

## تقویت خمشی و خمشی - برشی دال‌های مجوف بتن مسلح با استفاده از الیاف CFRP و GFRP و ورق‌های فولادی\*

محمد مهدی صالحی یانه‌سری<sup>(۱)</sup> علی مدانلو<sup>(۲)</sup> مرتضی حسین علی بیگی<sup>(۳)</sup> بهرام نوائی نیا<sup>(۴)</sup>

**چکیده** بسیاری از پل‌ها و ساختمان‌هایی که هم‌اکنون مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند از دال مجوف ساخته شده‌اند. استفاده از دال مجوف به منظور کاهش حجم بتن‌ریزی، هزینه و وزن سازه می‌باشد. برخی از این ساختمان‌ها و پل‌ها به‌خاطر حوادث طبیعی از قبیل زلزله، باد و یا بر اثر خستگی مصالح و عوامل خوردنده‌ی قلیایی و اسیدی آسیب‌های شدیدی دیده‌اند. از این رو، تعمیر و تقویت سازه‌های فوق امری حیاتی و مقرون به صرفه می‌باشد. در این تحقیق رفتار خمشی دال‌های بتن‌آرمه مجوف تقویت‌شده با استفاده از سیستم‌های مختلف FRP و ورق‌های فولادی به کمک مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تعداد ۸ نمونه دال‌های بتن‌آرمه مجوف به ابعاد  $150 \times 45 \times 20$  cm طبق آیین‌نامه‌ی آبا ساخته شده است. در این دال‌ها مقدار آرماتور کششی معادل  $0.25 \rho_b$  می‌باشد و در همه‌ی آن‌ها دو سوراخ سراسری به قطر ۱۰ cm ایجاد شده است. یک دال به‌عنوان مرجع (تقویت‌نشده) و هفت دال دیگر توسط ورق و لامینیت CFRP، ورق GFRP و ورق فولادی تقویت و تست شده‌اند. در حین آزمایش نیروها، کرنش‌ها و تغییر مکان‌ها ثبت شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مقاومت خمشی ایجاد شده در دال‌های تقویت شده با لامینیت FRP حدود ۴۳٪، ورق CFRP حدود ۵۷٪، ورق GFRP ۴۵٪ و ورق فولادی ۱۵٪ می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** دال مجوف، تقویت خمشی و خمشی - برشی، الیاف CFRP و GFRP، ورق‌های فولادی.

### The Flexural Strength and Flexural - Shear void Concrete Slabs with CFRP and GFRP and Steel Sheets

M.M.Salehi Yanehsari

A.Modanloo

M.Beygi

B.Navayi Neya

**Abstract** A large number of bridges and buildings that are currently used, are made of slabs with opening. Some of these buildings and bridges have been severely damaged because of natural disasters such as earthquake, storm and other effects such as materials fatigue and alkaline and corrosive agents. Therefore, retrofitting and strengthening of these structures is essential and affordable. In this research, by applying experimental models, the flexural behavior of reinforced concrete slabs with opening strengthened with different FRP systems and steel sheets have been studied. Eight specimens of reinforced concrete slabs designed according to the Iranian code ABA with the dimensions of  $150 \times 45 \times 20$  cm were manufactured. In these slabs, the amount of tensile reinforcement was equal to  $0.25 \rho_b$ . Two openings across the length of each slab with 10 cm diameter were created. One slab was considered as reference (not strengthened) and seven other slabs were strengthened with CFRP laminates, GFRP sheets and steel sheets, and tested. Forces, strains and deflections were recorded during the tests. The results of this research show that the flexural strength increases about 43% in the strengthened slabs with FRP laminates, about 57% with CFRP sheets, 45% with GFRP sheets and 15% with steel sheets.

**Key Words** Void slab, CFRP-GFRP Laminate, steel sheet

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۱۱/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۱ می‌باشد...

