

بررسی آزمایشگاهی رفتار شالوده‌های ساخته شده با بتن سبک و مسلح شده با میلگرد بسپاری (GFRP)

اصغر وطنی اسکویی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

محمد پورقلی کیوی (کارشناس ارشد)

مجمع فنی و مهندسی، مؤسسه‌ی آموزش عالی مقدس اردبیلی

حسن عراقی (کارشناس ارشد)

پژوهشکده‌ی سوانح طبیعی، دانشگاه جامع علمی کاربردی

مهندسی عمران شریف، (پیاورد ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۳-۴۰

در این نوشتار، کاربرد بتن سبک سازه‌ی در شالوده‌های پیش‌ساخته‌ی مسلح شده با میلگردهای بسپاری مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، ۴ نمونه شالوده با مقیاس واقعی مسلح شده با میلگرد بسپاری (GFRP) بر روی بستر ماسه‌یی تحت آزمایش قرار گرفتند. یکی از این شالوده‌ها با بتن معمولی و ۳ نمونه‌ی دیگر با بتن سبک سازه‌ی ساخته شدند. همچنین برای کنترل عرض ترک در یکی از نمونه‌های ساخته شده از بتن سبک از الیاف پلیمری (بتن سبک الیافی) استفاده شده است. با توجه به نتایج، کرنش ایجاد شده در میلگردهای شالوده با بتن معمولی، به دلیل پیوستگی بهتر بتن شالوده با میلگرد بسپاری (GFRP)، تقریباً به ۵۵٪ کرنش نهایی میلگرد می‌رسد، در صورتی که در شالوده با بتن سبک، کرنش بیشینه به ۲۷٪ کرنش نهایی میلگرد می‌رسد.

واژگان کلیدی: میلگرد بسپاری (GFRP)، بتن سبک، فونداسیون منفرد، مقاومت باند، نیروی فشاری.

vatani@srttu.edu
m.pirgholikivi@gmail.com
h_3324@yahoo.com

۱. مقدمه

سالانه بیش از ۱۰۰۰۰۰ واحد پیچ و مهره‌یی یک طبقه در مناطق روستایی توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ساخته می‌شود. همچنین در بازسازی پس از زلزله نیز از همین سیستم سازه‌یی استفاده می‌شود که به علت استفاده از شالوده‌ی درجا، علاوه بر ضعف کیفیت، سرعت ساخت و ساز نیز کاهش یافته است. استفاده از شالوده‌های پیش‌ساخته‌ی سبک می‌تواند در کنار کیفیت بتن، سبکی و سرعت ساخت را افزایش دهد. استفاده از میلگردهای پلیمری به جای میلگردهای معمولی جهت جلوگیری از خوردگی جایگزین مناسبی است.^[۱] استفاده از میلگردهای بسپاری علاوه بر افزایش عمر سازه‌ها،^[۲] با توجه به مقاومت بالای این میلگردها در مقایسه با میلگردهای فولادی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای قطعات سازه‌یی، که نیاز به شکل‌پذیری آنها در هنگام زلزله کم است، باشد.^[۳]

با توجه به کمبود تحقیقات و معیار طراحی دقیق برش منگنه‌یی قطعات بتن مسلح ساخته شده از میلگردهای بسپاری، پژوهشگران با اصلاح معادلات ارائه شده برای میلگردهای فولادی از میلگردهای پلیمری استفاده کرده‌اند.^[۴] گرچه عملکرد

با توجه به کمبود تحقیقات و معیار طراحی دقیق برش منگنه‌یی قطعات بتن مسلح ساخته شده از میلگردهای بسپاری، پژوهشگران با اصلاح معادلات ارائه شده برای میلگردهای فولادی از میلگردهای پلیمری استفاده کرده‌اند.^[۴] گرچه عملکرد

۲. اهمیت پژوهش

شالوده‌های سبک پیش‌ساخته به خاطر امکان کنترل کیفیت بتن، سهولت و سرعت نصب آنها در محل و کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌توانند در سازه‌های با اسکلت فولادی و سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از میلگردهای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۹/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۲، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۳

انجام آزمایش، سطح بالا و پایین ناهموار نمونه‌ی استوانه‌ی توسط مخلوط گوتگرد مذاب شده صاف شد. نمونه‌های استوانه‌ی در همان روزی تحت آزمایش قرار گرفتند که شالوده‌های مربوط نیز آزمایش شدند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۳.۱.۳. الیاف پلیمری

الیاف‌های پلی اولفین استفاده شده در طرح اختلاط بتن مربوط به شالوده‌ی S۴، به طول ۴۸ میلی‌متر بودند، که دارای مقاومت کششی ۵۵۰ MPa و مدول کشسانی ۶ GPa بودند. سه کیلوگرم از الیاف ذکر شده به یک متر مکعب از بتن تازه در آخرین مرحله‌ی طرح اختلاط و قبل از ریختن بتن در قالب اضافه شدند. این تذکر لازم است که این الیاف، اگر به اندازه‌ی 7 kg/m^3 استفاده شود، اسلامپ را تقریباً به اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر کاهش می‌دهد. تعداد این الیاف ذکر شده در هر کیلوگرم، حدود ۳۵۰۰۰ عدد است.

۲.۳. نمونه‌ها

همه‌ی نمونه‌ها با ابعاد یکسان و میلگردهای مشابه تهیه شدند. مطابق شکل ۲ و جدول ۲، عمق مؤثر کمینه (d)، ۱۷۶ میلی‌متر برای همه‌ی نمونه‌ها بود. یک صفحه ستون با ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت، که ضخامت آن برای شالوده‌ی S۱، ۲۰ میلی‌متر و برای شالوده‌های دیگر ۱۰ میلی‌متر بود. صفحه ستون‌ها از صفحه‌های فلزی گرم نورد شده با مقاومت تسلیم حدود ۲۳۵ MPa ساخته شده‌اند و از ملات رقیق اپوکسی برای هموار کردن زیر آنها استفاده شده است. به علاوه ۴ میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر، صفحه ستون را در شالوده مهار کرده‌اند. این بولت‌های مهاری که در ۴ گوشه‌ی صفحه ستون نصب شده‌اند، دارای خم ۹۰ درجه‌ی استاندارد هستند که طول این خم‌ها ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و موقع نصب به سمت گوشه‌های شالوده امتداد یافته‌اند (شکل ۲).

