



مطالعه آزمایشگاهی تقویت دال‌های بتن آرمه دوطرفه با استفاده از ورق‌های فولادی پانچ شده

سید سعید صحرانورد، حسن حاجی کاظمی*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹

کلمات کلیدی:

دال‌های دوطرفه

تقویت دال‌های بتنی

ورق‌های فولادی پانچ شده

حالت شکست، شکل پذیری

خلاصه: دال‌ها اعضای سازه‌ای هستند که وظیفه حمل و انتقال بار را بر عهده دارند. دال‌ها به دلایل گوناگون از جمله تغییر کاربری، خوردگی آرماتورها و تغییر در آیین‌نامه‌ها نیازمند تقویت هستند. با سابقه‌ترین روش تقویت دال‌های بتنی استفاده از ورق‌های تقویت فولادی است. مسأله اصلی در استفاده از ورق‌های فولادی، وزن زیاد آن‌ها به هنگام استفاده، نصب مشکل و عدم اطمینان از اتصال مناسب ورق تقویت به دال است. در این پژوهش ورق‌های فولادی سوراخ شده به عنوان عامل تقویت کننده دال مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نوع از ورق‌ها در کنار وزن کمتر امکان اتصال آسان‌تر و مطمئن‌تری را فراهم می‌نمایند. به منظور انجام آزمایش‌ها، ۹ دال بتن مسلح دوطرفه با ابعاد ۱۲۰۰ و ضخامت ۸۰ میلی‌متر زیر اثر بار نیمه‌متمرکز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تأثیر ضخامت ورق، چیدمان سوراخ‌ها، مساحت سوراخ‌ها و روش اتصال ورق پانچ شده بر عملکرد سیستم تقویت از طریق مطالعه نمودار بار-تغییر مکان، انرژی شکست و شکل‌پذیری مورد بحث قرار گرفته است. نتایج آشکار ساخته‌اند که ورق‌های سوراخ‌دار ظرفیت باربری، جذب انرژی و شکل‌پذیری دال‌های دوطرفه را به ترتیب تا ۶۲٪، ۲۵۳٪ و ۲۲۰٪ افزایش می‌دهند. مقایسه الگوی شکست نمونه‌های تقویت شده نشان داده است که فاصله سوراخ‌ها از گوشه ورق و مساحت قسمت مرکزی ورق در انتخاب چیدمان مناسب سوراخ‌ها حائز اهمیت است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده تقویت با بهره‌گیری از چسب سبب افزایش ظرفیت باربری و سختی اولیه شده و حالت شکست آن جداسازی ورق اتصال است؛ در حالی که تقویت با استفاده از پیچ می‌تواند شکل‌پذیری و جذب انرژی دال را بهبود داده و حالت شکست آن بیرون کشیده شدن پیچ است.

۱- مقدمه

سختی، ترک خوردگی، خیز، جذب انرژی، شکل‌پذیری و موارد دیگری را در برمی‌گیرد که متناسب با شرایط یک یا چند مشخصه اهمیت خواهند داشت [۱].

شناخته‌شده‌ترین مصالح در تعمیر و تقویت دال‌های بتنی که از گذشته مورد بهره‌برداری قرار گرفته فولاد است که در اشکال مختلفی همچون میلگردها و صفحات تقویت کننده در تعداد بسیار زیادی از پروژه‌های اجرایی و تحقیقاتی استفاده شده است. با اینکه فولاد به نسبت مصالحی ارزان و مقرون به صرفه است، اما موارد ذیل استفاده از ورق‌های تقویت فولادی را با چالش‌هایی روبرو کرده است: الف) وزن زیاد ورق‌های فولادی که نصب آن‌ها را در بالای سر بهنگام تقویت دال با مشکلات فراوانی مواجه می‌نماید؛ ب) نداشتن دسترسی به زیر ورق تقویت و عدم امکان کنترل میزان چسب مصرفی و خارج کردن هوای

دال‌های بتنی یکی از عناصر اصلی باربر در سازه‌های بتنی و فولادی محسوب شده و در تحمل و انتقال بارهای مرده و زنده سازه نقش اساسی دارند و بارهای متمرکز، نیمه گسترده (موضعی) و گسترده به شکل‌های استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی به صورت معمول به دال‌های بتنی وارد می‌آیند. دال‌ها به دلایلی همچون تغییر در آیین‌نامه‌ها، خوردگی آرماتورها، تغییر در کاربری و خطاهای اجرایی نیازمند تقویت هستند [۱].

مقاوم‌سازی دال‌ها به معنای افزایش مشخصه‌های مکانیکی یک دال است که به دلایل ذکر شده آن مشخصه‌ها را از دست داده است. مشخصه‌های مکانیکی طیف گسترده‌ای شامل ظرفیت حمل بار،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hkazemi@um.ac.ir



محبوس در مورد استفاده از چسب اپوکسی^۱ برای اتصال ورق؛ ج) عدم امکان کنترل وضعیت دال در دوره‌های مختلف بهره‌برداری [۱]. بسیاری از محققان تقویت خمشی اعضای بتنی را با استفاده از ورق‌های فولادی مطالعه نموده‌اند. این تحقیقات عموماً بر اساس روش اتصال ورق تقویت و نوع دال بتنی دسته‌بندی می‌شوند [۱]. در بخش عمده‌ای از این تحقیقات از چسب اپوکسی برای اتصال ورق فولادی به سطح بتن استفاده شده است. گمرت [۲] برای اتصال نوارهای فولادی به سطح دال از چسب اپوکسی با ضخامت ۲ الی ۳ میلی‌متر استفاده نمود. این محقق با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمون‌های برش و خمش-برش راهکارهای طراحی ورق‌های تقویت و مهار کردن آن‌ها را ارائه نموده است. یلگین و همکاران [۳] تقویت دال‌های بتنی یک‌طرفه با ابعاد ۳۰۰۰×۸۰۰×۱۰۰ میلی‌متر را تحت اثر بارگذاری خطی در وسط دهانه مورد مطالعه قرار دادند. برای تقویت از صفحات فولادی با عرض ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ و ۴ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که ظرفیت باربری دال پس از تقویت تا حدود ۳ برابر افزایش می‌یابد. همچنین این مطالعات نشان داد که شکست دال‌های دارای ورق ۲ میلی‌متری از انتهای ورق‌ها و شکست دال‌های دارای ورق ۴ میلی‌متری از قسمت میانی اتفاق می‌افتد. علاوه بر آن نشان داده شد است که صفحات فولادی بیش از ۳ میلی‌متر در هنگام شکست از دال جدا می‌شود. هووینن [۴] تیرهای بتنی دارای مقطع ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر را با ورق فولادی به ضخامت‌های ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر و با استفاده از چسب اپوکسی تقویت نموده و بارهای استاتیکی و دینامیکی را به آن‌ها اعمال کرده است. نتایج مطالعات این محققان آشکار ساخت زمانی که ضخامت ورق تقویت ۲ یا ۵ میلی‌متر بوده، صفحه فولادی تقویت‌کننده جاری شده است؛ اما در مورد ورق تقویت ۱۰ میلی‌متری جداسازی ورق اتفاق افتاده است. سایر نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ورق فولادی برای تقویت تیرهای بتنی بسیار مؤثر و اقتصادی است. رشید و همکاران [۵] تقویت دال‌های بتنی با ابعاد ۶۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر را مطالعه نمودند. صفحات فولادی با ضخامت ۱ و ۱/۵ میلی‌متر به سطح دال چسبانده شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت به صورت کلی مشخصات مکانیکی دال‌ها پس از مقاوم‌سازی بهبود یافته است و بار متناظر با اولین ترک و سختی افزایش می‌یابد. اولین ترک در ناحیه

خارج از صفحه فولادی آغاز شده است و ترک شکست در همان ناحیه رخ داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ابعاد ورق فولادی از ضخامت آن مؤثرتر است. در روند آزمایش‌ها مشاهده شده است که جداسازی ورق در ناحیه بین انتهای ورق و نقطه اثر بار اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که شکست هیچ‌گاه در اثر خرد شدن بتن یا تسلیم ورق تقویت اتفاق نمی‌افتد و شکست همیشه در اثر جداسازی ورق از بتن واقع می‌شود. شریف [۶] تیرهای با ابعاد ۲۲۰۰×۲۵۵×۱۵۵ را به وسیله ورق فولادی با چسب اپوکسی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر تقویت نمود. همه تیرهای دارای ورق تقویت مقاومت و سختی بیشتر و خیز، چرخش، کرنش و عرض ترک کمتر به نسبت نمونه‌های شاهد داشته‌اند. الگوی ترک‌خوردگی تیرهای تقویت شده و تقویت نشده مشابه یکدیگر بوده‌اند؛ اما ترک اولیه در تیرهای تقویت شده در بار بزرگ‌تر و با تأخیر رخ داده است.

اکثر محققانی که برای اتصال ورق تقویت از چسب اپوکسی استفاده نموده‌اند حالت گسیختگی را جدایش ورق گزارش نموده‌اند. به همین جهت تعدادی از محققان روش اتصال پیچ و چسب-پیچ را برای تقویت اعضای بتنی آزمودند. عباد و همکاران [۷] تقویت دال‌های بتن مسلح دوطرفه را از طریق اتصال ورق فولادی با استفاده از پیچ‌های فولادی تحقق نمودند. به صورت مشخص با افزایش تعداد پیچ‌ها ظرفیت باربری افزایش یافته است. همچنین می‌توان دریافت که صفحات فولادی به نسبت پیچ‌های فولادی اثر بیشتری بر روی ظرفیت حمل بار دال‌ها دارند. سختی دال‌های تقویت شده نیز به نسبت نمونه کنترلی افزایش داشته است. گومز و همکاران [۸] برای تقویت تیرهای بتنی با استفاده از ورق فولادی علاوه بر چسب اپوکسی از پیچ‌های مقاوم بالا نیز بهره بردند. نتایج مطالعات نشان داد اثربخشی سیستم مقاوم‌سازی به شکل اساسی به رفتار اتصالات وابسته است. سویدی و همکاران [۹] ورق‌های فولادی را با استفاده از پیچ‌های انتظار از پیش کار گذاشته شده در بتن به وجه زیرین تیرهای بتنی متصل نمودند. این محققان ضخامت صفحه تقویت را بر اساس دو مشخصه آسانی استفاده و ارتقاء مقاومت به میزان مورد نیاز انتخاب نموده‌اند. در این پژوهش ظرفیت‌های خمشی و نمودارهای بار-جابجایی ارزیابی شده‌اند.