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

(۳) استادیار، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

(۴) استادیار، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

## مقدمه

به دلایل مختلفی چون خرابی‌های ناشی از عوامل محیطی نظیر خوردگی و یا وزش بادهای شدید و خطاهای محاسباتی و تضعیف اعضا در اثر افعال در نگهداری صحیح، خسارات وارده به ساختمان ناشی از جنگ و زلزله و ...، تغییر کاربری و بارهای بهره برداری وارد به سازه، ضعف آئین نامه قدیمی و ... ممکن است سازه‌های ساخته شده فاقد مقاومت و شکل پذیری لازم در مقابل بارهای اعمالی تشخیص داده شوند. از این رو تقویت و نوسازی مجدد سازه‌های مورد بحث، در دستور کار قرار خواهد گرفت. به طور کلی تقویت سازه‌ها در اغلب این موارد بسیار اقتصادی‌تر از ساخت مجدد سازه می‌باشد. به همین منظور محققان زیادی مسأله‌ی تقویت را مورد توجه قرار داده‌اند. تقویت سازه، بیش‌تر به دنبال افزایش مقاومت و بهبود شکل‌پذیری و رفتار اعضای موجود می‌باشد. نیاز به تقویت خمشی دال‌های بتنی با توجه به کاربرد فراوان آن، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. لذا تقویت خمشی دال‌های بتن‌آرمه به روش‌های مختلف هم‌چون تقویت با ورقه‌های فولادی، الیاف پلیمری مسلح و یا تقویت با آرماتورهای خارجی نیز توجه محققان بسیاری را خصوصاً در دهه‌ی گذشته به خود جلب کرده است. این تقویت‌ها می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت خمشی و یا برشی سازه و یا هر دو آن‌ها باشد. دال‌ها در ساختمان‌ها و عرشه‌ی پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [1].

به‌علت عبور لوله‌ها و تأسیسات مکانیکی، بازشدگی در این دال‌ها ایجاد می‌شود. وجود این بازشوها ظرفیت برشی را کاهش می‌دهد.

در یک دهه‌ی اخیر، مطالعات زیادی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی و تقویت اعضای بتن مسلح مانند تیرها، ستون‌ها در برش، خمش و حتی پیچش با استفاده از الیاف پلیمری مسلح به‌صورت پوشش بیرونی انجام گرفته است [3-1]. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه‌ی تیرها و ستون‌های بتن مسلح، در مورد دال‌های

بتنی به ویژه دال‌های مجوف فعالیت‌های تحقیقاتی کمی انجام شده است. رفتار خمشی دال‌های یک طرفه‌ی تقویت‌شده با نوارهای الیاف کربن تحت بارگذاری نقطه‌ای توسط واسکیوس و کبهری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نوارهای الیاف کربن به‌صورت پوشش بیرونی، ظرفیت باربری دال‌های تقویت‌شده را افزایش می‌دهد. علاوه‌براین، در دال‌های تقویت‌شده نسبت به دال تقویت نشده، ترک‌های ایجادشده کوچک‌تر و به‌طور یکنواخت‌تری توزیع گردیده‌اند [4]. موسالام نیز تحقیقاتی را بر رفتار خمشی دال‌های دوطرفه‌ی بدون بازشوی تقویت شده با الیاف پلیمری مسلح تحت بارگذاری یکنواخت انجام داده است. این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم‌های الیاف پلیمری مسلح در افزایش ظرفیت باربری دال‌های دوطرفه مناسب می‌باشند [5]. در دانشگاه فنی و مهندسی نوشیروانی، آقای بحرینی در مورد تقویت دال با استفاده از نوارهای الیاف شیشه آزمایش‌هایی انجام داد. در این تحقیق برای ارزیابی تقویت خمشی دال‌های بتنی یک طرفه‌ی تقویت شده با ورقه‌های نوارهای الیاف شیشه با استفاده از رزین اپوکسی، ۱۵ نمونه دال بتنی به‌طول 100 سانتی‌متر و به عرض 50 سانتی‌متر ساخته شد و این ۱۵ نمونه در ۵ گروه سه‌گانه شناخته شدند. تفاوت بین این گروه‌ها، مقدار آرماتور کششی استفاده شده، در نظر گرفته شد. آنچه که از آزمایش‌ها مشاهده شد این بود که با افزایش سطح مقطع ورقه‌های الیاف شیشه، مقاومت نهایی دال افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. در اثر تقویت ترک‌های خمشی محدود شده و در هنگام شکست نهایی ترک‌ها خمشی-برشی رشد بیش‌تری پیدا کرده و در حالی که عرض ورق‌ها برابر عرض دال باشد اولین ترک‌خوردگی در بار بیش‌تر به‌وجود آمده است. تغییر شکل و شکل‌پذیری دال‌های تقویت‌شده‌ی خمشی از دال‌های تقویت‌نشده کم‌تر است [6]. در سال ۲۰۰۴ آقایان ژانگ و راهوان، رفتار سه دال بتن‌آرمه‌ی یک‌طرفه را با ابعاد  $330 \times 100 \times 25$

۱۱۰-۲۲ دال بدون بازشو بوده است. با استفاده از تقویت با ورق الیاف کربن می توان ترس وجود سوراخ در دال ها را از بین برد و یک سازه ی مقاوم در برابر بارهای زیاد به وجود آورد و دال با بازشو مقاومت سازه ای خیلی بیش تری نسبت به دال بدون باز شو از خود نشان می دهد [8].