بتن ریزی در قالب‌های چوبی دارای پوشش نایلون‌های پلاستیکی انجام شد تا

جدول ۱. ویژگی‌های بتن ۲۸ روزه (نمونه‌ی استوانه‌ی).

کد*	وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت فشاری (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	ضریب پواسون
۱ (NW)	۲۴۵۰	۵۹	۲۹	۰٫۲۱
۲ (LW)	۱۸۲۰	۲۷	۱۸٫۱	۰٫۲۴
۳ (LW)	۱۷۸۰	۲۱	۱۴٫۳	۰٫۲۴
۴ (LWF)	۱۸۰۰	۳۴	۱۸٫۹	۰٫۲۲

*: کد NW به بتن معمولی و کد LW به بتن سبک نسبت داده شده و F اختصار بتن الیافی است.

نکته: برای همه‌ی نمونه‌های بتنی از فوق روان‌کننده‌ی ملامین سولفونات به اندازه‌ی ۱٫۳٪ وزن مواد سیمانی استفاده شده است. به علاوه، ۸٪ محتوای سیمان با میکروسیلیس جایگزین شده است.

جدول ۲. شرایط شالوده‌های آزمایش شده.

کد شالوده	کد بتن	ρ_l (%)	$P_{T_{est}}$ (KN)
S۱	۱ (NW)	۰٫۶۵	۷۱۵
S۲	۲ (LW)	۰٫۶۵	۴۶۶
S۳	۳ (LW)	۰٫۶۵	۳۴۶
S۴	۴ (LWF)	۰٫۶۵	۵۷۵

فولادی معمولی به‌خاطر خطرات زنگ‌زدگی و پوسیدگی با محدودیت‌هایی همراه است. بنابراین استفاده از میلگردهای بسیاری FRP می‌تواند گزینه‌ی قابل قبول جهت مطالعه‌ی بیشتر باشد.

مشکل اصلی میلگرد بسیاری FRP در داخل بتن سبک، پیوستگی^۱ ضعیف بین بتن سبک و میلگرد است، که می‌تواند باعث ترک‌های گسترده و شکست زودرس شود. این مشکل باید با افزایش پیوستگی بین میلگرد و بتن مرتفع شود. افزایش مقاومت شکافت^۲ کششی بتن، راهکار مناسبی برای برطرف کردن این مسئله است؛ که منجر به افزایش مقاومت پیوستگی می‌شود و عرض ترک نیز در شالوده‌ی بتن سبک مسلح شده با میلگردهای پلیمری کاهش می‌یابد. به طوری که در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۲، استفاده از میلگردهای پلیمری در بتن سبک بدون استفاده از برش‌گیر را جزء کارهای تحقیقاتی مورد نیاز جامعه‌ی مهندسی دانسته‌اند.^[۲]

۳. مطالعات آزمایشگاهی

در این پژوهش، ۴ شالوده‌ی منفرد مسلح با میلگرد بسیاری (GFRP) که بر بستر ماسه‌ی واقع شده‌اند، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. یکی از نمونه‌ها با بتن معمولی (S۱) و ۳ نمونه‌ی دیگر از بتن با سنگ‌دانه‌ی سبک ساخته شده‌اند (S۲، S۳، S۴). علاوه بر این، در نمونه‌ی چهارم (S۴) الیاف‌های پلی اولفین^۳ نیز در طرح اختلاط بتن مورد استفاده قرار گرفته است.

۱.۳. مواد

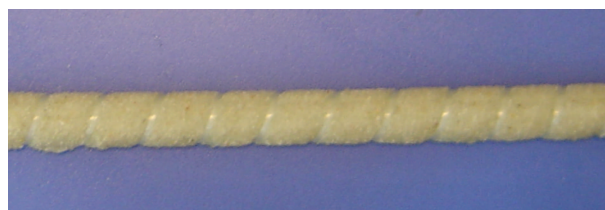
۱.۱.۳. میلگرد

در این مطالعه، میلگردهای بسیاری (GFRP) با سایز #۵ (با قطر ۱۵٫۸۸ میلی‌متر) و مقاومت کششی بیشینه‌ی ۷۱۰ MPa، مدول کشسانی طولی ۲۳ GPa مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱).

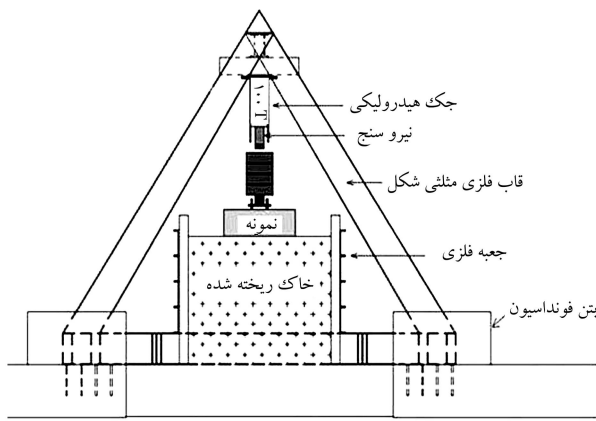
۲.۱.۳. بتن

بتن معمولی مورد استفاده در نمونه‌ی S۱، بتن با مقاومت بالاست، که از سیمان معمولی ساخته شده است. بتن سبک نیز بتن سبک‌دانه‌ی سازه‌ی است که مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI۲۱۱ از سنگ‌دانه‌ی رس منبسط شده^۴ و ماسه‌ی معمولی به عنوان ریزدانه ساخته شده است.^[۲] در هر دو نوع بتن معمولی و سبک، بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی استفاده شده ۹٫۵ میلی‌متر است.

