

بررسی عوامل موثر بر افزایش مقاومت برش پانچ در اتصالات دال تخت

مقاوم سازی شده با FRP

محمد جواد مرادی^۱، رضا آقاییاری^۲

۱. کارشناسی ارشد، عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

reza_agh@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۹]

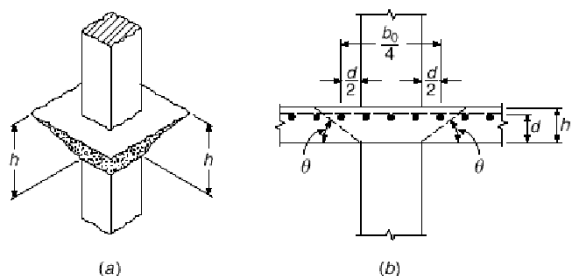
تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۹/۲]

چکیده- در سال‌های اخیر تقویت سازه‌های بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت های FRP مورد توجه زیادی قرار گرفته که در این میان تقویت دال‌های دوطرفه برای افزایش مقاومت پانچ کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. مزایای دال‌های دوطرفه به ویژه دال‌های تخت سبب کاربرد زیاد این نوع سازه شده است؛ ولی این سیستم‌ها با مشکلاتی مانند خیز زیاد و برش پانچ روبرو است. در این پژوهش تقویت دال‌های تخت با استفاده از صفحات FRP برای تقویت ظرفیت برش پانچ مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ابتدا مدل اجزا محدود دال در نرم افزار ABAQUS توسعه داده شد و ویژگی‌های غیرخطی مصالح منظور شد. پس از کالیبره کردن نرم‌افزار، مطالعاتی پارامتریک روی اتصال دال به ستون انجام شد و تاثیر نسبت آرماتور دال، مقاومت فشاری بتن و وجود آرماتور در ناحیه فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار آرماتور اتصال در تعیین مد شکست اتصال نقش اساسی بازی می‌کند. همچنین با افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی اتصال افزایش خواهد یافت. سپس دال‌های تخت بتن مسلح با الیاف پلیمری مقاوم‌سازی شد. تاثیر جنس الیاف، تعداد نوارها و تعداد لایه‌های FRP و همچنین دو نوع الگوی متفاوت مقاوم‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که صفحات FRP در دال‌های تخت، علاوه بر افزایش ظرفیت برش پانچ، افزایش سختی نمونه و کاهش انرژی جذب شده را به همراه داشت.

واژگان کلیدی- مقاوم سازی، دال تخت، برش پانچ، الیاف پلیمری، تحلیل اجزا محدود.

۱- مقدمه

شکست با تغییر شکل‌های کمی همراه است و به دلیل ماهیت ترد آن که نداشتن علائم هشدار دهنده قبل از بروز می‌باشد، دلخواه نیست [۲].



شکل (۱) منطقه مستعد شکست پانچ [۴]

دال تخت بتن مسلح یکی از سیستم‌های مرسوم سازه‌ای است. این دال برای پوشش کف در ساختمان‌های با بارهای سبک، مانند آپارتمان‌های مسکونی، و با دهانه‌های ۴/۵ تا ۶ متر مناسب و اقتصادی است [۱]. عدم وجود تیر در این قاب‌ها، موجب آسانی اجرا، افزایش سرعت ساخت و ساز، افزایش ارتفاع خالص طبقه و کاهش ارتفاع کلی ساختمان می‌شود. با این وجود، خطر شکست ترد پانچ در اتصالات دال ستون باعث می‌شود که این سیستم‌ها مستعد خرابی پیش رونده‌ای باشند که با بروز گسیختگی در یک اتصال همراه بود. این نوع

آگباسو و همکاران [۵] مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته بود، مدلسازی شد.

جدول (۱) مشخصات فولاد و بتن مصرفی

فولاد	بتن	
200 ± 4	۳۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳	۰/۲	ضریب پواسون
۵۰۰	۲/۵	تنش نهایی کششی (Mp)
۵۰۰	۳۵/۴	تنش نهایی فشاری (Mp)
۷۸۵۰	۲۵۰۰	چگالی (kg/m^3)
الاستو پلاستیک	$\sigma = E_b \frac{\varepsilon}{1 + (1 + \varepsilon/\varepsilon_0)^2}$ $\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E_b}$	
		رابطه تنش - کرنش

۲-۱- مشخصات دال مورد بررسی

۲-۱-۱- هندسه

آزمایش روی دال‌های مربعی با ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ میلی‌متر انجام شد. دال‌ها روی چهار تکیه‌گاه ساده خطی به طول ۱/۲ متر در لبه‌های دال قرار گرفتند. بارگذاری با استفاده از جکی هیدرولیکی به صورت موضعی در سطحی به ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر اعمال شد. بتن مصرفی در کلاس C30 بوده و برای ایجاد برش پانچ در دال‌ها، از نسبت فولاد به بتن بالایی استفاده شد. آرماتورهای فولادی از نوع ST65 به صورت شبکه جوش شده مربعی ($\phi_s = 9 \times 9, S = 100 \times 100, S = 636mm^2$) برای وجه تحتانی و فولاد ST35 به صورت شبکه جوش شده مربعی ($\phi_s = 7 \times 7, S = 100 \times 100, S = 358mm^2$) برای وجه بالایی استفاده شد.

در شکل (۳) نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی دال گفته شده،

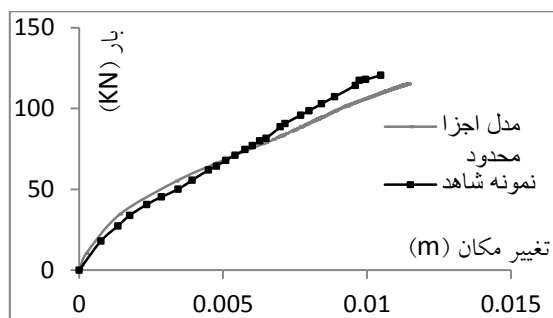
عوامل زیادی بر سازوکار شکست اتصالات موثر است که به عنوان مهمترین عامل، می‌توان از میزان فولاد اتصال نام برد. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌ها و نمودارهایی که به وسیله‌ی منتری [۳] ارائه شده است، اشاره نمود. در این نمودارها تفاوت در رفتار اتصال تحت تاثیر میزان آرماتور به خوبی دیده می‌شود. اگرچه بارنهایی اتصال در شکست خمشی، کمتر از شکست برشی است؛ ولی میزان تغییرشکل بعد از بارنهایی در این نوع شکست بیشتر بوده و به عبارت بهتر، شکل‌پذیری اتصال در این نوع شکست بیشتر خواهد بود. عوامل دیگری از جمله مقاومت بتن و وجود آرماتور در وجه فشاری اتصال نیز بر ماهیت رفتاری اتصال تاثیر گذار است [۳].