راهکار دیگر در کاهش احتمال جداسازی ورق تقویت از سطح بتن نصب ورق در عمق بتن است که استفاده از این روش به علت

ورق‌های تقویت می‌توان شکل‌های متنوعی را با در نظر گرفتن شرایط اجرایی بکار برد و در طول دوره بهره‌برداری از دال، ایجاد ترک‌های احتمالی در آن به علت وجود سوراخ در ورق تقویت قابل پیگیری خواهد بود. در این پژوهش برای انجام سوراخ‌کاری از برش پلازما استفاده شده است که به نسبت سایر روش‌های ممکن هزینه‌های کمتری خواهد داشت.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی مشخصه‌های لازم برای شناخت رفتار ورق‌های تقویت سوراخ‌دار بررسی شده‌اند. ضخامت ورق تقویت، چیدمان سوراخ‌ها در ورق تقویت، مساحت بازشوها در ورق و نحوه اتصال ورق به دال محورهای مطالعاتی این پژوهش هستند. با توجه به آنکه استفاده از سوراخ‌های چندوجهی و تیزگوشه احتمال ایجاد تمرکز تنش و پاره‌شدگی ورق حین بارگذاری را افزایش خواهد داد، در تمامی ورق‌های سوراخ‌دار از سوراخ‌های دایروی با قطر ۱۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. از آنجا که اتصال ناحیه میانی ورق تقویت که زیر نقطه اثر بار قرار دارد از اهمیت بالایی برخوردار است، در هیچ‌کدام از ورق‌های سوراخ‌دار در مرکز ورق سوراخی ایجاد نشده است. علاوه بر هندسه سوراخ، نحوه چیدمان سوراخ‌ها و مساحت سوراخ‌ها در ورق تقویت از اهمیت زیادی برخوردار هستند. دو پارامتر مهم که چیدمان سوراخ‌ها را تعیین می‌کند فاصله سوراخ‌ها از گوشه‌های ورق و مساحت قسمت میانی ورق هستند. برای کنترل اثر این دو عامل بر عملکرد سیستم تقویت هشت عدد سوراخ دایروی با قطر ۱۶۰ میلی‌متر در سه چیدمان مختلف مربعی، دایروی و لوزوی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور مطالعه اثر مساحت بازشدگی ورق در رفتار سازه‌ای آن سه درصد مختلف صفر، بیست و چهل از بازشدگی به ورق‌های تقویت اعمال شده است. در نهایت جهت بررسی تأثیر روش اتصال ورق‌های پانچ شده به دال بر عملکرد آن سه روش مختلف اتصال شامل استفاده از چسب اپوکسی، پیچ‌های منبسط شونده و استفاده هم‌زمان از چسب اپوکسی و پیچ تحقیق شده است.

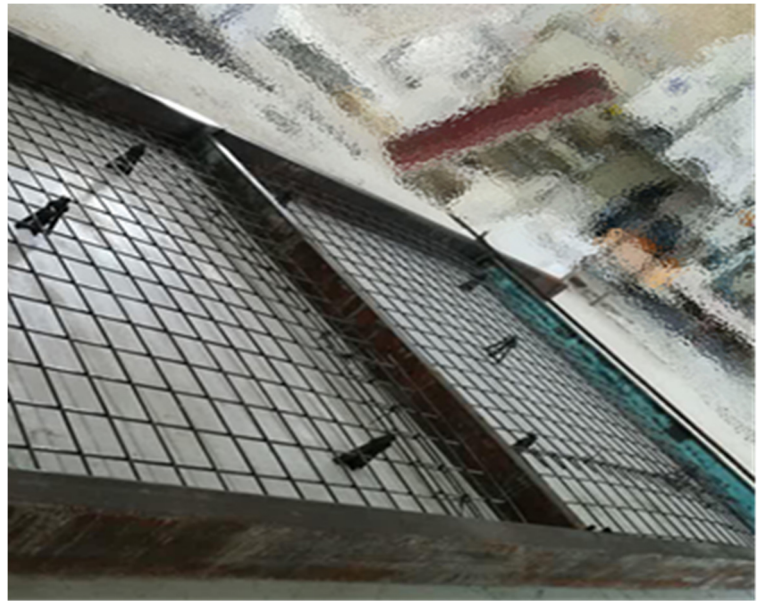
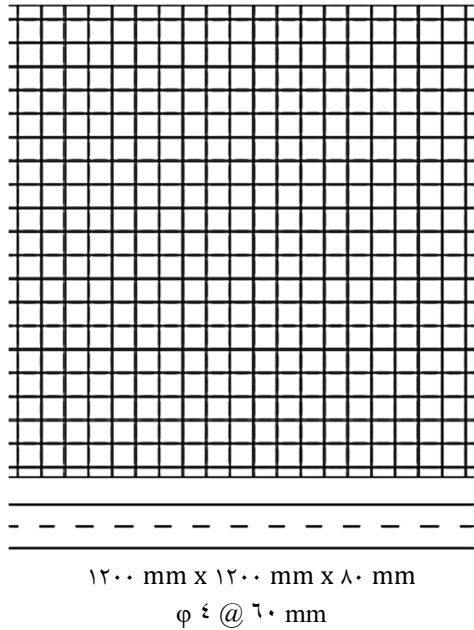
۲-۱- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌ها، تعداد ۹ عدد دال بتنی مربعی با ابعاد

مشکلات اجرایی از گستردگی کمتری برخوردار است. اولاجوموک و همکاران [۱۰] دال‌های بتن مسلح را با استفاده از ورق‌های فولادی به دو روش مسلح‌سازی خارجی EBR و نصب در نزدیک سطح NSM تقویت نموده و مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که روش NSM برخی از حالت‌های گسیختگی مشاهده شده در روش EBR را حذف می‌نماید.

از آنجا که به علت هزینه و یا امکان‌پذیری، همیشه ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مقدور نیست، برخی از محققان تلاش نموده‌اند که رفتار دال‌های تقویت شده توسط ورق‌های فولادی را به صورت عددی شبیه‌سازی نمایند. رابرت و همکاران [۱۱] در یک مطالعه عددی رفتار تیر بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با صفحات فولادی را بررسی نمودند. محققان همچنین کاربرد معادلات به دست آمده را با حل یک مثال بررسی نموده‌اند. متوالی [۱۲] دال بتن مسلح مقاوم شده توسط ورق فولادی و چسب را در محیط نرم‌افزاری ABAQUS مدل‌سازی نمود. این محقق همچنین با ساخت مدل آزمایشگاهی درستی رفتار مدل‌های عددی را آزمود. نتایج آزمایش و مدل‌سازی نشان دادند که شکست نمونه‌ها هیچ‌گاه بر اثر خردشدگی بتن و یا تسلیم شدن ورق تقویت رخ نمی‌دهد، بلکه شکست همیشه با از دست رفتن عملکرد هم‌زمان بتن و ورق تقویت اتفاق می‌افتد.

در پژوهش حاضر برای اولین بار از ورق‌های فولادی پانچ شده در تقویت خمشی دال‌های دوطرفه استفاده شده است. دال‌ها در اغلب موارد تحت اثر بارهای خمشی نیارمند تقویت می‌گردند، به همین علت در این پژوهش بر تقویت خمشی دال‌ها تمرکز شده است. همان‌گونه که گفته شد اصلی‌ترین مسأله در استفاده از ورق‌های فولادی، وزن بالا و دشواری در استفاده از آن‌ها می‌باشد. در گذشته اغلب برای فائق آمدن بر مشکلات یاد شده ورق‌های فولادی را به صورت نوارهای باریک به همراه پیچ و یا چسب استفاده نموده‌اند. استفاده از ورق‌های سوراخ‌دار امکان استفاده از ورق‌های گسترده را ممکن ساخته و سرعت اجرا را افزایش می‌دهد؛ در عین حال وجود حفرات بر روی ورق تقویت، وزن آن را کاهش داده و امکان خروج چسب اضافی و هوای محبوس را در مورد استفاده از چسب‌های اپوکسی ممکن ساخته و اتصال مطمئن‌تری را فراهم می‌آورد. همچنین با توجه به ایجاد حجم انبوهی از ورق‌های پانچ شده در صنایع فلزی به عنوان پسماند، می‌توان این ورق‌های مازاد را در تقویت دال‌ها بکار برد. در ایجاد سوراخ بر روی



شکل ۱. جزئیات ساخت دال‌های بتنی دوطرفه

Fig. 1. Details of tow-way RC slabs

نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های فولادی متفاوت و روش‌های اتصال مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. جدول ۱ نمونه‌های ساخته شده را معرفی می‌نماید. نمونه‌های این پژوهش در ۴ گروه کلی مطالعه خواهند شد. گروه G1 با هدف مطالعه اثر ضخامت ورق بر سیستم تقویت از نمونه‌های C، S1 و S2 به دست خواهد آمد. گروه G2 به منظور کنترل سطح مؤثر ورق تقویت بر رفتار سیستم مقاوم‌سازی تشکیل شده و از گردآوری نمونه‌های C، S1، S3 و S6 حاصل می‌شود. گروه G3 با هدف کنترل اثر چیدمان سوراخ‌ها بر میزان اثربخشی ورق تقویت با مقایسه نمونه‌های C، S3، S4 و S5 به دست خواهد آمد؛ و در نهایت گروه مطالعاتی G4 مشتمل بر نمونه‌های C، S3، S7 و S8 و با هدف مطالعه روش اتصال ورق تقویت پانچ شده تشکیل شده است. شکل ۲ ورق‌های تقویت پانچ شده در نمونه‌های S3 الی S8 را نشان داده است.

