

رفتار تیرهای بتنی مسلح به ورقهای فولادی سوراخدار

علیرضا خالو* و رضا مرشد**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۷۷/۶/۳۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۸/۴/۲)

چکیده - در این تحقیق که ایده آن برای اولین بار مطرح شده و برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است رفتار استوانه‌ها و تیرهای بتنی مسلح به ورقهای سوراخدار فولادی به ترتیب تحت کشش و خمش مورد بررسی آزمایشگاهی و نظری قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ورق سوراخدار فولادی به عنوان آرماتور کنترل کننده کشش بتن به صورت موضعی - کلی و روی نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به حلقه فولادی به عنوان آرماتور کنترل کننده کشش بتن به صورت کلی و در هر دو مورد با سختی جانبی بالا صورت گرفته است. همچنین چند نمونه تیر مسلح با تعداد مختلف لایه ورق سوراخدار در کشش برای ارزیابی مقاومت و شکل پذیری مورد آزمایش خمشی قرار گرفت. نتایج آزمایشهای کشش غیرمستقیم برزیلی روی نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ورقهای سوراخدار، نشانگر افزایش قابل ملاحظه سختی و مقاومت ترک خوردگی بتن نسبت به نمونه‌های غیرمسلح و مسلح به حلقه‌های فولادی است. نتایج حاصل از آزمایشهای خمشی روی تیرها، قابلیت این ورقها را به عنوان آرماتور طولی در کشش برای نیل به مقاومت قابل قبول در سطوح به ویژه ترک خوردگی، تسلیم ورق و مقاومت نهایی و همچنین قابلیت ایجاد شکل پذیری قابل توجه نشان می‌دهد. همچنین آزمایشهایی روی تیرهای مسلح به ورق فولادی سوراخدار وصله شده انجام شد که نظر به اینکه بتن از درون سوراخهای همپوشانی منطقه وصله عبور می‌کند، نیاز به طول وصله کمتری برای انتقال نیرو در ورقهای مجاور در مقایسه با مقدار پیشنهادی در آیین نامه ACI است.

Behavior of Concrete Beams Reinforced with Perforated Steel Plates

A.R. Khaloo and R. Morshed

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT- *In this original research study, behavior of concrete cylinders under tension and beams reinforced with perforated steel plates under flexure are experimentally and theoretically investigated. The experimental study on cylinders include specimens reinforced with perforated steel plates as reinforcement controlling tension in concrete in local-global form and specimens reinforced with steel hoops as reinforcement controlling tension in concrete in global form. These two types of cylindrical specimens possessed high lateral stiffness. Also, a few beam specimens reinforced with different layers of perforated steel plates in tension*

** دانشجوی دکترا

* استاد

were tested in flexure to evaluate their influence on strength and ductility of beams.

Test results on the cylinders under indirect tension revealed that the cylinders reinforced with perforated plates provide significant increase in stiffness and cracking strength as compared to unreinforced and hoop reinforced cylinders. The results on beams indicated the capability of plates as longitudinal reinforcement in tension to acquire acceptable strength at levels of cracking, yielding of plate, and ultimate strength and also to provide considerable ductility. Also, tests on beams reinforced with lap-spliced steel plates showed a reduced lap-splice length for transferring force in adjacent plates as compared to that obtained in ACI code for ordinary reinforcing steel bars.

۱- مقدمه

در صورت لزوم می‌توان با آجدار کردن سطح ورق، مقاومت پیوند بیشتری را نیز فراهم آورد. اطمینان به عملکرد قابل اعتماد ورقهای سوراخدار در هر یک از موارد بالا، مطالعه آزمایشگاهی مربوطه را می‌طلبد تا پشتوانه لازم برای استفاده از ورقهای فولادی فراهم آید.

در این مقاله تحقیقاتی، روش پیشنهادی امکان استفاده از ورقهای سوراخدار در منطقه کششی اعضای خمشی، به‌عنوان آرمان‌تور اصلی کششی که برای اولین بار مطرح شده است، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. در این راستا تعدادی تیر مسلح با یک یا چند لایه ورق سوراخدار فولادی آزمایش شدند. همچنین نمونه‌هایی از بتن مسلح به ورق سوراخدار و حلقه تحت کشش غیرمستقیم برای تعیین اثر ورق و حلقه روی مقاومت ترک خوردگی به دلیل شباهت آن در ترک‌خوردگی تیر مسلح به ورقهای سوراخدار مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایشهایی نیز روی تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار وصله شده انجام شد تا تخمینی از طول‌گیری ورق سوراخدار برای حفظ مقاومت و شکل‌پذیری تیر فراهم آید. نظر به اینکه ساخت ورقهای سوراخدار مورد استفاده، با توجه به ابعاد و اندازه سوراخهای مورد نیاز در ورقها، به‌راحتی امکان‌پذیر نبود، لذا تعداد نمونه‌های مورد آزمایش محدود شد.

۲- اهمیت تحقیق

بتن ماده‌ای ترد و شکننده است که این نوع شکست در آن با ایجاد تنشهای کششی کنترل نشده میسر می‌شود. فراهم آوردن سیستمی که بتواند عملکرد عضو سازه‌ای بتنی را مازاد بر ایجاد تسلیح در جهت نیروی کششی، یکپارچه و کلی کند حائز اهمیت است. گزارش پروژه تحقیقاتی در این مقاله مربوط به روشی جدید از تسلیح، برای افزایش مقاومت ترک‌خوردگی، حفظ مقاومت نهایی و بهبود

بتن ماده‌ای ترد است که تحت نیروهای کششی از مقاومت و شکل‌پذیری اندکی برخوردار است. در صورت ایجاد سیستمی که بتواند جلوی رشد ترک را گرفته و یکپارچگی در رفتار بتن فراهم آورد، قابلیت افزایش مقاومت ترک‌خوردگی بتن، حفظ مقاومت نهایی و همچنین نیل به شکل‌پذیری مطلوب فراهم می‌آید. به‌طور کلی در بتن تحت فشار، سیستمی محصورکننده به‌صورت عرضی و به شکل ورق سوراخدار در طول عضو این قابلیت‌ها را میسر می‌سازد [۱].

در اعضای تحت کشش و یا خمش، به‌کارگیری ورقهای سوراخدار در منطقه کشش ضمن اینکه به‌همراه بتن به‌صورت المان کششی عمل می‌کند، سیستمی یکنواخت در عرض عضو و یکپارچه در کل عضو ایجاد می‌کند. یکپارچگی حاصل از حضور ورقهای سوراخدار می‌تواند شکست عضو سازه‌ای مسلح به این ورقها را تدریجی و همراه با شکل‌پذیری مناسب کند. همچنین سختی جانبی نسبتاً بالا در ورقهای سوراخدار در صفحه کشش، می‌تواند قبل از اینکه مکانیسمهای ترک در بتن رشد زیادی یابد و سطوح محتمل شکست در بتن تشکیل شود وارد عمل شوند. به عبارت دیگر در تغییر شکلهای کم و قبل از ایجاد سطوح ترک گسترده در بتن، به مقاومت نهایی خود برسد و این وضعیت را تا تغییر شکلهای زیاد حفظ کند.

این ورقهای سوراخدار می‌توانند کاربرد وسیعی را نیز دارا باشند. به‌طور مثال برای استفاده به‌عنوان شبکه آرمان‌تور دالها و دیوارها می‌توانند مناسب باشند. حتی می‌توان نوارهایی از آنها را بریده و به‌عنوان آرمان‌تور کششی در تیرها مورد استفاده قرار داد. با توجه به درگیری کامل ورقهای سوراخدار با بتن، طول‌گیری و طول وصله مورد نیاز آنها نیز کم خواهد بود. علاوه بر آن درگیری ورق سوراخدار با بتن و انتقال نیرو بین بتن و ورق سوراخدار به‌صورت اتکایی و نه به‌صورت اصطکاکی خواهد بود. اگرچه

جدول ۱- برنامه آزمایشهای کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای

نوع نمونه ها	تعداد لایه ها	فاصله ورقها سانتیمتر	تعداد نمونه ها	علامت اختصاری
استوانه‌های بتنی	۲	۱۰	۱	۲L-G
مسلح به ورقهای سوراخدار	۴	۶	۱	۴L-G
استوانه‌های بتنی	۲	۱۰	۱	۲G
مسلح به حلقه‌های فولادی	۴	۶	۱	۴G
استوانه بتنی ساده	-	-	۴	p
مجموع نمونه‌ها			۸	

شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای بتنی است. در این راستا از ورقهای سوراخدار به‌عنوان آرماتور اصلی کششی در اعضای خمشی استفاده شده است.

۳- برنامه آزمایشها

به منظور شناخت و بررسی تأثیر ورقهای سوراخدار فولادی به‌عنوان آرماتورهای طولی در اعضای خمشی، مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های تیر مسلح به ورقهای سوراخدار در خمش و روی نمونه‌های سیلندری مسلح به ورقهای سوراخدار در کشش، در آزمایشگاه دانشکده مهندسی عمران و دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفت. با توجه به جدید بودن موضوع، سعی شد تا پارامترهای با تأثیرگذاری محدود از قبیل نوع مخلوط بتن، استفاده از مواد افزودنی و اندازه بزرگترین درشت‌دانه ثابت در نظر گرفته شوند. این کار با محدود کردن اندازه بزرگترین درشت‌دانه نسبت به قطر سوراخها، استفاده از نسبت آب به سیمان و همچنین نسبت ریزدانه به درشت‌دانه نسبتاً بالا و نتیجتاً عدم نیاز به استفاده از مواد افزودنی روانساز انجام گرفت. همچنین مقاومت بتن با ثابت نگهداشتن نسبت اجزای مخلوط بتن ثابت نگهداشته شد.

۳-۱- آزمایش کشش

به منظور بررسی عملکرد ورقهای سوراخدار در وضعیت کشش

نسبتاً یکنواخت و تأثیر این ورقها در جلوگیری از بازشدن ترکهای بتن و به تأخیرانداختن شروع ترک خوردگی بتن، آزمایشهایی روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بتنی (۱۵×۳۰cm) مسلح به ورقهای سوراخدار فولادی با عملکرد موضعی - کلی^۱ انجام گرفت. عملکرد موضعی بدین صورت است که هر سوراخ بتن را به‌طور موضعی تحت محصوریت قرار می‌دهد و عملکرد مجموعه این سوراخها نیز به‌طور کلی بتن آن سوراخ را محصور می‌کند. پارامتر متغیر در این آزمایشها فاصله ورقهاست. برای مقایسه تأثیر ورقهای سوراخدار و حلقه‌های منفرد، آزمایشهایی نیز روی استوانه‌های بتنی مسلح به حلقه‌های فولادی با عملکرد کلی^۲ انجام گرفت. برنامه آزمایشها در جدول (۱) ارائه شده است.