در بررسی صورت گرفته، به منظور به دست آوردن طرح بهینه در تقویت مقاومت برش پانچ دال‌های تخت ابتدا عوامل مؤثر در ظرفیت برشی این دال‌ها و میزان تاثیر آن‌ها بررسی شد. سپس تقویت دال‌های تخت با استفاده از صفحات FRP برای تقویت ظرفیت برش پانچ مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ابتدا مدل اجزا محدود دال در نرم افزار ABAQUS توسعه داده شد و ویژگی‌های غیرخطی مصالح منظور شد. پس از کالیبره کردن نرم افزار، تاثیر جنس الیاف، تعداد نوارها و تعداد لایه‌های FRP و همچنین دو نوع الگوی متفاوت مقاوم سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که صفحات FRP در دال‌های تخت، علاوه بر افزایش ظرفیت برش پانچ، افزایش سختی نمونه و کاهش انرژی جذب شده را به همراه داشت.

۲- مدل سازی و مشخصات مدل‌ها

برای مدل‌سازی دال‌ها و مشاهده تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت اتصال، از برنامه اجزا محدود ABAQUS 6.10 استفاده شد. در این برنامه برای مدل‌سازی بتن، تکیه‌گاه صلب و صفحه فشاری از المان ۸ گره‌ای C3D8R، و برای مدل‌سازی آرماتورها از المان دو گره‌ای میله‌ای T3D2 بهره برده شد [۴]. خواص فولاد و بتن مصرفی به صورت جدول (۱) فرض شد.

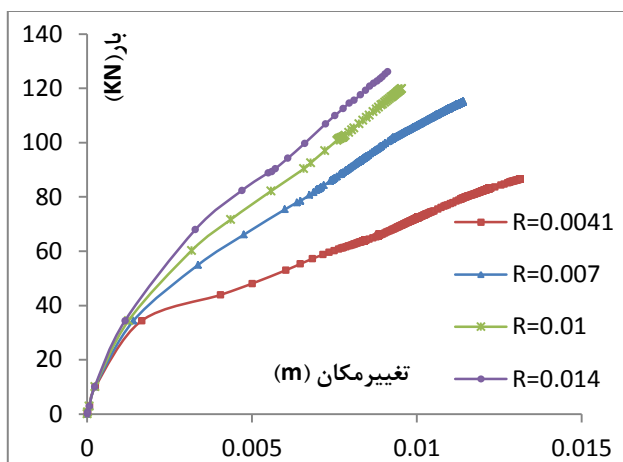
به منظور درستی آزمایشی، یک نمونه دال که به وسیله‌ی



شکل (۳) مقایسه نمودار بار تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و تحلیلی

جدول (۲) نتایج ظرفیت نهایی باربری و تغییر مکان و درصد افزایش هریک به همراه انرژی جذب شده

نمونه	بار نهایی P_u	تغییر مکان نهایی Δ_u	انرژی جذب شده (N-m)
۱ ($\rho = 0.0041$)	۸۶۵۱۰	۰/۰۱۳۱۳	۷۲۰/۲
۲ (شاهد) ($\rho = 0.007$)	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
۳ ($\rho = 0.01$)	۱۱۹۸۳۵	۰/۰۰۹۵۳	۱۱۷۱/۶
۴ ($\rho = 0.014$)	۱۲۶۱۰۳	۰/۰۰۹۱۱	۶۹۳/۵



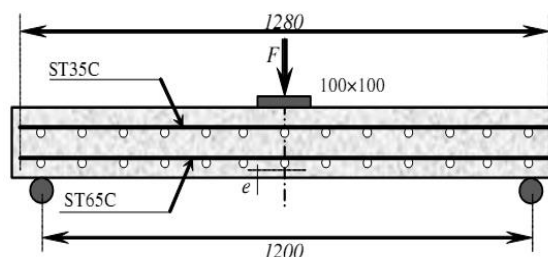
شکل (۴) نمودار بار تغییر مکان نمونه ها با درصد فولاد متفاوت

نمودار تاثیر فولاد اتصال بر ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی دال در شکل های (۵) و (۶) آورده شده است.

مقایسه شده است. برای این مقایسه از نمودار بار-تغییر مکان مرکز دال استفاده شد. همان گونه که مشاهده می شود نتایج از هماهنگی و سازگاری خوبی برخوردار است.

۳- تشریح نمونه های تحلیل شده

در ابتدا و به عنوان مهمترین عامل، نقش میزان آرماتور اتصال در رفتار دال مورد بررسی قرار گرفت. سپس ۴ نمونه دال برای بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت اتصال مدل سازی و تحلیل شد. در انتها نیز تاثیر وجود یا عدم وجود آرماتور در ناحیه فشاری بررسی می شود.

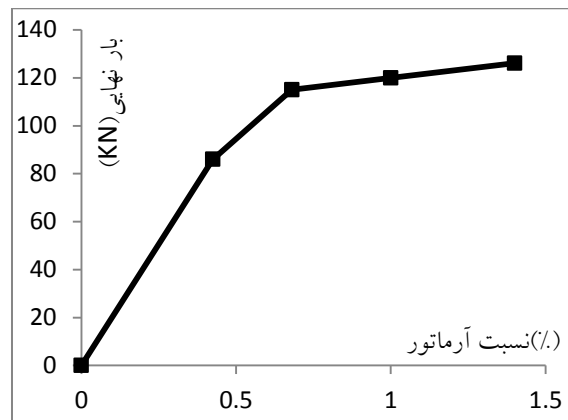


شکل (۲) دال آزمایش شده به وسیله آگاسو و همکاران [۵]

۳-۱- تاثیر میزان فولاد اتصال بر مقاومت پانچ

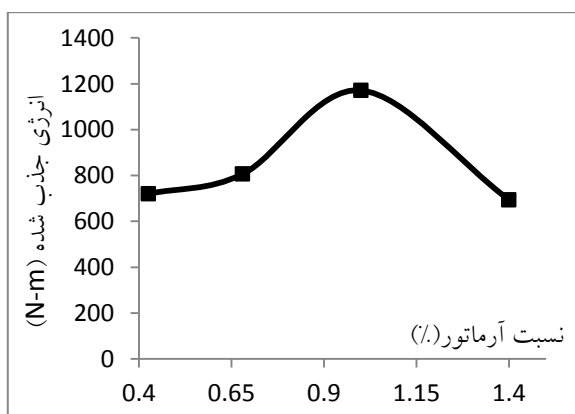
به منظور بررسی تاثیر میزان فولاد بر مقاومت پانچ، ۴ نمونه دال مدل سازی شد. درصد فولاد نمونه شاهد آزمایشگاهی ۰/۷٪ بود. سه نمونه دیگر با نسبت آرماتورهای ۰/۴۱٪، ۰/۱٪ و ۰/۱۴٪ مدل سازی و نتایج آن ها استخراج شد. نتایج حاکی از تغییر در رفتار دال با تغییر در میزان آرماتور بود به شکلی که با افزایش میزان نسبت آرماتور مقطع، بار نهایی و سختی پس از ترک خوردگی افزایش یافته و تغییر مکان نهایی کاهش می یابد.