ابعاد تمام ورق‌های تقویت مربعی ۹۰۰×۹۰۰ میلی‌متر است و در تمامی ورق‌های تقویت پانچ شده از سوراخ‌های دایروی با قطر ۱۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. همان‌گونه در شکل ۲ دیده می‌شود در ورق‌های تقویت نمونه‌های S3، S4 و S5 هشت عدد سوراخ با قطر ۱۶۰ میلی‌متر ایجاد شده است. در این حالت حدود ۲۰٪ مساحت ورق تقویت توسط سوراخ‌های ایجاد شده کسر گردیده است و تنها نحوه چیدمان هشت عدد سوراخ متفاوت است. فرم چیدمان سوراخ‌ها

۱۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۸۰ میلی‌متر ساخته شده است. طراحی دال با استفاده از آیین‌نامه بتن ایران و بر اساس بارهای مرده و زنده ۲/۵ و ۳ کیلونیوتن بر مترمربع انجام شده است. مقاومت فشاری بتن مصرفی در فرآیند طراحی ۳۰ مگاپاسکال و بزرگ‌ترین بعد سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در آن ۱۲/۵ میلی‌متر بوده است. بر اساس طراحی انجام شده درصد آرماتور طولی باید ۰/۰۳۵ باشد. در این پژوهش با هدف ایجاد یک نقص عمدی در دال که بتواند شرایط خوردگی آرماتورها را شبیه‌سازی نماید، درصد آرماتور طولی به ۰/۰۲۶ کاهش داده شده است. شکل ۱ جزئیات دال‌های بتنی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای مسلح نمودن دال‌ها از یک شبکه جوشی پیش‌ساخته با اعضای دایروی بدون آج در وسط دال‌ها به نحوی استفاده شده است که رویه بتن شبکه فولادی در دو جهت مساوی و برابر با ۳۸ میلی‌متر باشد. با توجه به ابعاد دال انتخاب شده برای این پژوهش و به منظور جلوگیری از ایجاد برش پانچ در حین انجام آزمایش‌ها، چشمه‌های شبکه مسلح کننده ۶۰ میلی‌متر و قطر المان‌های مسلح کننده ۴ میلی‌متر انتخاب شده است.

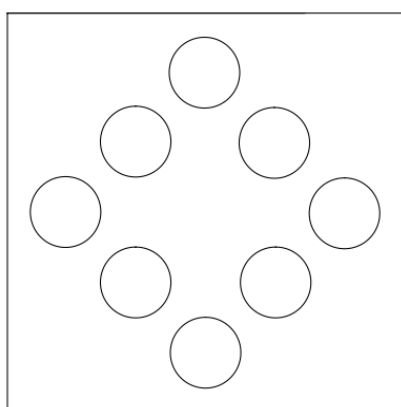
۲-۲- سیستم‌های تقویت

از مجموع ۹ نمونه مطالعه شده در این پژوهش، نمونه C به عنوان نمونه کنترلی هیچ‌گونه تقویتی ندارد و نمونه‌های S1 الی S8 به عنوان

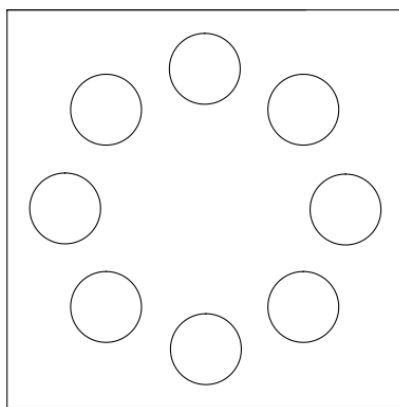
جدول ۱. جزئیات ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 1. Properties of experimental specimens

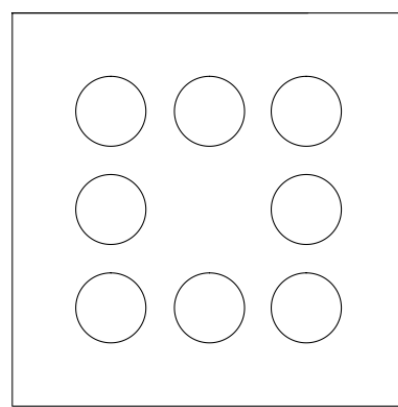
نام نمونه	گروه‌های مطالعاتی	ورق تقویت		نوع اتصال	
		نوع ورق	ضخامت (mm)	چسب اپوکسی	پیچ منبسط شونده
C	G4 – G3 – G2 – G1	-	-	-	-
S1	G3 – G1	ساده	1	■	□
S2	G1	ساده	2	■	□
S3	G4 – G3 – G2	سوراخ‌دار	1	■	□
S4	G2	سوراخ‌دار	1	■	□
S5	G2	سوراخ‌دار	1	■	□
S6	G3	سوراخ‌دار	1	■	□
S7	G4	سوراخ‌دار	1	□	■
S8	G4	سوراخ‌دار	1	■	■



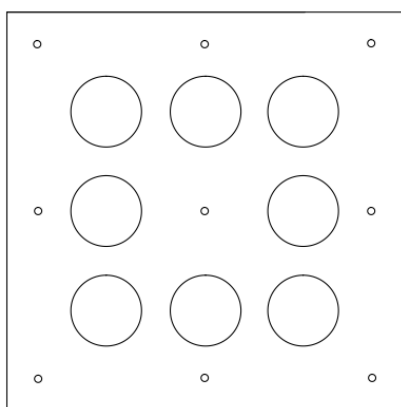
ورق تقویت نمونه S^۵



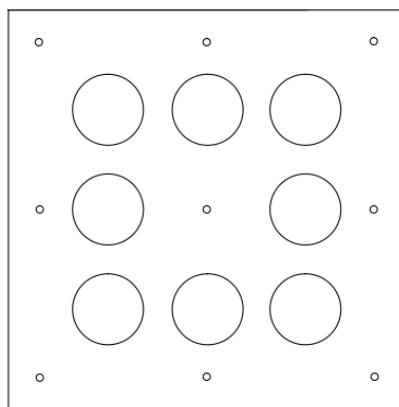
ورق تقویت نمونه S^۴



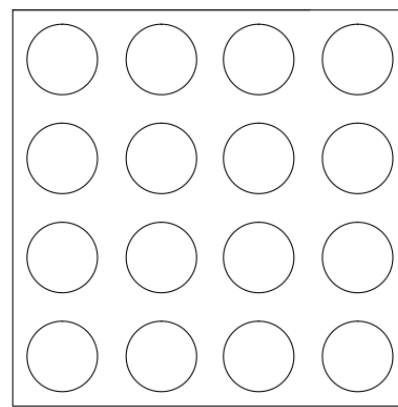
ورق تقویت نمونه S^۳



ورق تقویت نمونه S^۸



ورق تقویت نمونه S^۷



ورق تقویت نمونه S^۶

شکل ۲. ورق‌های تقویت پانچ شده

Fig. 2. Punched strengthening steel plates

جدول ۲. مشخصات چسب اپوکسی مصرفی [۱۳]

Table 2. Properties of Epoxy resin

مقدار	روش استاندارد	مشخصه
185-192 g/eq	D1652	هم‌ارزی اپوکسی جزء A
0.51-0.54 mol/100g	D1652	ارزش اپوکسی جزء A
MAX 0.1 wt%	D1726	میزان کلر قابل هیدرولیز جزء A
MIN 99 wt%	DIN EN ISO 3251	غیر فرار بودن جزء A
82 deg C	D4065	دمای تغییر فاز
<35 Mpa	D638 TYPE 1	مقاومت کششی
<3.1 Gpa	D638 TYPE 1	مدول الاستیسیته کششی
<2.0%	D638 TYPE 1	درصد افزایش طول
<60 Mpa	D695	مقاومت فشاری
<3.2 Gpa	D695	مدول الاستیسیته فشاری

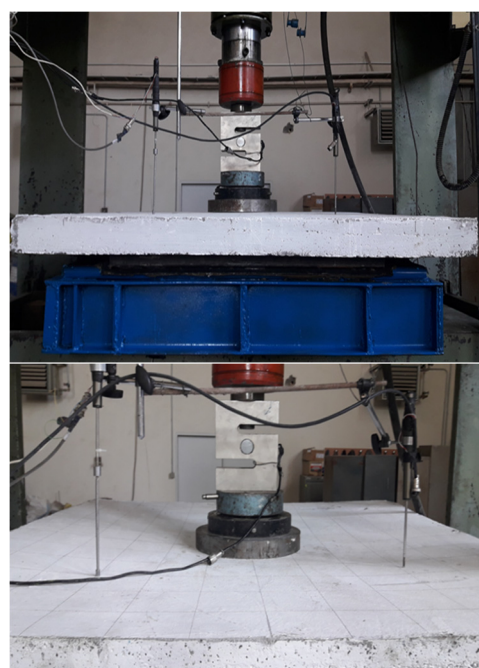
شود. در ورق S3، S4 و S5 به ترتیب مربعی، دایروی و لوزوی هستند. در ورق تقویت نمونه S6 شانزده سوراخ با قطر ۱۶۰ میلی‌متر ایجاد شده است و مجموعاً در حدود ۴۰٪ مساحت ورق کسر گردیده است. ورق‌های تقویت نمونه‌های S7 و S8 مشابه با ورق نمونه S3 هستند و تنها تعداد هشت عدد سوراخ با قطر ۱۶ میلی‌متر جهت نصب پیچ‌های اتصال در ورق تقویت اضافه شده است. لازم به توضیح است ضخامت همه ورق‌های پانچ شده ۱ میلی‌متر انتخاب گردیده است.