۳-۲- آزمایش خمش

برای بررسی رفتار ورقهای سوراخدار به‌عنوان آرماتور کششی تیرها، آزمایشهایی روی تیرهای بتنی به ابعاد ۱۱۰×۲۰×۱۸ سانتیمتر (عرض، عمق و طول) انجام گرفت. طول تیر با توجه به محدودیت در ساخت ورقهای سوراخدار ۱۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. ضخامت و اندازه سوراخهای ورقهای فولادی یکسان در نظر گرفته شد. تغییر درصد آرماتور کششی با تغییر تعداد لایه‌های ورق انجام گرفته است. تأثیر فاصله ورقها روی چسبندگی ورقها با بتن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. طول وصله ورقهای سوراخدار فولادی، در تیرهای یک لایه ورق با بررسی دو مقدار

جدول ۲- برنامه آزمایشهای خمشی روی نمونه‌های تیر

مشخصات	علامت اختصاری	تعداد نمونه	d (cm)	ρ_{avg}	ρ_b (ACI)
تیر بتنی با یک لایه ورق با نصب کرنش سنج روی ورق	۱L	۱	۱۷/۳	۰/۰۰۸	۰/۰۵۴
تیر بتنی با دو لایه ورق به هم چسبیده	۲L	۱	۱۷	۰/۰۱۶	"
تیر بتنی با دو لایه ورق با فاصله ۲/۵ سانتیمتر و نصب کرنش سنج روی ورق تحتانی	۲L-S	۱	۱۶	۰/۰۱۷۴	"
تیر بتنی با چهار لایه ورق به هم چسبیده	۴L	۱	۱۷/۵	۰/۰۳۱	"
تیر بتنی با یک لایه ورق وصله شده به طول ۶ سانتیمتر (۲ سوراخ همپوشانی)	۲Hole-lap	۱	۱۷/۲	۰/۰۰۸	"
تیر بتنی با یک لایه ورق وصله شده به طول ۱۲ سانتیمتر (۴ سوراخ همپوشانی)	۴Hole-lap	۱	۱۷/۲	۰/۰۰۸	"

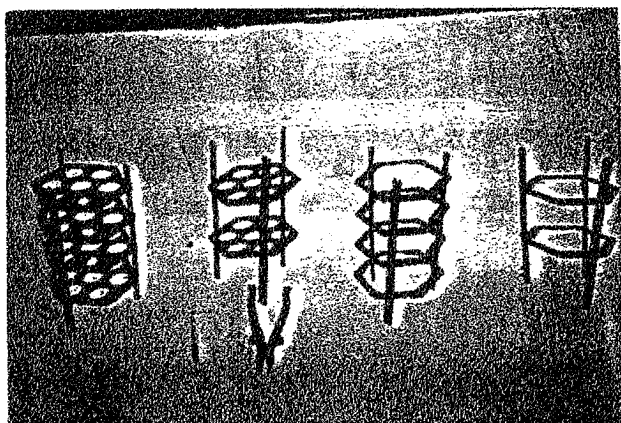
مختلف طول وصله، مورد آزمایش قرار گرفت.

برای تعیین وضعیت تنش در ورق فولادی در مراحل مختلف بارگذاری تیر، تعدادی از آزمایشهای خمشی با نصب کرنش سنج روی ورقهای فولاد انجام گرفته است. جزئیات برنامه آزمایشهای خمشی در جدول (۲) ارائه شده است. در مجموع شش تیر بتنی و برای هر تیر، چهار نمونه استوانه‌ای ساده برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شدند. کلیه تیرها و استوانه‌های مسلح، پس از رسیدن مقاومت بتن ساده به یک مقدار مشخص حدود ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع تحت آزمایش قرار گرفتند.

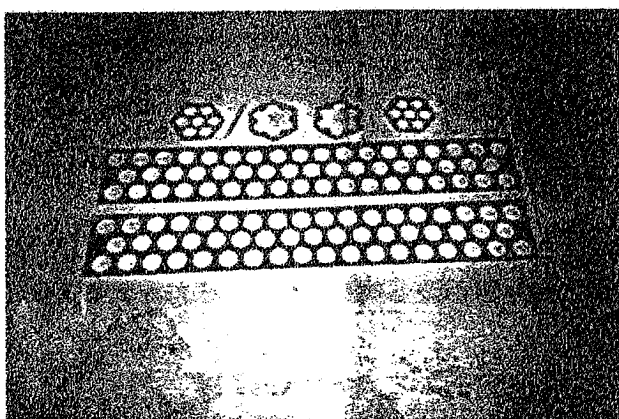
۳-۳- آماده‌سازی ورقها

برای تهیه ورقهای سوراخدار، یک قطعه فولادی به ضخامت ۳ میلیمتر تهیه شد و بیش از ۱۲ قطعه ۱۳×۱۵ سانتیمتر برای استفاده در استوانه‌ها و ۱۲ قطعه ۱۷/۴×۱۰۹ سانتیمتر برای استفاده در تیرها از ورق بریده شد. همچنین دو نمونه کششی بر طبق

استاندارد ASTM-E8 از ورق مورد استفاده بریده شد و پس از نصب کرنش سنج تحت آزمایش قرار گرفت تا منحنی کامل تنش-کرنش فولاد مصرفی به دست آید. ورقهای سوراخدار مورد استفاده در نمونه‌های استوانه‌ای به شکل شش ضلعی منتظم به ضلع ۷/۵ سانتیمتر درآورده شدند، شکل (۱). سپس این ورقها در یک دسته ۱۲ تایی روی هم جوش شده و به کمک مته با دقت سوراخکاری شدند. قطر سوراخهای این ورقها چهار برابر اندازه بزرگترین درشت‌دانه بتن، یعنی ۰/۱ ± ۳۶ میلیمتر است. برای تهیه حلقه‌های فولادی، قسمت داخلی این ورقها بیرون آورده شده است، شکل‌های (۲) و (۴). پس از اتمام سوراخکاری و بازکردن جوشها، گوشه‌های تیز ورقها گرد شده‌اند، شکل‌های (۱)، (۲) و (۴). قطعات بریده شده ۱۷/۴×۱۰۹ سانتیمتری مورد استفاده در تیرها نیز در یک دسته با خال جوش به هم متصل شده و سپس مطابق شکل (۳) با مته سوراخکاری شده‌اند. قطر سوراخهای این ورقها ۰/۱ ± ۴۸ میلیمتر است. شایان ذکر است که برای استفاده کاربردی از این



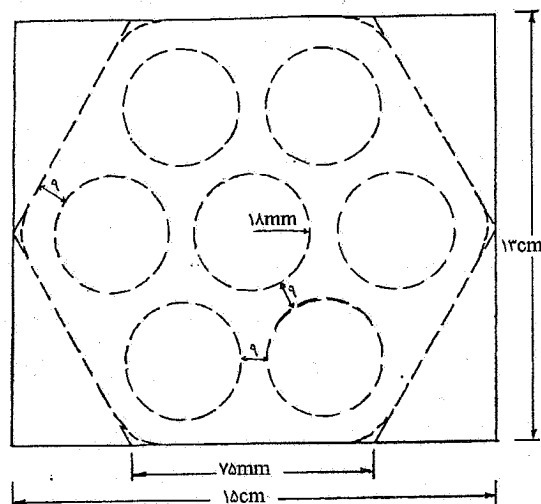
شکل ۲- ورقهای فولادی سرهمبندی شده برای قرارگیری در قالبهای استوانه‌ای



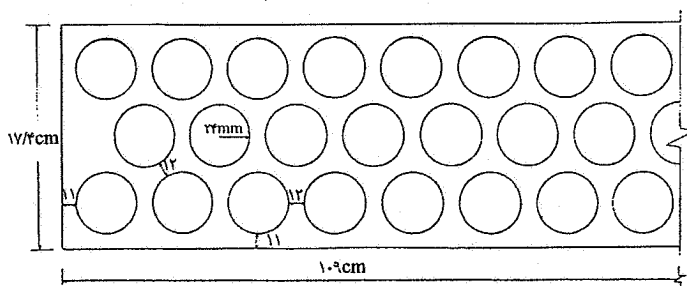
شکل ۴- ورقهای سوراخدار مورد استفاده در نمونه‌های تیر و استوانه‌ای

۳-۴- مخلوط بتن

سیمان مصرفی، از نوع I پرتلند است. از ماسه با مدول نرمی ۴، چگالی ۲/۶۲ و جذب آب ۰/۸٪ استفاده شده است. درشتی شن با توجه به ابعاد سوراخهای ورقها و سهولت بتن‌ریزی و تراکم تعیین شده است. حداکثر اندازه دانه حدود یک چهارم قطر سوراخها یعنی ۱۲/۷ میلیمتر برای تیرها و ۹/۵ میلیمتر برای استوانه‌های بتنی مسلح به ورقهای سوراخدار در نظر گرفته شده است. شن رودخانه‌ای دارای چگالی ۲/۶۵ و جذب آب ۰/۵٪ بوده است. طرح اختلاط بتن بر اساس ضوابط آیین‌نامه ACI-۲۱۱ صورت گرفته است. مخلوط بتن برای مقاومت فشاری حدود 300 kg/cm^2 و



شکل ۱- ابعاد ورق و سوراخهای ورقهای مورد استفاده در نمونه‌های استوانه‌ای

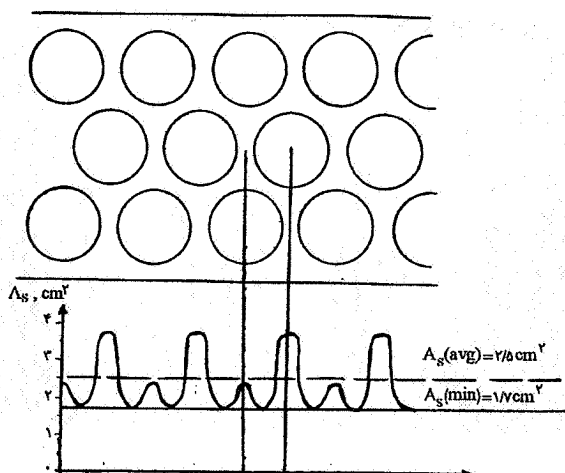


شکل ۳- ابعاد ورق مورد استفاده در نمونه‌های تیر

ورقها، باید ورقهای فولادی از ابتدا به صورت سوراخدار تهیه شوند تا از نظر اقتصادی قابلیت کاربرد داشته باشند شکلهای (۳) و (۴). شایان ذکر است که تعیین محل سوراخها و سوراخکاری ورقها با دقت بسیار بالایی انجام گرفته است.