عملکرد میخ پرچی موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود؛ اما این افزایش سبب می‌شود قبل از گسترش تسلیم‌شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون و وقوع شکست خمشی نرم، گسیختگی ترد برش پانچ در ناحیه بتن فشاری اتفاق افتاده و به همین دلیل تغییر مکان نهایی اتصال کاهش یابد. با کاهش نسبت آرماتورها مد گسیختگی از برش پانچ به مد گسیختگی خمشی تبدیل می‌شود و ظرفیت تغییرمکان و میزان شکل‌پذیری در دال افزایش می‌یابد [۶]. در تعیین درصد فولاد آستانه برش پانچ، پژوهش‌گران مختلف مقادیر متفاوتی گفته‌اند. شکل (۸) که به وسیله‌ی پارک و کمپل ارائه شده است، تاثیر میزان فولاد در تعیین رفتار برشی و یا خمشی اتصال را نشان می‌دهد. نسبت آرماتور ۱٪ پیشنهاد شده است [۷].

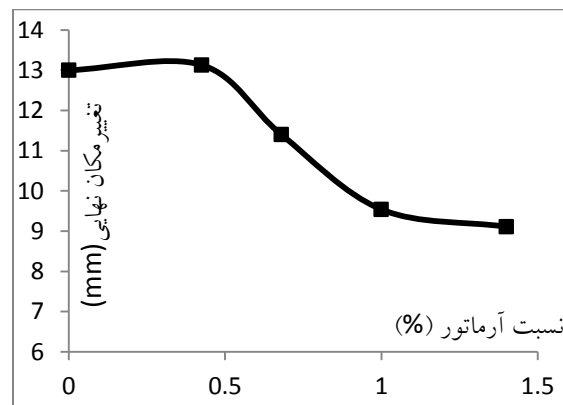


شکل (۵) نمودار تاثیر میزان فولاد اتصال بر بار نهایی

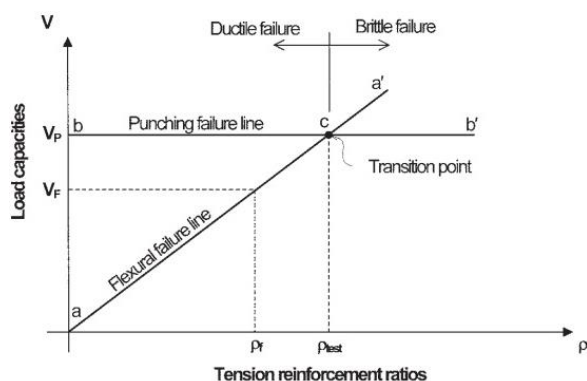
با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) نتیجه می‌شود، افزایش مقدار آرماتور باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش ظرفیت تغییرمکان نمونه‌ها شده است.



شکل (۷) نمودار تاثیر میزان فولاد اتصال بر انرژی جذب شده



شکل (۶) نمودار تاثیر میزان فولاد اتصال بر تغییرمکان نهایی



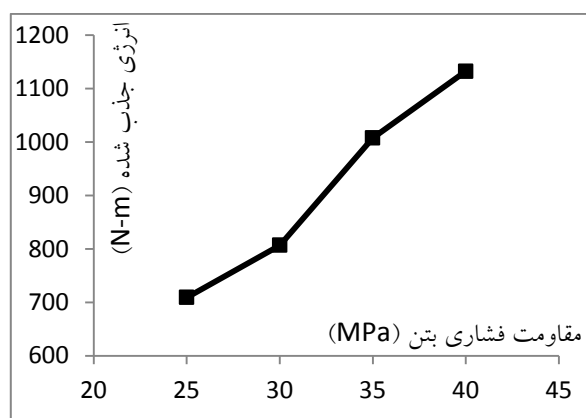
شکل (۸) نمودار تاثیر مقدار آرماتور بر رفتار اتصال دال ستون [۷]

می‌توان گفت با افزایش مقدار آرماتور شکل پذیری اتصال کاهش خواهد یافت زیرا مقاومت خمشی افزایش پیدا کرده و شکست خمشی به تعویق می‌افتد و این امر سبب شکست برشی خواهد شد، و در نتیجه مقطع در باری کمتر از مقاومت خمشی نهایی دچار شکست می‌شود؛ به عبارت دیگر $\frac{M_u}{M_f} < 1$ یعنی میزان خمش در لحظه شکست نمونه کمتر از ظرفیت خمشی اسمی آن است. با بروز زود هنگام شکست برش پانچ، مقطع قادر به جذب انرژی مطلوب نخواهد بود [۸].

افزایش نسبت آرماتورهای کششی اتصال، با توجه به افزایش

جدول (۳) نتایج ظرفیت نهایی باربری، تغییر مکان و انرژی جذب شده

نمونه	ظرفیت برش طبق ACI 318-08	بار نهایی حاصل از تحلیل P_u	تغییر مکان نهایی Δ_u	انرژی جذب شده (N-m)
۱ (مقاومت ۲۵ MPa)	۱۰۰۰۰۰	۱۰۷۸۶۳	۰/۰۱۰۷۴	۷۰۹
۲ (نمونه شاهد با مقاومت ۳۰ MPa)	۱۰۹۵۴۴	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
۳ (مقاومت ۳۵ MPa)	۱۱۸۳۲۱	۱۲۹۹۶۸	۰/۰۱۲۶۵	۱۰۰۷/۵
۴ (مقاومت ۴۰ MPa)	۱۲۶۴۹۱	۱۳۷۷۶۶	۰/۰۱۳۴۱	۱۱۳۲



شکل (۱۰) نمودار تاثیر مقاومت فشاری بتن بر انرژی جذب شده

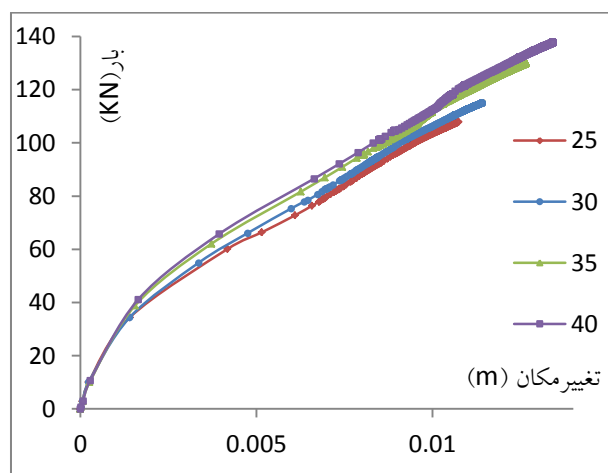
نمودار تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی دال، که در تعیین نوع شکست برشی و یا خمشی اتصال مهم است، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به تئوری‌های حاکم بر برش پانچ در دال‌های تخت، رابطه بین ظرفیت باربری دال و مقاومت فشاری بتن به صورت تقریبی از درجه دوم خواهد بود [۹].