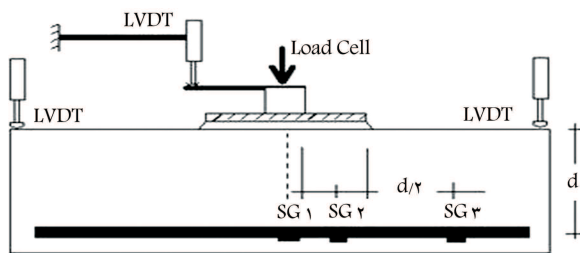
برای هر طرح اختلاط بتن، ۳ نمونه‌ی بتنی استوانه‌ی با اندازه‌ی ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی‌متر به منظور آزمایش فشاری آماده شد، تا ویژگی‌های هر یک از آنها به دست آورده شود. همه‌ی نمونه‌ها به مدت ۲۱ روز در داخل حوضچه‌ی آب غوطه‌ور و عمل‌آوری شدند. دو روز قبل از انجام آزمایش، یک کرنش‌سنج در وسط ارتفاع استوانه بر روی سطح بتن چسبانده شد تا تغییرشکل‌های محیط نمونه‌ی استوانه‌ی در اثر نیروی محوری و از آنجا ضریب پواسون محاسبه شود. ۲۴ ساعت قبل از



شکل ۱. میلگرد GFRP استفاده شده در پژوهش.



شکل ۳. برپایی آزمایش و موقعیت شالوده در بستر خاک.

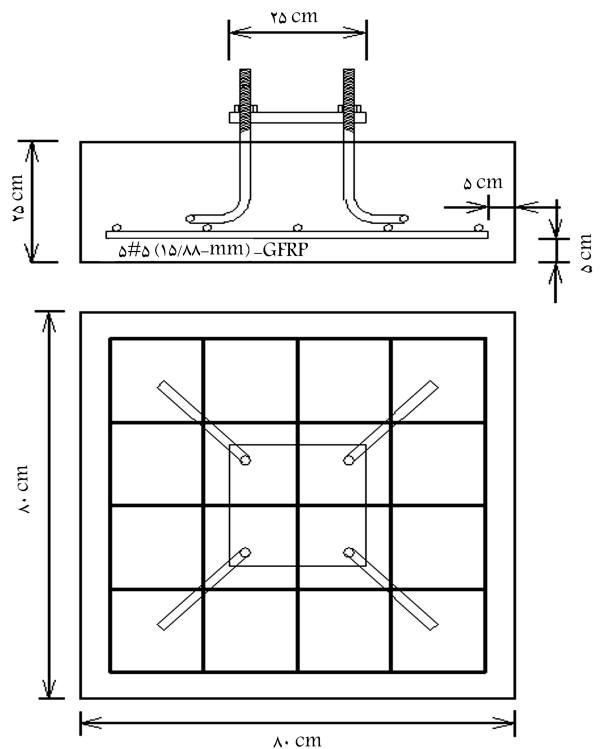


شکل ۴. ابزار بندی شالوده.

۴. بررسی تحلیلی

مدول کشسانی خاک بستر از طریق میانگین شیب اولیه منحنی تنش کرنش زیر شالوده S_1 تعیین شده است. مطابق با این منحنی، این مسئله مشخص شد که شالوده S_1 تحت تنش‌های کمتر از 11 MPa رفتار صلب از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، برای تنش‌های پایین‌تر، تغییرشکل‌های شالوده S_1 مساوی تغییرشکل حاصل شده از خاک بستر است و در خود شالوده S_1 تغییرشکلی ایجاد نمی‌شود. بنابراین مدول کشسانی خاک (E_s) برابر با 45.33 MPa محاسبه شده است. سختی سیستم (k_s) نیز از طریق معادلات هگر و همکارانش^[۱۱] محاسبه شده است (رابطه ۱):

$$k_s = \frac{E_c \cdot I_{\text{footing}}}{E_s \cdot l^3} \quad (1)$$



شکل ۲. جزئیات ابعاد شالوده.

از نشت آب جلوگیری شود. بعد از ریختن بتن و تحکیم آن بوسیله ویراتور میله‌یی، سطح بالایی شالوده‌ها نیز با نایلون‌های پلاستیکی پوشش داده شدند تا از تبخیر آب سطح بتن جلوگیری شود. نمونه‌ها به مدت ۲۱ روز به‌وسیله‌ی گونی خیس عمل‌آوری شدند و سرانجام در سن ۱۵۰ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند.

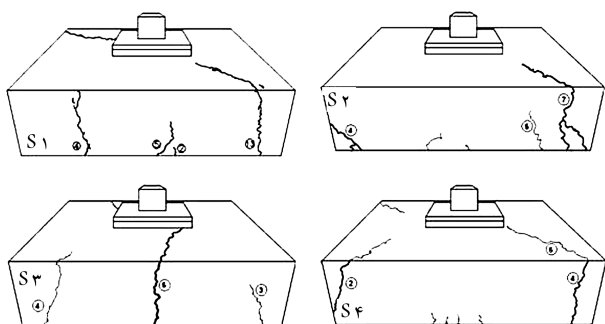
۳.۳. برپایی آزمایش و ابزار بندی

مطابق با شکل ۳، جهت انجام آزمایش از دو قاب فلزی مثلثی شکل به صورت موازی و یک جک هیدرولیکی که در رأس آنها نصب شده بود، استفاده شده است. این قاب به کف قوی آزمایشگاه مهار شده و نیز یک جعبه‌ی فلزی صلب پر شده با ماسه به عنوان بستر تکیه‌گاهی شالوده‌ها استفاده شده است.