اتصال ورق‌های فولادی به دو روش چسب اپوکسی و پیچ‌های کاشت در عمق انجام شده است. با توجه به آنکه در استفاده از چسب اپوکسی کیفیت سطح بتن تأثیر مستقیم و قابل توجه بر عملکرد سیستم تقویت دارد، قبل از چسباندن ورق‌های تقویت، سطح دال‌ها در چند مرحله آماده‌سازی شده است. ابتدا سطح دال توسط دستگاه ساب به نحوی ساییده شده است که سنگ‌دانه‌ها نمایان شوند، سپس توسط یک ملات ترمیمی حفرات بزرگ و ریختگی‌های قابل توجه سطح دال ترمیم شده است. پس از گذشت ۲۴ ساعت و خشک شدن ملات ترمیمی، سطح دال در چندین مرحله با فشار باد از غبارها و مواد زائد پاک شده و سپس ورق تقویت چسبانده می‌شود. ورق‌های تقویت نیز قبل از اتصال به سطح دال کاملاً از روغن و چربی‌های سطحی تمیز شده و لبه‌های ورق در محیط پیرامونی و قسمت‌های پانچ شده ساب خورده است تا لبه‌های تیز که در اثر برش ورق ایجاد شده‌اند از بین رفته و از تمرکز تنش در چسب اپوکسی جلوگیری

شود. برای اتصال ورق تقویت با چسب اپوکسی از چسبی با مشخصات درج شده در جدول ۲ محصول شرکت Ctech-LLC [۱۳] استفاده شده است. این نوع چسب گرانش کمی داشته و از دو جزء تشکیل شده است که پس از ۳ دقیقه ترکیب به آسانی بر روی سطح بتن با استفاده از یک ابزار به ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر گسترده شده، سپس ورق تقویت بر روی لایه چسب قرار داده شده است. در هنگام قرارگیری ورق در جایگاه خود از اتصال کامل ورق به چسب و خارج شدن هوا از محل بازشدگی‌ها اطمینان حاصل می‌شود. در مورد اتصال ورق با استفاده از پیچ در نمونه S7 از هشت عدد پیچ منبسط‌شونده شماره ۱۲ که در شکل ۳ نشان داده شده، استفاده شده است. برخلاف اتصال با استفاده از چسب اپوکسی، اتصال با استفاده از پیچ‌های کاشت در عمق به کیفیت سطح ارتباطی نداشته و از عمق بتن به منظور انتقال نیروها استفاده می‌نماید. برای کاشت پیچ ابتدا دال به عمق ۵۰ میلی‌متر در ۸ نقطه سوراخ‌کاری شده، سپس پیچ در حفره کاشته شده و کاملاً سفت می‌شود. به منظور اطمینان از اتکای کامل پیچ به ورق اتصال از یک واشر با قطر ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. در نمونه S8 که از چسب اپوکسی و پیچ به صورت هم‌زمان استفاده شده است، ابتدا با روش‌های گفته شده ورق تقویت با چسب اپوکسی متصل شده و پس از گذشت دوره عمل‌آوری چسب، پیچ‌ها در محل‌های تعیین شده کاشته شده‌اند.



شکل ۳. پیچ‌های منبسط شونده و نمونه S7 تقویت شده با پیچ‌های منبسط شونده
 Fig. 3. expansion bolts –punched steel plate connected with expansion bolts

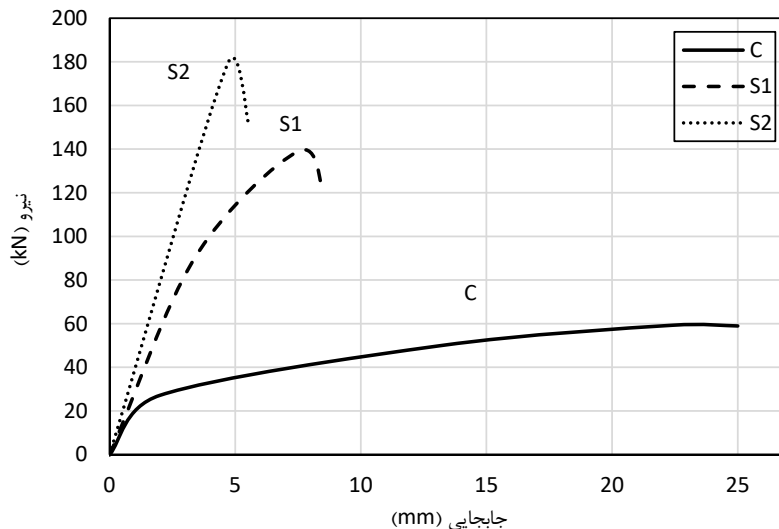


شکل ۴. دستگاه آزمایش
 Fig. 4. Test setup

می‌آیند و همچنین بارهای قائم رفت و برگشتی در این تحقیق بررسی نشده‌اند. تکیه‌گاه‌های دال در انجام آزمایش مطابق با فرآیند طراحی، از نوع ساده لحاظ شده است. اجزاء تکیه‌گاه دستگاه آزمایش از یک قاب مربعی نسبتاً صلب به ابعاد ۱۰۰۰ میلی‌متر تشکیل شده است که امکان چرخش و لغزش کامل و آزادانه را برای دال در محل تکیه‌گاه‌ها مهیا می‌نماید. برای ثبت رفتار دال از یک نیروسنج در مرکز دال در محل اعمال بار، دو عدد LVDT در وجه بالا - که در یک‌چهارم دو قطر نمونه نصب شده‌اند - و همچنین یک لیزر در وجه پایین به

۳-۲- سیستم آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها از یک جک با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن و قابلیت جابه‌جایی ۴۰۰ میلی‌متر که در شکل ۴ نشان داده شده، استفاده شده است. بارگذاری به صورت یک‌طرفه از نوع جابه‌جایی کنترل^۱ و نرخ بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۱ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در این پژوهش تنها بارهای قائم یک طرفه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و بارهای لرزه‌ای که بصورت افقی به دیافراگم وارد



شکل ۵. نمودار بار-جابجایی نقطه میانی دال‌های گروه G1
 Fig. 5. Load-displacement graph of G1's specimens

می‌شوند که صفحه صلب بارگذاری بر اساس شبکه ترسیم شده بر روی دال‌ها در وسط نمونه قرار بگیرد. سپس لبه‌های آزاد نمونه از هر سمت تکیه‌گاه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر تنظیم شده است. در حین بارگذاری خیز وسط دال و همچنین جابه‌جایی نمونه در یک چهارم قطرهای دال اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. در انجام آزمایش‌های نمونه‌های تقویت شده با استفاده از چسب اپوکسی فرآیند بارگذاری تا جدا شدن ورق و در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از پیچ اعمال بار تا لحظه تخریب دال و یا بیرون کشیده شدن پیچ‌ها ادامه یافته است.

در تمام نمونه‌های S1 الی S6 که در آن‌ها از چسب اپوکسی برای اتصال ورق استفاده شده است، حالت شکست گسیختگی چسب و جدایش ورق بوده است. در این نمونه‌ها جدایش از گوشه‌های ورق اتصال آغاز و به سایر نقاط تسری یافته و سبب رها شدن ورق می‌گردد. در این دسته از نمونه‌ها به علت حالت شکست هیچ‌گونه تغییر شکل پلاستیک و ماندگار در ورق تقویت مشاهده نشده است. دال‌های S7 و S8 که در آن‌ها از پیچ استفاده شده تغییرشکل‌های بسیار بزرگ‌تری را تحمل می‌نمایند؛ زیرا تا زمانی که ترک‌ها تا اندازه‌ای توسعه یابند که سبب تخریب دال شوند، ورق تقویت همچنان متصل بوده و نیرو تحمل می‌نماید. ورق‌های تقویت این دو نمونه جابه‌جایی زیادی را تا انتهای آزمایش تحمل نموده و دچار تغییرشکل‌های پلاستیک شده‌اند.

۳-۱- مطالعه سختی و ظرفیت باربری

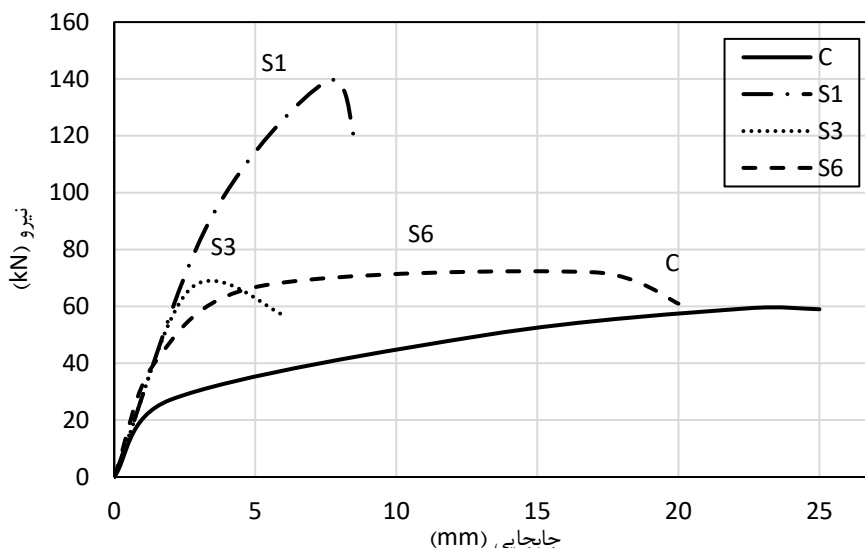
نمودار شکل ۵ تغییرشکل مرکز دال‌ها را در مقابل بار وارده برای

منظور ثبت جابه‌جایی‌های مرکز دال، استفاده شده است.