۲-۳- بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت اتصال

مقاومت فشاری بتن به دلیل نقش تعیین کننده در مقاومت ناحیه فشاری بتن در هنگام وقوع برش پانچ و به طور غیرمستقیم بر روی مقاومت کششی، عاملی موثر در تعیین میزان ظرفیت باربری اتصال به حساب می‌آید. در این بخش به منظور بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری و شکل پذیری اتصال، علاوه بر نمونه شاهد که با بتن دارای مقاومت ۳۰ مگاپاسکال ساخته شده بود، ۳ نمونه با هندسه مشابه با نمونه شاهد و مقاومت‌های فشاری ۲۵، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال مدل‌سازی و نتایج با رابطه مقاومت برش پانچ بتن در ACI 318-08 مقایسه شد [۸]؛ مقاومت بیشینه برش پانچ برابر است با:

$$V_c = \frac{1}{3} \phi \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (1)$$

میانگین اختلاف ظرفیت‌های به دست آمده از نرم افزار و رابطه ACI به ۷/۸٪ محدود می‌شود.



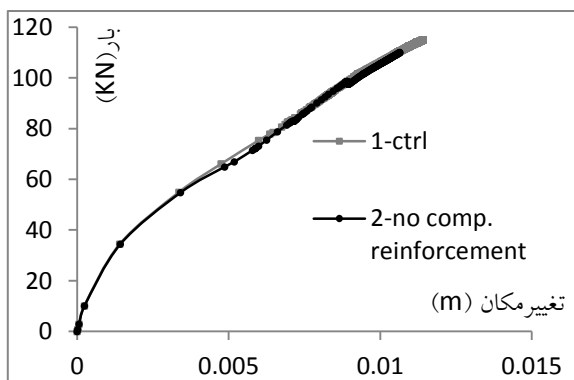
شکل (۹) نمودار بار تغییر مکان نمونه‌ها با مقاومت فشاری متفاوت

همان‌گونه که از شکل (۱۰) مشخص است، با افزایش مقاومت فشاری بتن بر میزان انرژی جذب شده نمونه افزوده می‌شود.

تاخیر می‌افتد، بنابراین تنش در فولاد به تدریج فعال شده و تسلیم شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون گسترش یافته و با به تاخیر افتادن شکست برش پانچ، آرماتورها فرصت بیشتری برای رفتار شکل‌پذیر داشته و در نتیجه ظرفیت تغییرمکان و مقدار شکل‌پذیری دال افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از بتن با مقاومت بالاتر موجب کاهش ارتفاع تارختی مقطع و در نتیجه افزایش زاویه انحنای متصل شده و شکل‌پذیری اتصال را افزایش می‌دهد [۱۰].

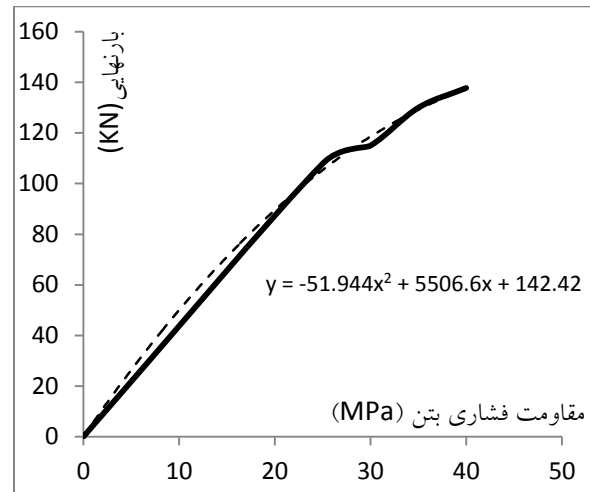
۳-۳- بررسی تاثیر عدم وجود آرماتور فشاری در اتصال

به منظور بررسی تاثیر وجود یا عدم وجود آرماتور فشاری بر ظرفیت باربری اتصالات دال-ستون، دو نمونه دال مدل‌سازی و تحلیل شد. نمونه اول (شاهد)، همان نمونه درستی آزمایشی شده با مدل آزمایشگاهی بوده که در قسمت فشاری خود دارای ۱۳ آرماتور به قطر ۷ mm بود. نمونه دوم بدون حضور این آرماتورها تحلیل شده. نتایج مربوط به هر یک در ادامه آورده شده است.



شکل (۱۲) نمودار بار تغییر مکان نمونه شاهد و نمونه بدون آرماتور فشاری

با توجه به نتایج تحلیل، گسیختگی در نمونه شاهد در ترکیب مد خمشی و برشی پانچ به وقوع پیوست. به دلیل وجود آرماتورهای فشاری سطوح گسیختگی تا حدودی به سمت دورتر از ناحیه اتصال انتقال پیدا کرد. همچنین وجود آرماتور فشاری موجب افزایش ظرفیت باربری و افزایش تغییرمکان نهایی نمونه شاهد به ترتیب به میزان ۵٪ و ۷٪ شده است.



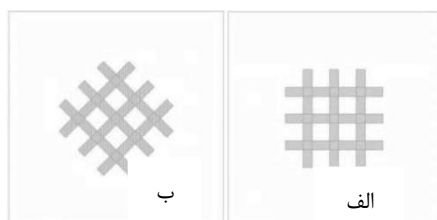
شکل (۱۱) نمودار تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری اتصال

با توجه به نتایج حاصل مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها شده است. همچنین با افزایش مقاومت فشاری بتن طبق رابطه (۱)، مقاومت برش پانچ به صورت خطی افزایش می‌یابد و به طور متوسط برای هر ۱ MPa افزایش مقاومت فشاری بتن، ۱/۷ کیلونیوتن بر مقاومت برش پانچ افزوده می‌شود. با افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت تغییرمکان دال نیز افزایش می‌یابد. با توجه به تئوری‌های موجود برای محاسبه بار پانچ در دال‌های تخت، افزایش مقاومت فشاری بتن، با افزایش مقاومت ناحیه بتن فشاری ترک نخورده واقع در بالای ترک‌های مورب برشی در نزدیکی وجه ستون، موجب افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود.

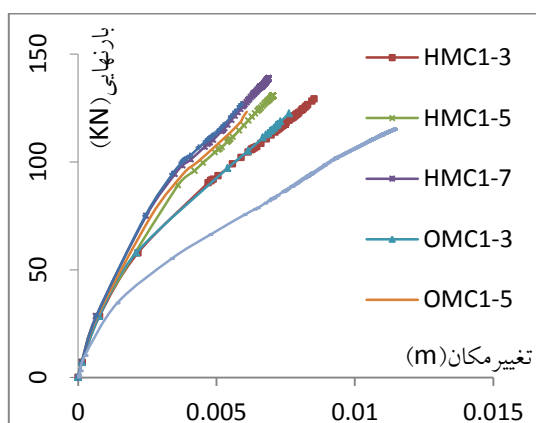
هرچند گسیختگی پانچ یک گسیختگی ناگهانی بوده و با کاهش سریع در ظرفیت باربری مشخص است، اما ترک‌های پانچ که منجر به گسیختگی می‌شوند، به طور ناگهانی شکل نمی‌گیرند و با شکل‌گیری ترک‌های ریز داخلی آغاز می‌شود. به دلیل شکل‌گیری تدریجی ترک‌های ریز، مقاومت فولاد نیز به تدریج فعال می‌شود. سرانجام گسیختگی برش پانچ در ناحیه فشاری و قبل از گسترش تسلیم شدگی به نواحی دورتر از مجاورت ستون به وقوع می‌پیوندد. همان‌گونه که اشاره شد با افزایش مقاومت فشاری بتن، به دلیل افزایش مقاومت ناحیه بتن فشاری واقع در بالای ترک‌های مورب، شکست ترد پانچ به

۴-۱- الگوهای پوشش شطرنجی

در نام‌گذاری مدل‌ها، حرف اول نشان دهنده نوع قرارگیری الیاف (موازی با آرماتورها یا طولی یا مورب)، حرف دوم نشان دهنده الگوی شطرنجی مقاوم‌سازی، حرف سوم نشان دهنده نوع الیاف، عدد اول نشان دهنده تعداد لایه‌های صفحات و عدد آخر مربوط به تعداد نوارها می‌باشد. در شکل (۱۳) دال-های HMC1-3 و OMC1-3 آورده شده است.