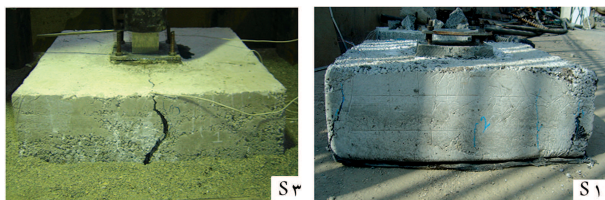
بار اعمالی از طریق یک مکعب فولادی صلب از جنس فولاد سخت با ابعاد 100×100 میلی‌متر به مرکز صفحه ستون انتقال داده شده است.

چهار LVDT در هر ۴ گوشه‌ی شالوده نصب شدند تا مقدار نشست میانگین شالوده تحت بار وارده ثبت شود. به علاوه یک LVDT نیز به منظور ثبت جابه‌جایی کلی، در مرکز نمونه نصب شد. نحوه‌ی ابزار بندی شالوده‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. کرنش میله‌گردها در ۵ موقعیت بحرانی توسط کرنش‌سنج‌ها اندازه‌گیری شدند (مقاومت کرنش‌سنج 3 ± 0.12 اهم و طول آنها ۵ میلی‌متر).

بارگذاری در همه‌ی نمونه‌ها به صورت استاتیکی یکنواخت تا حد بار سرویس صورت گرفت. بار سرویس در این آزمایش‌ها معادل بار نهایی مورد انتظار آیین‌نامه‌ی مطابق با $ACI 318-05$ (P_{code}) تقسیم بر ۱٫۲ در نظر گرفته شد.^[۱۰] پس از رسیدن به بار سرویس، بار برداری تا میزان نصف بار سرویس انجام شد و سه بار این چرخه ادامه یافت. در نهایت، بعد از پایان چرخه‌ی سوم، بارگذاری تا مرحله‌ی شکست اعمال شد.



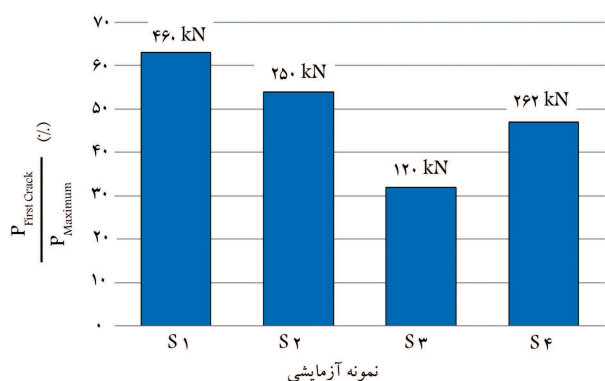
شکل ۵. مکانیزم ترک‌ها در سطح شالوده و ترتیب ظاهر شدن آن‌ها.



شکل ۶. عرض ترک در لحظه‌ی گسیختگی.



شکل ۷. تأثیر الیاف در محدود کردن عرض ترک در شالوده‌ی سبک.



شکل ۸. اولین بار مربوط به ترک اصلی در شالوده.

هر ترک اصلی ایجاد شده، عاملی برای کاهش سختی شالوده است. شیب منحنی بار- تغییرمکان می‌تواند به عنوان سختی شالوده در نظر گرفته شود. به علاوه از تقسیم مقدار باری که در آن ترک ایجاد شده است بر بار ترک اولیه، می‌توان پارامتری با عنوان پارامتر شکل‌پذیری (μ) تعریف کرد که بدون بُعد است. شکل ۱۱، سختی شالوده در مقابل پارامتر تغییرمکان در هر بار مربوط به

که در آن، E_s و E_c به ترتیب مدول کشسانی بتن و خاک، $I_{footing}$ ممان اینرسی سطح مقطع شالوده، l طول ضلع در جهت انحناء اصلی، و b عرض شالوده هستند. با توجه به معادله ۱، ضریب سختی سیستم برای شالوده‌ی S۱، معادل ۱/۶۳ محاسبه شده است.

۵. نتایج آزمایش و بحث و بررسی

۵.۱. بررسی مکانیزم ترک در شالوده‌ها

مطالعه‌ی ترک‌ها روی وجوه شالوده‌ی معمولی (S۱) نشان داد که ترک‌های خمشی در وسط دهانه‌ی شالوده سریع‌تر از ترک‌های برشی، که در نزدیک لبه‌های شالوده قابل رؤیت هستند، رخ می‌دهند (شکل ۵).

در شالوده‌ی سبک (S۳)، ترک‌های گسترده‌ی اصلی، در مراحل پایانی بارگذاری رخ می‌دهند، که در نزدیکی وسط دهانه قابل رؤیت هستند. از آنجا که هیچ خراشیدگی و آسیبی روی سطح میلگرد پس از آزمایش مشاهده نشده است، می‌توان استنباط کرد که این ترک‌ها به دلیل از بین رفتن مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن گسترش یافته‌اند. الگوهای ترک شالوده‌های S۲ و S۴ نیز شبیه شالوده‌ی S۱ هستند، چرا که با اعمال راهکارهایی در این دو نمونه، رفتار پیوستگی بتن و میلگرد بهبود یافته است. راهکاری که برای بهبود پیوستگی شالوده‌ی S۲ در نظر گرفته شد، افزایش مقاومت فشاری بتن مصرفی و راهکاری که برای شالوده‌ی S۴ در نظر گرفته شد، استفاده از الیاف گسسته‌ی پلی اولفین بوده که منجر به بالا بردن مقاومت شکافت کششی بتن شده است. پیشینه‌ی عرض ترک‌ها در شالوده‌ی بتن سبک (۱۲ میلی‌متر برای S۳) ثبت شد که عرض‌تر از ترک‌های نمونه با بتن معمولی است (کمتر از ۱ میلی‌متر برای S۱). همچنین در شالوده‌ی S۴ به دلیل استفاده از الیاف پلی اولفین، عرض ترک‌ها در مقایسه با شالوده‌ی S۳ کمتر بود (شکل‌های ۶ و ۷). همه‌ی ترک‌ها در همه‌ی انواع شالوده‌ها، ابتدا از کف شالوده رخ داده و به تدریج با افزایش بارگذاری به طرف بالا گسترش پیدا کرده است. اولین ترک در شالوده‌ی S۱ در بار حدود ۴۶۰ KN در مقایسه با شالوده‌ی S۲، در بار ۲۵۰ KN (۵۴٪ بار پیشینه) و در شالوده‌ی S۳ در نزدیک بار ۱۲۰ KN (۳۳٪ بار پیشینه) و در شالوده‌ی S۴ در بار ۲۶۲ KN (۴۶٪ بار پیشینه) رخ داده است. این موضوع نشان می‌دهد که ترک اولیه در شالوده‌های سبک، سریع‌تر از شالوده‌ی S۱ رخ می‌دهد (شکل ۸).