### مشخصات دال ها

در این پژوهش، ۸ دال مجوف به طول ۱۵۰ سانتی متر، عرض ۴۵ سانتی متر و ضخامت ۲۰ سانتی متر با نسبت آرماتور کششی معادل  $\rho_b = 0.25\rho_{max}$  ساخته شدند. از پنج میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور کششی و سه میلگرد ۸ به عنوان میلگرد فشاری استفاده شده است.

آرماتورهای برشی به قطر ۶ میلی متر در فواصل مرکز به مرکز ۱۰ سانتی متر در (۱/۵) کناری و ۲۰ سانتی متر در (۳/۵) میانی از یکدیگر قرار دارند. همچنین از میلگردهای نمره ۶ در فواصل مرکز به مرکز ۱۵ سانتی متر به عنوان میلگردهای حرارتی در بالا و پایین دال در جهت عمود بر میلگردهای اصلی استفاده شده است.

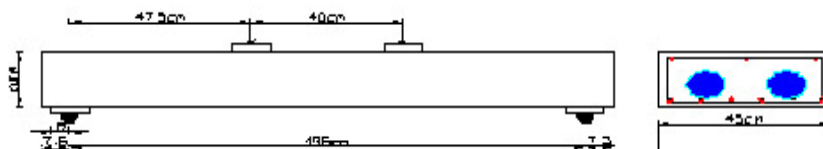
دو بازشدگی به قطر ۱۰ سانتی متر در تمام طول دال ایجاد شده است. مشخصات و نحوه ی آرماتورگذاری دال ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

سانتی متر که با استفاده از شبکه ی میله گردهای الیاف کربن تقویت شده اند مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش شکل ترک خوردن، تغییر مکان ها، کرنش ها و مد شکست دال ها اندازه گیری شد.

نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که دال های تقویت شده با الیاف پلیمری مسلح تغییر مکان کم تری نسبت به دال تقویت نشده دارند. با استفاده از تقویت با شبکه ی میلگردهای الیاف کربن ضخامت دال ها را می توان کم تر کرد. شکست تمام دال های تقویت شده از نوع برشی بوده است و هم چنین مقاومت و سختی دال های تقویت شده افزایش می یابد [7].

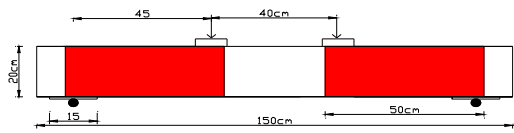
در سال ۲۰۰۶ در دانشگاه تکنولوژی دانمارک، آقایان روسینسکی و اولافسون در مورد تقویت دال های دو طرفه ی دارای بازشو تحقیقاتی انجام دادند. آنها یازده دال به ابعاد ۲/۶×۲/۶ متر و با ضخامت ۱۰ سانتی متر ساختند که یک دال بدون بازشو و ۵ دال با سوراخ ۰/۸۵×۰/۸۵ (گروه S) و تعداد ۵ دال دیگر با سوراخ ۲/۱×۲/۱ m (گروه L) ساخته شد و همه ی آنها دارای آرماتور یکسان بودند.

در این آزمایش، یک دال در هر دو گروه از دال ها را به عنوان شاهد و بدون تقویت، یک دال را با استفاده از میلگرد و با زاویه ی ۴۵ درجه، یک دال با استفاده از ورق الیاف کربن با زاویه ی ۹۰ درجه و یک دال را هم با ورق الیاف کربن با زاویه ی ۹۰ درجه و ۴۵ درجه به صورت توأم در اطراف سوراخ تقویت کردند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که افزایش مقاومت در دال های تقویت شده ۱۲۵-۲۴ دال های شاهد و

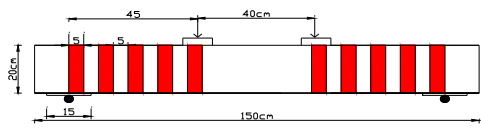


شکل ۱ مشخصات دال ها

GFRP تقویت شدند. نحوه‌ی تقویت دال‌ها در شکل (۲ و ۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ نحوه‌ی تقویت برشی نمونه‌های C-2 و G-2



شکل ۳ نحوه‌ی تقویت برشی نمونه‌ی L-2

در این پژوهش از بتن معمولی استفاده شده است که مقاومت فشاری (استوانه ای) ۲۸ روزگی بتن در حدود 30MPa حاصل گردیده است. لامینیت‌های CFRP به عرض 50 میلی‌متر پس از آماده‌سازی سطح به جان دال‌ها در منطقه‌ی دهانه‌ی برشی متصل گردید. خواص لامینیت‌ها و ورق‌های CFRP، ورق‌های GFRP طبق گزارش کارخانه‌ی سازنده، در جدول (۱) و مشخصات ورق‌های فولادی در جدول (۲) آورده شده است.