شکل (۱۳) الگوهای مختلف مقاوم سازی، الف) HMC1-3 (موازی آرماتورها یا طولی)، و، ب) OMC1-3 (مورب)



شکل (۱۴) نمودار بار تغییر مکان دال بتنی مقاوم سازی شده با الگو و تعداد نوارهای متفاوت CFRP (الایه)

با مقایسه پاسخ بار تغییر مکان نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که مقاوم‌سازی با صفحات CFRP، سختی خمشی نمونه‌ها را افزایش داده و باعث بهبود در ظرفیت مقاومت اتصال می‌شود. در میان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در این بخش، نمونه‌های HMC1-7 و OMC1-3 به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ظرفیت باربری را از خود نشان می‌دهند. در بین نمونه‌ها، کمترین میزان ظرفیت تغییر شکل متعلق به نمونه OMC1-7 است. همچنین با افزایش مساحت لایه‌های مقاوم‌سازی، مقاومت نهایی اتصال افزایش می‌یابد؛ این افزایش مقاومت در نمونه‌های گروه H بیشترین نمود را خواهد داشت.

جدول (۴) نتایج ظرفیت نهایی باربری و تغییر مکان و درصد افزایش هریک به همراه انرژی جذب شده

نمونه	بار نهایی P_u	تغییر مکان نهایی Δ_u	انرژی جذب شده (N-m)
۱ (نمونه شاهد)	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
۲ (نمونه بدون وجود آرماتور فشاری)	۱۱۰۰۰	۰/۰۱۰۶۴	۷۱۱/۸

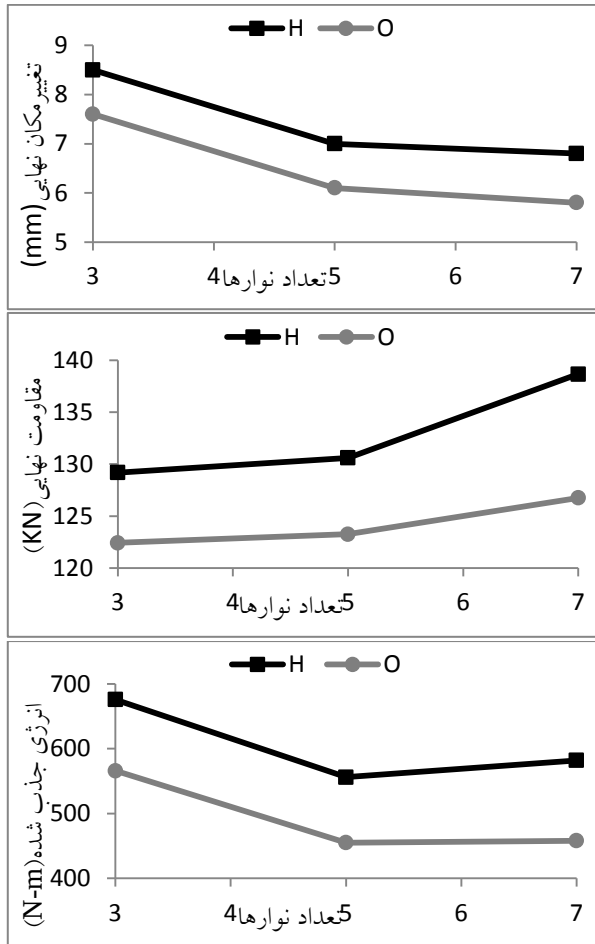
با توجه به تئوری‌های موجود برای محاسبه بار پانچ دال‌های تخت، وجود آرماتور فشاری مانند عاملی که در برای افزایش مقاومت فشاری بتن عمل می‌نماید، با افزایش مقاومت ناحیه بتن فشاری ترک نخورده، از طریق بهبود عملکرد مولفه‌های قائم ناحیه فشاری بالای ترک پانچ و نیز افزایش مقاومت ناشی از اثر اندرکنشی بین بتن و فولاد، موجب افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد به دلیل شکل‌گیری تدریجی ترک‌های ریز مولد ترک پانچ، تنش در فولاد کششی به تدریج فعال شده و تسلیم شدگی آرماتورهای کششی به نواحی دورتر از مجاورت ستون گسترش می‌یابد. از طرف دیگر استفاده از آرماتورهای فشاری سبب کاهش ارتفاع تار خنثی و در نتیجه افزایش زاویه انحنای نهایی و افزایش شکل پذیری و انرژی جذب شده در اتصال می‌شود. با توجه به نتایج فوق تاثیر وجود آرماتور فشاری در افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی مشخص می‌شود.

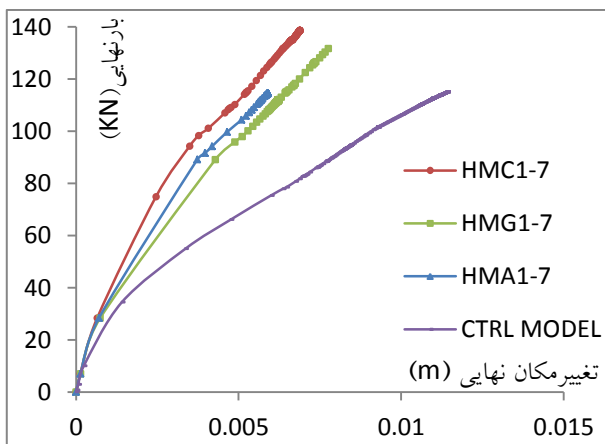
۴-۲ مقاوم سازی دال‌های تخت با FRP

در این بخش، مقاوم‌سازی دال‌های تخت با الیاف پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام مطالعات مقاوم‌سازی، ابتدا تعدادی نمونه مشابه با نمونه شاهد مدلسازی و سپس به صورت خارجی با استفاده از صفحات CFRP، GFRP، AFRP و با الگوهای مختلف مقاوم‌سازی شدند. الگوهای مورد مطالعه، الگوی شطرنجی موازی آرماتورها یا طولی (با نام H) و الگوی شطرنجی مورب (با نام O) بودند.

نتیجه گرفت اثر نوارهای FRP هنگامی که الیاف این نوارها در راستای آرماتورهای طولی قرار می‌گیرند در مقایسه با سایر حالات بهینه خواهد بود.