سوراخکاری ورقها از این رو با مته انجام شده است که با این روش در مقایسه با سوراخکاری به روش پانچینگ، ترکهای مویی کمتری در اطراف سوراخها ایجاد می‌شود. وجود این ترکهای مویی باعث تمرکز تنش در آن نقاط خواهد شد که منجر به گسیختگی ورق در بار کمتر خواهد شد. لازم به توضیح است که جوشکاری انجام شده روی ورقها قبل از سوراخکاری به طرز ظریف و در محلهایی از ورقها که تأثیر نامطلوبی روی خواص آنها نگذارد انجام شده است. جداسازی ورقها پس از سوراخکاری نیز با دقت انجام شده و نقاط جوشکاری به دقت سنباده زده شده‌اند.

فواصل مورد نظر و جلوگیری از جابه‌جا شدن آنها در حین بتن‌ریزی، از میلگردهای ساده نمره ۶ که در فواصل مورد نظر بر اساس فاصله بین ورقها شیار داده شده‌اند، استفاده شده است. این میلگردها به کمک مفتولهای نازکی در محل شیارها به ورقها بسته شده‌اند، شکل (۲).



شکل ۵- تغییرات سطح مقطع در طول ورق مورد استفاده در نمونه‌های تیر

بتن مورد استفاده در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای، بتنی نسبتاً روان با اسلامپ ۸ سانتیمتر و با شن رودخانه‌ای ریز تهیه شد تا بتواند به راحتی از بین سوراخهای ورقها عبور کرده و به خوبی در لابلای ورقها جای گیرد. قبل از بتن‌ریزی اسکلت‌های ساخته شده توسط ورقهای فولادی سوراخدار و میلگردهای نگهدارنده با دقت درون استوانه‌های فولادی (۱۵×۳۰cm) که درون آنها روغنکاری شده بود، قرار داده شدند. سپس قالبهای فلزی روی میز و بیره قرار داده شدند و بتن‌ریزی نمونه‌ها همراه با ارتعاش تا تراکم مناسب نمونه‌ها انجام شد. در هنگام بتن‌ریزی مراقبت دقیق به عمل آمد تا اینکه ورقها حالت افقی خود را از دست ندهند.

پس از بتن‌ریزی، سطح قالبها با گونی مرطوب پوشانده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و برای مدت حدود ۳۰ روز با گونی خیس به طور مداوم مرطوب نگهداشته شده‌اند. قبل از آزمایش، نمونه‌ها به مدت حدوداً ۲۴ ساعت در مجاورت هوا در آزمایشگاه قرار داشته‌اند. مقاومت فشاری، حاصل از میانگین آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای است. نمونه‌های فشاری قبل از آزمایش کلاهک‌گذاری شدند.

جدول ۳- نسبت‌های اختلاط بتن

بتن استوانه‌ها	بتن تیرها	
۱۸۹ kg/m ^۳	۱۶۵ kg/m ^۳	آب
۴۰۹ "	۳۶۴ "	سیمان
۶۰۶ "	۷۵۶ "	دانه درشت (مرطوب)
۱۰۵۹ "	۱۰۲۸ "	دانه ریز (مرطوب)
۰/۵۵ "	۰/۵۵ "	نسبت آب به سیمان

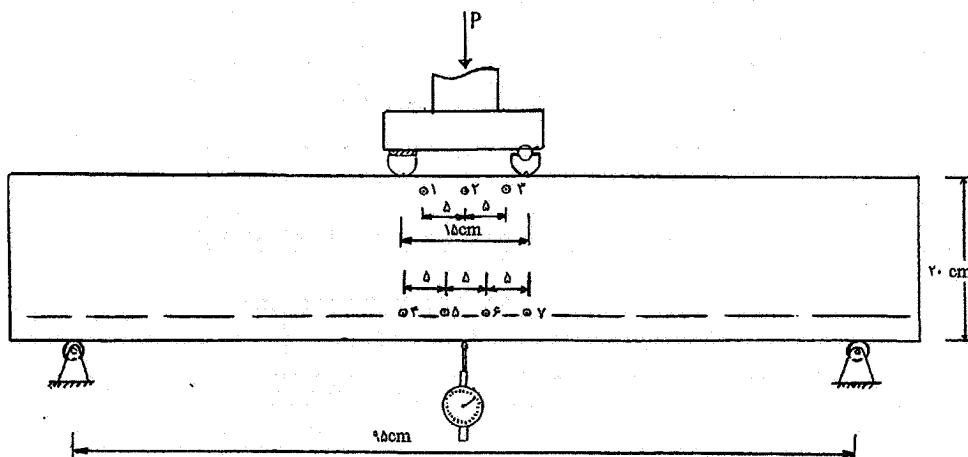
کارایی لازم برای بتن‌ریزی در بین لایه‌ها و سوراخهای ورق و زیر ورقهای تیر انجام گرفت. نسبت‌های اختلاط برای هر متر مکعب بتن، با در نظر گرفتن اسلامپ حدود ۸ سانتیمتر در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای ساده حاصل از آزمایش‌های در زمان آزمایش حدود ۳۵۰ kg/cm^۲ برای تیرها و استوانه‌های مسلح به دست آمده است. برای نیل به مقاومت حدود ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، نمونه‌ها در ستین ۲۸ الی ۳۵ روز آزمایش شدند.

۳-۵- ساخت نمونه‌های استوانه‌ای

با توجه به نیاز اجرای دقیق و استقرار ورقهای سوراخدار در

۳-۶- طراحی و ساخت نمونه‌های خمشی

برای جلوگیری از شکست برشی تیرها، با توجه به فرضیات اولیه، بر اساس ضوابط آیین‌نامه ACI ۳۱۸ (۲) خاموت‌های برشی طراحی و در تیرها تعبیه شدند. فرض اولیه برای تنش تسلیم فولاد ورقها ۲۸۰۰ kg/cm^۲ بوده است. سطح مقطع ورق سوراخدار، A_g، برابر با کمترین سطح مقطع فولاد در نظر گرفته شده و به عنوان سطح مقطع فولاد کششی در محاسبات استفاده شد. تغییرات سطح مقطع در طول ورق در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار سطح مقطع ورق سوراخدار در محاسبه مقاومت خمشی ۱/۷ سانتیمتر مربع در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نحوه



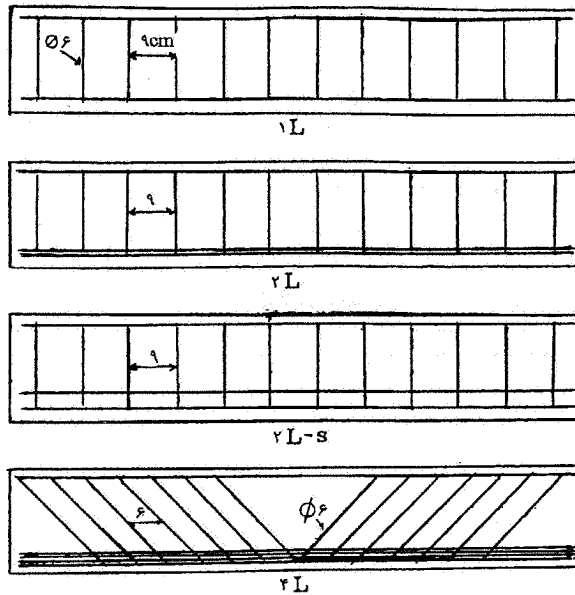
شکل ۶- شکل شماتیک نحوه آزمایش خمشی تیرها به همراه محل استقرار demec ها

جدول ۴- ظرفیت لنگر خمشی و برشی تخمینی تیرها

نوع	A_s (cm^2)	d (cm)	ρ	ρ'		M_n (kg-m)	v_n (kg)	v_c^* (kg)	$v_s = v_n - v_c$ (kg)
۱L	۱/۷	۱۷/۳	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۱۸	(۱)	۸۰۹	۲۰۲۲	۲۸۹۲	-
					(۲)	۸۶۸	۲۱۷۰	۳۱۲۳	-
۲L	۳/۴	۱۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۸	(۱)	۱۵۳۹	۳۸۴۸	۲۸۴۲	۱۰۰۶
					(۲)	۱۶۵۸	۴۱۴۴	۳۰۶۹	۱۰۷۵
۲L-S	۳/۴	۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	(۱)	۱۴۲۵	۳۵۶۳	۲۶۴۴	۹۱۹
					(۲)	۱۵۲۶	۳۸۱۶	۲۸۵۶	۹۶۰
۴L	۶/۸	۱۷/۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۱۸	(۱)	۲۸۴۰	۷۱۰۰	۲۸۱۰	۴۲۹۰
					(۲)	۳۰۷۰	۷۶۷۵	۳۰۳۴	۴۶۴۱
<p>(۱) مقدار محاسبه شده براساس فرضیات اولیه برای f_c' و f_y ($۳۰۰ kg/cm^2$ و $۲۸۰۰ kg/cm^2$)</p> <p>(۲) مقدار محاسبه شده براساس مقادیر واقعی f_c' و f_y ($۳۵۰ kg/cm^2$ و $۳۰۰۰ kg/cm^2$)</p> <p>* از رابطه ساده تر ACI برای برش به دست آمده است [۷].</p>									

ظرفیت خمشی و برشی مقطع در تیرها محاسبه شده است، جدول (۴). در این جدول در زیر ستون "نوع"، ۱L، ۲L و ۴L به ترتیب یک لایه، ۲ و ۴ لایه ورق بدون فاصله و ۲L-S نشاندهنده دو لایه با فاصله ۲ سانتیمتر را نشان می دهند. مقدار پوشش ورقها

بارگذاری تیرها در شکل (۶) داریم که با استفاده از معادله های طراحی ACI 318 و با فرض $f_c' = ۳۰۰ kg/cm^2$ ، $f_y = ۲۸۰۰ kg/cm^2$ و استفاده از دو میلگرد ساده به قطر ۶ میلیمتر در ناحیه فشاری به فاصله حدود ۲ سانتیمتر از بالای تیر، حداکثر



شکل ۷- نحوه خاموتگذاری و استقرار ورقهای فولادی سوراخدار و آرماتورهای فشاری در نمونه‌های تیر (نحوه خاموتگذاری تیرهای با ورق‌های وصله شده شبیه تیر ۱L است).

همان طور که از جدول (۴) نتیجه می‌شود، این خاموتها جوابگوی مقادیر واقعی f_y و f'_c نیز هستند. نحوه خاموتگذاری و استقرار ورقهای سوراخدار در کشش و آرماتورهای طولی در فشار برای این تیرها در شکل (۷) نشان داده شده است.

