

# رفتار تیرهای بتنی مسلح به ورقهای فولادی سوراخدار

علیرضا خالو<sup>\*</sup> و رضا مرشد<sup>\*\*</sup>

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۷۷/۶/۳۱ - دریافت نسخه‌هایی: 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 لا یه ورق سوراخدار در کشش برای ارزیابی مقاومت و شکل پذیری مورد آزمایش خمی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم بروزیلی روی نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ورقهای سوراخدار، نشانگر افزایش قابل ملاحظه سختی و مقاومت ترک خوردنگی بتن نسبت به نمونه‌های غیرمسلح و مسلح به حلقه‌های فولادی است. نتایج حاصل از آزمایش‌های خمی روی تیرها، قابلیت این ورقها را به عنوان آرماتور طولی در کشش برای نیل به مقاومت قابل قبول در سطوح بهویژه ترک خوردنگی، 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 شده 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، به عنوان آرماتور 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 خورده‌گی به دلیل شباهت آن در ترک خورده‌گی تیر مسلح به ورقهای سوراخدار مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایشها نیز روی تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار وصله شده انجام شد تا تخمینی از طول گیرایی 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، به راحتی 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 می‌شود. فراهم آوردن سیستمی که بتواند عملکرد عضو سازه‌ای بتی را مازاد بر ایجاد تسليح در جهت نیروی کششی، یکپارچه و کلی کند حائز اهمیت است. گزارش پژوهه تحقیقاتی در این مقاله مربوط به روشی جدیداز تسليح، برای افزایش مقاومت ترک خورده‌گی، 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 ترک خورده‌گی بتن، حفظ مقاومت نهایی و همچنین نیل به شکل‌پذیری مطلوب فراهم می‌آید. بهطور کلی در بتن تحت فشار، سیستمی محصور کننده به صورت عرضی و به شکل ورق سوراخدار در طول عضو این قابلیتها را میسر می‌سازد [۱].

در اعضای تحت کشش و یا خمش، به کارگیری ورقهای سوراخدار در منطقه کشش ضمن اینکه به همراه بتن به صورت 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 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 تغییر شکلهای زیاد حفظ کند.

این ورقهای سوراخدار می‌توانند کاربرد وسیعی را نیز دارا باشند. به‌طور مثال برای استفاده به عنوان شبکه آرماتور دالهای و دیوارها می‌توانند مناسب باشند. حتی می‌توان نوارهایی از آنها را بریده و به عنوان آرماتور کششی در تیرها مورد استفاده قرار داد. با توجه به درگیری کامل ورقهای سوراخدار با بتن، طول گیرایی 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 به صورت اتکایی و نه به صورت اصطکاکی خواهد بود. اگرچه

جدول ۱- برنامه آزمایش‌های کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای

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

نسبتاً یکنواخت و تأثیر این ورقها در جلوگیری از بازشدن ترکهای بتن و به تأخیر انداختن شروع ترک خوردن بتن، آزمایش‌هایی روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بتنی ( $15 \times 30 \text{ cm}$ ) مسلح به ورقهای سوراخدار فولادی با عملکرد موضعی - کلی<sup>۱</sup> انجام گرفت. عملکرد موضعی بدین صورت است که هر سوراخ بتن را به طور موضعی تحت محصوریت قرار می‌دهد و عملکرد مجموعه این سوراخها نیز به طور کلی بتن آن سوراخ را محصور می‌کند. پارامتر متغیر در این آزمایشگاهی روی نمونه‌های تیر مسلح به ورقهای سوراخدار در خمین 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 جدول (۱) ارائه شده است.

### ۲-۱- آزمایش خمین

برای بررسی رفتار ورقهای سوراخدار به عنوان آرماتور کششی تیرها، آزمایش‌هایی روی تیرهای بتنی به ابعاد  $110 \times 20 \times 18$  سانتی‌متر (عرض، عمق و طول) انجام گرفت. طول تیر با توجه به محدودیت در ساخت ورقهای سوراخدار  $110$  سانتی‌متر درنظر گرفته شده است. ضخامت و اندازه سوراخهای ورقهای فولادی یکسان درنظر 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

شکل پذیری اعضای سازه‌ای بتنی است. در این راستا از ورقهای سوراخدار به عنوان آرماتور اصلی کششی در اعضای خمینی استفاده شده است.

### ۳- برنامه آزمایشها

به منظور شناخت و بررسی تأثیر ورقهای سوراخدار فولادی به عنوان آرماتورهای طولی در اعضای خمینی، مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های تیر مسلح به ورقهای سوراخدار در خمین 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 درنظر 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 ثابت‌نگهداشت نسبت اجزای مخلوط بتن ثابت نگهداشته شد.

### ۳-۱- آزمایش کشش

به منظور بررسی عملکرد ورقهای سوراخدار در وضعیت کشش

جدول ۲- برنامه آزمایش‌های خمی روی نمونه‌های تیر

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

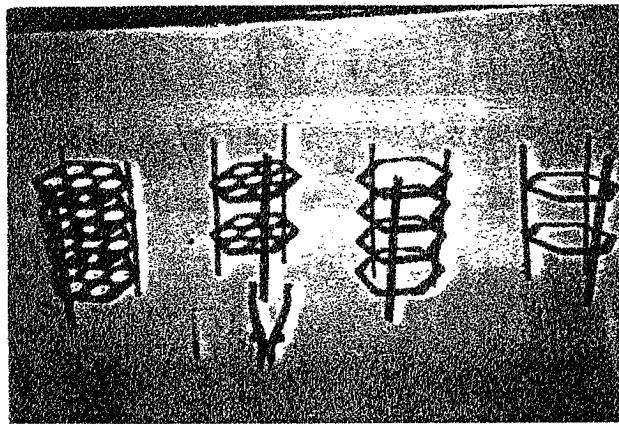
استاندارد ASTM-E8 از ورق مورد استفاده بریده شد و پس از نصب کرنش سنج تحت آزمایش قرار گرفت تا منحنی کامل تنش-کرنش فولاد مصرفی به دست آید. ورقهای سوراخدار مورد استفاده در نمونه‌های استوانه‌ای به شکل شش ضلعی منتظم به ضلع ۷/۵ سانتیمتر درآورده شدند، شکل (۱). سپس این ورقهای در یک دسته ۱۲ تایی روی هم جوش شده و به کمک مته با دقت سوراخکاری شدند. قطر سوراخهای این ورقهای چهار برابر اندازه بزرگترین درشت‌دانه بتن، یعنی  $۰/۱ \pm ۰/۳۶$  میلیمتر است. برای تهیه حلقه‌های فولادی، قسمت داخلی این ورقهای بیرون آورده شده است، شکل‌های (۲) و (۴). پس از اتمام سوراخکاری و بازکردن جوشها، گوشه‌های تیز ورقهای گرد شده‌اند، شکل‌های (۱)، (۲) و (۴). قطعات بریده شده  $۱۰/۹ \times ۱۷/۴$  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 ورقهای  $۰/۱ \pm ۰/۴۸$  میلیمتر است. شایان ذکر است که برای استفاده کاربردی از این

مختلف طول وصله، مورد آزمایش قرار گرفت.