شکل (۱۶) نمودار تاثیر تعداد نوارها و الگوهای مقاوم سازی بر مقاومت نهایی، تغییر مکان نهایی و انرژی جذب شده



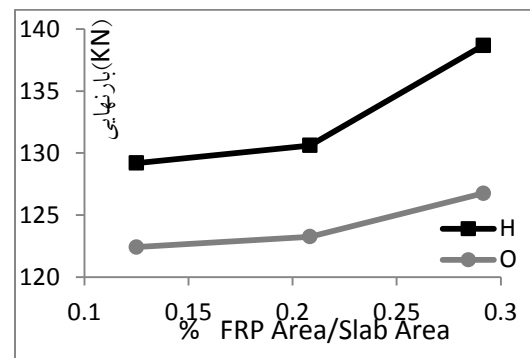
شکل (۱۷) نمودار بار تغییر مکان دال بتنی مقاوم سازی شده با انواع FRP (۱ لایه و ۷ نوار)

در هر دو الگوی مقاوم سازی با افزایش تعداد نوارهای FRP، مقاومت نهایی افزایش یافته است که میزان این افزایش در الگوی مقاوم سازی H به میزان متوسط ۷٪ بیشتر از مورد مشابه در الگوی O است.

جدول (۵) نتایج ظرفیت نهایی باربری و تغییر مکان و درصد افزایش هریک به همراه انرژی جذب شده

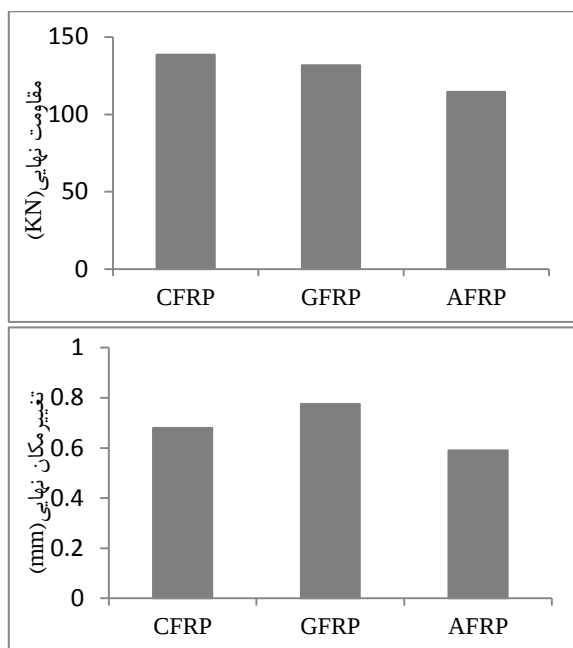
نمونه	بار نهایی P_u	تغییر مکان نهایی Δu	انرژی جذب شده
CTRL MODEL	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
HMC1-3	۱۲۹۱۸۴	۰/۰۰۸۵۲۱	۶۷۶/۷
HMC1-5	۱۳۰۶۰۱	۰/۰۰۷۰۳۷	۵۵۶
HMC1-7	۱۳۸۶۷۷	۰/۰۰۶۸۸۲	۵۸۲
OMC1-3	۱۲۲۴۱۵	۰/۰۰۷۶۱۴	۵۶۶
OMC1-5	۱۲۳۲۴۱	۰/۰۰۶۰۹۳	۴۵۵/۶
OMC1-7	۱۲۶۷۵۳	۰/۰۰۵۸۹۵	۴۵۷/۸

همچنین با افزایش تعداد نوارها، ظرفیت تغییر مکان کاهش می‌یابد. این کاهش در الگوی مقاوم سازی O به میزان متوسط ۱۶٪ بیشتر است. با افزایش تعداد نوارها، انرژی جذب شده در نمونه کاهش می‌یابد. با این حال متوسط انرژی جذب شده در نمونه‌های H به میزان ۲۰٪ بیشتر از الگوی مقاوم سازی O است.



شکل (۱۵) نمودار تاثیر مساحت CFRP و الگوی مقاوم سازی بر ظرفیت نهایی اتصال

با توجه به افزایش بیشتر در ظرفیت مقاومت اتصال در نمونه‌های مقاوم سازی شده با الگوی H نسبت به الگوی O، می‌توان



شکل (۱۸) نمودار ستونی مقادیر مقاومت نهایی و تغییر مکان نهایی نمونه ها

با مقایسه ظرفیت باربری حاصل شده از سه نوع مختلف الیاف پلیمری، مشخص می‌شود که الیاف CFRP دارای مقاومت و سختی بیشتری در مقایسه با دو نوع دیگر است. این امر سبب افزایش کاربرد این صفحات در مقاوم سازی خمشی در مقایسه با سایر مصالح شده است.

صفحات CFRP در مقایسه با صفحات GFRP تغییر مکان نهایی کمتری دارند. این امر به دلیل کمتر بودن مقاومت نهایی و در نتیجه کرنش نهایی CFRP در مقایسه با GFRP است. در نتیجه می‌توان بسته به نوع و محل مقاوم سازی، از صفحات پلیمری از جنس شیشه یا کربن استفاده کرد. انرژی جذب شده در سه نمونه نسبت به نمونه شاهد کاهش دارد که نشان دهنده ناگهانی بودن شکست و عدم قابلیت جذب انرژی در نمونه های مقاوم سازی شده است

۴-۱-۲- بررسی تاثیر تعداد لایه های صفحات FRP در افزایش مقاومت اتصال

در این بخش به منظور بررسی تاثیر تعداد لایه های صفحات FRP در افزایش مقاومت اتصال، سه نمونه دال مشابه با مدل HMC1-7 مدلسازی شدند. تفاوت مدل ها در تعداد لایه های صفحات CFRP بود. نمودار بار تغییر مکان مدل ها به همراه

۴-۱-۱- بررسی تاثیر جنس صفحات بر ظرفیت اتصال

در مقاوم سازی سازه ها بیشتر به دلیل کرنش گسیختگی بالا از الیاف GFRP برای تقویت برشی استفاده می‌شود. در مقابل، الیاف CFRP به دلیل مقاومت کششی بالا اغلب برای تقویت خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. در این بخش تاثیر جنس صفحات روی ظرفیت دال های تخت بتن مسلح مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. بدین منظور از سه نوع مختلف الیاف استفاده شد که مشخصات مکانیکی آنها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول (۶) مشخصات الیاف FRP مورد استفاده جهت مقاوم سازی دال بتنی