### روش کلی آزمایش

پس از تقویت دال‌ها و عمل‌آوری رزین، به‌منظور مشخص نمودن محل دقیق ترک‌ها، سطح تیرها به‌وسیله‌ی رنگ سفید شده است. هم‌چنین در ارتفاع دال در وسط دهانه دکمه‌هایی مطابق شکل (۴) برای اندازه‌گیری کرنش‌ها و تغییر مکان‌سنج نصب شده است. در این آزمایش‌ها، تیرها در مراحل مختلف بارگذاری شدند. بار افزایش داده شد و هر نقطه از دال که ترک برداشت، بلافاصله ادامه‌ی بارگذاری متوقف شد و کلیه‌ی تغییرات ثبت و مسیر ترک‌ها بر سطوح دال کاملاً مشخص شد و مقادیر بار ترک بر روی دال

### نحوه‌ی تقویت دال‌ها

دال‌ها از جهت نوع الیاف FRP و ورق فولادی تقویتی به چهارگروه L، G، C، S نام‌گذاری شده‌اند. یک دال هم به عنوان دال مرجع (تقویت نشده) می‌باشد که به اسم REF نام‌گذاری شده است. گروه L شامل دو دال به نام‌های L-1 و L-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی دو ورق لامینیت به شکل نواری به ابعاد ۱۵۰ × ۵ سانتی‌متر تقویت شده‌اند.

دال L-2 علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است. برای این کار از پنج ورق به ابعاد ۲۰ × ۵ سانتی‌متر از نقطه‌ی اعمال بار تا تکیه‌گاه با فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر از هم استفاده شده است. گروه G شامل دو دال به نام‌های G-1 و G-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی الیاف شیشه (GFRP) به ابعاد ۱۵۰ × ۴۰ سانتی‌متر تقویت شده‌اند. دال G-2 علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است. برای این کار از ورق‌ی به ابعاد ۲۰ × ۴۵ سانتی‌متر از نقطه‌ی اعمال بار تا تکیه‌گاه استفاده شده است.

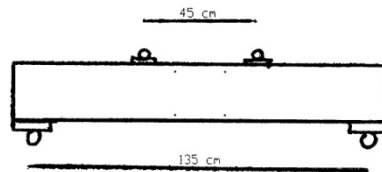
گروه C شامل دو دال به اسم‌های C-1 و C-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی دو لایه الیاف کربن (CFRP) به شکل نواری به ابعاد ۱۵۰ × ۱۰ سانتی‌متر تقویت شده‌اند. دال C-2 علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است، شکل و مقدار تقویت برشی شبیه دال G-2 بوده است و گروه S نیز شامل یک دال به اسم S می‌باشد که به‌وسیله‌ی دو ورق فولادی به ابعاد ۱۵۰ × ۱۰ سانتی‌متر تقویت شده‌اند. در هر گروه یک دال به‌عنوان نمونه‌ی مرجع و سه دال دیگر با ورق‌های CFRP، GFRP و لامینیت‌های CFRP در دهانه‌ی برشی دال‌ها (فاصله‌ی بین محل اعمال بار و عکس‌العمل تکیه‌گاهی) تقویت شدند. دال‌های L-1 و L-2 با لامینیت‌های CFRP در فواصل مرکز به مرکز ۱۰ سانتی‌متر، دال‌های C-1 و C-2 با ورق‌های CFRP و دال‌های G-1 و G-2 با ورق‌های

نسبت به نمونه‌ی مرجع کاهش یافته است. شکست تمام دال‌ها ترد است که نشان دهنده‌ی جاری نشدن میلگردهای خمشی و الیاف FRP می‌باشد. در هر دو سری نیز بیش‌ترین سختی مربوط به دال‌های تقویت‌شده با لامینیت‌های CFRP است.

### نمودارهای بار- کرنش کششی دال‌ها (نمونه‌ها)

با مشاهده‌ی شکل (۷) مربوط به نمودار بار کرنش کششی دال‌های REF، L-1، G-1، C-1 و S به این نتیجه می‌رسیم که شکل‌پذیری دال REF بیش‌تر از دال‌های تقویت‌شده می‌باشد. می‌توان گفت با تقویت خمشی یک دال بتن‌آرمه‌ی یک طرفه، شکل‌پذیری آن کاهش و سختی آن افزایش می‌یابد. از طرفی با مشاهده‌ی شکل (۸) مربوط به نمودار بار کرنش کششی دال‌های REF، L-2، G-2، C-2 به این نتیجه می‌رسیم که شکل‌پذیری دال REF بیش‌تر از دال‌های تقویت شده می‌باشد. می‌توان گفت با تقویت خمشی-برشی یک دال بتن‌آرمه‌ی یک طرفه، شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

یادداشت گردید تا مکانیزم مسیر و شکل ترک‌ها به‌منظور ارزیابی‌های بعدی کاملاً در دسترس باشد. همچنین در هر گام بارگذاری به‌وسیله کرنش‌سنج، تغییرات کرنش در ارتفاع تیر نیز ثبت شد و در نهایت بارگذاری تا مرحله‌ی گسیختگی دال ادامه یافت و با ثبت حالت گسیختگی و تهیه تصاویر از این حالت آزمایش به پایان رسید.