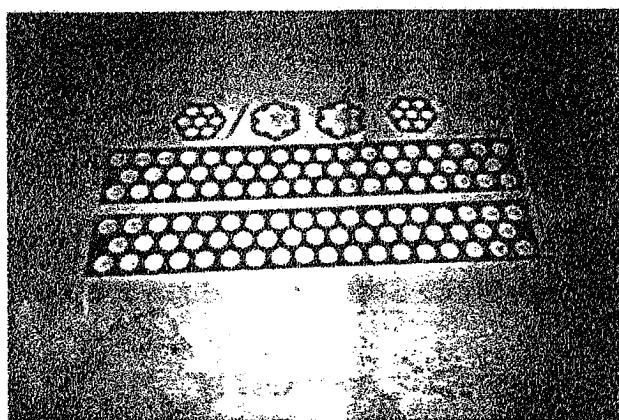
برای تعیین وضعیت تنش در ورق فولادی در مراحل مختلف بارگذاری تیر، تعدادی از آزمایش‌های خمی با نصب کرنش سنج روی ورقهای فولاد انجام گرفته است. جزئیات برنامه آزمایش‌های خمی در جدول (۲) ارائه شده است. در مجموع شش تیر بتنی و برای هر تیر، چهار نمونه استوانه‌ای ساده برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شدند. کلیه 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  $۱۵ \times ۱۳$  سانتیمتر برای استفاده در استوانه‌ها و ۱۲ قطعه  $۱۰/۹ \times ۱۷/۴$  سانتیمتر برای استفاده در تیرها از ورق بریده شد. همچنین دو نمونه کششی بر طبق



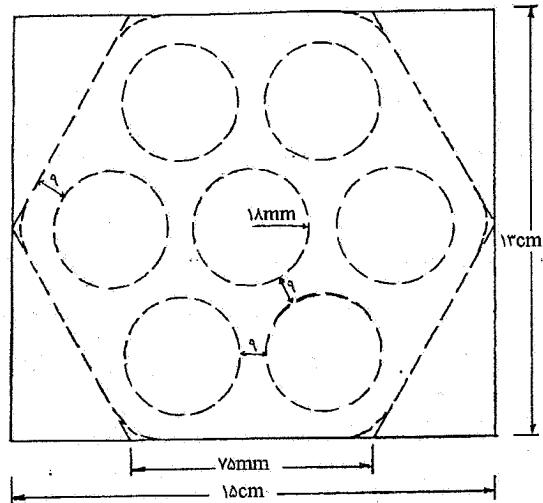
شکل ۲- ورقهای فولادی سرهمبندی شده برای قرارگیری  
در قالبهای استوانه‌ای



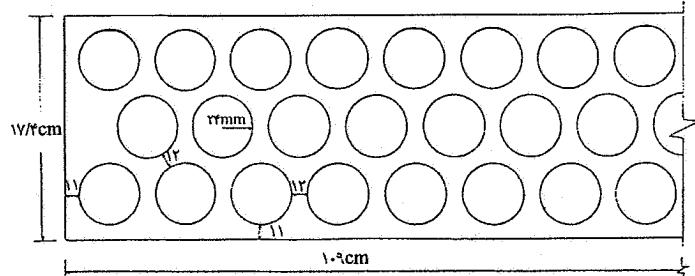
شکل ۴- ورقهای سوراخدار مورد استفاده در نمونه‌های  
تیر و استوانه‌ای

#### ۴-۳- مخلوط بتن

سیمان مصرفی، از نوع I پرتلند است. از ماسه با مدول نرمی ۴، چگالی ۲/۶۲ و جذب آب ۰/۰٪ استفاده شده است. درشتی شن با توجه به ابعاد سوراخهای ورقها و سهولت بتن‌ریزی و تراکم تعیین شده است. حداقل اندازه دانه حدود یک چهارم قطر سوراخها یعنی ۷/۱۲ 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 آیین نامه ACI-۲۱۱ صورت گرفته است. مخلوط بتن برای مقاومت فشاری حدود  $300 \text{ kg/cm}^2$  و



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



شکل ۳- ابعاد ورق مورد استفاده در نمونه‌های تیر

ورقهای، 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 متنه انجام شده است که با این روش در مقایسه با سوراخکاری به روش پانچنیگ، ترکهای مویی کمتری در اطراف سوراخها ایجاد می‌شود. وجود این ترکهای مویی باعث تمرکز تنفس 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 ظرف 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.

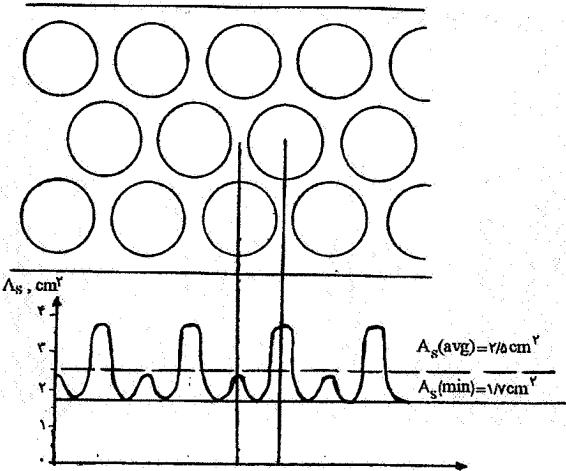
فوacial مورد نظر و جلوگیری از جایه‌جا شدن آنها در حین بتون‌ریزی، از میلگردهای ساده نمره ۶ که در فوacial مورد نظر بر اساس فاصله بین ورقها شیار داده شده‌اند، استفاده شده است. این میلگردها به کمک مفتولهای نازکی در محل شیارها به ورقها بسته شده‌اند، شکل (۲).

بتن مورد استفاده در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای، بتنی نسبتاً روان با اسلامپ ۸ سانتیمتر و با شن رودخانه‌ای ریز تهیه شد تا بتواند بعراحتی از بین سوراخهای ورقها عبور کرده و به خوبی در لابلای ورقها جای گیرد. قبل از بتون‌ریزی اسکلتنهای ساخته شده توسط ورقهای فولادی سوراخدار و میلگردهای نگهدارنده با دقت درون استوانه‌های فولادی ( $15 \times 30 \text{ cm}$ ) که درون آنها روغنکاری شده بود، قرار داده شدند. سپس قالبهای فلزی روی میز و پرمه قرار داده شدند و بتون‌ریزی نمونه‌ها همراه با ارتعاش تا تراکم مناسب نمونه‌ها انجام شد. در هنگام بتون‌ریزی مراقبت دقیق به عمل آمد تا اینکه ورقها حالت افقی خود را از دست ندهند.

پس از بتون‌ریزی، سطح قالبهای با گونی مرتبط پوشانده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و برای مدت حدود ۳۰ روز با گونی خیس به طور مداوم مرتبط 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.