۵.۲. رفتار بار- تغییرشکل

تغییرمکان سازه‌ی شالوده با تقاضا نشست و تغییرمکان ایجاد شده در گوشه‌های شالوده از کل تغییرمکان در مرکز شالوده، که توسط تغییرمکان‌سنج‌ها (LVDT) ثبت شده است، و مقدار نشست گوشه‌ها از میانگین مقادیر ثبت شده توسط ۴ تغییرمکان‌سنج (LVDT) در ۴ گوشه‌ی شالوده به دست آمده است. منحنی بار- تغییرشکل شالوده‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نمودار تغییرشکل در شالوده‌ی S۴ در مقایسه با دیگر شالوده‌ها نشان داده شده است.

کیفیت پیوستگی بین بتن و میلگرد را در چرخه‌های بارگذاری و باربرداری می‌توان بررسی کرد. بنابراین، با توجه به یکسان بودن شیب منحنی بار- تغییرمکان شالوده‌های آزمایش شده، بعد از باربرداری و بارگذاری مجدد می‌توان نتیجه گرفت که پیوستگی میلگرد با بتن اطراف خود تحت بار سرویس و در مراحل اولیه‌ی بارگذاری قابل قبول است. ولی منطبق نبودن منحنی در حد سرویس با منحنی باربرداری نشان از تغییرات سختی و زوال پیوستگی بتن با میلگرد است.

ستون و برکف ستون (موقعیت ۲)، و حالت سوم در فاصله‌ی $d/2$ از برکف ستون (موقعیت ۳) بررسی شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پیشینه‌ی کرنش میلگرد در همه‌ی نمونه‌ها در موقعیت مرکز میلگرد رخ داده است. کرنش میلگرد بسیاری GFRP در نمونه‌ی S1 در لحظه‌ی گسیختگی شالوده در وسط طول میلگرد به 0.70093 رسید (۵۵٪ کرنش گسیختگی میلگرد). این اندرکنش خوب میلگرد در بتن می‌تواند ناشی از رفتار پیوستگی خوب باشد. در حالی که کرنش ناچیزی در میلگردهای شالوده‌ی S3 مشاهده شد، که می‌تواند بیانگر پیوستگی ضعیف میلگرد و بتن در این نمونه باشد. در نمونه‌های S2 و S4، هدف بهبود رفتار پیوستگی بوده است. در نمودار شکل ۱۲ واضح است که کرنش میلگرد در شالوده‌ی S2 به 0.7003 در بار ۳۵۰ KN رسیده است (۱۸٪ کرنش گسیختگی میلگرد). اگر چه در این حالت اطلاعات بعد از بار ۳۵۰ kN برای شالوده‌ی S2 به خاطر گسیختگی کرنش سنج در داخل بتن ثبت نشده است. شالوده‌ی S4 رفتار بهتری از شالوده‌ی S2 داشته و پیشینه‌ی کرنش میلگرد در لحظه‌ی گسیختگی شالوده، 0.700459 ثبت شده است (۲۷٪ کرنش گسیختگی میلگرد).

۶. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با معیارهای آیین‌نامه‌ی

آیین‌نامه‌های مختلف برای تعیین مقاومت برش منگنه‌ی بی (بانج) عضو مسلح شده با میلگردهای بسیاری (FRP)، این روابط را پیشنهاد کرده‌اند، که از روابط داده‌شده برای میلگردهای فولادی استفاده شده است:

- آیین‌نامه‌ی ACI318-05 [۱۳]

معادلات ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی ACI318-05 به این صورت است که برای تعیین ظرفیت، باید مقدار کمینه از بین ۳ فرمول ۲ الی ۴ را انتخاب کرد:

$$V_c = 0.7083 \left(2 + \frac{f_c}{\beta_c} \right) \lambda \sqrt{f_c} b_o d \quad (2)$$

$$V_c = 0.7083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \lambda \sqrt{f_c} b_o d \quad (3)$$

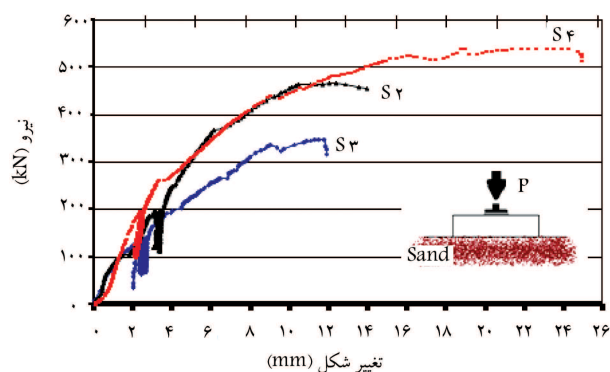
$$V_c = 0.7322 \lambda \sqrt{f_c} b_o d \quad (4)$$

که در آن‌ها، α_s برای ستون‌های میانی 40° ، ستون‌های کناری 30° و برای ستون‌های گوشه 20° است. β_c نسبت ضلع بلند به ضلع کوتاه بار متمرکز یا ناحیه‌ی عکس‌العمل است. b_o محیط مقطع بحرانی در فاصله‌ی $d/2$ از برکف ستون. d عمق مؤثر. λ برای بتن معمولی ۱، برای بتن سبک با دانه‌های ماسه‌ی سبک 0.75 و برای دیگر بتن‌های سبک 0.75 است.