در ABAQUS

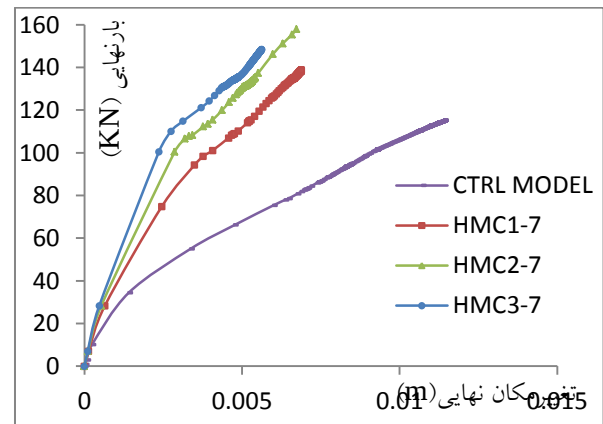
نوع الیاف	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت بواسون	مدول برشی (GPa)	مقاومت گسیختگی (MPa)
CFRP	$\begin{cases} E_x = 169 \\ E_y = 13 \\ E_z = 13 \end{cases}$	$\begin{cases} \nu_{xy} = 0.22 \\ \nu_{yz} = 0.3 \\ \nu_{zx} = 0.22 \end{cases}$	$\begin{cases} G_{xy} = 8 \\ G_{yz} = 4.7 \\ G_{zx} = 8 \end{cases}$	$F_u = 1000$
GFRP	$\begin{cases} E_x = 55 \\ E_y = 4.1 \\ E_z = 4.1 \end{cases}$	$\begin{cases} \nu_{xy} = 0.26 \\ \nu_{yz} = 0.3 \\ \nu_{zx} = 0.26 \end{cases}$	$\begin{cases} G_{xy} = 2.7 \\ G_{yz} = 1.55 \\ G_{zx} = 2.7 \end{cases}$	$F_u = 3500$
AFRP	$\begin{cases} E_x = 120 \\ E_y = 9.2 \\ E_z = 9.2 \end{cases}$	$\begin{cases} \nu_{xy} = 0.26 \\ \nu_{yz} = 0.3 \\ \nu_{zx} = 0.26 \end{cases}$	$\begin{cases} G_{xy} = 4.1 \\ G_{yz} = 2.5 \\ G_{zx} = 4.1 \end{cases}$	$F_u = 4000$

جدول (۷) نتایج ظرفیت نهایی باربری و تغییر مکان و درصد افزایش هریک به همراه انرژی جذب شده

نمونه	بار نهایی P_u	تغییر مکان نهایی Δ_u	انرژی جذب شده
CTRL MODEL	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
HMC1-7	۱۳۸۶۷۷	۰/۰۰۶۸۸۲	۵۸۲
HMG1-7	۱۳۱۷۴۱	۰/۰۰۷۷۶	۶۰۰/۵
HMA1-7	۱۱۴۶۰۵	۰/۰۰۵۹۰۵	۴۰۹

نمونه شاهد در شکل (۱۹) ارائه شده است.

می‌توان گفت افزایش تعداد لایه‌ها از ۱ به ۲، باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه HMC2-7 به میزان ۳۷٪ نسبت به نمونه شاهد شده و این افزایش نسبت به مدل HMC1-7 ۱۳٪ است. با افزایش تعداد لایه‌ها از ۱ به ۳ میزان افزایش در مقایسه با حالت قبل کاهش یافته است.



شکل (۱۹) نمودار بار تغییرمکان دال بتنی مقاوم سازی شده با تعداد لایه های متفاوت CFRP (۷ نوار)

جدول (۸) نتایج ظرفیت نهایی باربری و تغییرمکان و درصد افزایش هریک به همراه انرژی جذب شده

نمونه	بار نهایی P_u	تغییرمکان نهایی Δu	انرژی جذب شده
CTRL MODEL	۱۱۵۰۱۶	۰/۰۱۱۴	۸۰۶/۴
HMC1-7	۱۳۸۶۷۷	۰/۰۰۶۸۸۲	۵۸۲
HMC2-7	۱۵۷۸۹۵	۰/۰۰۶۷۳۴	۶۲۵/۵
HMC3-7	۱۴۸۴۴۹	۰/۰۰۵۶۲۲	۵۳۶

این امر نشان‌دهنده وجود نسبت مصالح FRP متعادل در مقطع است. علاوه بر این در عمل، استفاده از دو لایه FRP روی هم باعث ایجاد نیروهای زیادی در FRP و در نتیجه تمرکز بالای تنش افقی در حد واسط بین صفحات و بتن می‌شود و دال‌های مسلح شده با دو لایه FRP متحمل گسیختگی ناشی از جداسازی صفحات خواهند شد. بنابراین سهم نوارهای FRP در مقاومت خمشی در این حالت به صورت کارآمدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و مقاومت پانچ نمونه‌های تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های مشابه با یک لایه نوار FRP تفاوت

چندانی از خود نشان نخواهد داد [۱۰].

۵- خلاصه و نتیجه گیری

پس از به دست آوردن اطمینان از درستی نتایج تحلیل و کالیبراسیون نرم‌افزار، آزمون‌های مقدماتی روی مدل شاهد صورت گرفت. برای انجام مطالعات پارامتریک، تعداد ۸ مدل المان محدود مدل‌سازی شدند و تحت بارگذاری ثقلی قرار گرفتند. ابتدا تحلیل حساسیت مدل به ابعاد مش‌ها صورت گرفت. سپس تاثیر عوامل مختلف از جمله درصد آرماتور کششی، تاثیر مقاومت فشاری بتن و وجود آرماتور فشاری تحت یک مجموعه مطالعات پارامتریک مورد مطالعه قرار گرفت. انجام مطالعات یاد شده به شناخت بیشتر پدیده برش پانچ کمک قابل توجهی خواهد نمود. سپس مقاوم‌سازی دال-های تخت با استفاده از الیاف مسلح پلیمری چسبیده به وجه کششی دال بررسی شد. در ابتدا ۷ نمونه دال بتن مسلح که به صورت متمرکز در مرکز بارگذاری شده بودند، مدل‌سازی شدند. ۶ نمونه با استفاده از صفحات CFRP مقاوم‌سازی شدند و یک نمونه بدون مقاوم‌سازی تحت عنوان نمونه شاهد باقی ماند. در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، تاثیر الگوهای مختلف قرارگیری صفحات، از جمله الگوی موازی آرماتورهای طولی (H) و الگوی مورب (O) مطالعه شد. در انتها یک مجموعه مطالعات پارامتریک روی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده انجام گرفت. در این راستا علاوه بر نمونه‌های مطالعه شده، ۸ نمونه دیگر مدل‌سازی و تاثیر مساحت صفحات بر ظرفیت باربری بررسی شد. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف مانند، جنس، ضخامت صفحات و تعداد نوارهای CFRP در آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها را می‌توان در بندهای زیر خلاصه کرد:

۱- مقدار آرماتور کششی دال در تعیین مد شکست اتصال نقش کنترل‌کننده‌ای دارد. در صورت وجود آرماتور با نسبت مساحت بیشتر از ۱٪ در دال، مد شکست اتصال از شکست نرم خمشی به شکست ترد برشی تبدیل می‌شود.

۲- افزایش در میزان آرماتور کششی دال، دارای تاثیر ناچیزی

۱/۱۳ برابر نمونه ۲۵ MPa است.

۷- وجود آرماتور فشاری در ناحیه اتصال تاثیر چندانی بر ظرفیت باربری نداشته و موجب افزایش تغییرمکان نهایی (به میزان ۷٪)، شکل پذیری اتصال (به میزان ۷٪) و انرژی جذب شده (به میزان ۱۳٪) نسبت به نمونه فاقد آرماتور می شود.