### ۳-۶- طراحی و ساخت نمونه‌های خمشی

برای جلوگیری از شکست برشی تیرها، با توجه به فرضیات اولیه، بر اساس ضوابط آینه‌نامه ACI ۳۱۸ (۲) خاموتهای برشی طراحی و در تیرها تعییه شدند. فرض اولیه برای تنفس تسلیم فولاد ورقها  $280 \text{ kg/cm}^2$  بوده است. سطح مقطع ورق سوراخدار،  $A_s$  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  $1/7$  سانتیمتر مربع درنظر گرفته می‌شود. بر اساس نحوه



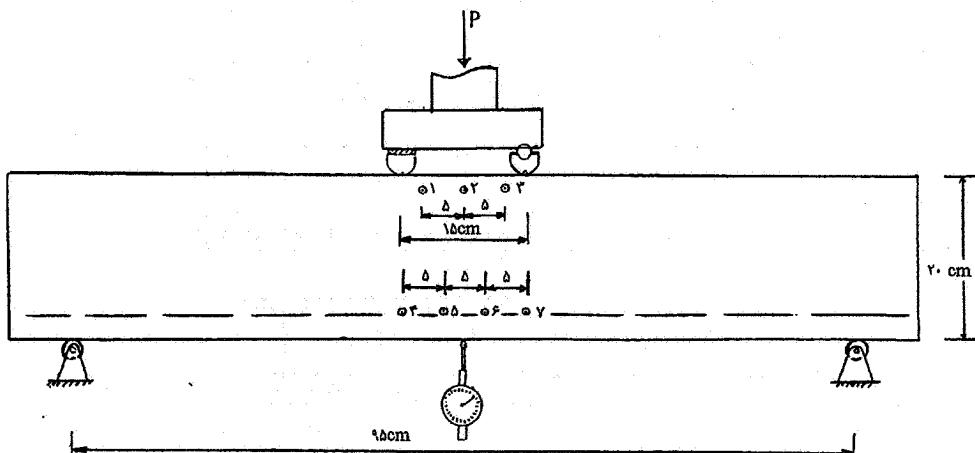
شکل ۵- تغییرات سطح مقطع در طول ورق مورد استفاده در نمونه‌های تیر

جدول ۳- نسبتهاي اختلاط بتون

بتن تیرها	بتن استوانه ها	
$165 \text{ kg/m}^3$	$189 \text{ kg/m}^3$	آب
۳۶۴ "	۴۰۹ "	سیمان
۷۵۶ "	۶۰۶ "	دانه درشت (مريط)
۱۰۲۸ "	۱۰۵۹ "	دانه ریز (مريط)
۰/۰۵ "	۰/۵۵ "	نسبت آب به سیمان

کارایی لازم برای بتون‌ریزی در بین لایه‌ها و سوراخهای ورق و زیر ورقهای تیر انجام گرفت. نسبتهاي اختلاط برای هر متر مکعب بتون، با درنظر گرفتن اسلامپ حدود ۸ سانتیمتر در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای ساده حاصل از آزمایشها در زمان آزمایش حدود  $350 \text{ kg/cm}^2$  برای تیرها و استوانه‌های مسلح به دست آمده است. برای نیل به مقاومت حدود  $350$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، نمونه‌ها در سهین ۲۸ الی ۳۵ روز آزمایش شدند.

### ۴-۵- ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با توجه به نیاز اجرای دقیق و استقرار ورقهای سوراخدار در



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

جدول ۴- ظرفیت لنگر خمی و برشی تخمینی تیرها

نوع	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	$\rho$	$\rho'$		$M_n$ (kg-m)	$v_n$ (kg)	$v_c^*$ (kg)	$v_s = v_n - v_c$ (kg)
۱L	۱/V	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
۷L-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

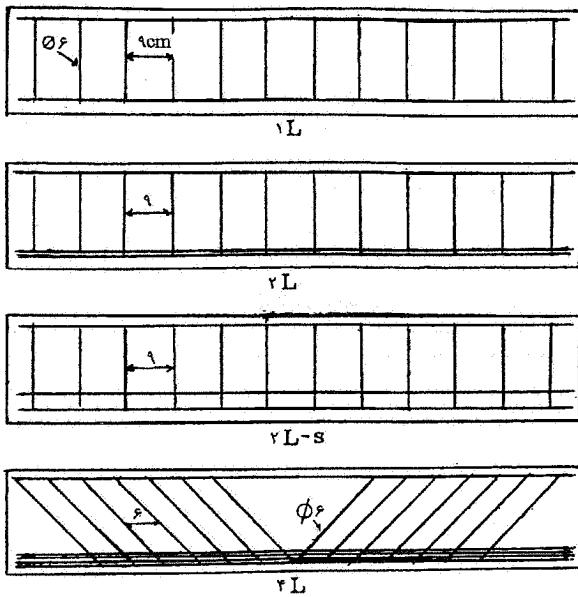
(۱) مقدار محاسبه شده براساس فرضیات اولیه برای  $c_f$  و  $f_y = ۲۸۰۰ \text{ kg/cm}^2$

(۲) مقدار محاسبه شده براساس مقادیر واقعی  $c_f = ۳۵۰ \text{ kg/cm}^2$  و  $f_y = ۳۰۰۰ \text{ kg/cm}^2$

\* از رابطه ساده‌تر ACI برای برش به دست آمده است [۷].

ظرفیت خمی و برشی مقطع در تیرها محاسبه شده است، جدول (۴). در این جدول در زیر ستون "نوع"، "۱L، ۲L، ۴L و ۷L-S" به ترتیب یک لایه، ۲ و ۴ لایه ورق بدون فاصله و ۲L-S نشانده‌ند. دو لایه با فاصله ۲ سانتیمتر را نشان می‌دهند. مقدار پوشش ورقها

بارگذاری تیرها در شکل (۶) داریم که با استفاده از معادله‌های طراحی ACI۳۱۸ و با فرض  $c_f = ۳۰۰ \text{ kg/cm}^2$ ،  $f_y = ۲۸۰۰ \text{ kg/cm}^2$  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 ویبراتور 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 کرنش‌سنج 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 خمی نیز ساخته شدند. طول وصله ورق فولادی بهنحوی انتخاب شد تا تنفس فولاد ورق از تنش تسلیم کمتر باشد و نتیجتاً نوع شکست شکافتگی<sup>۳</sup> 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  $240 \text{ kg/cm}^2$  استفاده شده است. برای تیر یک لایه، نیاز به خاموت حداقل است و حداقل فاصله خاموتها  $d/2 = 9 \text{ cm}$  است و داریم

$$A_{v(\min)} = \frac{2/5 b_w S}{f_y} = \frac{2/5 \times 0.0566 \text{ cm}^3}{0/283} = 0.0236 \text{ cm}^2$$

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

$$V_S = \frac{A_v f_v d}{S} = 2560 \text{ kg} > 1006 \text{ kg}$$

که بیش از مقدار مورد نیاز است. برای تأمین مقاومت برشی در تیر ۴L خاموتها برای برشی با زاویه  $45^\circ$  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 بتون مسلح و بتن ساده

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

آزمایش کشش برزیلی روی نمونه‌های استوانه‌ای بتون مسلح به ورقهای سوراخدار و حلقه، اندازه‌گیری تغییر فاصله عمودی بین فکه‌ها در حین بارگذاری توسط تغییر طول سنج عقرهای با دقت ۱/۰۰٪ اینچ انجام شده است. بارگذاری در نمونه‌های استوانه‌ای مسلح، تا خردشدنگی بتون با توجه به فشار نافعال 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.