تمامی نمونه‌های جهت ردیابی بهتر ترک‌ها و آشکار شدن حالت گسیختگی رنگ‌آمیزی و شبکه‌بندی شده‌اند. به منظور انتقال بار از جک به دال از یک صفحه فولادی با قطر ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است که به نسبت سایر اجزاء سیستم، می‌توان آن را صلب فرض نمود. همچنین از یک مفصل گریس‌کاری شده بین نیروسنج و صفحه بارگذاری استفاده شده است تا چنانچه در حین بارگذاری دال به صورت نامتقارن دچار شکست و تغییرشکل شد، بارگذاری همچنان کاملاً قائم باقی بماند. با توجه به بارگذاری کاملاً قائم به دال هیچ‌گونه نیروی جانبی وارد نشده و تنها نیروهای خمشی حاکم خواهند بود. استفاده از صفحه فولادی صلب برای بارگذاری به سبب ایجاد بارگذاری نیمه‌متمرکز بوده است و باعث توزیع بهتر نیروها و جلوگیری از ایجاد برش پانچ در دال‌ها خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

نمونه‌های تقویت شده با استفاده از چسب اپوکسی قبل از انجام آزمایش هفت روز در دمای معتدل ۲۵ درجه سلیسیوس نگهداری شده‌اند. انجام آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 [۱۴] برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، نشان داده است که میانگین مقاومت فشاری بتن استفاده شده در ساخت دال‌های مورد مطالعه ۲۸/۵ مگاپاسکال می‌باشد. پس از طی دوره عمل‌آوری دال‌ها بر روی تکیه‌گاه قرار گرفته و به نحوی جانمایی



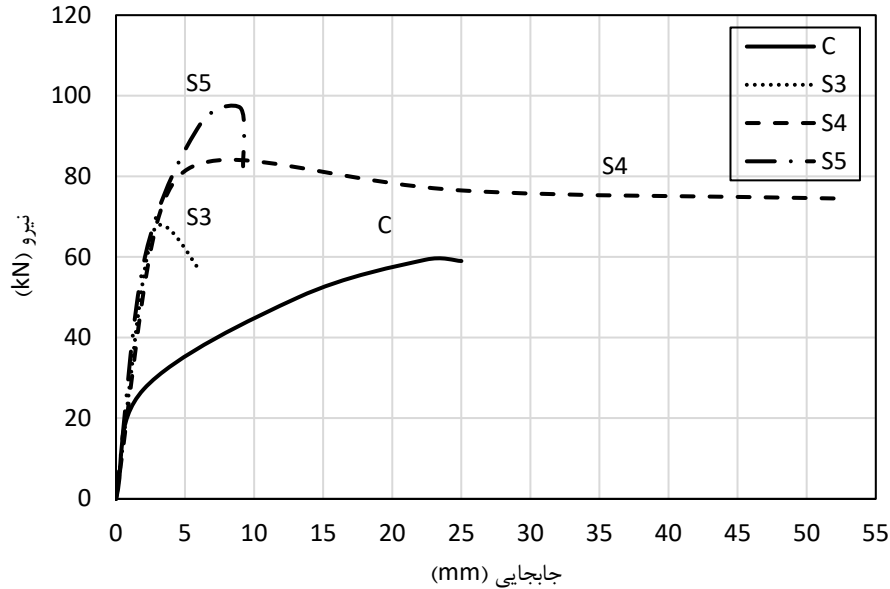
شکل ۶. نمودار بار-جابجایی نقطه میانی دال‌های گروه G2
 Fig. 6. Load-displacement graph of G2's specimens

۱۳/۳ و ۲۵ درصد بهبود داده و ظهور رفتار پلاستیک را در سیستم به تأخیر انداخته‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت ورق تقویت با ۸۰٪ سطح مؤثر و ورق تقویت با ۶۰٪ سطح مؤثر تقریباً به یک میزان ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند؛ اما ورق دارای ۱۶ سوراخ رفتار مناسب‌تری در حفظ ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دارد. برای اظهارنظر قطعی در ارتباط با تأثیر تعداد سوراخ‌ها بر عملکرد ورق تقویت نیاز به مطالعات تکمیلی و نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتر خواهد بود. نتایج این گروه همچنین آشکار می‌سازد که پانچ نمودن ورق سبب کاهش اثربخشی آن در ظرفیت باربری می‌شود؛ ولی افزایش مساحت ورق تقویت ارتباط مستقیمی با افزایش عملکرد آن نداشته است.

نمودارهای شکل ۷ مربوط به گروه مطالعاتی G3 اثر چیدمان سوراخ را با حفظ مساحت ورق تقویت بر عملکرد سازه‌ای آن مورد توجه قرار می‌دهد. در هر سه ورق تقویت پانچ شده این گروه مطالعاتی ۸ عدد سوراخ ایجاد شده است. چیدمان سوراخ‌ها در ورق S3، S4 و S5 به ترتیب مربعی، دایروی و لوزوی هستند. نمودارهای شکل ۵ نشان داده است که درحالی‌که چیدمان مربعی باعث افزایش ۱۳/۳ درصدی ظرفیت باربری شده است، چیدمان دایروی و لوزوی به ترتیب ظرفیت باربری دال دوطرفه را ۴۰ و ۶۱/۶ درصد افزایش داده است. بررسی الگوی شکست نمونه شاهد و مقایسه آن با الگوی شکست نمونه‌های S3، S4 و S5 آشکار می‌سازد عامل اصلی در تعیین

گروه مطالعاتی G1 نشان می‌دهد. نمودار C که مربوط به نمونه شاهد است و بدون تقویت تحت اثر بار قرار گرفته است، رفتار دوخطی و نرم داشته و پس از تحمل ظرفیت نهایی خود معادل ۶۰ کیلونیوتن بدون تحمل تغییرشکل‌های اضافی منهدم شده است. در مقابل در هر دو نمونه S1 و S2 ظرفیت باربری و سختی اولیه به صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داشته است. نمونه S1 که با ورق گسترده یک میلی‌متر تقویت شده ۱۴۰ کیلونیوتن ظرفیت باربری داشته است که به نسبت نمونه شاهد ۱۳۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین نمونه S2 تقویت شده با ورق دو میلی‌متری ۱۸۰ کیلونیوتن بار را تا لحظه جدایش ورق تحمل نموده است و افزایش ۲۰۰ درصدی ظرفیت باربری را به نسبت نمونه شاهد نشان می‌دهد. هر دو نمونه تقویت شده در آغاز جدایش ورق دچار افت ناگهانی در ظرفیت باربری شده‌اند و پس از آن میزان تغییرشکل‌ها و عرض ترک‌ها در آن‌ها به سرعت افزایش می‌یابد.

نمودار شکل ۶ نمودار بار-جابجایی نقطه میانی دال‌های گروه G2 را نشان داده است. در این گروه اثر مساحت ورق تقویت بر عملکرد آن قابل مقایسه است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ورق تقویت بدون سوراخ به نسبت ورق تقویت دارای ۸ و ۱۶ سوراخ عملکرد بهتری در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دال‌های دوطرفه داشته است. ظرفیت باربری نمونه‌های S3 و S6 به ترتیب ۶۸ و ۷۵ کیلونیوتن بوده است و مقایسه نمودارهای C، S3 و S6 نشان می‌دهد که ورق‌های تقویت پانچ شده S3 و S6 ظرفیت حمل بار نهایی دال را به ترتیب



شکل ۷. نمودار بار-جابجایی نقطه میانی دال‌های گروه G3
 Fig. 7. Load-displacement graph of G3's specimens

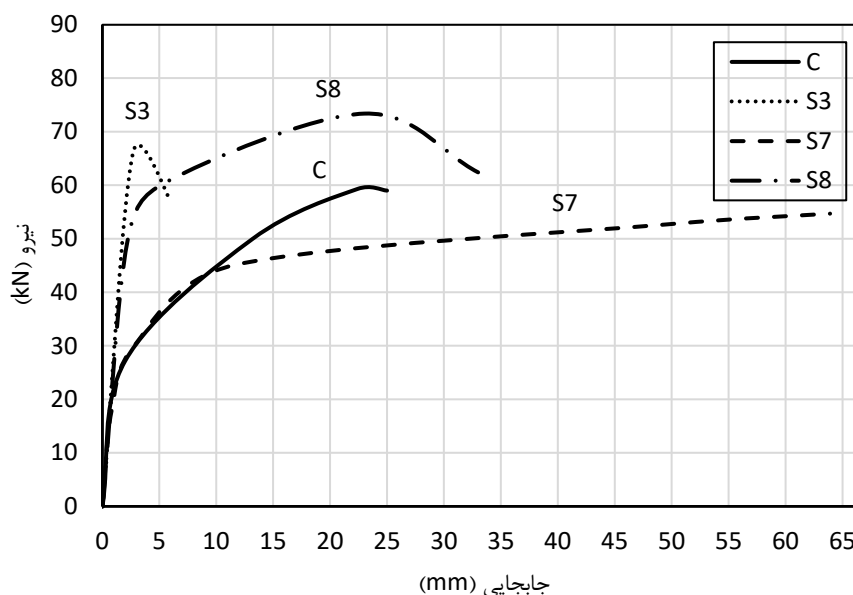
بخش میانی تقریباً برابر یکدیگر و از این مقدار در نمونه S4 کمتر است، بنابراین در این سیستم تقویت اُفت کمتری در ظرفیت باربری رخ داده است.

شکل ۸ مربوط به نمودارهای بار-جابجایی گروه G4 است که در آن روش اتصال ورق تقویت تحقیق شده است. این نمودار مشخص می‌سازد که در مورد ورق‌هایی که چیدمان سوراخ‌های آن مربعی است، همان‌گونه که انتظار می‌رود استفاده هم‌زمان از چسب اپوکسی و پیچ‌های منبسط شونده بهترین روش اتصال است. استفاده از این روش ظرفیت باربری را ۲۰ درصد افزایش داده است. درحالی‌که استفاده از چسب اپوکسی تنها ۱۳/۳ درصد ظرفیت باربری را افزایش داده است. استفاده از پیچ‌های منبسط شونده در مقایسه با دو روش اتصال دیگر رفتاری کاملاً متفاوت نشان داده و ظرفیت باربری را ۲۵ درصد کاهش داده است. این روش اتصال به ورق تقویت امکان جابه‌جایی بیشتری می‌دهد و به همین سبب ظرفیت باربری دال را افزایش نداده است. علاوه بر آن اجرای این روش اتصال نیازمند ایجاد سوراخ‌های برای کاشت پیچ است و این عوارض زمینه‌ساز گسترش ترک‌ها و ایجاد شکست در دال شده است؛ بنابراین استفاده از این روش برای افزایش ظرفیت باربری دال سودمند نخواهد بود.