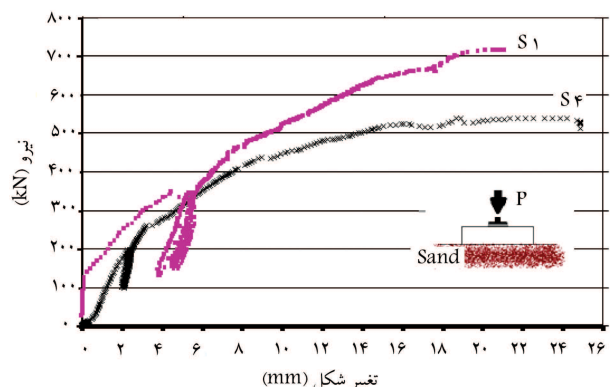
با توجه به اینکه فرمول‌های ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی ACI318-05 برای استفاده از میلگردهای فولادی است، بنابراین، هنگام استفاده از میلگردهای بسیاری لازم است فرمول‌های ارائه‌شده برای میلگردهای فولادی با استفاده از معادله‌ی ۵ اصلاح شود:

$$V_{cf} = V_c \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \varphi_\varepsilon \quad \varphi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y} \quad (5)$$

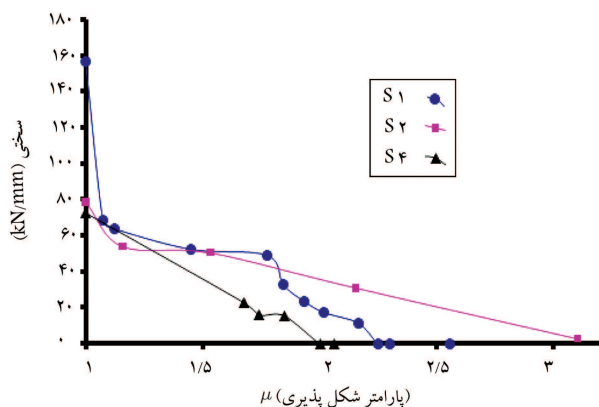
- آیین‌نامه‌ی ACI440.1R-06 [۱۴]



شکل ۹. منحنی‌های بار- تغییر مکان شالوده‌ی سبک.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی‌های بار- تغییر مکان شالوده‌های S1 و S4.

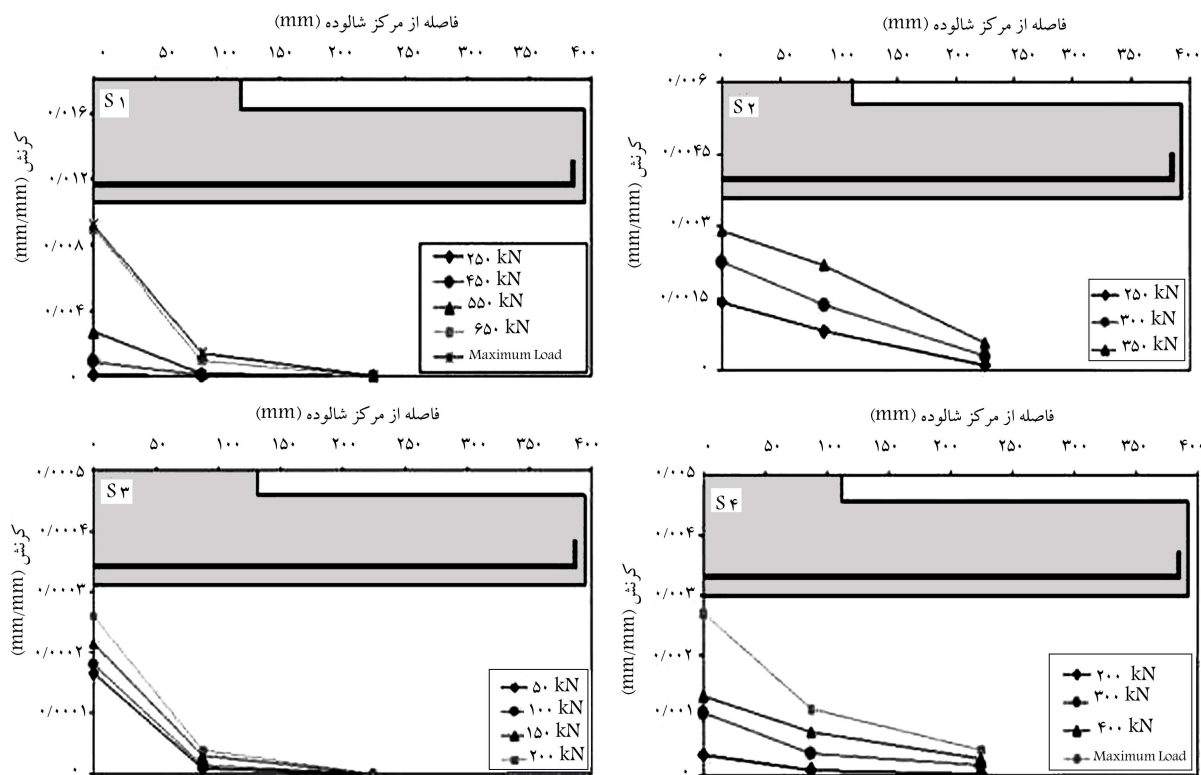


شکل ۱۱. کاهش سختی شالوده با ترک‌های اصلی.