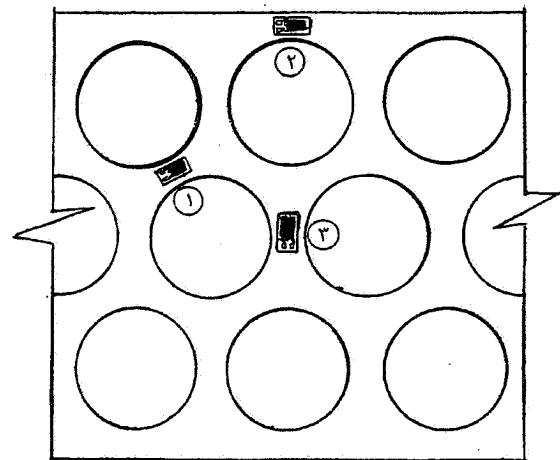
کرنش سنجهای نصب شده روی ورقهای تیرهای ۱L و ۲L به نحوی نصب شده‌اند که در راستای تنش اصلی حداقل قرار گیرند. با توجه به هندسه ورق، تنش در سایر جهات را می‌توان ناقص فرض کرد.

#### ۴- نتایج آزمایشها و بحث پیرامون آنها

در آزمایش کشش استوانه، مشابه آزمایش خمش تیر، ورقهای سوراخدار ناحیه کششی بتون 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، ۴G) در هنگام مشاهده اولین ترک قابل رویت در امتداد قطر استوانه و بار عمودی در جدول (۵) آورده شده است. تنش ترک خوردگی تا قبل



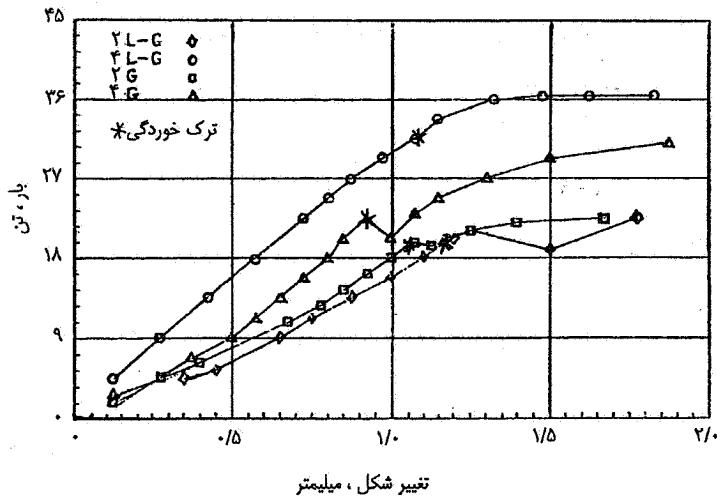
شکل ۸- محل نصب کرنش سنجها روی ورقهای در وسط تیر خامو تهای برشی بسته نبوده‌اند.

#### ۷-۳- عمل آوری نمونه‌ها

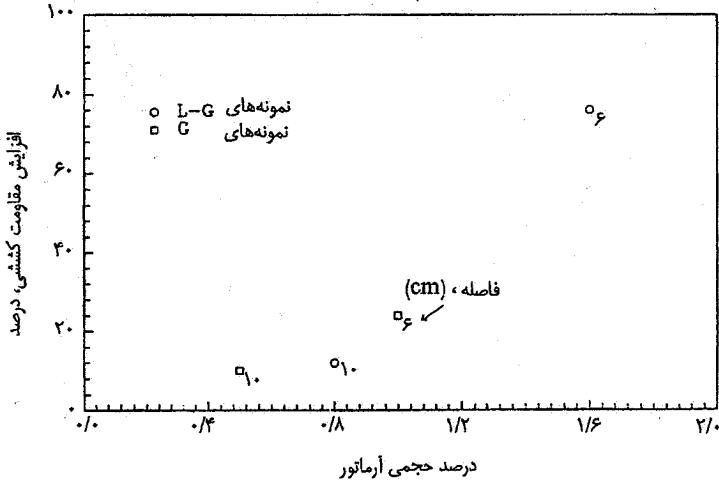
پس از بتون ریزی، سطح قالبها با گونی مرتضوب پوشانده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و برای مدت ۳۰ تا ۳۵ روز با گونی خیس به طور مداوم مرتضوب نگهداشته شده‌اند. قبل از آزمایش، نمونه‌ها به مدت حدوداً ۲۴ ساعت در مجاورت هوادر آزمایشگاه قرار داشته‌اند. کلیه نمونه‌های فشاری قبل از آزمایش کلاهک‌گذاری شدند.

#### ۸-۳- جزئیات آزمایشها

آزمایش کشش روی دو نمونه از ورق فولادی، تنش تسليم  $300\text{ kg/cm}^2$  و مقاومت نهایی  $400\text{ kg/cm}^2$  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 ( $\rho$ ) نیز در جدول (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای فاصله ۱۰ سانتیمتری ورقهای سوراخدار و حلقه‌ها (۲G و ۴L-G) افزایش به دست آمده در مقاومت کششی ناچیز است. اما برای فاصله کمتر یعنی ۶ سانتیمتر و بهویژه 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 ۴L-G نسبت به نمونه G، ۵۷ درصد است، که نشانگر عملکرد محصورکنندگی بهتر نمونه‌های G-L با کاهش فاصله ورقه است. شبیب نسبی رابطه بار - تغییر شکل نیز با افزایش مقاومت ترک خورده افزایش یافته است که نشانگر افزایش سختی نمونه‌های با

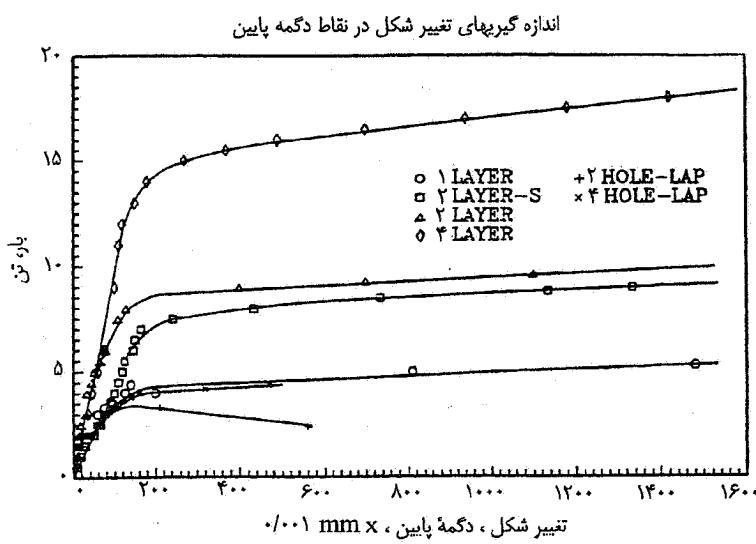
از ترک خوردن نمونه‌ها از معادله زیر تعیین شده است

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

که در آن  $P$  بار وارد،  $D$  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 بتنه به صورت دو نیمه مجزا در آمده است و توزیع تنشهای داخل آن تفاوت خواهد کرد. شبیب 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 خورده‌گی، تسلیم و نهایی حاصل از آزمایشها