از آرماتورهای فشاری برای استقرار صحیح خاموتها استفاده به عمل آمده است. تراکم بتن تیرها توسط ویراتور خرطومی انجام شد. برای هر تیر، چهار نمونه استوانه‌ای ساده برای تعیین مقاومت فشاری بتن حاصله نیز ساخته شده است. روی ورقهای سوراخدار تیرهای ۱L و ۲L-S از کرنش سنج برای بررسی رفتار ورقها در کشش نصب شده است، شکل (۸).

دو تیر مسلح به ورق فولادی سوراخدار وصله شده یکی با دو سوراخ همپوشانی به طول وصله ۶ سانتیمتر و دیگری با چهار سوراخ همپوشانی به طول وصله ۱۲ سانتیمتر برای تعیین حداقل طول وصله مورد نیاز برای انجام آزمایش خمشی نیز ساخته شدند. طول وصله ورق فولادی به نحوی انتخاب شد تا تنش فولاد ورق از تنش تسلیم کمتر باشد و نتیجتاً نوع شکست شکافتگی^۳ در امتداد طول وصله ایجاد شود. ورقهای فولادی در وسط دهانه هر دو تیر وصله شدند.

در کلیه تیرها، بتن به صورت غیر محصور بوده و به عبارتی دیگر

حدود ۲/۵ سانتیمتر بوده است. برای خاموتها از میلگرد ساده به قطر ۶ میلیمتر و تنش تسلیم 240 kg/cm^2 استفاده شده است. برای تیر یک لایه، نیاز به خاموت حداقل است و حداکثر فاصله خاموتها $9 \text{ cm} \approx d/2$ است و داریم

$$A_v(\min) = \frac{3/5 b_w S}{f_y} = 0.236 < 2 \times 0.283 = 0.566 \text{ cm}^2$$

که از سطح مقطع تأمین شده توسط میلگرد ۶ کمتر است. اگر از همین خاموتگذاری برای تیرهای ۲L و ۲L-S نیز استفاده به عمل آید، داریم

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} = 2560 \text{ kg} > 1006 \text{ kg}$$

که بیش از مقدار مورد نیاز است. برای تأمین مقاومت برشی در تیر ۴L خاموتهای برشی با زاویه 45° و به فاصله ۶ سانتیمتر از هم قرار داده شده‌اند، لذا داریم

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} (\sin \alpha + \cos \alpha) = 5440 \text{ kg} > 4290 \text{ kg}$$

جدول ۵- مقایسه نتایج آزمایشهای مقاومت ترک خوردگی استوانه‌های بتنی مسلح و بتن ساده

نوع نمونه	فاصله ورقها (cm)	نسبت حجمی آرماتور، ρ	تنش ترک خوردگی (kg/cm^2)	شیب نسبی منحنی $p-\Delta$	درصد افزایش تنش ترک خوردگی
۲L-G	۱۰	۰/۰۰۸	۲۸	۱/۰۸	۱۲
۴L-G	۶	۰/۰۱۶	۴۴	۱/۷۲	۷۶
۲G	۱۰	۰/۰۰۵	۲۷/۵	۱/۰۵	۱۰
۴G	۶	۰/۰۱	۳۱	۱/۳۸	۲۴
ساده	-	-	۲۵	۱	-

آزمایش کشش برزلی روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح به ورقهای سوراخدار و حلقه، اندازه‌گیری تغییر فاصله عمودی بین فکها در حین بارگذاری توسط تغییر طول سنج عقربه‌ای با دقت ۰/۰۰۱ اینچ انجام شده است. بارگذاری در نمونه‌های استوانه‌ای مسلح، تا خردشدگی بتن با توجه به فشار نافع عرضی ناشی از ورق سوراخدار یا حلقه انجام گرفته است.

در حین آزمایش تیرها، تغییر مکان مرکز تیر اندازه‌گیری شده است، شکل (۶). همچنین از demec در فیبرهای فشاری و کششی تیرها برای تعیین کرنش و انحنا استفاده شد.

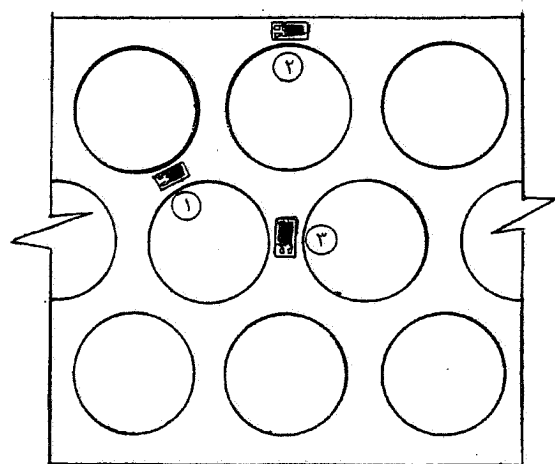
کرنش‌سنجهای نصب شده روی ورقهای تیرهای ۱L و ۲L-S به نحوی نصب شده‌اند که در راستای تنش اصلی حداکثر قرار گیرند. با توجه به هندسه ورق، تنش در سایر جهات را می‌توان ناچیز فرض کرد.

۴- نتایج آزمایشها و بحث پیرامون آنها

در آزمایش کشش استوانه، مشابه آزمایش خمش تیر، ورقهای سوراخدار ناحیه کششی بتن را محصور می‌کنند. لذا از این دو آزمایش برای بررسی ورقهای سوراخدار در اعضای تحت کشش یا در فیبرهای کششی اعضای خمشی استفاده به عمل آمده است. نتایج آزمایشهای استوانه‌ها و تیرها و بررسی آنها در زیر ارائه شده است.

۴-۱- استوانه‌های مسلح در کشش

تنش ترک خوردگی نمونه‌های محصور (۲L-G، ۴L-G، ۲G و ۴G) در هنگام مشاهده اولین ترک قابل زویت در امتداد قطر استوانه و بار عمودی در جدول (۵) آورده شده است. تنش ترک خوردگی تا قبل



شکل ۸- محل نصب کرنش‌سنجها روی ورقهای در وسط تیر

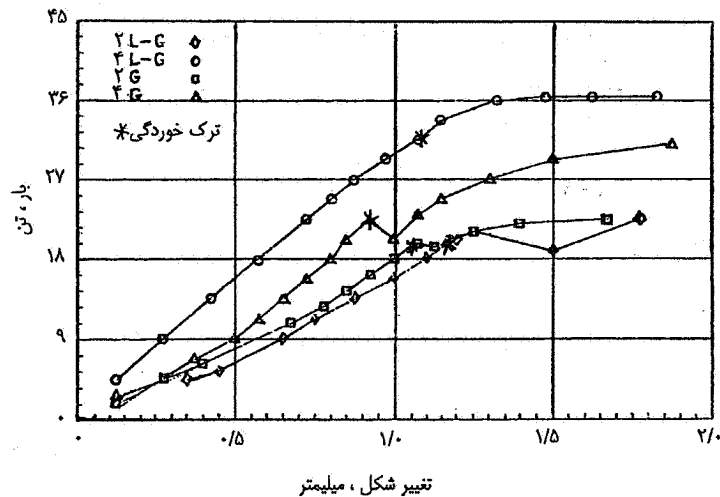
خاموتهای برشی بسته نبوده‌اند.

۳-۷- عمل‌آوری نمونه‌ها

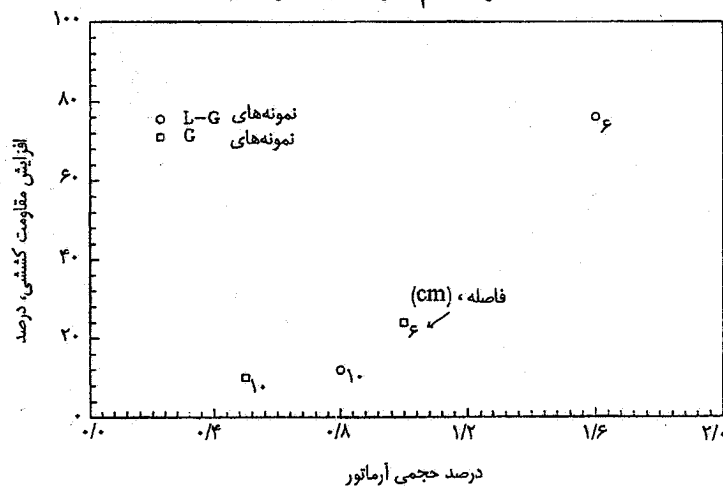
پس از بتن‌ریزی، سطح قالبها با گونی مرطوب پوشانده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و برای مدت ۳۰ تا ۳۵ روز با گونی خیس به‌طور مداوم مرطوب نگهداشته شده‌اند. قبل از آزمایش، نمونه‌ها به مدت حدوداً ۲۴ ساعت در مجاورت هوا در آزمایشگاه قرار داشته‌اند. کلیه نمونه‌های فشاری قبل از آزمایش کلاهدک‌گذاری شدند.