شکل ۴ موقعیت دکمه‌ها در ارتفاع دال‌ها

### نتایج آزمایشگاهی

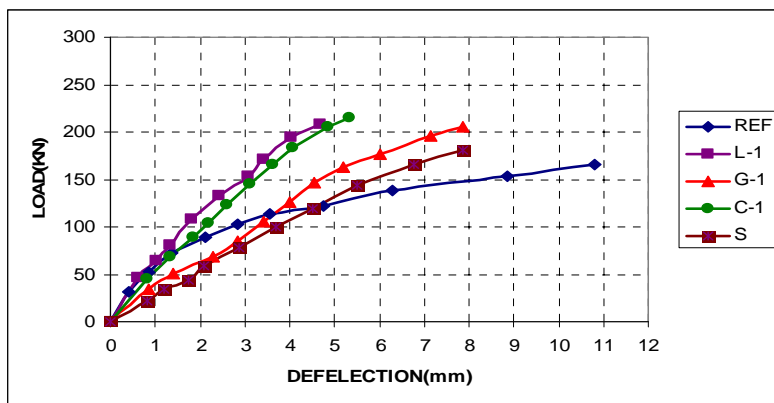
نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌ها. برای بررسی سختی و تغییر مکان دال‌ها، منحنی بار-تغییر مکان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است شکل (۶ و ۵). ملاحظه می‌شود که سختی دال‌های تقویت شده با الیاف کربن نسبت به نمونه‌ی مرجع افزایش یافته است در حالی که سختی دال‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه

جدول ۱ خواص الیاف مورد استفاده

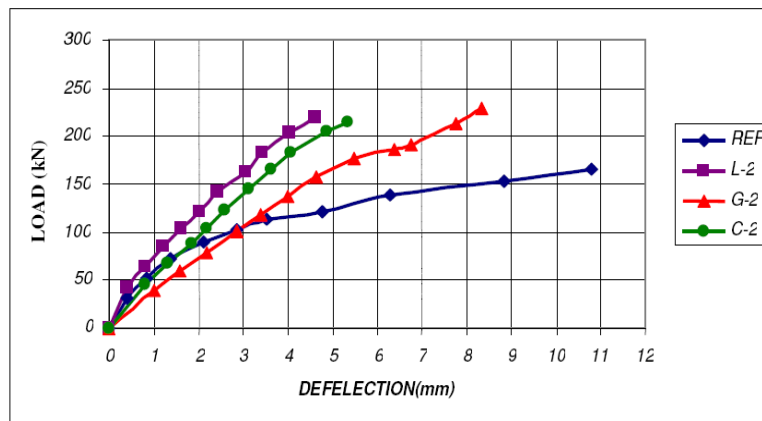
مصلح تقویتی	ضخامت (mm)	عرض (mm)	مقاومت نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
CFRP Laminate	۱/۲	۵۰	۳۰۰۰	۱۶۵	۱/۸
CFRP Sheet	۰/۱۷۶	-	۴۰۰۰	۲۴۰	۱/۶
GFRP Sheet	۰/۳	-	۱۷۰۰	۷۷	۲/۲

جدول ۲ مشخصات ورق فولادی

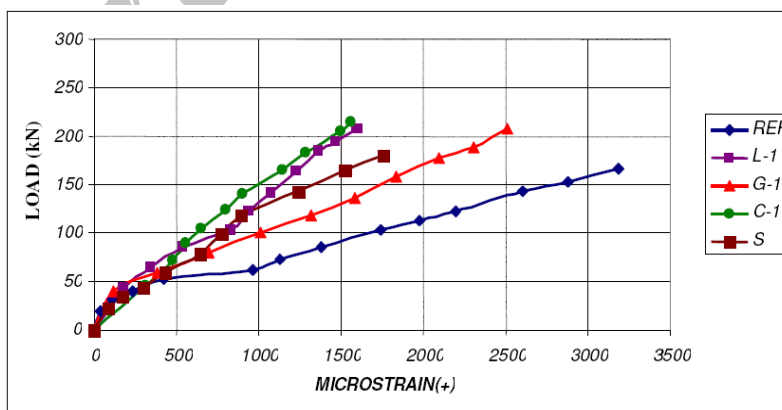
مدول الاستیسیته $\text{kg/cm}^2$	ضخامت (mm)	عرض (mm)	تنش حد تسلیم $\text{kg/cm}^2$	تنش در جاری شدن $\text{kg/cm}^2$	وزن واحد حجم $\text{kg/cm}^3$	جرم واحد حجم $\text{kg/cm}^3$
۲۰۶۰۰۰۰	۴	۱۰۰	۳۷۰۰	۲۴۰۰	۷۸۵۰	۷۹۵