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



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

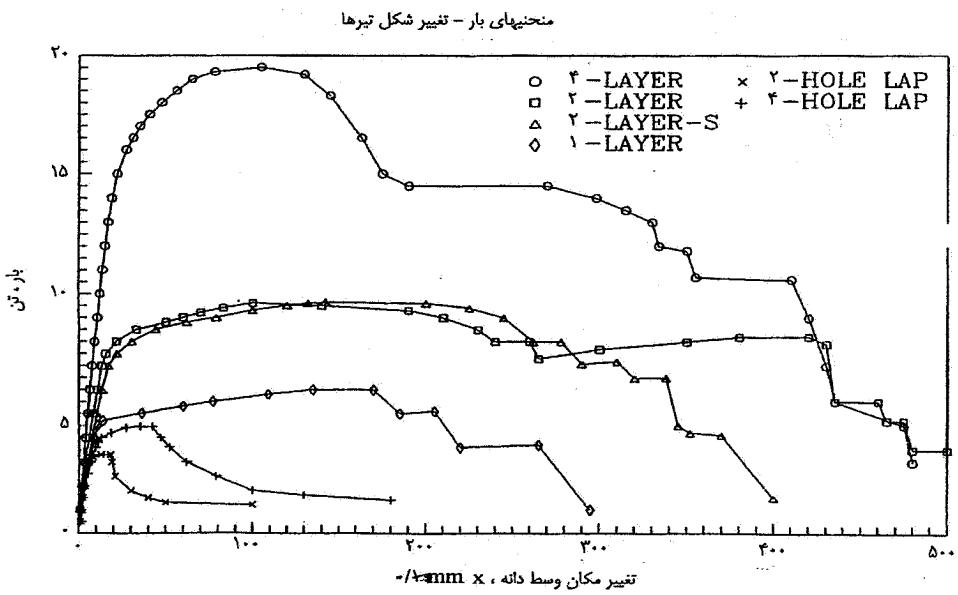
۴-۲- تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار بررسی نتایج آزمایش‌های خمشی بر اساس دو معیار مقاومت و شکل‌پذیری انجام شده است

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

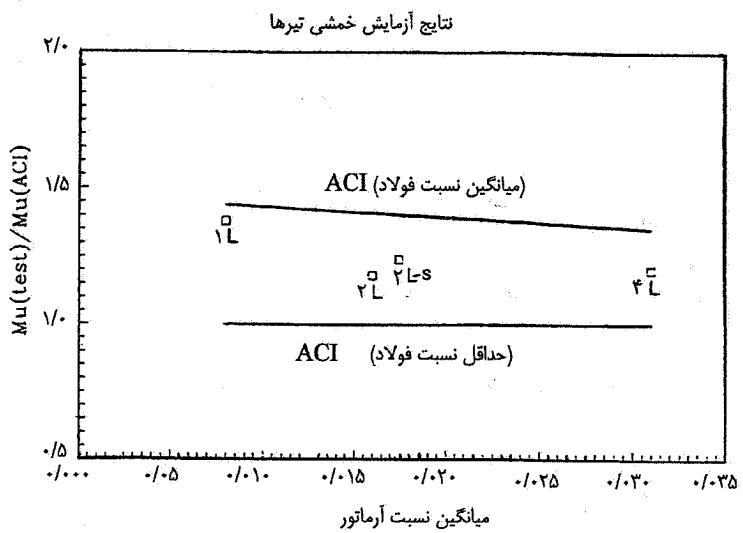
اصولاً از آنجاکه کرنش متناظر تنش ترک خورده‌گی بسیار کوچک است، نمی‌توان از ظرفیت کششی کامل فولاد برای افزایش مقاومت ترک خورده‌گی بتن استفاده کرد. لیکن بر اساس نتایج آزمایش‌های کششی روح بتن‌های محصور می‌توان تیجه گرفت که با استفاده از ورقهای سوراخدار می‌توان راندمان فولاد را در جلوگیری از ترک خورده‌گی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

#### ۴-۱- مقاومت خمشی

برای ارزیابی مقاومت خمشی تیرها از لنگر خمشی ترک خورده‌گی ( $M_{cr}$ ), لنگر خمشی تسلیم ( $M_y$ ) و لنگر خمشی نهایی ( $M_u$ ) استفاده به عمل آمده است، جدول (۶). منحنی بار-تغییر شکل حاصل از demec 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،  $\rho$ ، مقاومت خمشی افزایش و شکل‌پذیری تیرها همانند تیرهای مسلح



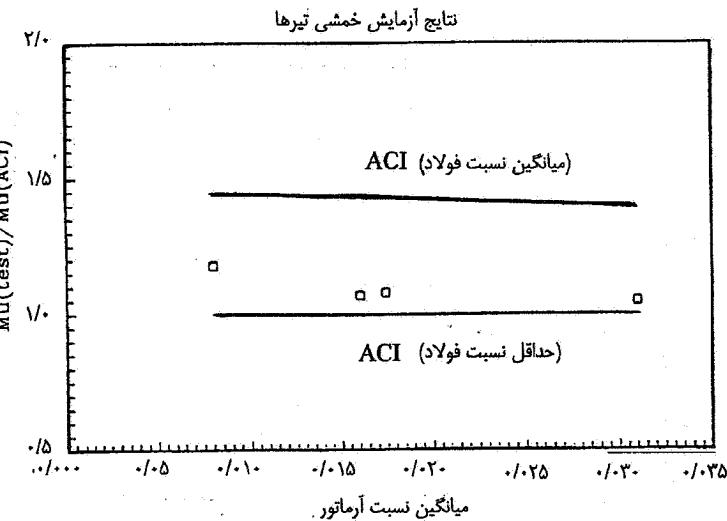
شکل ۱۲- منحنی های کامل بار - تغییر مکان تیرهای مسلح به ورقهای سوراخدار



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

$\mu_{0.054}$  بدست آمده است، لیکن باید توجه داشت که فرمول  $\mu$  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). قاعده‌تاً 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 ورقهای مشارکت بتن

به آرماتورهای معمولی کاهش یافته است. بر اساس مقدار  $\mu$ ، مقادیر مقاومتهای خمشی متناظر برای تیرهای معمولی بر اساس روابط ACI-۳۱۸ 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  $\mu$  بر اساس آینه نامه ACI حدود



شکل ۱۴- مقایسه لنگر خمثی ترک خوردگی تیرها مورد آزمایش با مقادیر ACI

جدول ۷- لنگر خمثی ترک خوردگی تیرها براساس آیین نامه ACI و مقایسه با نتایج آزمایش

$\frac{M_{cr(test)}}{M_{cr(ACI)}}$	$M_{cr}$ (kg-m)	$I_{tr}$ (cm $^3$ )	$\rho$	$d$ (cm)	$A_{Avg}$ (cm $^2$ )	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

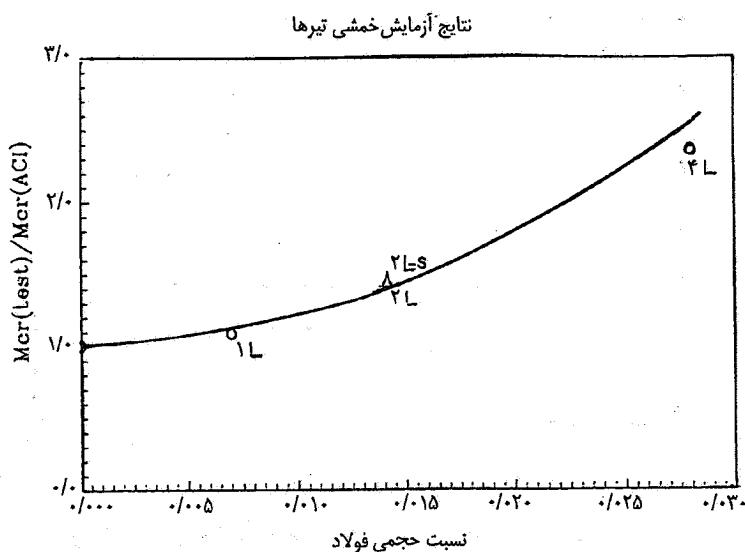
کمتر است که با توجه به اینکه در ورقهای سوراخدار همه فولاد در سمت مورد نظر برای خمث قرار نمی‌گیرد امری واضح است. ولی می‌توان انتظار داشت که مقاومت ورقهای سوراخدار در دالهای دو طرفه که فولاد در دو سو وارد عمل می‌شود خیلی بهتر باشد. با این وجود پارامترهای دیگری از قبیل شکل پذیری و کنترل ترک خوردگی نیز در 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 بخشای بعدی رجوع شود).