۳-۸- جزئیات آزمایشها

آزمایش کشش روی دو نمونه از ورق فولادی، تنش تسلیم $3000 kg/cm^2$ و مقاومت نهایی $4000 kg/cm^2$ را نتیجه داد. در



شکل ۹- منحنی بار - تغییر شکل (طول قطر) در آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای



شکل ۱۰- درصد افزایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای مسلح نسبت به نمونه ساده

مشاهده اولین ترک برای درصدهای مختلف فولاد (ρ) نیز در جدول (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای فاصله ۱۰ سانتیمتری ورقهای سوراخدار و حلقه‌ها (۲L-G و ۲G) افزایش به دست آمده در مقاومت کششی ناچیز است. اما برای فاصله کمتر یعنی ۶ سانتیمتر و به ویژه استوانه‌های مسلح به ورقهای سوراخدار این افزایش قابل توجه است. افزایش مقاومت در نمونه ۴G نسبت به نمونه ۲G، ۱۳ درصد است، در حالی که این افزایش برای نمونه ۲L-G نسبت به نمونه ۲L-G، ۵۷ درصد است، که نشانگر عملکرد محصورکنندگی بهتر نمونه‌های L-G با کاهش فاصله ورقهاست. شیب نسبی رابطه بار - تغییر شکل نیز با افزایش مقاومت ترک خوردگی افزایش یافته است که نشانگر افزایش سختی نمونه‌های با

از ترک خوردن نمونه‌ها از معادله زیر تعیین شده است

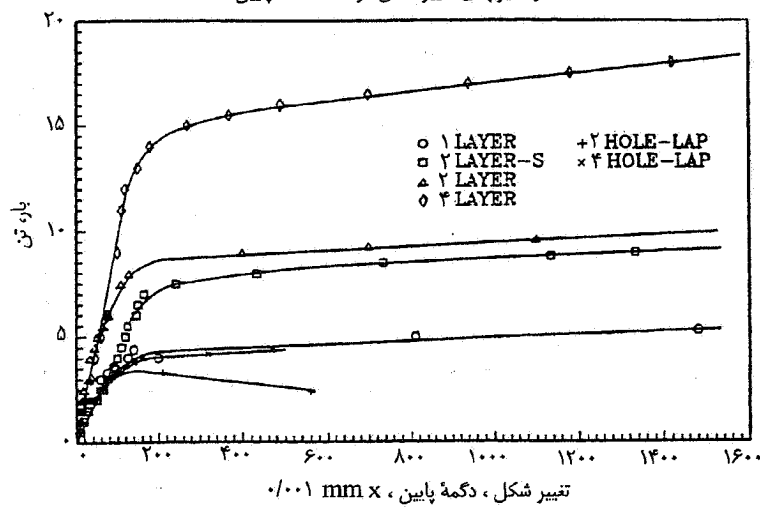
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن P بار وارده، D قطر استوانه و L طول استوانه است. شایان ذکر است که نتایج حاصله بعد از ترک خوردن نمونه‌ها که بیانگر دو نیم شدن آنهاست، چندان قابل اعتماد نیست چون در این حالت استوانه بتنی به صورت دو نیمه مجزا در آمده است و توزیع تنشهای داخل آن تفاوت خواهد کرد. شیب نسبی منحنیهای بار-تغییر اندازه قطر شکل (۹) و درصد افزایش مقاومت کششی نمونه‌های محصور نسبت به نمونه ساده شکل (۱۰) تا لحظه

جدول ۶- مقاومت‌های خمشی ترک خوردگی، تسلیم و نهایی حاصل از آزمایشها

نوع نمونه	M_{cr} (kg-m)	M_y (kg-m)	M_u (kg-m)
۱L	۵۶۰	۹۶۰	۱۲۰۰
۲L	۸۰۰	۱۶۵۰	۱۹۲۰
۲L-S	۸۰۰	۱۵۵۰	۱۹۳۰
۴L	۱۶۰۰	۳۲۰۰	۳۹۰۰
۲ سوراخ همپوشان	۴۰۰	۶۴۰	۶۶۰
۴ سوراخ همپوشان	۵۰۰	۸۰۰	۹۰۰

اندازه گیریهای تغییر شکل در نقاط دگمه پایین



شکل ۱۱- نتایج به دست آمده از demec های تحتانی نصب شده روی تیرها

۲-۴- تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار

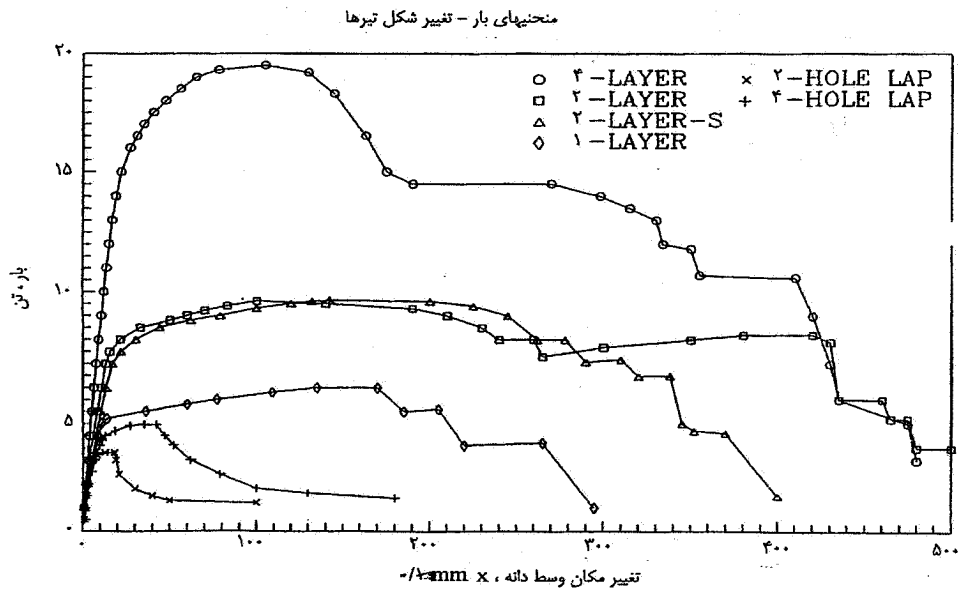
بررسی نتایج آزمایشهای خمشی بر اساس دو معیار مقاومت و شکل پذیری انجام شده است

۲-۴-۱ مقاومت خمشی

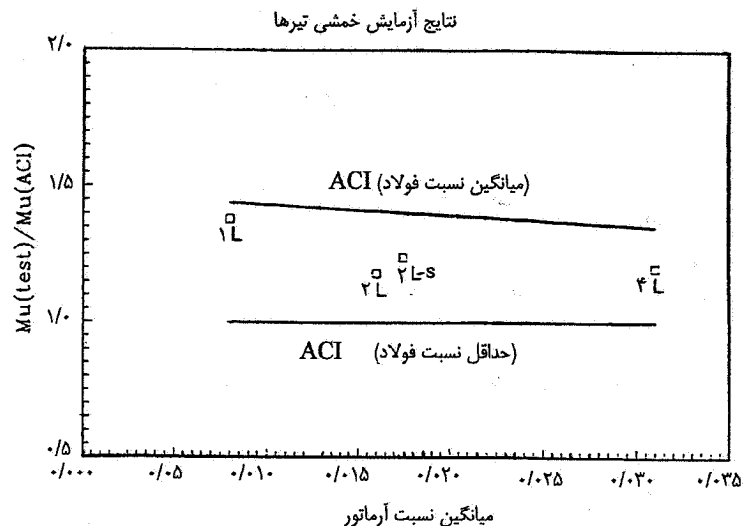
برای ارزیابی مقاومت خمشی تیرها از لنگر خمشی ترک خوردگی (M_{cr})، لنگر خمشی تسلیم (M_y) و لنگر خمشی نهایی (M_u) استفاده به عمل آمده است، جدول (۶). منحنی بار-تغییر شکل حاصل از demecها و منحنیهای کامل بار-تغییر مکان وسط تیر به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده‌اند. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نسبت فولاد، ρ ، مقاومت خمشی افزایش و شکل پذیری تیرها همانند تیرهای مسلح

به کارگیری ورق سوراخدار و حلقه فولادی است شکل (۹). افزایش سختی نمونه‌ها نیز مشابه افزایش مقاومت ترک خوردگی برای نمونه‌های مسلح شده با ورقهای سوراخدار بیشتر است و با افزایش فاصله ورقها از میزان آن به شدت کاسته می‌شود.

اصولاً از آنجا که کرنش متناظر تنش ترک خوردگی بسیار کوچک است، نمی‌توان از ظرفیت کششی کامل فولاد برای افزایش مقاومت ترک خوردگی بتن استفاده کرد. لیکن بر اساس نتایج آزمایشهای کششی روی بتن‌های محصور می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از ورقهای سوراخدار می‌توان راندمان فولاد را در جلوگیری از ترک خوردگی و باز شدن ترکها افزایش داد. به همین دلیل کاربرد این ورقها در دیواره مخازن آب و سایر مواردی که نیاز به آب‌بندی بتن است به عنوان آرماتور کششی اصلی، می‌تواند بسیار مناسب باشد.



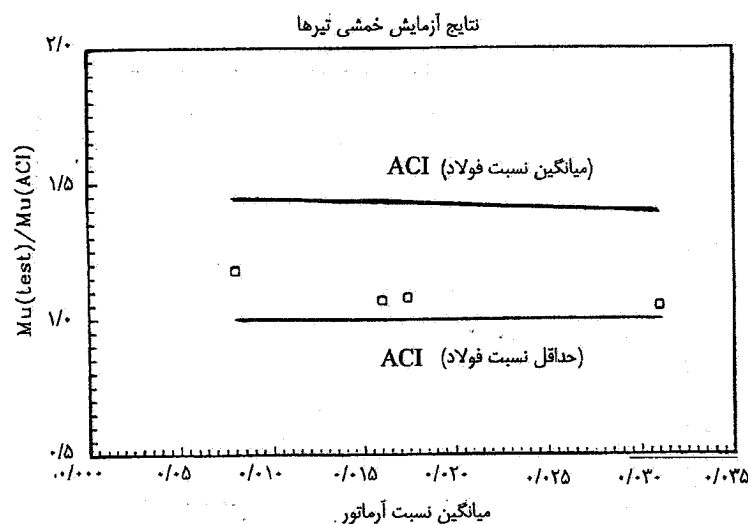
شکل ۱۲- منحنی های کامل بار - تغییر مکان تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار



شکل ۱۳- مقایسه مقاومت خمشی نهایی تیرهای مورد آزمایش با مقادیر ACI

به مقدار ρ ، بر اساس معمولی کاهش یافته است. بر اساس مقدار ρ ، مقادیر مقاومت‌های خمشی متناظر برای تیرهای معمولی بر اساس روابط ACI-318 برای مقایسه با نتایج آزمایشها محاسبه می‌شوند. نظر به اینکه سطح مقطع ورقهای سوراخدار در طول ورق متغیر است، از سطح مقطع متوسط ورق، A_{av} ، برابر $2/5$ سانتیمتر مربع و سطح مقطع ورق در ضعیفترین مقطع، A_{min} ، برابر $1/7$ سانتیمتر مربع، برای تعیین مقاومت‌های نهایی خمشی متناظر بر اساس روابط ACI استفاده شده است. مقدار ρ_b بر اساس آیین‌نامه ACI حدود $0/054$ به دست آمده است، لیکن باید توجه داشت که فرمول ρ_b ممکن است برای تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار صادق نباشد. مقایسه بین مقاومت خمشی نهایی تیر بر اساس ACI و نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که مقاومت‌های خمشی آزمایشها همواره بیشتر از آن بر اساس سطح مقطع حداقل فولاد است، شکل (۱۳). قاعدتاً مقاومت‌های خمشی حاصل از آزمایشها باید معادل مقاومت به دست آمده از ضعیفترین مقطع تیر باشد. این اختلاف ناشی از عملکرد کار سختی فولاد و شکل خاص ورقهاست که مشارکت بتن