۸- ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی اتصالات با استفاده از طرح مقاوم سازی به ترتیب تا میزان ۲۰/۵۷٪ افزایش و ۲۶٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد داشت. از آنجا که صفحات FRP مقاومت اندکی در برابر بارهای عرضی دارند، میزان افزایش ظرفیت برشی در نمونه های مقاوم سازی شده، به نقش این تسلیحات در محدود کردن گسترش ترک های کششی - خمشی و برشی از طریق افزایش ظرفیت خمشی نمونه ها مربوط می - شود.

۹- در مقاوم سازی به روش یاد شده، امکان تغییر مد گسیختگی از مد ترد برش پانچ به مد نرم خمشی در نمونه ها امکان پذیر نشد. لیکن در تمامی نمونه های مقاوم سازی شده، سطوح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده انتقال یافته و ناحیه مسلح شده نسبتاً سالم باقی ماند.

۱۰- با افزایش در تعداد نوارهای FRP و در نتیجه افزایش بعد ناحیه مسلح شده، به دلیل امکان انتقال ترک های مولد برش پانچ و سطوح گسیختگی به ناحیه ای دورتر از ناحیه اتصال، ظرفیت برش پانچ اتصال افزایش می یابد.

۱۱- برای تعداد نوارهای مساوی، نمونه های مقاوم سازی شده با الگوی موازی آرماتورهای طولی نسبت به الگوی مورب، افزایش بیشتری در ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی از خود نشان دادند. بنابراین اثر نوارهای CFRP زمانی بهینه خواهد بود که الیاف نوارها در راستای آرماتورهای طولی قرار گرفته باشند.

۱۲- وجود صفحات CFRP موجب انتقال تنش های اصلی حداکثر از مجاورت ناحیه بحرانی اتصال به گوشه های محل تقاطع دو نوار متعامد شد که وقوع گسیختگی در این نواحی را محتمل می ساخت. به علاوه وجود صفحات CFRP نقش مهمی در کنترل ترک خوردگی در داخل ناحیه مسلح شده ایفا می - نماید و موجب انتقال کامل ترک های مولد برش پانچ به خارج

در افزایش ظرفیت باربری اتصال است و سایر عوامل محدود کننده، موجب شکست اتصال خواهند شد. به گونه ای که افزایش درصد فولاد مقطع از ۰/۷۱٪ به ۱٪ موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۴/۲٪ شد. لیکن کاهش میزان آرماتور کششی دال نقش چشمگیری در افزایش تغییرمکان نهایی و شکل پذیری اتصال دارد، به شکلی که کاهش درصد فولاد اتصال از ۰/۷۱٪ به ۰/۴۱٪ موجب افزایش تغییرمکان نهایی به میزان ۱۵/۱۷٪ شد. همچنین افزایش میزان آرماتورها در مقطع سبب افزایش میزان سختی پس از ترک خوردگی می شود.

۳- با افزایش میزان آرماتور، شکل پذیری کاهش می یابد؛ به شکلی که برای تغییر نسبت آرماتور از ۰/۷۱٪ به ۱/۴٪، میزان شکل پذیری دچار کاهش به میزان ۱۹٪ می شود.

۴- مقاومت فشاری بتن به لحاظ نقش تعیین کننده در مقاومت حوزه فشاری بتن، در هنگام وقوع برش پانچ و نیز تاثیر غیرمستقیم بر مقاومت کششی بتن، عامل موثری در تعیین ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی اتصال محسوب می شود. افزایش مقاومت فشاری بتن از ۳۰ به ۴۰ مگاپاسکال نه تنها موجب افزایش ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی اتصال به ترتیب به میزان ۱۹/۷٪ و ۱۷/۶۳٪ شد، بلکه مد گسیختگی اتصال را از مد ترد پانچ به ترکیب مد خمشی و برش پانچ تغییر داد.

۵- مطابق رابطه (۱) برای تعیین مقاومت برش پانچ بر اساس ACI 318-08 به ازای هر ۱ مگاپاسکال افزایش در مقاوم فشاری بتن، ۱/۷ کیلونیوتن بر مقاومت برش پانچ مقطع افزوده شده و میانگین اختلاف ظرفیت های به دست آمده از نرم افزار و رابطه ACI به ۷/۸٪ محدود می شود.

۶- با افزایش مقاومت فشاری بتن، میزان شکل پذیری و انرژی جذب شده نمونه ها افزایش می یابد. میزان افزایش شکل پذیری دارای کرانه حداکثری بوده ولی انرژی جذب شده به صورت خطی افزایش می یابد. به عنوان مثال، نمونه با مقاومت ۴۰ MPa دارای شکل پذیری و میزان انرژی جذب شده بیشتری به ترتیب ۱/۴ و ۱/۰۳ برابر نمونه ۳۰ MPa و این نمونه دارای شکل - پذیری و میزان انرژی جذب شده بیشتری به ترتیب ۱/۰۶ و

[4]ABAQUS User's Manual, Ver. 6.10

[5]Amen Agbossou, Laurent Michel, Manuel Lagache, Patrice Hamelin, "Strengthening Slabs Using Externally Bonded Strip Composite: Analysis of Concrete on The Strengthening", Composites: Part B 39 (2008) 1125-1135, Journal

homepage:www.elsevier.com/locate/compositesb

[6]MacGregor, James G. "Reinforced Concrete Mechanics and Design", 5th Edition, Prentice-Hall International, Inc. New Jersey, 2002.

[7]Park, R. Gamble, W., Reinforced Concrete Slabs, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 2000.

[8]ACI 318-08. Building Code Requirements For Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2005.

[9]Nilson, A., Darwin, D., Dolan, CH. W., "Design of Concrete Structures", The Mc Grow-Hill, 2004.

[۱۰] مرادی، محمد جواد. مقاوم سازی دال‌های تخت بتن

مسلح با استفاده از الیاف پلیمری مرکب (FRP). پایان نامه

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، مهر

۱۳۹۲.

از ناحیه مسلح شده می‌شود.

۱۳- استفاده از نوارهای GFRP به جای نوارهای CFRP منجر

به کاهش ظرفیت باربری به میزان ۵٪ و افزایش تغییر مکان

نهایی نمونه نسبت به نمونه CFRP به میزان ۱۲٪ شد. این

مقادیر برای نوارهای AFRP در مقایسه با CFRP، به ترتیب

۱۷٪ و ۱۴٪ کاهش ثبت شدند. در نتیجه می‌توان گفت الیاف

کربن (CFRP) یکی از مناسب ترین مصالح برای مقاوم سازی

خمش است.

۶-مراجع

[۱] مستوفی نژاد، داوود. سازه های بتن آرمه؛ اصفهان،

انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۸، ص ۲۷۳.

[2]Binici B, Bayrak O. Punching shear strengthening of reinforced concrete flat plates using carbon fiber reinforced polymers. Journal of Structural Engineering, ASCE 129:9 (2003) 1173-1182.

[3]Menetrey, Ph, 2002, "Synthesis of punching failure in reinforced concrete", Cement & Concrete Composite, Vol. 24, pp. 497-507.