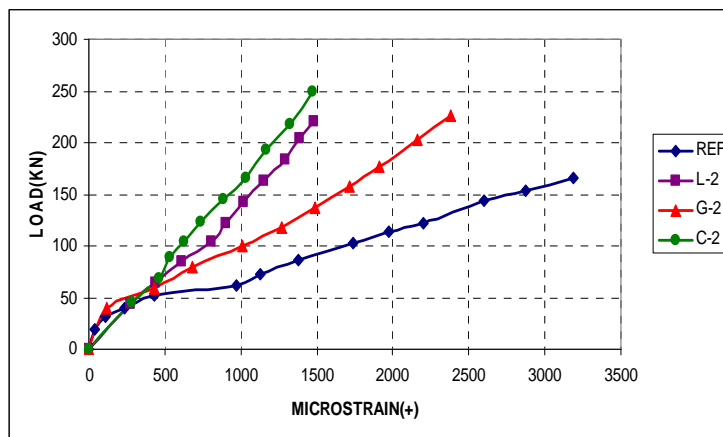
شکل ۵ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال‌های REF, L-1, G-1, C-1 و S.



شکل ۶ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال‌های REF, L-2, G-2, C-2.



شکل ۷ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌های REF, L-1, G-1, C-1 و S.



شکل ۸ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌های REF، L-2، G-2، C-2

دال‌های مورد آزمایش بسان یک تیر یک‌طرفه عمل می‌کنند و به دلایل ذکر شده شکست برشی صورت گرفته است و این دال‌ها نتوانسته‌اند تمامی ظرفیت خمشی خود را نشان دهند.

همان‌طور که مشاهده شده افزایش مقاومت ایجاد شده در دال تقویت شده با لامینیت حدود ۲۷٪، تقویت شده با شیشه ۳۰٪ تقویت شده با کربن ۴۲٪ و تقویت شده با ورق فولادی ۱۵٪ بوده است. ولی باید این نکته را توجه داشت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به مراتب بیش‌تر از این مقدار باشد. زیرا شکست تمام دال‌ها از نوع برشی بوده و دال قبل از اینکه از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کند، گسیخته شده است. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی دال‌های تقویت شده، به مراتب بیش‌تر از آنچه مشاهده شده است می‌باشد.

#### مقایسه‌ی دال REF با دال‌های L-2، G-2 و C-2

اولین ترک خمشی ایجاد شده در دال REF در بار ۳۱ kN بوده است در حالی که اولین ترک خمشی ایجاد شده در دال‌های L-2، G-2، C-2 به ترتیب برابر ۵۰ kN، ۵۵ kN، ۴۵ kN بوده است. اولین ترک این دال‌ها در باری تقریباً ۱/۴۵، ۱/۷۷، ۱/۶۱ برابر دال

#### مقایسه‌ی دال REF با دال‌های L-1، G-1، C-1 و S

با مشاهده‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها اولین ترک خمشی ایجاد شده در دال REF در بار ۳۱ kN بوده است در حالی که اولین ترک خمشی ایجاد شده در دال‌های L-1، G-1، C-1، S به ترتیب برابر ۴۳ kN، ۵۰ kN، ۴۵ kN و ۴۵ kN بوده است. اولین ترک این دال‌ها در باری تقریباً ۱/۳۹، ۱/۶۱، ۱/۴۵، ۱/۴۵ برابر دال مرجع به وجود آمده است.

شکست دال REF در بار ۱۶۶ kN اتفاق افتاد که این شکست از نوع خمشی بوده و با جاری شدن میلگردهای کششی هم‌زمان بوده است، در حالی که شکست دال‌های L-1، G-1، C-1، S به ترتیب ۲۱۰ kN، ۲۱۵ kN، ۲۳۵ kN و ۱۹۰ kN بوده و شکست آن از نوع برشی بوده است. در تحلیل شکست‌های برشی ایجاد شده می‌توان گفت که علی‌رغم مبانی درست طراحی دال، رفتار این دال‌ها با ابعاد انتخابی مانند یک تیر یک‌طرفه عمل کرده و به دلیل نداشتن میلگرد برشی کافی و عدم تأمین نیاز برشی، شکست برشی حادث شده است. این در حالی است که رفتار دال و مبانی طراحی آن بر مبنای حالت خمش انجام می‌گیرد و بحث تأمین مقاومت برشی گفته شده در اولویت‌های طراحی نیست. در هر حال،