هر مرحله از ترک اصلی را، که در روی سطح شالوده مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد؛ گرچه در هنگام طراحی سازه فرض بر این است که شالوده دچار تغییر شکل نشود. منحنی سختی شالوده‌ی S4 شیب تقریباً ثابتی را نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده‌ی این است که ترک‌ها اثر ناگهانی در سختی شالوده‌های با بتن الیافی ایجاد نمی‌کنند.

۳.۵. کرنش میلگرد GFRP

مطالعه‌ی کرنش میلگردها می‌تواند معیاری مهم برای بررسی و فهم اندرکنش مرکب و پیوستگی بین میلگرد و بتن باشد. کرنش میلگرد وسط در ۳ موقعیت بر روی میلگرد در شکل ۱۲ ترسیم شده است. حالت اول در مرکز (موقعیت ۱)، حالت دوم بین بر



شکل ۱۲. کرنش میلگردهای بسیاری GFRP در شالوده در مراحل بارگذاری متفاوت.

بر ستون تغییر یافته است. بعضی از پارامترها قبلاً توضیح داده شده است:

$$V_{cf} = 0.12 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \left(\sqrt{100 \rho_f \frac{E_f}{E_s} \varphi_e f_{ck}} \right) b_{\text{red}} d \quad (11)$$

- آیین‌نامه‌ی BS 8110 [۱۶] در این آیین‌نامه، همچون Euro code ۲، محیط منطقه‌ی بحرانی برش منگنه‌یی از $0.75d$ به $1.75d$ تغییر داده شده است (رابطه‌ی ۱۲):

$$V_{cf} = 0.179 \sqrt{100 \rho_f \frac{E_f}{E_s} \varphi_e} \sqrt{\frac{400}{d}} \sqrt{\frac{f_{cu}}{25}} b_{\text{red}} d \quad (12)$$

- آیین‌نامه‌ی CSA-S806-11 [۱۷] در این آیین‌نامه، جهت تعیین ظرفیت برش منگنه‌یی از بین معادلات ۱۳ الی ۱۵، باید آن معادله‌یی که مقدار کمینه را می‌دهد، انتخاب کرد:

$$V_{fc} = 0.1028 \lambda \varphi_c \left(1 + \frac{2}{\beta_d} \right) \sqrt{E_f \rho_f f'_c} b_{\text{red}} d \quad (13)$$

$$V_{fc} = 0.147 \lambda \varphi_c \left(0.19 + \frac{\alpha_s d}{b_{\text{red}}} \right) \sqrt{E_f \rho_f f'_c} b_{\text{red}} d \quad (14)$$

$$V_{fc} = 0.1056 \lambda \varphi_c \sqrt{E_f \rho_f f'_c} b_{\text{red}} d \quad (15)$$

پارامترهای ارائه‌شده در CSA-S806-11 همچون ACI 318-05 [۱۳] است.

مقایسه‌ی نتایج ناشی از آزمایش‌های صورت‌گرفته و مقادیر به‌دست‌آمده توسط معادلات پیشنهادی در آیین‌نامه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور، مقادیر نیروی برش منگنه‌یی محاسبه‌شده توسط ACI 318-05 [۱۳] و

در این راهنما جهت برش منگنه‌یی، فرمول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است:

$$V_{cf} = 0.18 \sqrt{f'_c} b_{\text{red}} K d \quad (6)$$

$$K = \sqrt{2 \rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (7)$$

- که در آن‌ها، n_f نسبت ضریب کشسانی الیاف بسیاری به ضریب کشسانی بتن، b_{red} محیط بحرانی در فاصله‌ی $0.75d$ از بر ستون، ρ_f نسبت سطح مقطع میلگرد بسیاری به سطح مقطع مؤثر بتن، d عمق مؤثر، f'_c مقاومت فشاری بتن.

- آیین‌نامه‌ی JSCE [۱۴] این آیین‌نامه توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن (۱۹۹۷) ارائه شده است (روابط ۸ الی ۱۰):

$$V_{cf} = \beta_d \beta + p \beta_r f_{pcd} b_{\text{red}} d \quad (8)$$

$$\beta_d = \sqrt{\frac{1000}{d}} \leq 1.5, \quad \beta_p = \sqrt{100 \rho_f \frac{E_f}{E_s}} \leq 1.5 \quad (9)$$

$$\beta_r = 1 + \frac{1}{1 + 0.25 \frac{U}{d}}, \quad f_{pcd} = 0.2 \sqrt{f'_c} \leq 1.2 \text{ MPa} \quad (10)$$

که در آن، U محیط قسمت بارگذاری است. دیگر پارامترها قبلاً توضیح داده شده است.

- آیین‌نامه‌ی Euro code ۲ [۱۵] در این آیین‌نامه، محیط بحرانی به جای فاصله‌ی $0.75d$ از بر ستون به $1.75d$ از

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌ها (مقادیر بر حسب kN هستند).

CSA- ۸۰۶-۱۱ ^[۱۷]	BS8 ۱۱۰ ^[۱۶]	Euro code ۲ ^[۱۵]	ACI ۳۱۸-۰۵ ^[۱۳]	ACI ۴۴۰٫۱-۶ ^[۳]	JSCE ^[۱۴] (JSCE, ۱۹۹۷)	Experimental Result (kN)	specimen
۳۲۰٫۶۱	۵۷۲٫۶۹	۳۶۵٫۰۹	۵۹۰٫۶۸	۲۳۸٫۷۱	۲۹۹٫۶۰	۷۱۵	S۱
۱۸۵٫۲۹	۴۰۹٫۶۶	۲۹۲٫۰۱	۲۹۹٫۶۹	۲۰۰٫۶۸	۲۵۹٫۴۶	۴۶۶	S۲
۱۷۰٫۴۱	۳۶۴٫۲۲	۲۷۰٫۰۰	۲۶۴٫۳۰	۱۹۶٫۹۵	۲۲۸٫۸۲	۳۴۶	S۳
۲۰۰٫۰۵	۴۵۲٫۱۸	۳۱۱٫۰۰	۳۳۶٫۳۰	۲۲۰٫۷۹	۲۹۱٫۱۶	۵۷۵	S۴

توصیه‌ی باشد، تا پیوستگی بتن با میلگرد افزایش یابد و عرض ترک‌ها محدود شود.

