششی نوارهای FRP روی داده است.

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش با انتخاب مناسب مدل تنش- کرنش بتن و یافتن مقادیر صحیح پارامترهای خسارت مومسانی بتن در نرم افزار ABAQUS نتایج مدل سازی عددی مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی و نیز نتایج سایر نرم افزارهای تحلیل اجزا محدود پیدا کرده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان دهنده کیفیت انتخاب طول مهار FRP بر اساس آیین نامه ACI 440.2R-17 علیرغم نصب در ناحیه دارای ترک است. نصب ورق FRP در راستای ترک های مورد انتظار در دال و با جهت الیاف عمود بر ترک نیز مقدار قابل توجهی صرفه جویی در مصرف مصالح و افزایش ظرفیت باربری دال را از ۲۲ تا ۵۸ درصد را در پی خواهد داشت. چنانچه برای بهینه سازی هرچه بیشتر مصرف FRP الگوی تقویت از حالت نوار پیوسته به نوار منفصل تبدیل شود باعث کاهش ظرفیت باربری شده اما در بهبود شکل پذیری دال تاثیر بسزایی دارد. در نهایت برای دال مورد مطالعه الگوی st-w350@80 به عنوان تقویت بهینه انتخاب شده و ضمن حفظ شکل پذیری منجر به افزایش ۲۰ درصدی بار نهایی دال خواهد شد.



## دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۸ و ۷ خرداد ۱۳۹۹

دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران



### ۶. مراجع

- ۱- رضا دریابیگی، حسین حسینی، امید رضایی، "تقویت و بهسازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP مفاهیم و کاربرد"، انتشارات علم و ادب، ویرایش دوم، ۱۳۹۰
- ۲- علی خیرالدین، محمد کاظم شربتدار، "مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه به کمک ورق و پروفیل‌های فولادی و کامپوزیت‌های FRP"، انتشارات دانشگاه سمنان، ۱۳۹۵
- 3-Ebead, U., Hesham Marzouk, and Leonard M. Lye. "Strengthening of two-way slabs using FRP materials: A simplified analysis based on response surface methodology." In 2nd World engineering congress, Sarawak, Malaysia, vol. 22, no. 25, pp. 1-14. 2002.
- 4- Mosallam, Ayman S., and Khalid M. Mosalam. "Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates." Construction and building materials 17, no. 1 (2003): 43-54
- 5- Limam, Oualid, Viet Tung Nguyen, and Gilles Foret. "Numerical and experimental analysis of two-way slabs strengthened with CFRP strips." Engineering structures 27, no. 6 (2005): 841-845.
- 6-Agbossou, Amen, Laurent Michel, Manuel Lagache, and Patrice Hamelin. "Strengthening slabs using externally-bonded strip composites: Analysis of concrete covers on the strengthening." Composites Part B: Engineering 39, no. 7-8 (2008): 1125-1135.
- 7-Floruț, Sorin-Codruț, Gabriel Sas, Cosmin Popescu, and Valeriu Stoian. "Tests on reinforced concrete slabs with cut-out openings strengthened with fibre-reinforced polymers." Composites Part B: Engineering 66 (2014): 484-493.
- ۸- مجتبی لیب زاده، "بررسی تاثیر الیاف تقویتی پلیمری کربنی CFRP در میزان باربری دال‌های بتن مسلح دوطرفه مربعی شکل دارای باز شو در لبه کناری و گوشه دال"، نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، ج. ۲۹، ش. ۱، ص. ۱۶، ۱۳۹۶
- 9- Kabir, M. Z., and H. Ghaednia. "Numerical investigation of strengthening two-way concrete slabs with FRP strips subjected to transverse loading." 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, 15-17 September 2008 Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus
- 10- Lesmana, Cindrawaty, and Hsuan-Teh Hu. "Nonlinear finite element analysis of rectangular reinforced concrete slabs strengthened by fiber reinforced plastics." Scientia Iranica 22, no. 3 (2015): 615-628.
- 11- Lesmana, Cindrawaty, and Hsuan-Teh Hu. "Parametric analyses of square reinforced concrete slabs strengthened by fiber-reinforced plastics." Construction and Building Materials 53 (2014): 294-304.
- 12- Wahalathantri, Buddhi Lankananda, D. P. Thambiratnam, T. H. T. Chan, and S. Fawzia. "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS." In Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing, pp. 260-264. Queensland University of Technology, 2011.
- ۱۳- رضا شهبازی، محمد یکرنگ‌نیا، "راهنمای کاربردی ABAQUS به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک"، انتشارات علم عمران، ویرایش سوم، ۱۳۹۵
- 14- Kmiecik, P., and M. Kamiński. "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration." Archives of civil and mechanical engineering 11, no. 3 (2011): 623-636.
- ۱۵- آ. سی. اوگرال، اس. سی. فنستر، "مقاومت مصالح"، ترجمه: انوشیروان فرشیدیان‌فر، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۳
- 16- Obaidat, Yasmeen Taleb. "Structural Retrofitting of Concrete Beams Using FRP." Department of Construction Sciences, Structural Mechanics, Lund University, Lund, Sweden (2011).
- 17- A.C.I. Committee 440, ACI 440. 2R-17 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, 2017