### مقایسه‌ی کلی بین دال‌ها

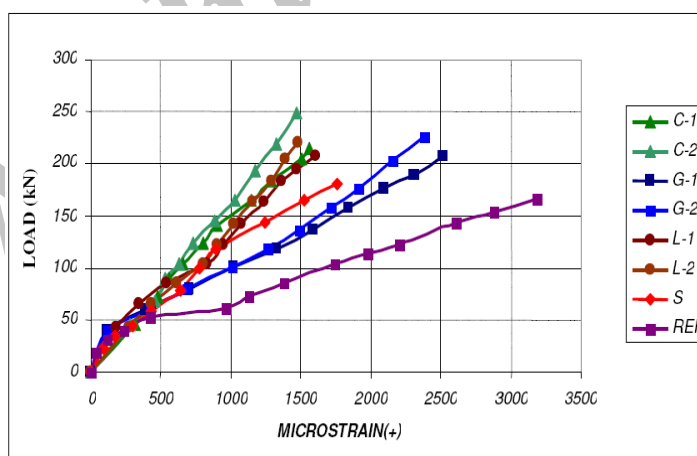
با مشاهده‌ی تایچ حاصل از آزمایش‌ها با شرایط تقریباً یکسان برای این دال‌ها به نتایج زیر می‌رسیم. مقاومت نهایی و سختی دال‌های تقویت‌شده در مقایسه با دال مرجع افزایش یافته و این در حالی است شکل‌پذیری آن‌ها کاهش یافته است. شکست در همه‌ی دال‌های تقویت‌شده از نوع برشی می‌باشد. از میان دال‌های تقویت‌شده، دال‌هایی که با کربن (*CFRP*) تقویت شده‌اند دارای مقاومت نهایی بیش‌تری نسبت به دیگر دال‌ها می‌باشند، اما شکل‌پذیری آن‌ها از دال‌های دیگر کم‌تر می‌باشد (شکل ۱۰ و ۹).

افزایش مقاومت نهایی دال‌های *L-2*، *G-2* و *C-2* که تقویت خمشی-برشی شده‌اند، نسبت به مقاومت نهایی دال‌های *L-1*، *G-1*، *C-1* به ترتیب ۵۹٪، ۵۰٪ و ۳۶٪ بوده است (جدول ۲). با توجه به شکل (۱۰) درمی‌یابیم سختی دال *L-2* از دال *L-1*، *G-2* از *G-1* و *C-2* از *C-1* بیشتر می‌باشد. هم‌چنین مقاومت نهایی دال *C-2* از بقیه‌ی دال‌ها بیش‌تر بوده است.

مرجع به‌وجود آمده است.

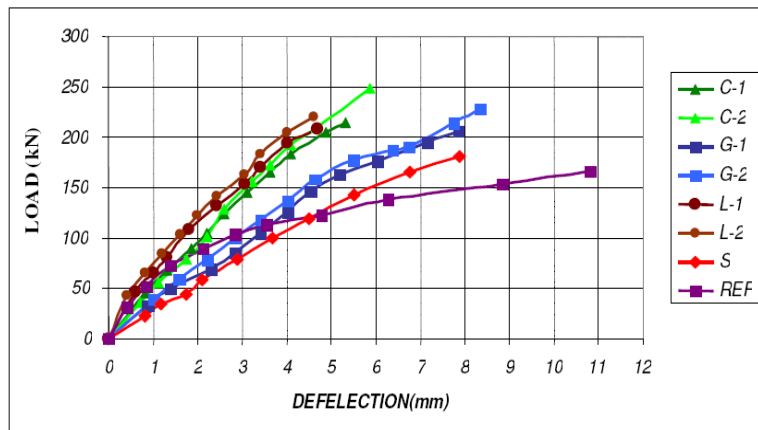
شکست دال REF در بار ۱۶۶ kN اتفاق افتاد که این شکست از نوع خمشی بوده و با جاری شدن میلگردهای کششی هم‌زمان بوده است، در حالی که شکست دال‌های *L-2*، *G-2*، *C-2* به ترتیب ۲۳۷ kN، ۲۴۰ kN، ۲۶۰ kN بوده است و نوع شکست این دال‌ها، برشی و با جداشدگی ورق تقویتی از زیر دال همراه بوده است.

همان‌طور که مشاهده شد افزایش مقاومت ایجادشده در دال تقویت‌شده با لامینیت حدود ۴۳٪، تقویت‌شده با شیشه ۴۵٪، تقویت‌شده با کربن ۵۷٪ بوده است. ولی باید این نکته را توجه داشت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به‌مراتب بیش‌تر از این مقدار باشد. زیرا شکست تمام دال‌ها از نوع برشی بوده و دال قبل از این‌که از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کند، گسیخته شده است. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی دال‌های تقویت‌شده، به‌مراتب بیش‌تر از آنچه مشاهده شده می‌باشد.