- پیشینه‌ی کرنش میلگرد بسیاری GFRP در این مطالعه، در وسط طول میلگرد رخ داده است. اگر چه ACI بیان می‌کند که برش بیشینه باید در فاصله‌ی $d/2$ از برکف ستون کنترل شود. این مورد بیان‌گر این واقعیت است که در شالوده، ترکیبی از برش و خمش تأثیرگذار است.
- پیوستگی میلگرد بسیاری GFRP و بتن سبک، با افزایش مقاومت بتن و همچنین از طریق اضافه‌کردن الیاف در طرح اختلاط بتن افزایش می‌یابد. ولی در هر صورت مقدار پیوستگی میلگرد بسیاری با بتن سبک کمتر از پیوستگی آن با بتن معمولی است.
- اثر اتصالی الیاف‌ها در بدنه‌ی بتنی شالوده از افت ناگهانی سختی بعد از هر ترک اصلی جلوگیری می‌کند.
- معادلات ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ها نسبت به جواب آزمایش‌ها در همه‌ی حالت‌ها محافظه‌کارانه است. آیین‌نامه تأثیر سختی و مقاومت خاک زیر شالوده را در معادلات خود لحاظ نکرده است.

BS۸۱۱۰^[۱۶] جواب‌های نزدیک به نمونه‌های آزمایشی را می‌دهند. این نسبت در بتن معمولی حدود ۱/۲ است. در صورتی که بقیه‌ی آیین‌نامه‌ها، که در آنها بیشتر از روابطی برای میلگردهای با الیاف بسیاری استفاده شده است، در مقایسه با نتایج این پژوهش مقادیر محافظه‌کارانه‌ی را ارائه می‌دهند، که برای بتن معمولی و بتن الیافی ضریب اطمینانی در حدود ۲/۳۵ و برای بتن‌های سبک عددی کمتر از ۲ را ارائه می‌دهند.

۷. نتیجه‌گیری

- در این مطالعه، رفتار شالوده‌های ساخته‌شده با بتن سبک در مقایسه با شالوده‌های ساخته‌شده با بتن معمولی که در آنها میلگردهای بسیاری استفاده شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است، که خلاصه‌ی نتایج به این شرح است:
- در شالوده‌های با بتن سبک، عرض ترک بیشتر از شالوده با بتن معمولی است. استفاده از الیاف می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش مقاومت کششی بتن و هم

پانویس‌ها

1. bond
2. split
3. Poly Olefin
4. LECA-light expanded clay aggregate

منابع (References)

1. Bou Guerra, K., Ahmed, E.A., El-Gamal, S. and Benmokrane, B. "Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars", *Construction and Building Materials*, **25**(10), pp. 3956-3965 (2011).
2. Laoubi, K., El-Salakawy, E. and Benmokrane, B. "Creep and durability of sand-coated glass FRP bars in concrete elements under freeze/thaw cycling and sustained loads", *Cement & Concrete Composites*, Detroit, **28**(10), pp. 869-887 (2006).
3. American Concrete Institute (ACI) Committee 440., *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, Detroit (2006).
4. Liu, R. and Pantelides, C.P. "Shear capacity of concrete slabs reinforced with glass-fiber-reinforced polymer bars using the modified compression field theory", *PCI Journal*, **57**(3), pp. 83-97 (summer 2012).
5. Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N. "A design model for punching shear of 8FRP-reinforced slab-column connections", *Cement & Concrete Composites*, **30**(6), pp. 544-555 (2008).
6. Ospina, C.E., Alexander, S.D.B. and Cheng, J.R. "Punching of two-way concrete slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids", *ACI Structural Journal*, **100**(5), pp. 589-598 (2003).
7. Dulude, D., Ahmad, E., El-Gamal, S. and Benmakrane, B. "Testing of large scale two way concrete slab reinforced with GFRP bars", CICE2010, The 5th International Conference of FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China (2010).

8. Richart, F.E. "Reinforced concrete wall and column footings", *ACI Journal, Proceedings*, **45**(Part 1, No.2), pp. 97-127 (Oct. 1948), (Part 2, No. 3), pp. 237-260 (Nov. 1948).
9. Hegger, J., Sherif, A.G. and Ricker, M. "Experimental investigations on punching behavior of reinforced concrete footings", *ACI Structural Journal*, **103**(4), pp. 604-613 (July-Aug. 2006).
10. Hegger, J., Ricker, M., Ulke, B. and Ziegler, M. "Investigations on the punching behavior of reinforced concrete footing", *Engineering Structures*, **29**(9), pp. 2233-2241 (2007).
11. Hegger, J., Ricker, M., and Sherif, A.G. "Punching strength of reinforced concrete footings", *ACI Structural Journal*, **106**(5), pp. 706-716 (Sep-Oct. 2009).
12. American Concrete Institute, *Recommended Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*, ACI 211 (2004).
13. American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318 (2005).
14. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), In: Machida, A., *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series, 23, 325 p, (1997).
15. Eurocode 2, *Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, CEN, EN 1992-1-1, 225 p., Brussels, Belgium (April 2004).
16. BSI, BS 8110-1:1997, *Structural Use of Concrete*, Code of Practice for Design and Construction, Part 1, British Standard Institution, London (1997).
17. CAN/CSA S806-11, "Design and construction of building components with fiber reinforced polymers", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario (2011).