لنگر خمثی 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 دزنظر گرفتن تنفس حدکث 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. بهویژه اینکه در مورد تیرهای ۱L و ۲L-S که ورقها به صورت تک لایه با بتن اندترکنش دارند افزایش مقاومت حاصله بیشتر است. به عبارت دیگر عدم یکنواختی تنفس در المانهای مختلف ورق، سبب توزیع تنفس و بالابردن مقاومت المانهای ضعیفتر می‌شود.

لنگر خمثی 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 خمثی تیرهای مسلح شده با ورقهای سوراخدار نسبت به تیرهای مسلح معمولی با حجم فولاد مساوی استقلال، سال ۱۸، شماره ۲، اسفند ۱۳۷۸



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 و صله یعنی چهار سوراخ همپوشانی، مقاومت خمشی به دست آمده در حدود ۷۵ درصد مقاومت نهایی تیر با ورق سراسری است، جدول (۶). نسبتهای منتظر برای لنگر خمشی سراسری می‌باشد.

نسبتهای (گیرایی کم) می‌توان مقاومتهای به دست آمده را در مقایسه با (طول گیرایی کم) می‌گردد. با توجه به طول کم و صله‌ها تسلیم به ترتیب ۶۷ و ۸۳ درصد است. با توجه به طول کم و صله‌ها (طول گیرایی کم) می‌توان مقاومتهای به دست آمده را در نتایج به نظر می‌رسد که با افزایش طول و صله به ۱۸ سانتیمتر (معادل هفت همپوشانی) مقاومت معادل تیر با ورق سراسری به دست آید.

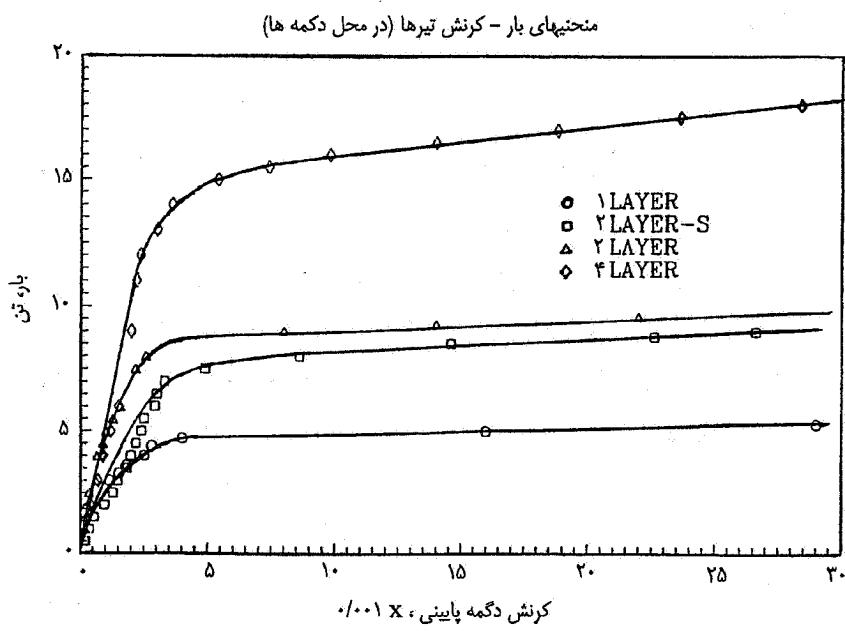
شکست تیرهای با ورق و صله شده، عمدتاً به علت جداشدنی پوشش بتن زیر ناحیه و صله بر اثر تغییر شکل زیاد تیر در این محل (محل ایجاد مفصل پلاستیک) رخ داده است و چنانچه و صله‌ها در خارج از این ناحیه قرار گیرند، ممکن است این پدیده به وجود نیاید. به طور کلی نتیجه می‌شود که به علت درگیری کامل بتن و فولاد در سیستم ورقهای سوراخدار، نیاز به استفاده از طول مهاری زیاد و یا قلاب وجود نخواهد بود. شایان ذکر است که مقدار طول و صله بر اساس آیین نامه ACI به روش و صله‌های 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.

$\rho$  و  $I_{tr}$  به ترتیب عمق مؤثر مقطع، درصد فولاد ورق سوراخدار نسبت به سطح مقطع کل ( $A_{av}/bh$ ) و ممان ایزرسی مقطع تبدیل یافته هستند. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی فولاد، مقاومت ترک خوردگی به مقدار تا بیش از دو برابر ( $2/35$ ) 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 بتون 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 تیرهای، 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  $\rho_v$  درصد حجمی فولاد و مقدار ثابت  $k$  مساوی ۲۰۰۰ است. شکل (۱۵) مقایسه معادله (۲) را با نتایج آزمایش نشان می‌دهد.

تأثیر طول و صله ورقهای روی مقاومت بررسی مقاومتهای به دست آمده برای تیرهای با ورق و صله شده نشان می‌دهد که برای طول و صله ۶ سانتیمتر یعنی فقط دو سوراخ



شکل ۱۶- مقایسه منحنیهای بار - کرنش در تراز ورتهای demec های تحتانی

$\epsilon_{cu}$  با توجه به اینکه شکل و نحوه قرارگیری خاموتها به گونهای بوده است که ناحیه فشاری تیرها محصور نشود، برابر  $40\%$  در نظر گرفته شده است. در هر صورت با توجه به مقدار نسبتاً بالای کرنش نهایی فولاد  $\epsilon_{sy}$ ، خطای حاصل از انتخاب دقیق  $\epsilon_{cu}$  ناچیز خواهد بود. با داشتن مقادیر  $\epsilon_{sy}$  و  $\epsilon_{cu}$  و عمق مؤثر تیر مقدار انحنای نهایی  $\phi$ ، به دست می آید. مقدار کرنش تسلیم فولاد  $\epsilon_{sy}$ ، بر اساس کرنش متوسط در تراز ورها به هنگام تغییر شیب منحنیهای بار - کرنش در تراز ورها، تعیین شده است، شکل (۱۶). بنابراین مقدار  $\epsilon_{sy}$  با مقدار معمول برای کرنش تسلیم فولاد (حدود  $20\%$ ) تفاوت دارد. در کرنش  $20\%$  المانهای کناری ورق سوراخدار (المانهای موازی تیر) به تسلیم می رستند، اما با توجه به شکل (۱۶)، در این مرحله رفتار تیر هنوز نسبتاً کشسان است و شیب صعودی منحنی بار - کرنش تغییر محسوسی نمی کند. تغییر شیب و ورود به ناحیه تسلیم هنگامی است که المانهای مورب ورها سوراخدار هم به حد تسلیم نزدیک شده باشند. بنابراین ملاک انتخاب  $\epsilon_{sy}$ ، لحظه تقریبی شروع رفتار موسمان بر اساس نمودارهای بار - کرنش است. با بدست آوردن محل تارختی، مقدار  $\epsilon_{sy}$  و عمق مؤثر تیر، انحنای تسلیم  $\phi$ ، به دست می آید.