به آرماتورهای معمولی کاهش یافته است. بر اساس مقدار ρ ، مقادیر مقاومت‌های خمشی متناظر برای تیرهای معمولی بر اساس روابط ACI-318 برای مقایسه با نتایج آزمایشها محاسبه می‌شوند. نظر به اینکه سطح مقطع ورقهای سوراخدار در طول ورق متغیر است، از سطح مقطع متوسط ورق، A_{av} ، برابر $2/5$ سانتیمتر مربع و سطح مقطع ورق در ضعیفترین مقطع، A_{min} ، برابر $1/7$ سانتیمتر مربع، برای تعیین مقاومت‌های نهایی خمشی متناظر بر اساس روابط ACI استفاده شده است. مقدار ρ_b بر اساس آیین‌نامه ACI حدود $0/054$ به دست آمده است، لیکن باید توجه داشت که فرمول ρ_b ممکن است برای تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار صادق نباشد. مقایسه بین مقاومت خمشی نهایی تیر بر اساس ACI و نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که مقاومت‌های خمشی آزمایشها همواره بیشتر از آن بر اساس سطح مقطع حداقل فولاد است، شکل (۱۳). قاعدتاً مقاومت‌های خمشی حاصل از آزمایشها باید معادل مقاومت به دست آمده از ضعیفترین مقطع تیر باشد. این اختلاف ناشی از عملکرد کار سختی فولاد و شکل خاص ورقهاست که مشارکت بتن



شکل ۱۴- مقایسه لنگر خمشی تسلیم تیرهای مورد آزمایش با مقادیر ACI

جدول ۷- لنگر خمشی ترک خوردگی تیرها بر اساس آیین نامه ACI و مقایسه با نتایج آزمایش

$\frac{M_{cr(test)}}{M_{cr(ACI)}}$	M_{cr} (kg-m)	I_{tr} (cm ^۲)	ρ	d (cm)	A_{Avg} (cm ^۲)	نوع
۱/۰۹	۵۱۶	۱۳۲۵۰	۰/۰۰۷	۱۷/۳	۲/۵	۱L
۱/۴۳	۵۶۱	۱۳۹۵۰	۰/۰۱۴	۱۷	۵	۲L
۱/۴۹	۵۳۷	۱۳۵۰۰	۰/۰۱۴	۱۶	۵	۲L-S
۲/۳۵	۶۸۱	۱۵۸۴۰	۰/۰۲۸	۱۷/۵	۱۰	۴L
-	۴۵۰	۱۲۰۰۰	-	-	-	ساده

کمتر است که با توجه به اینکه در ورقهای سوراخدار همه فولاد در سمت مورد نظر برای خمش قرار نمی‌گیرد امری واضح است. ولی می‌توان انتظار داشت که مقاومت ورقهای سوراخدار در دالهای دو طرفه که فولاد در دو سو وارد عمل می‌شود خیلی بهتر باشد. با این وجود پارامترهای دیگری از قبیل شکل پذیری و کنترل ترک خوردگی نیز در ارزیابی رفتار تیرها نقش دارند که در آن موارد رفتار تیرهای مسلح شده با ورقهای سوراخدار نسبت به تیرهای معمولی با حجم فولاد مساوی بهتر است (به بخشهای بعدی رجوع شود).

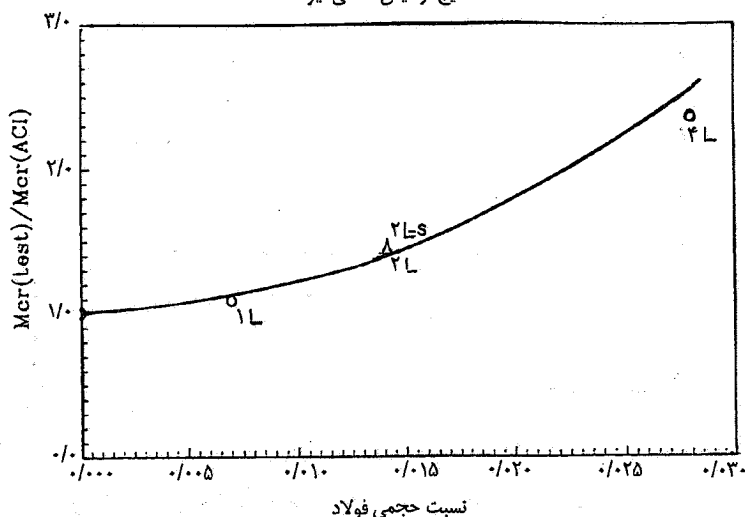
لنگر خمشی ترک خوردگی به منظور مقایسه، برای تیرهای معمولی بر اساس مقطع تبدیل یافته قبل از ترک خوردگی تیر بر اساس سطح مقطع متوسط ورق فولادی و با در نظر گرفتن تنش حداکثر در ناحیه کششی بر اساس آیین نامه ACI محاسبه شده و در جدول (۷) نسبت به نتایج آزمایش ارائه شده است. در این جدول

را در تحمل بار به همراه دارد. به ویژه اینکه در مورد تیرهای ۱L و ۲L-S که ورقها به صورت تک لایه با بتن اندرکنش دارند افزایش مقاومت حاصله بیشتر است. به عبارت دیگر عدم یکنواختی تنش در المانهای مختلف ورق، سبب توزیع تنش و بالا بردن مقاومت المانهای ضعیفتر می‌شود.

لنگر خمشی تسلیم، M_y بر اساس روابط ارائه شده توسط پارک و پالی [۳] محاسبه شده و در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که در این حالت نتایج آزمایش به مقاومت محاسبه شده بر اساس حداقل سطح فولاد، به دلیل عدم عملکرد کار سختی فولاد، نسبت به حالت قبلی نزدیکتر است.

در اینجا ذکر این نکته لازم است که با توجه به شکلهای (۱۳) و (۱۴)، مقاومت خمشی تیرهای مسلح شده با ورقهای سوراخدار نسبت به تیرهای مسلح معمولی با حجم فولاد مساوی

نتایج آزمایش خمشی تیرها



شکل ۱۵- مقایسه لنگر خمشی ترک خوردگی تیرهای مورد آزمایش با مقادیر ACI

همپوشانی، مقاومت خمشی به دست آمده در حدود ۵۵ درصد مقاومت نهایی تیر با ورق سراسری و برای نمونه با ۱۲ سانتیمتر طول وصله یعنی چهار سوراخ همپوشانی، مقاومت خمشی به دست آمده در حدود ۷۵ درصد مقاومت نهایی تیر با ورق سراسری است، جدول (۶). نسبتهای متناظر برای لنگر خمشی تسلیم به ترتیب ۶۷ و ۸۳ درصد است. با توجه به طول کم وصله‌ها (طول گیرایی کم) می‌توان مقاومت‌های به دست آمده را در مقایسه با طول وصله (گیرایی) میلگردها بسیار خوب دانست. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که با افزایش طول وصله به ۱۸ سانتیمتر (معادل هفت همپوشانی) مقاومت معادل تیر با ورق سراسری به دست آید.

شکست تیرهای با ورق وصله شده، عمدتاً به علت جداشدگی پوشش بتن زیر ناحیه وصله بر اثر تغییر شکل زیاد تیر در این محل (محل ایجاد مفصل پلاستیک) رخ داده است و چنانچه وصله‌ها در خارج از این ناحیه قرار گیرند، ممکن است این پدیده به وجود نیاید. به طور کلی نتیجه می‌شود که به علت درگیری کامل بتن و فولاد در سیستم ورق‌های سوراخدار، نیاز به استفاده از طول مهارتی زیاد و یا قلاب وجود نخواهد بود. شایان ذکر است که مقدار طول وصله بر اساس آیین‌نامه ACI به روش وصله‌های جوشی و اتصالات مکانیکی نباید کمتر از ۳۰ سانتیمتر باشد. توجه شود که طول گیرایی ورق سوراخدار را، مقدار سطح بتن عبور کرده از سوراخهای ورق تیرها تعیین می‌کند.

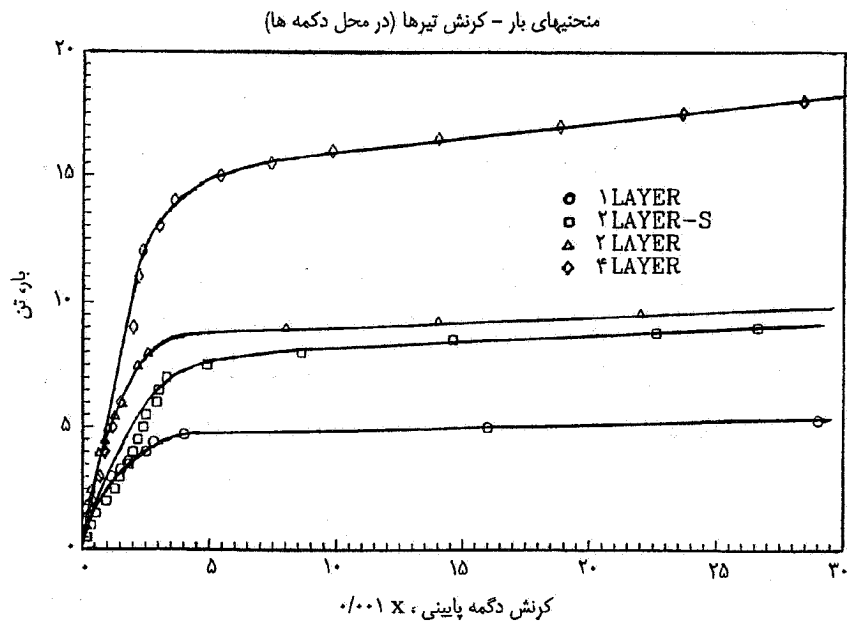
d و I_{tr} به ترتیب عمق مؤثر مقطع، درصد فولاد ورق سوراخدار نسبت به سطح مقطع کل (A_{sv}/bh) و ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته هستند. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی فولاد، مقاومت ترک خوردگی به مقدار تا بیش از دو برابر (۲/۳۵) برابر در نمونه ۴L نسبت به تیرهای مسلح معمولی افزایش می‌یابد. این نتایج، نتایج مندرج در جدول (۵) حاصل آزمایش کشش روی نمونه‌های مسلح به ورق‌های سوراخدار را تأیید می‌کند. به طور کلی بتن در درون سوراخها تحت تنشهای کششی در راستای تیر و فشاری عمود بر راستای تیر قرار می‌گیرد که نتیجتاً مقاومت ترک خوردگی تیر افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش ترک خوردگی تیرها، معادله زیر برای تعیین لنگر خمشی ترک خوردگی نسبت به رابطه محاسباتی ACI به دست آمده است

$$\frac{M_{cr}}{M_{cr}(ACI)} = 1 + k\rho_v^2 \quad (2)$$

که ρ_v درصد حجمی فولاد و مقدار ثابت k مساوی ۲۰۰۰ است. شکل (۱۵) مقایسه معادله (۲) را با نتایج آزمایش نشان می‌دهد.