در جدول ۳ حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه‌های مطالعاتی در مقابل وزن ورق تقویت مصرفی درج شده‌اند. نسبت ظرفیت باربری

حداکثر ظرفیت باربری یک سیستم تقویت سوراخ‌دار، فاصله سوراخ‌ها از گوشه ورق تقویت است. بر این مبنا چیدمان لوزوی که سوراخ‌های آن بیشترین فاصله را تا گوشه ورق تقویت دارد، بیشترین بار را تحمل نموده است. ظرفیت نهایی نمونه دارای ورق تقویت دایروی که در آن فاصله سوراخ‌ها از گوشه‌های ورق اندکی به نسبت چیدمان لوزوی کوچک‌تر است، مقداری کمتر است. به همین شکل الگوی مربعی با کمترین فاصله سوراخ‌ها از گوشه‌های ورق منتج به پایین‌ترین ظرفیت حمل بار شده است.

بررسی نمودارهای بار-تغییر مکان این گروه مطالعاتی از دیدگاه توانمندی سیستم در حفظ ظرفیت نشان می‌دهد نمودارهای نمونه‌های S3 و S5 پس از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری دچار افت می‌شوند. در مقابل نمونه S4 پس از رسیدن به نقطه حداکثر افت قابل ملاحظه‌ای نداشته و همچنان ظرفیت حداکثری خود را حفظ می‌نماید. بررسی این تفاوت با در نظر داشتن الگوی شکست این نمونه‌ها آشکار می‌سازد که اُفت ظرفیت باربری پس از جدایش گوشه‌های ورق تقویت با مساحت بخش میانی آن ارتباط دارد. منظور از بخش میانی ورق تقویت محدوده‌ای است که در مرکز ورق تقویت قرار داشته و هیچ سوراخی در آن ایجاد نشده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهند که هرچه قسمت میانی ورق سوراخ‌دار بزرگ‌تر باشد اُفت ظرفیت باربری کمتر است. در ورق‌های تقویت S3 و S5 مساحت



شکل ۸. نمودار بار-جابجایی نقطه میانی دال‌های گروه G4
 Fig. 8. Load-displacement graph of G4's specimens

جدول ۳. ظرفیت باربری در نمونه‌های مطالعاتی
 Table 3. Loading capacity ratio

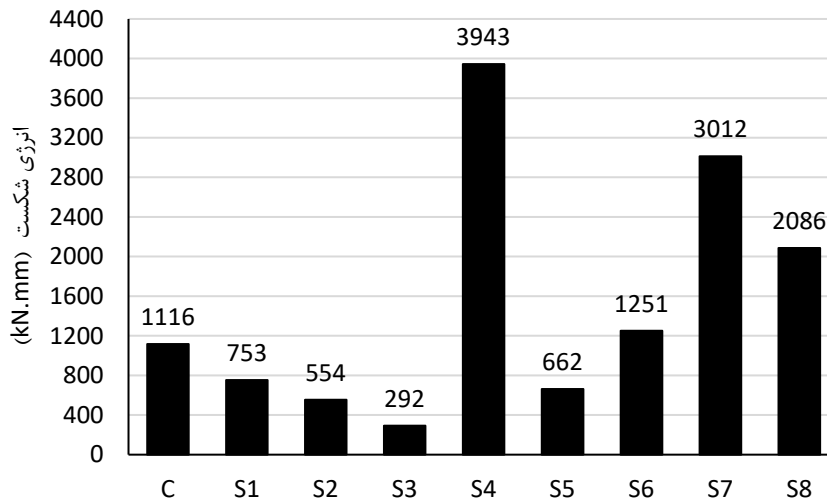
نسبت ظرفیت باربری	حداکثر ظرفیت باربری (kN)	وزن ورق تقویت (kg)	نمونه
۱/۰۰	۶۰	-	C
۲/۳۳	۱۴۰	۶/۳۰۰	S1
۳/۰۰	۱۸۰	۱۲/۶۰۰	S2
۱/۱۳	۶۸	۵/۰۶۰	S3
۱/۴۰	۸۴	۵/۰۶۰	S4
۱/۶۲	۹۷	۵/۰۶۰	S5
۱/۲۵	۷۵	۳/۸۰۰	S6
۰/۷۵	۴۵	۵/۰۴۰	S7
۱/۲۰	۷۲	۵/۰۴۰	S8

تقویت شده است. نتایج این جدول همچنین نشان می‌دهد که روش اتصال و چیدمان سوراخ‌ها ارتباط روشنی با عملکرد ورق تقویت در افزایش ظرفیت باربری دارد؛ اما بین مساحت ورق تقویت با ظرفیت باربری ارتباط مستقیمی وجود ندارد.

۳-۲- مطالعه جذب انرژی

نمودار شکل ۹ انرژی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این پژوهش انرژی شکست هر نمونه مطالعاتی بر اساس

نمونه‌های تقویت شده به نمونه شاهد مشخص می‌سازد که ورق‌های پانچ شده در مقایسه با ورق‌های پانچ نشده در افزایش ظرفیت باربری یک دال دوطرفه اثربخشی کمتری دارند، اما این دسته از ورق‌ها می‌توانند تا ۶۲٪ ظرفیت باربری را افزایش دهند. مقایسه نمونه‌های S1 و S5 نشان می‌دهد که کاهش ۲۰ درصدی وزن ورق تقویت مصرفی سبب کاهش ۳۰ درصدی در عملکرد آن شده است. همچنین انجام این مقایسه برای نمونه‌های S1 و S6 نشان می‌دهد که کاهش ۴۰ درصدی وزن ورق منجر به کاهش ۴۷ درصدی عملکرد ورق



شکل ۹. جذب انرژی نمونه‌های مطالعاتی

Fig. 9. Energy absorption of experimental specimens

شاهد بهبود بخشیده است. این مقایسه بیانگر آن است که مساحت ورق تقویت ارتباط مستقیمی با عملکرد سیستم تقویت در زمینه جذب انرژی ندارد.

در ارتباط با گروه مطالعاتی G3 که سه چیدمان مختلف از سوراخ‌ها را در ورق‌های تقویت مطالعه می‌نماید، دیده می‌شود که علی‌رغم آنکه مساحت بازشدگی در تمام ورق‌های سوراخ‌دار مشابه یکدیگر و برابر ۲۰٪ است، چیدمان دایروی جذب انرژی دال را به صورت قابل ملاحظه‌ای ارتقاء می‌بخشد؛ درحالی‌که هر دو چیدمان مربعی و لوزوی به علت مساحت کوچک‌تر ناحیه میانی ورق سبب افت جذب انرژی دال شده‌اند. بررسی نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه S4 دارای چیدمان دایروی ۲۵۳٪ بهتر از نمونه کنترلی است. این نتایج نشان می‌دهند که در استفاده از ورق‌های سوراخ‌دار، چیدمان سوراخ‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در چیدمان مربعی نمونه S3 به صورت هم‌زمان فاصله سوراخ‌ها از گوشه‌های ورق کمتر و مساحت ناحیه میانی نیز به نسبت نمونه‌های S4 و S5 کمتر است. در کنار هم قرار گرفتن این دو عامل باعث کاهش مضاعف جذب انرژی دال شده است.

مقایسه انرژی شکست نمونه‌های گروه G4 می‌تواند میزان اثربخشی روش‌های مختلف اتصال را در جذب انرژی سیستم تقویت آشکار سازد. استفاده از پیچ در نمونه S7 برای اتصال ورق تقویت قادر به بهبود ظرفیت باربری و سختی دال نیست، اما این روش اتصال به سبب عدم جدایش ورق باعث افزایش ۱۷۰ درصدی جذب انرژی

رابطه (۱) با محاسبه سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان محاسبه شده است.

$$E = \int \delta e = \int \delta p \delta \quad (1)$$

مقایسه انرژی شکست نمونه‌های حاضر در گروه مطالعاتی G1 شامل C، S1 و S2 نشان می‌دهد که نمونه S2 که با استفاده از ورق بدون سوراخ با ضخامت دو میلی‌متر و چسب اپوکسی تقویت شده است، قبل از جدایش ورق انرژی کمتری را مستهلک نموده که به معنای ایجاد شکست و ترک‌های کمتر در دال است. این نمونه رفتار بسیار تردی داشته و جدایش ورق در تغییرشکل‌های کم و به علت تنش‌های برشی بزرگ در لایه چسب رخ می‌دهد؛ بنابراین استفاده از ورق‌های تقویت با ضخامت زیاد علی‌رغم ایجاد سختی اولیه بالا و ظرفیت باربری قابل‌توجه، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی دال را کاهش می‌دهد. نمونه S1 که به نسبت نمونه S2 سختی و ظرفیت باربری کمتری داشته است، جذب انرژی بزرگ‌تری نشان می‌دهد؛ اما این معیار در هر دو نمونه تقویت شده با ورق‌های سوراخ نشده به نسبت نمونه شاهد کاهش یافته است.

در گروه مطالعاتی G2 شامل نمونه‌های C، S1، S3 و S6 که متغیر اصلی در آن مساحت بازشدگی است، ورق تقویت دارای ۸ سوراخ با فرم مربعی جذب انرژی دال را کاهش داده است، در مقابل ورق تقویت دارای ۱۶ سوراخ جذب انرژی دال را ۱۲٪ به نسبت نمونه

جدول ۴. محاسبه شاخص شکل پذیری نمونه‌های مطالعاتی
Table 4. Derivation of Ductility Criterion (μ)

نسبت شکل پذیری	μ شاخص شکل پذیری	δ خیز حداکثر (mm)	δ_1 خیز الاستیک (mm)	وزن ورق تقویت (kg)	نمونه
۱/۰۰	۲۵	۲۵	۱/۰	-	C
۰/۰۴	۱/۰۷	۸	۷/۵	۶/۳۰۰	S1
۰/۰۵	۱/۲	۶	۵/۰	۱۲/۶۰۰	S2
۰/۱۰	۲/۷۲	۶	۲/۲	۵/۰۶۰	S3
۱/۰۱	۲۵/۲۳	۵۳	۲/۱	۵/۰۶۰	S4
۰/۱۷	۴/۲۸	۹	۲/۱	۵/۰۶۰	S5
۰/۲۷	۶/۶۶	۲۰	۳/۰	۳/۸۰۰	S6
۳/۲	۸۰	۶۴	۰/۸	۵/۰۴۰	S7
۰/۶	۱۵	۳۳	۲/۲	۵/۰۴۰	S8

تقویت در دال S7، به علت آنکه اتصال آن سطحی نبوده و از عمق بتن برای انتقال نیرو استفاده می‌نماید، تا لحظه شکست دال جدا نشده و تحمل بار مشارکت داشته است. به همین سبب نمونه S7 بیشترین خیز را بدون فروپاشی تحمل نموده و علی‌رغم گسترش عرض ترک‌ها تا بیش از ۱۰ میلی‌متر همچنان قابلیت تحمل نیرو را دارد. بنابراین استفاده از پیچ‌های کاشت در عمق اگرچه سختی و مقاومت نهایی را بهبود نمی‌دهد، اما شکل‌پذیری را ۲۲۰٪ بهبود می‌دهد. بنابراین چنانچه رفتار سیستم‌های تقویت را بر مبنای تحمل جابه‌جایی و شکل‌پذیری بررسی نماییم، اتصال با استفاده از پیچ می‌تواند بهترین روش اتصال باشد.