نهایتاً شکل پذیری انحنایی  $\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\delta_u}{\delta_y}$  و شکل پذیری تغییر مکان  $\frac{\delta_u}{\delta_y} = \mu$  تعیین شده و در جدول (۸) ارائه شده اند.

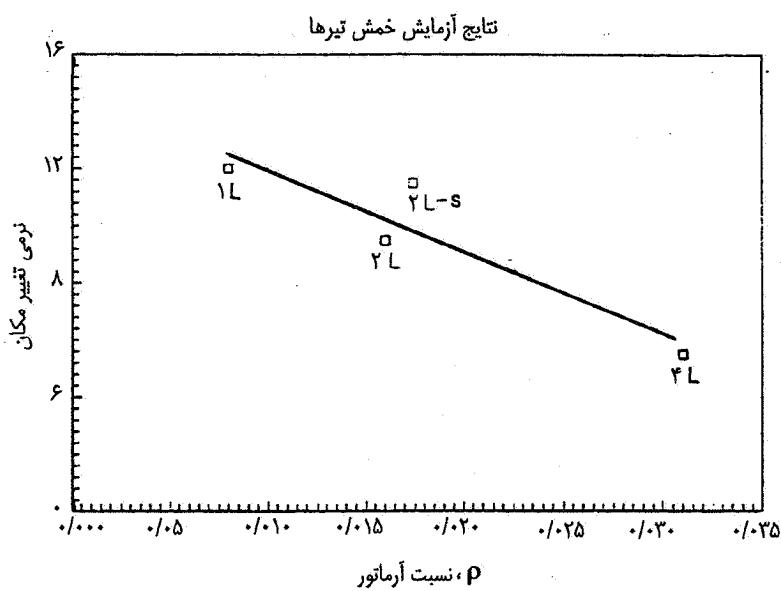
در آزمایشها حاضراز جوش یا اتصال مکانیکی استفاده نشد و ورها در محل وصلة روی هم قرار داده شدند و تنها برای حفظ انسجام در طی بتون ریزی، دو قطعه ورق در محل وصلة توسط سیم به هم بسته شدند.

## ۲-۲-۴ شکل پذیری

برای تعیین مقدار شکل پذیری تیرهای مسلح به ورها سوراخدار فولادی، شکل پذیری انحنایی و شکل پذیری تغییر مکان مورد توجه قرار داده شده است. انحنای نهایی و تغییر مکان نهایی را متناظر با مقاومت خمسی نهایی تیر و یا به عبارت دیگر لحظه آغاز کاهش مقاومت تیر در نظر می گیریم. این نقطه از منحنی را می توان تقریباً معادل لحظه خردشدنگی بتون ناحیه فشاری تیر دانست. تغییر مکان نقطه وسط تیرها در حین آزمایش مستقیماً اندازه گیری شده است. انحنای تیر در وسط تیر در حین آزمایش به طور غیرمستقیم و با کمک نتایج حاصل از demec ها در تراز لایه های 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 آمدند، بر اساس شیب ثابت رابطه بار - کرنش پس از تسلیم با کمی برونویابی، مقدار کرنش متوسط در محل ورق فولادی،  $\epsilon_{sy}$ ، متناظر با مقاومت نهایی به دست می آید، شکل (۱۶). کرنش نهایی بتون،

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

$\mu_\Delta$	$\mu_\phi$	$\delta_u$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\phi_u$ (1/m)	$\phi_y$ (1/m)	$\varepsilon_{su}$	$\varepsilon_{sy}$	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

لرزه‌خیز منظور شود. شایان ذکر است که در مناطق لرزه‌خیز،  $\rho_b/0.5\rho_{av} < 0.027$  م است و برای تیرهای مورد آزمایش معادل  $0.027 = \rho_b/0.5\rho_{av}$  است. برای  $\rho_b/0.027 = \rho$ ، شکل پذیری حدود ۷ را نتیجه می‌دهد 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،  $2L-S$ ، ورق تحتانی پس از رسیدن تیر به مقاومت نهایی دچار پارگی شد. در نتیجه عمدۀ 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  $2L$ ، دو لایه ورق تقریباً همزمان پاره شده‌اند و در نتیجه تا تغییر مکان بالاتری

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقدار  $\rho$ ، شکل پذیری‌های انحنایی و تغییر مکان هر دو کاهش می‌یابند. شکل پذیری تغییر مکان و انحنایی در تیر  $2L-S$  بیش از تیر  $2L$  است که می‌تواند ناشی از تسلیم شدن ورقها به طور غیر همزمان، درگیری بهتر ورقهای فاصله‌دار با بتن و توزیع نیروی واردہ به بتن در ناحیه‌ای وسیعتر در نمونه تیر  $2L-S$  باشد. شکل (۱۷) شکل پذیری تغییر مکان را نسبت به درصد متوسط فولاد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود 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  $4L$  با مقدار فولاد برابر  $\rho_{av}/0.031 = 0.57$  می‌تواند حد مجاز برای تأمین شکل پذیری در نواحی

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 مومنان 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 عمدۀ به المانهای مورب انتقال یافته و ظرفیت خمشی تیر کاهش می‌یابد، لیکن شکست نهایی تیر بلا فاصله 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

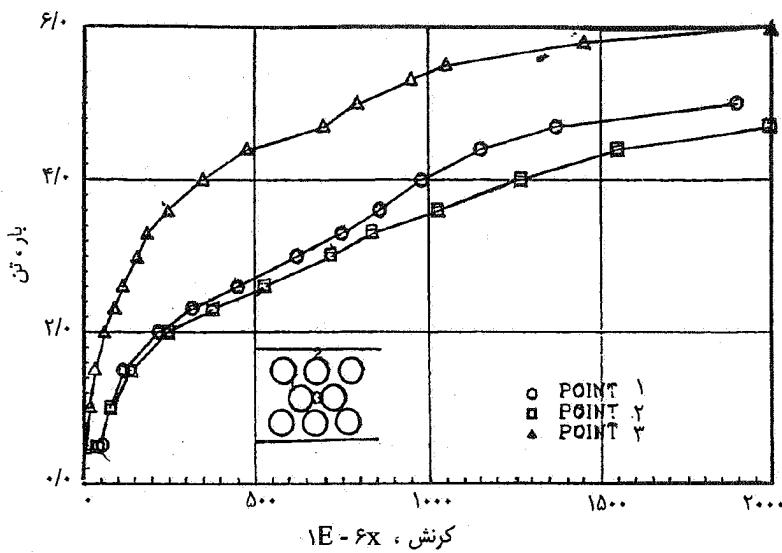
۱- استفاده از  $1/6$  درصد حجمی ورق سوراخدار در استوانه‌های بتنی تحت کشش غیرمستقیم، مقاومت ترک‌خوردگی را در مقایسه با بتن ساده تا  $76$  درصد افزایش می‌دهد. با این وجود، افزایش فاصله ورقها تأثیر آنها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. همچنین نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ورقهای سوراخدار در مقایسه با نمونه‌های مسلح به حلقة از مقاومت ترک‌خوردگی بیشتری برخوردارند.