تأثیر طول وصله ورق‌ها روی مقاومت

بررسی مقاومت‌های به دست آمده برای تیرهای با ورق وصله شده نشان می‌دهد که برای طول وصله ۶ سانتیمتر یعنی فقط دو سوراخ



شکل ۱۶- مقایسه منحنیهای بار - کرنش در تراز ورقهای (demec های تحتانی)

در آزمایشهای حاضر از جوش یا اتصال مکانیکی استفاده نشد و ورقها در محل وصله روی هم قرار داده شدند و تنها برای حفظ انسجام در طی بتن ریزی، دو قطعه ورق در محل وصله توسط سیم به هم بسته شدند.

با توجه به اینکه شکل و نحوه قرارگیری خاموتها به گونه‌ای بوده است که ناحیه فشاری تیرها محصور نشود، برابر 0.004 در نظر گرفته شده است. در هر صورت با توجه به مقدار نسبتاً بالای کرنش نهایی فولاد ϵ_{su} ، خطای حاصل از انتخاب دقیق ϵ_{cu} ناچیز خواهد بود. با داشتن مقادیر ϵ_{su} و ϵ_{cu} و عمق مؤثر تیر مقدار انحنا نهایی ϕ_u به دست می‌آید. مقدار کرنش تسلیم فولاد ϵ_{sy} ، بر اساس کرنش متوسط در تراز ورقها به هنگام تغییر شیب منحنیهای بار - کرنش در تراز ورقها، تعیین شده است، شکل (۱۶). بنابراین مقدار ϵ_{sy} با مقدار معمول برای کرنش تسلیم فولاد (حدود 0.002) تفاوت دارد. در کرنش 0.002 المانهای کناری ورق سوراخدار (المانهای موازی تیر) به تسلیم می‌رسند، اما با توجه به شکل (۱۶)، در این مرحله رفتار تیر هنوز نسبتاً کشسان است و شیب صعودی منحنی بار-کرنش تغییر محسوسی نمی‌کند. تغییر شیب و ورود به ناحیه تسلیم هنگامی است که المانهای مورب ورقهای سوراخدار هم به حد تسلیم نزدیک شده باشند. بنابراین ملاک انتخاب ϵ_{sy} ، لحظه تقریبی شروع رفتار مومسان بر اساس نمودارهای بار - کرنش است. با به دست آوردن محل تار خنثی، مقدار ϵ_{sy} و عمق مؤثر تیر، انحنا تسلیم ϕ_y ، به دست می‌آید.

نهایتاً شکل پذیری انحنايي ($\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$) و شکل پذیری تغییر مکان ($\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$) تعیین شده و در جدول (۸) ارائه شده‌اند.

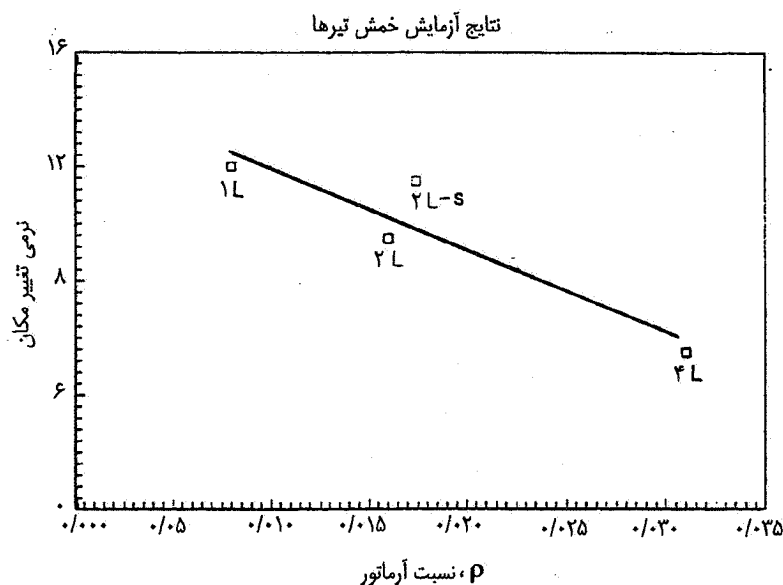
در آزمایشهای حاضر از جوش یا اتصال مکانیکی استفاده نشد و ورقها در محل وصله روی هم قرار داده شدند و تنها برای حفظ انسجام در طی بتن ریزی، دو قطعه ورق در محل وصله توسط سیم به هم بسته شدند.

۲-۲-۴ شکل پذیری

برای تعیین مقدار شکل پذیری تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار فولادی، شکل پذیری انحنايي و شکل پذیری تغییر مکان مورد توجه قرار داده شده است. انحنايي نهایی و تغییر مکان نهایی را متناظر با مقاومت خمشی نهایی تیر و یا به عبارت دیگر لحظه آغاز کاهش مقاومت تیر در نظر می‌گیریم. این نقطه از منحنی را می‌توان تقریباً معادل لحظه خردشدگی بتن ناحیه فشاری تیر دانست. تغییر مکان نقطه وسط تیرها در حین آزمایش مستقیماً اندازه‌گیری شده است. انحنايي تیر در وسط تیر در حین آزمایش به‌طور غیرمستقیم و با کمک نتایج حاصل از demec ها در تراز لایه‌های ورق به دست آمده است شکل (۱۶). با توجه به اینکه نتایج به دست آمده از demec ها فقط تا نزدیکی مقاومت نهایی به دست آمده‌اند، بر اساس شیب ثابت رابطه بار - کرنش پس از تسلیم با کمی برونیابی، مقدار کرنش متوسط در محل ورق فولادی، ϵ_{su} ، متناظر با مقاومت نهایی به دست می‌آید، شکل (۱۶). کرنش نهایی بتن،

جدول ۸- شکل پذیری انحنایی و تغییر مکان تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار

$\mu\Delta$	$\mu\phi$	δ_u (mm)	δ_y (mm)	ϕ_u (1/m)	ϕ_y (1/m)	ε_{su}	ε_{sy}	d (cm)	نوع
۱۲	۱۲	۱۷	۱/۴	۰/۳۳	۰/۰۲۷	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳۵	۱۷/۳	۱L
۹/۵	۹/۲	۱۹	۲	۰/۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۰۰۳	۱۷	۲L
۱۱/۵	۹/۷	۲۳	۲	۰/۳	۰/۰۳۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۳۳	۱۶	۲L-S
۵/۵	۷/۷	۱۴	۲/۵	۰/۲۶	۰/۰۳۴	۰/۰۴۲	۰/۰۰۳۵	۱۷/۵	۴L
۲/۳	۳/۳	۱/۸	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۱۷/۲	۲ سوراخ
۳/۳	۴/۲	۴/۷	۱/۴	۰/۰۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱	۰/۰۰۲۵	۱۷/۲	۴ سوراخ



شکل ۱۷- رابطه بین شکل پذیری تغییر مکان با درصد فولاد ورق در تیرها

لرزه خیز منظور شود. شایان ذکر است که در مناطق لرزه خیز، $\rho < 0.05\rho_b$ است و برای تیرهای مورد آزمایش معادل 0.027 است. برای $\rho = 0.027$ ، شکل پذیری حدود ۷ را نتیجه می دهد شکل (۱۷). در تیر یک لایه، کمی پس از رسیدن تیر به مقاومت خمشی نهایی، ورق فولادی دچار پارگی شده است و در نتیجه منحنی بار - تغییر مکان نزول کرده است. در تیر با دو لایه ورق فولادی، ۲L-S، ورق تحتانی پس از رسیدن تیر به مقاومت نهایی دچار پارگی شد. در نتیجه عمده حمل بار به ورق فوقانی منتقل شده است و همزمان با کاهش تدریجی بار، پارگی ورق فوقانی را هم به دنبال داشته است. این در حالی است که در تیر ۲L، دو لایه ورق تقریباً همزمان پاره شده اند و در نتیجه تا تغییر مکان بالاتری

نتایج نشان می دهند که با افزایش مقدار ρ ، شکل پذیریهای انحنایی و تغییر مکان هر دو کاهش می یابند. شکل پذیری تغییر مکان و انحنایی در تیر ۲L-S بیش از تیر ۲L است که می تواند ناشی از تسلیم شدن ورقها به طور غیر همزمان، درگیری بهتر ورقهای فاصله دار با بتن و توزیع نیروی وارده به بتن در ناحیه ای وسیعتر در نمونه تیر ۲L-S باشد. شکل (۱۷) شکل پذیری تغییر مکان را نسبت به درصد متوسط فولاد نشان می دهد. مشاهده می شود که شکل پذیری تغییر مکان بالاتر از مقدار لازم ۳ تا ۵، برای رفتار مناسب در برابر نیروهای زلزله و باز توزیع لنگر است [۳ و ۴]. شکل پذیری در تیر ۴L با مقدار فولاد برابر $\rho_{av} = 0.031$ و $\frac{\rho_{av}}{\rho_b} = 0.057$ می تواند حد مجاز برای تأمین شکل پذیری در نواحی

مقاومت خمشی نسبتاً قابل ملاحظه‌ای را حفظ کرده‌اند. البته نزول مقاومت خمشی در این تیر پس از پارگی ورقها سریعتر است. شایان توجه است که منحنی بار - تغییر مکان در این دو تیر بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت تا تغییر مکانهای خیلی زیاد در حدود ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۴۶ طول دهانه ادامه یافته است. در نمونه چهار لایه بعد از مقاومت خمشی حداکثر، نزولی ناگهانی در بار ایجاد می‌شود که نشاندهنده تردی نسبی بالاتر تیرهای با نسبت آرماتور بالاست. در هنگام آزمایش تیر مسلح به ورقهای وصله شده به طول ۶ سانتیمتر پوشش بتنی زیر ناحیه وصله پس از ترک خوردگی در امتداد طول وصله ورق، در تغییر مکانهای نسبتاً کم شکافته و کنده شد و افت ناگهانی در مقاومت تیر به وجود آمده است. لیکن، با افزایش طول وصله به ۱۲ سانتیمتر، تغییر مکان متناظر با جداشدگی پوشش بتنی زیر ورق به بیش از دو برابر حالت قبل افزایش یافته است. به طور کلی، هرچند کاهش مقاومت خمشی تیرهای با ورق وصله شده چندان قابل توجه نیست ولی کاهش شکل پذیری آنها قابل توجه است. شکل پذیری تغییر مکان در این تیرها برای طول وصله ۶ و ۱۲ سانتیمتر به ترتیب ۱۹ درصد و ۲۸ درصد شکل پذیری تیر مسلح با ورق سراسری (۱L) است، جدول (۸). در این موارد انتقال نیرو بین ورقهای مجاور در محل وصله از طریق بتنی که از سوراخهای همپوشانی عبور می‌کند انجام می‌گیرد. اگرچه با افزایش طول وصله و اتصال ورقها به صورت مکانیکی یا جوش شکل پذیری افزایش می‌یابد، لیکن به طور کلی از وصله ورقها در محل تشکیل مفاصل پلاستیک باید خودداری کرد [۲].