شکل ۹ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌ها





شکل ۱۰ مربوط به نمودار بار- تغییر مکان دال‌ها

نمونه‌ی مرجع REF2 به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۵۰ و ۰/۲۲ می‌باشد. البته با توجه به نوع شکست دال‌ها که به علت جداشدگی الیاف FRP بوده این ظرفیت کم‌تر از مقدار حداکثری است که طبق آیین‌نامه‌ها برای حالت پارگی الیاف FRP پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که با افزایش درصد آرماتورهای کششی طولی، مقدار افزایش ظرفیت برشی ناشی از الیاف تقویتی FRP کاهش می‌یابد. بدون شک برای تأیید این نتیجه، آزمایش‌های بیش‌تری باید صورت گیرد.

### مقاومت برشی و نحوه‌ی گسیختگی دال‌ها

مقادیر بار نهایی، تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال، بار ترک‌خوردگی، حالت شکست و میزان افزایش بار نهایی پس از تقویت نمونه‌ها در جدول (۲) و شکست نمونه‌ها در شکل‌های (۱۱-۱۸) ارائه شده است. در دال‌های گروه ۱ افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت‌شده‌ی C-1 و G-1 نسبت به نمونه‌ی مرجع REF1 به ترتیب ۴۳/۷۵٪، ۶۲/۵٪ و ۳۱٪ می‌باشد. در دال‌های گروه ۲ نیز افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت‌شده‌ی L-2، C-2 و G-2 نسبت به

جدول ۲ نتایج آزمایشگاهی

تیر	اولین بار ترک خوردگی (kN)	بار نهایی (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	افزایش بار نهایی پس از تقویت (%)	نوع شکست
REF1	۳۱	۱۶۱	۱۰/۷۸۸	-	گسیختگی خمشی
L-1	۴۳	۲۱۰	۴/۷۱	۲۷	گسیختگی برشی
L-2	۴۵	۲۳۷	۴/۶۵	۴۳	گسیختگی برشی به همراه جداشدگی لامینیت CFRP از سطح بتن
G-1	۵۰	۲۱۵	۷/۸۵۶	۳۰	گسیختگی برشی به همراه جداشدگی ورق GFRP
G-2	۵۵	۲۴۰	۸/۳۵۴	۴۵	جداشدگی ورق GFRP
C-1	۴۵	۲۳۵	۵/۳۳۴	۴۲	گسیختگی برشی به همراه جداشدگی ورق CFRP زیر تکیه گاه
C-2	۵۰	۲۶۰	۵/۸۷۶	۵۷	گسیختگی برشی به همراه جداشدگی ورق CFRP
S	۴۵	۱۹۰	۷/۷۵۷	۱۵	گسیختگی برشی



شکل ۱۲ شکست نمونه‌ی S-1



شکل ۱۱ شکست نمونه‌ی REF



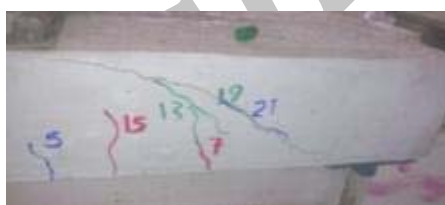
شکل ۱۴ شکست نمونه‌ی L-2



شکل ۱۳ شکست نمونه‌ی L-1



شکل ۱۶ شکست نمونه‌ی C-2



شکل ۱۵ شکست نمونه‌ی C-1



شکل ۱۸ شکست نمونه‌ی G-2



شکل ۱۷ شکست نمونه‌ی G-1

۲. دال‌های تقویت‌شده با الیاف GFRP شکل‌پذیری

به‌تری نسبت به دال‌های تقویت‌شده با الیاف CFRP در هر دو سری از خود نشان می‌دهند. در عین حال، مقاومت نهایی دال‌های تقویت‌شده با الیاف GFRP افزایش کم‌تری نسبت به دال‌های تقویت‌شده با الیاف CFRP دارند.

۳. گسیختگی در دال‌های تقویت‌شده با انواع FRP

عموماً به‌واسطه‌ی جداشدگی (Delamination) و گسیختگی برشی دال رخ داده است.

### نتیجه‌گیری

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌هایی که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد به‌طور خلاصه بیان می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که نتایج مذکور طبق شرایط خاص تکیه‌گاهی، نوع بارگذاری و ابعاد هندسی موجود در این آزمایش به‌دست آمده است که این نتایج به شرح زیر می‌باشند:

۱. در اثر تقویت، شروع اولین ترک‌خوردگی در بار بیش‌تری نسبت به نمونه‌ی مرجع اتفاق افتاد.

Archive of SID