۲- استفاده از ورقهای سوراخدار در ناحیه کششی تیرهای خمشی تیر مقاومت ترک‌خوردگی را بسته به مقدار درصد حجمی فولاد ورق تا  $135$  درصد افزایش می‌دهد. که این افزایش با توان دوم نسبت حجمی ورقهای سوراخدار متناسب است. لذا به کارگیری ورقهای

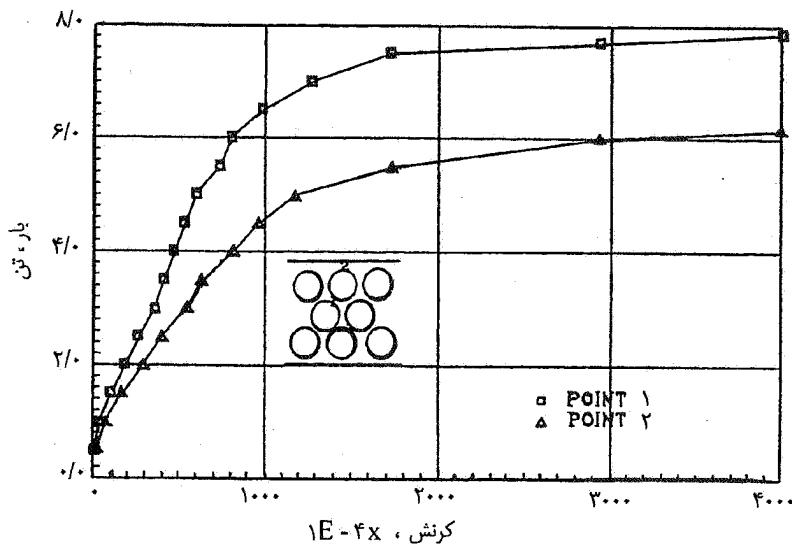
مقاومت خمشی نسبتاً قابل ملاحظه‌ای را حفظ کرده‌اند. البته نزول مقاومت خمشی در این تیر پس از پارگی ورقها سریعتر است. شایان توجه است که منحنی بار - تغییر مکان در این دو تیر بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت تا تغییر مکانهای خیلی زیاد در حدود  $0/028$  تا  $0/046$  طول دهانه ادامه یافته است. در نمونه چهار 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  $6$  سانتی‌متر پوشش بتنی زیر ناحیه وصله پس از ترک‌خوردگی در امتداد طول وصلة 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  $12$  سانتی‌متر، تغییر مکان متناظر با جداسدگی 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 وصلة  $6$  و  $12$  سانتی‌متر به ترتیب  $19$  درصد و  $28$  درصد شکل پذیری افزایش می‌یابد، لیکن به طور کلی از وصله ورقها 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].

## ۴- نحوه شکست

به طور کلی نتایج حاصل از آزمایش‌های خمشی نشانده‌نده رفتار مطلوب ورقهای سوراخدار به عنوان آرماتور خمشی تیرهای است. اندرکنش ورقها و بتن در حین بارگذاری که موجب ایجاد تنشهای چند محوری (فسار- کشش- برش) در بتن مجاور ورقها می‌شود، باعث شکست زودرس تیر نشده است. بتن محصور در سوراخهای ورقها به خوبی نیروهای واردۀ را تحمل کرده است و نتایج بدست آمده از کرنش‌سنجهای 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



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



شکل ۱۸-ب تاییج 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 ملائم منحنی بار - تغییر مکان در انتقال از حالت کشسان به حالت موسمان می‌شود. علاوه بر آن پارگی المانهای ورقها نیز تدریجی است و تیر تا آخرین مرحله پارگی ورقها، یکپارچگی خود را حفظ می‌کند.

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

سوراخدار در طراحی مخازن بتُنی مایعات که دیواره‌های آنها تحت اثر کشنش و یا خمش - کشنش توام قرار دارند و کنترل ترک خوردنگی از نظر آب بندی مهم است، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۳- شکل خاص ورقها و عبور بتُن از لابلای سوراخها درگیری بسیار مناسبی بین بتُن و ورقهای سوراخدار ایجاد می‌کند. این درگیری باعث اندرکنش مناسب بتُن 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)

خورنده (گرم و مرطوب و با حضور یونهای مخرب) و همچنین در دیگر مناطق هم اکنون به طور گسترده‌ای مورد توجه محققان است، لذا استفاده از ورقهای سوراخدار کامپوزیتی (همانند کامپوزیت فیر شیشه) به جای فولاد پیشنهاد می‌شود. اگرچه هدف اصلی تحقیق حاضر استفاده از ورقهای کامپوزیتی از قبل دارای سوراخ بوده است، لیکن به علت عدم امکان دستیابی به ورقهای فایبر گلاس مناسب سبب شد تا از ورقهای فولادی در این تحقیق استفاده به عمل آید.

### قدرتانی

بدین وسیله از حمایتهای معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف در انجام این پروژه تحقیقاتی قدردانی نموده. از مدیر و کارکنان کارگاه شهید شوریده، مدیر کارگاه مرکزی، کارکنان آزمایشگاه بتن و مصالح آقایان چراغعلی، بختیاری، سلیمانی، قبیری و جمالی‌پور، مدیر آزمایشگاه مکانیک جامدات دانشگاه صنعتی شریف آقای دکتر حسینی و کارکنان آزمایشگاه آقایان ابراهیمی و شاملو در انجام این مطالعه تحقیقاتی قدردانی و تشکر به عمل آید.

يعني حدود ۲ درصد طول دهانه در لحظه رسیدن به مقاومت نهايى قابل حصول است.

۷- شکل پذيری تيرها با افزایش نسبت فولاد كاهش می‌يابد. با اين وجود، برای نسبت آرماتور  $0.031 / 0.057 P_b$  (حدود  $5/5$ ) شکل پذيری تغيير مكان  $5/5$  بوده که بيش از حداقل لازم برای مناطق لرزه خizer است.

۸- ايجاد فاصله در بين ورقها در منطقه كششی تيرها تأثير اندکی روی مقاومت و شکل پذيری در مقایسه با ورقهای روی هم قرار داده شده دارد.

۹- نتایج تيرهای با ورقهای وصله شده، نشانگر نیاز به طول نسبتاً کم وصله برای حفظ مقاومت و شکل پذيری است. بدین صورت که با تعداد کمی سوراخ همپوشانی، پیوستگی بين ورقها، برای انتقال نیرو فراهم می‌شود.

۱۰- نظر به اينكه ورقهای سوراخدار در تمام جهات در منطقه کششی اعضا خمشی عمل می‌کنند، پیشنهاد می‌شود تحقیقاتی در زمينه رفتار خمشی دالهای بتی مسلح به ورقهای سوراخدار انجام شود.

۱۱- با توجه به اينكه كنترل خوردنگی آرماتورهای فولادی در مناطق

### واژه نامه

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

3. spilitting mode of failure

### مراجع

1. خالو، ع.، و مرشد، ر.، رفتار بتی محصور شده با ورقهای سوراخدار، پذيرفته 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.