۳-۴- نحوه شکست

به طور کلی نتایج حاصل از آزمایشهای خمشی نشاندهنده رفتار مطلوب ورقهای سوراخدار به عنوان آرماتور خمشی تیرهاست. اندرکنش ورقها و بتن در حین بارگذاری که موجب ایجاد تنشهای چند محوری (فشار-کشش-برش) در بتن مجاور ورقها می‌شود، باعث شکست زودرس تیر نشده است. بتن محصور در سوراخهای ورقها به خوبی نیروهای وارده را تحمل کرده است و نتایج به دست آمده از کرنش سنجها بیانگر به تسلیم رسیدن فولاد ورقها در تمام جهات، حتی در جهت عرضی است، شکل (۱۸). البته نواحی مختلف ورق به تدریج به تسلیم رسیده‌اند، بدین صورت که ابتدا

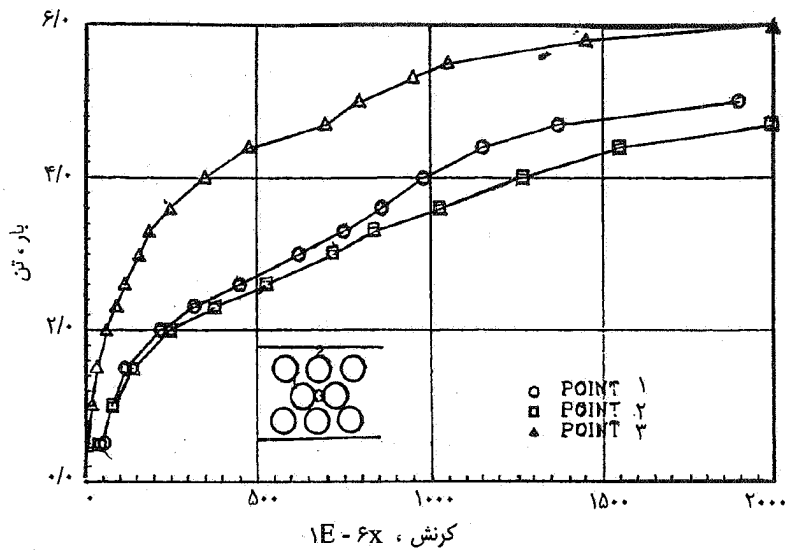
المانهای همجهت با تارهای کششی تیر و سپس المانهای قطری ورق سوراخدار و در نهایت در حوالی مقاومت نهایی تیر، المانهای عمود بر تارهای کششی تیر به تسلیم رسیده‌اند که در نتیجه موجب شیب ملایم منحنی بار-کرنش در انتقال از ناحیه کشسان به ناحیه مومسان شده است. شکافته شدن (برش) بتن در محل ورقها و جدایی پوشش زیر ورقها در تغییر شکلهای زیاد و در بخش نزولی منحنیهای بار - تغییر مکان تیرها اتفاق افتاده است. این جدا شدن فقط در محل حداکثر لنگر خمشی و تشکیل مفصل پلاستیک ایجاد شده است و در سایر نواحی تیر هیچ‌گونه شکافتگی تا پایان بارگذاری مشاهده نشده است. شکست نهایی تیرها نیز به صورت تدریجی و با پارگی مرحله به مرحله المانهای ورق تیرها انجام شده است. ابتدا المانهای موازی تیر در وسط دهانه پس از طی مرحله سخت کرنشی دچار پارگی شدند. با پارگی این المانها نیروی کششی به طور عمده به المانهای مورب انتقال یافته و ظرفیت خمشی تیر کاهش می‌یابد، لیکن شکست نهایی تیر بلافاصله اتفاق نمی‌افتد و تیر یکپارچگی خود را تا تغییر مکانهای بالاتری حفظ می‌کند تا اینکه تغییر مکان تیر به حدی برسد که سایر المانهای ورق سوراخدار در تیر هم دچار پارگی شوند.

۵- نتیجه گیری

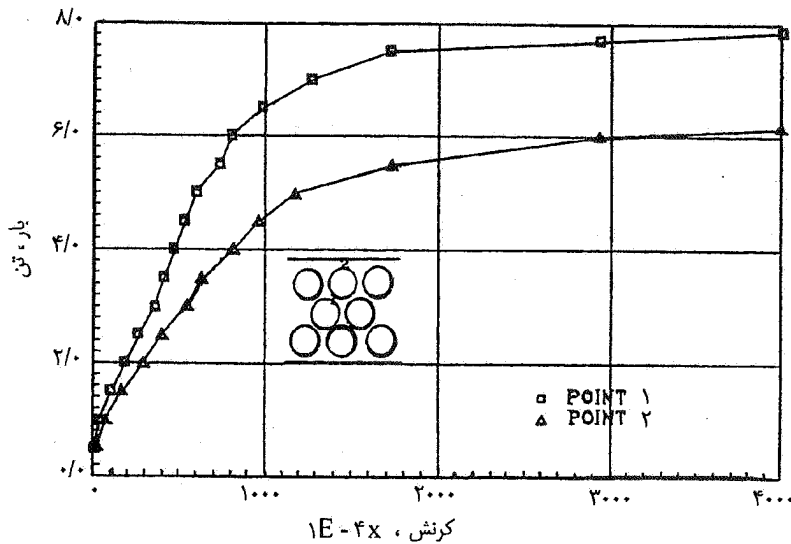
بر اساس نتایج آزمایشها کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای و خمشی روی نمونه‌های تیر مسلح به ورقهای سوراخدار موارد زیر نتیجه شده‌اند

۱- استفاده از ۱/۶ درصد حجمی ورق سوراخدار در استوانه‌های بتنی تحت کشش غیرمستقیم، مقاومت ترک خوردگی را در مقایسه با بتن ساده تا ۷۶ درصد افزایش می‌دهد. با این وجود، افزایش فاصله ورقها تأثیر آنها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. همچنین نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ورقهای سوراخدار در مقایسه با نمونه‌های مسلح به حلقه از مقاومت ترک خوردگی بیشتری برخوردارند.

۲- استفاده از ورقهای سوراخدار در ناحیه کششی تیرهای خمشی تیر مقاومت ترک خوردگی را بسته به مقدار درصد حجمی فولاد ورق تا ۱۳۵ درصد افزایش می‌دهد که این افزایش با توان دوم نسبت حجمی ورقهای سوراخدار متناسب است. لذا به کارگیری ورقهای



شکل ۱۸-الف نتایج به دست آمده از کرنش سنجهای نصب شده روی تیر ۱L



شکل ۱۸-ب نتایج به دست آمده از کرنش سنجهای نصب شده روی تیر ۲L-S

با توجه به عملکرد المانهای ورق در تمام جهات است. ۵- تسلیم و پارگی ورقها و شکست نهایی تیر روندی تدریجی دارد. المانهای مختلف ورق در مراحل مختلف بارگذاری به تسلیم می‌رسند که باعث شیب ملایم منحنی بار - تغییر مکان در انتقال از حالت کشسان به حالت مومسان می‌شود. علاوه بر آن پارگی المانهای ورقها نیز تدریجی است و تیر تا آخرین مرحله پارگی ورقها، یکپارچگی خود را حفظ می‌کند.

۶- شکل‌پذیری تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار قابل توجه بوده و برای دهانه ۹۵ سانتیمتر، تا حدود ۲ سانتیمتر تغییر مکان،

سوراخدار در طراحی مخازن بتنی مایعات که دیواره‌های آنها تحت اثر کشش و یا خمش - کشش توام قرار دارند و کنترل ترک‌خوردگی از نظر آب‌بندی مهم است، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۳- شکل خاص ورقها و عبور بتن از لابلای سوراخها درگیری بسیار مناسبی بین بتن و ورقهای سوراخدار ایجاد می‌کند. این درگیری باعث اندرکنش مناسب بتن و ورقها در ناحیه کششی شده و نتیجتاً بهبود رفتار تیر را فراهم می‌آورد.

۴- مقاومت خمشی تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار بیشتر از مقاومت بر اساس سطح مقطع حداقل ورق (ضعیفترین ناحیه ورق)

یعنی حدود ۲ درصد طول دهانه در لحظه رسیدن به مقاومت نهایی قابل حصول است.

۷- شکل پذیری تیرها با افزایش نسبت فولاد کاهش می یابد. با این وجود، برای نسبت آرماتور ۰/۰۳۱ (حدود ۰/۵۷ρ_b) شکل پذیری تغییر مکان ۵/۵ بوده که بیش از حداقل لازم برای مناطق لرزه خیز است.

۸- ایجاد فاصله در بین ورقها در منطقه کششی تیرها تأثیر اندکی روی مقاومت و شکل پذیری در مقایسه با ورقهای روی هم قرار داده شده دارد.

۹- نتایج تیرهای با ورقهای وصله شده، نشانگر نیاز به طول نسبتاً کم وصله برای حفظ مقاومت و شکل پذیری است. بدین صورت که با تعداد کمی سوراخ همپوشانی، پیوستگی بین ورقها، برای انتقال نیرو فراهم می شود.

۱۰- نظر به اینکه ورقهای سوراخدار در تمام جهات در منطقه کششی اعضای خمشی عمل می کنند، پیشنهاد می شود تحقیقاتی در زمینه رفتار خمشی دالهای بتنی مسلح به ورقهای سوراخدار انجام شود.

۱۱- با توجه به اینکه کنترل خوردگی آرماتورهای فولادی در مناطق

واژه نامه

1. local - global (L-G)
2. global (G)

3. splitting mode of failure

مراجع

۱. خالو، ع. و مرشد، ر. رفتار بتن محصور شده با ورقهای سوراخدار، پذیرفته شده برای چاپ در نشریه دانشگاه علم و صنعت.

2. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, p. 369, 1995.

3. Park, R., and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., p. 769, 1975.

4. *Recommended Lateral Force Requirements & Tentative Commentary*, Siesmology Committee, Structural Engineers Association of California, p. 123, 1988.