بررسی شکل ۱۰ همچنین نشان می‌دهد که نمونه‌های که در اتصال آن‌ها تنها از چسب استفاده شده به صورت عمومی در افزایش شاخص شکل‌پذیری مؤثر نیستند. تنها نمونه S4 در این میان شکل‌پذیری معادل با نمونه شاهد داشته است. این درحالی است که نمونه‌های S1 و S2 که در آن‌ها استفاده از ورق‌های بدون سوراخ سبب ظرفیت باربری و سختی اولیه قابل توجه شده است، شاخص شکل‌پذیری به مراتب کمتر از نمونه شاهد است. مقایسه شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های S3، S4 و S5 که در یک گروه مطالعاتی قرار دارند نشان می‌دهد که انتخاب چیدمان مناسب برای سوراخ‌های ورق تقویت در میزان شکل‌پذیری سیستم تقویت بسیار اثرگذار است. در چیدمان دایروی که بیشترین شاخص شکل‌پذیری را میان

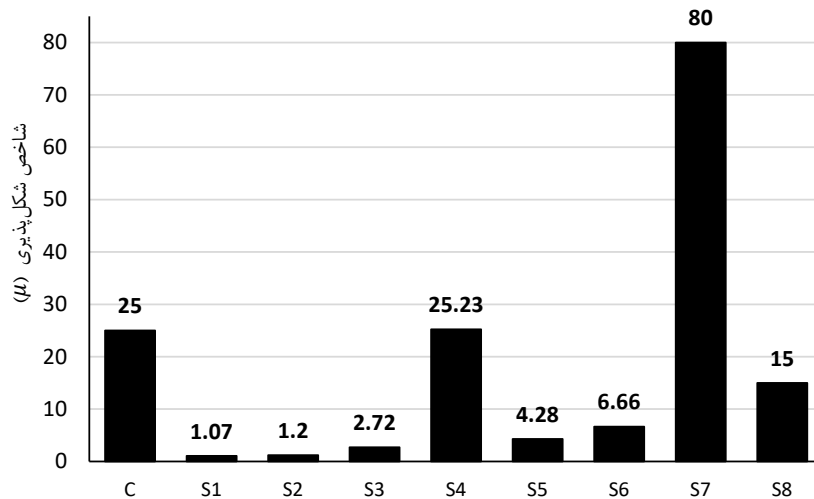
دال شده است. نمونه S8 در این گروه با اتصال ترکیبی چسب-پیچ ظرفیت باربری دال را بهبود بخشیده و جذب انرژی دال را نیز ۸۷٪ ارتقاء داده است. در اتصال ترکیبی پیچ-چسب، وجود پیچ‌ها سبب شده است که افت ظرفیت باربری در نتیجه جدایش ناحیه میانی ورق تقویت رخ نداده و جذب انرژی دال بهبود یابد. این در حالی است که استفاده از چسب اپوکسی به صورت تنها در نمونه S3 کمترین جذب انرژی در میان تمام نمونه‌های آزمایشگاهی را داشته و جذب انرژی نمونه کنترلی را به شدت کاهش داده است.

۳-۳- مطالعه شاخص شکل‌پذیری

جدول ۴ جابه‌جایی مرکز دال را برای تمامی نمونه‌ها در شروع رفتار غیرخطی به عنوان خیز الاستیک (δ_1) و همچنین در انتهای بارگذاری به عنوان خیز حداکثر (δ) نشان می‌دهد. در این پژوهش خیز الاستیک، جابه‌جایی متناظر با انتهای قسمت خطی نمودار بار-تغییرمکان هر نمونه است. و شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعاتی (μ) مطابق با رابطه (۲) با محاسبه نسبت خیز حداکثر به خیز الاستیک انجام شده است.

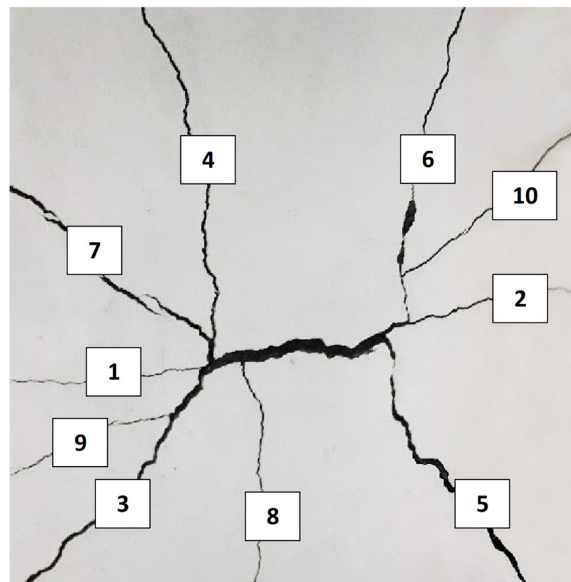
$$\mu = \frac{\delta_1}{\delta} \quad (2)$$

مقایسه مقادیر شکل‌پذیری در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ورق



شکل ۱۰. مقایسه شاخص شکل پذیری نمونه‌های مطالعاتی

Fig. 10. Ductility Criterion of experimental specimens



شکل ۱۱. الگوی ترک خوردگی و حالت شکست در نمونه شاهد

Fig. 11. Crack propagation and fracture mode in control specimen

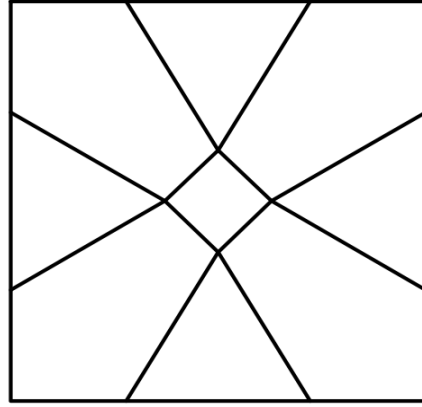
۳-۴- مطالعه حالت شکست

شکل ۱۱ وجه زیرین نمونه شاهد را پس از شکست نشان می‌دهد. با بررسی حالت شکست بر روی تصویر ترتیب ایجاد ترک‌ها نشان داده شده است. توالی ترک‌های ایجاد شده نشان می‌دهند که ابتدا یک ترک عرضی میانه دو وجه دال را به یکدیگر متصل نموده است. پس

چیدمان‌های مختلف داشته است، فواصل سوراخ‌ها از مرکز ورق و گوشه‌ها تقریباً برابر و شرایط تمامی سوراخ‌ها با یکدیگر مشابه است. درحالی‌که در چیدمان‌های مربعی و لوزوی فاصله سوراخ‌ها از گوشه و میانه ورق با یکدیگر برابر نبوده و این مسأله بر شکل‌پذیری سیستم تقویت اثر نامطلوب داشته است.



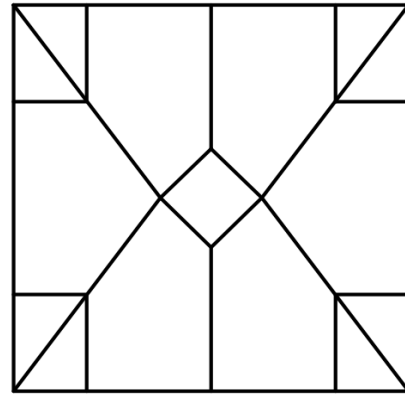
حالت شکست نمونه S^۳



الگوی ترک خوردگی نمونه S^۳



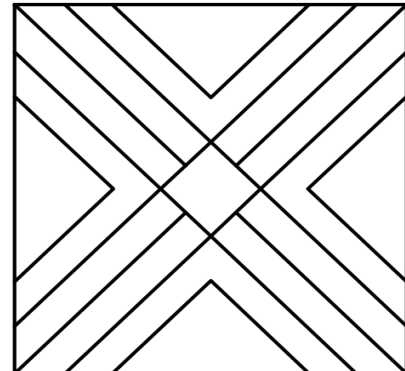
حالت شکست نمونه S^۴



الگوی ترک خوردگی نمونه S^۴



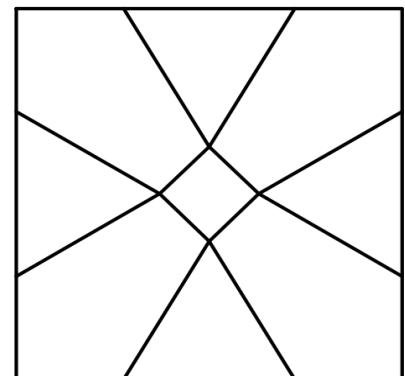
حالت شکست نمونه S^۵



الگوی ترک خوردگی نمونه S^۵



حالت شکست نمونه S^۶



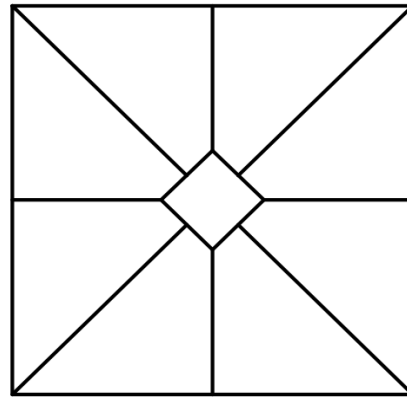
الگوی ترک خوردگی نمونه S^۶

شکل ۱۲. الگوی ترک خوردگی و حالت شکست نمونه‌های تقویت شده

Fig. 12. Crack propagation and fracture mode in strengthened specimens



حالت شکست نمونه S۷



الگوی ترک خوردگی نمونه S۷

ادامه شکل ۱۲. الگوی ترک خوردگی و حالت شکست نمونه‌های تقویت شده

Continued Fig. 12. Crack propagation and fracture mode in strengthened specimens

می‌سازد. در این روش اتصال از ۹ پیچ در سه ردیف سه تایی استفاده شده است و ترک‌ها به مرکزیت پیچ وسط و به صورت شعاعی به سمت پیچ‌های پیرامونی توسعه یافته‌اند. مشاهدات نشان داده است که این ترک‌ها در مراحل انتهایی تا آنجا توسعه می‌یابند که دال در نزدیک تکیه‌گاه‌ها دچار شکست شده و پیچ‌ها بیرون کشیده می‌شوند.

مسئله قابل توجه در اتصال با استفاده از پیچ تغییرشکل‌های شدید ورق تقویت در حین بارگذاری است. در این روش اتصال در مراحل ابتدایی بارگذاری به سبب فضای موجود بین ورق تقویت و پیچ، ورق تقویت هیچ‌گونه عملکردی نداشته و رفتار دال شبیه به نمونه کنترلی می‌باشد؛ اما پس از انجام تغییرشکل‌های ابتدایی و اتکای ورق تقویت به پیچ، ورق تحمل نیرو را آغاز می‌نماید. در حالی که ورق‌های متصل شده با استفاده از چسب اپوکسی پس از شکست چسب به صورت سالم و بدون اعوجاج از سطح دال جدا شده‌اند، ورق‌های متصل شده توسط پیچ دچار تغییرشکل‌های قابل توجه می‌گردد که نشان از ایجاد کرنش‌های پلاستیک در آن است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار از ورق‌های فولادی پانچ شده به منظور تقویت دال‌های بتنی دوطرفه استفاده شده است. مشکل عمده در استفاده از ورق‌های تقویت فولادی، وزن بالا و مشکلات اجرایی حین استفاده از آن‌ها است که ایجاد بازشو در ورق تقویت می‌تواند این مشکلات را برطرف نماید. در این مطالعات ۹ نمونه دال آزمایشگاهی با ابعاد $1200 \times 1200 \times 80$ میلی‌متر بررسی شده‌اند. از میان این نمونه‌ها

از آن، ترک‌های قطری از محدوده مرکز به چهارگوشه دال حرکت می‌نمایند. بررسی نمودار بار-تغییرمکان نمونه شاهد آشکار می‌سازد که سختی اولیه دال در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده بسیار کمتر است. عرض ترک‌ها به علت سختی کم در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده به سرعت افزایش یافته و منجر به شکست دال شده است.

شکل ۱۲ الگوی شکست نمونه‌های S3، S4، S5، S6 و S7 را نشان داده است. بررسی الگوهای شکست نمونه‌های تقویت شده با استفاده از چسب اپوکسی نشان می‌دهد که عرض ترک‌ها بسیار کمتر از نمونه شاهد بوده و تا لحظه‌ای که ورق تقویت به سطح دال متصل است ترک‌ها اگرچه بندرت ایجاد می‌شوند اما توسعه نمی‌یابند. مقایسه الگوهای شکست نشان می‌دهد که الگوی شکست نمونه‌های S3 و S6 که در هر دو از چیدمان مربعی سوراخ‌ها استفاده شده است مشابه یکدیگر هستند. ترک‌ها در این چیدمان از مرکز به سمت اضلاع بوده و فاقد ترک‌های قطری است. در نمونه S4 که از چیدمان دایروی استفاده شده است، گستردگی ترک‌ها بیشتر بوده و در همه سطح دال حضور دارند. این نوع از چیدمان امکان وقوع ترک‌های قطری را برای دال فراهم می‌آورد. نمونه S5 که از چیدمان لوزی برخوردار است سبب شده ترک‌ها به موازات قطر‌ها و به تعداد زیاد در سطح دال رخ دهند. در این چیدمان نیز همچون چیدمان دایروی ترک‌های قطری مشاهده می‌شوند.

بررسی الگوی شکست نمونه‌های S7 که در اتصال ورق تقویت از پیچ‌های منبسط شونده استفاده شده است، نشان می‌دهد که محل کاشت پیچ‌ها نحوه توسعه ترک‌ها و شکست نهایی دال را مشخص

خود را حفظ نموده و شکل‌پذیری دال را ارتقاء دهد. در این روش اتصال حالت شکست غالب بیرون کشیده شدن پیچ‌ها است.

مراجع

- [1] D. Banu, N. Taranu, Traditional Solutions For Strengthening Reinforced Concrete Slabs, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, 3 (2010).
- [2] D.A.V. Gemert, Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Plates by Epoxy-Bonded Steel Plates, (1990) 509-516.
- [3] A.N. Yelgin, H. Kasap, M.Z. Ozyurt, Strengthening of reinforced concrete slabs by thin steel plates glued with epoxy, Sakarya University journal of science SAUJS, 3 (1999) 25-34.
- [4] S. Huovinen, Action of Glued Steel Plates In Strengthening of Structures, Rakenteiden Mekaniikka, 29 (1996) 69-74.
- [5] L.S. Rasheed, T.K. Al-Azawi, Experimental Analysis Of Reinforced Concrete Slabs Strengthened With Steel Plates, The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 13 (2013).
- [6] A. Charif, Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epxy Bonded Steel Plates, University of Sheffield, 1983.
- [7] U.A. Ebead, H. Marzouk, Strengthening of two-way slabs using steel plates, Aci Structural Journal, 99 (2002) 435-444.
- [8] A. Gomes, J. Appleton, Strengthening design of concrete beams by addition of steel plates, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 1997.
- [9] N.K. Subedi, Member, ASCE, P.S. Baglin, External Plate Reinforcement for Concrete Beams, Journal of Structural Engineering, 124 (1998) 1490-1495.
- [10] A.M. Olajumoke, M. Dundu, Methods for flexural strengthening of reinforced concrete elements using steel plates, Construction Materials and Structures, (2014) 1080-1085.
- [11] T.M. Roberts, H. Haji-kazemi, Theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened

یک دال به عنوان نمونه شاهد، ۶ دال تقویت شده با ورق فولادی و چسب اپوکسی، یک دال تقویت شده با ورق فولادی و پیچ‌های منبسط‌شونده و یک دال تقویت شده با ورق فولادی با استفاده از چسب اپوکسی-پیچ می‌باشند. نتایج نمونه‌ها در چهار گروه مطالعاتی دسته‌بندی و مقایسه شده‌اند. در گروه G1 اثر ضخامت ورق تقویت بررسی شده است و نتایج نشان داده‌اند که افزایش ضخامت ورق تا ۲ میلی‌متر سبب افزایش سختی و بهبود ظرفیت باربری دال تا ۲۰٪ می‌گردد، اما شکل‌پذیری و جذب انرژی آن را می‌کاهد. در گروه G2 با هدف کنترل اثر مساحت بازشدگی، ورق‌هایی با ۲۰٪ و ۴۰٪ بازشدگی مورد آزمایش قرار گرفتند و آشکار گردید که سوراخ کردن ورق تقویت تأثیر آن را بر ظرفیت باربری کم می‌کند؛ اما در مقابل می‌تواند شکل‌پذیری و جذب انرژی را همزمان با ظرفیت باربری بهبود ببخشد که در مقایسه با ورق‌های بدون سوراخ که تنها ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند، ارزشمند محسوب می‌گردد. در این پژوهش ارتباط مستقیم مابین مساحت ورق تقویت و ظرفیت باربری سیستم تقویت به اثبات نرسید. در گروه G3 سه چیدمان مختلف از سوراخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و نشان داده شد که در انتخاب چیدمان مناسب باید به فاصله سوراخ‌ها از گوشه ورق و مساحت ناحیه میانی ورق تقویت توجه ویژه داشت. این مطالعات نشان دادند عملکرد ورق تقویت پانچ شده از چیدمان سوراخ‌ها در آن به شدت اثر می‌پذیرد. چیدمان لوزی با ۶۲٪ افزایش بهترین عملکرد در بهبود ظرفیت باربری و چیدمان دایروی با ۲۵۳٪ افزایش بهترین عملکرد را در جذب انرژی داشته‌اند. در گروه G4 اثر نحوه اتصال ورق پانچ شده به دال بر رفتار سیستم تقویت بررسی شد. این بخش از مطالعات نشان داد که استفاده از پیچ‌های منبسط‌شونده به جای چسب برای اتصال ورق تقویت اگرچه منجر به کاهش ظرفیت باربری دال می‌شود، شاخص شکل‌پذیری دال را تا ۲۲۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین آشکار شد که استفاده هم‌زمان از چسب و پیچ بهترین روش اتصال است و ظرفیت باربری و جذب انرژی را ارتقاء می‌بخشد. مطالعه الگوی شکست در نمونه‌های مختلف نشان داده است که استفاده از چسب سختی اولیه را افزایش و مانع از رشد ترک‌ها در دال می‌شود و حالت شکست در این نوع اتصال گسیختگی چسب و جدایش ورق تقویت است. در مقابل اتصال با استفاده از پیچ مانع از رشد ترک‌ها در دال نمی‌شود، اما سبب می‌شود تا در تغییر شکل‌های بسیار زیاد ورق همچنان کارایی

- 2(2) (2014) 91-108.
- [13] Ctech-LLC, ERA 420, in, 2019.
- [14] International, W. Conshohocken, PA, ASTM C39 / C39M-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, 2018.
- by externally bonded steel plate, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, (1989) 39-55.
- [12] I.M. Metwally, Three-dimensional finite element analysis of reinforced concrete slabs strengthened with epoxy-bonded steel plates, Advances in Concrete Construction,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sahranavard, H. Haji-Kazemi, Experimental Study of Flexural Strengthening of Two-way Reinforced Concrete Slabs Using Punched Steel Plates, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2851-2868.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17529.6591](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17529.6591)

