

# بهینه‌سازی مدل خرابایی روش بست و بند در تیرهای عمیق با بازشو

مهدی مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد رضا اسفحانی\* (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵  
 دوره ۲ - شماره ۲/۱ - شماره ۲/۱ - ص ۷۷-۶۷

اخیراً استفاده از روش بست و بند<sup>۱</sup> برای طراحی مستقیم تیرهای عمیق با و بدون بازشو گسترش یافته است؛ به طوری که بسیاری از آیین‌نامه‌های معتبر، روش مذکور را جایگزین روش‌های طراحی پیشین کرده‌اند. لیکن پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که این روش قادر به مدل‌سازی دقیق رفتار تیرهای عمیق، به خصوص تیرهای عمیق با بازشو نیست. برخی از معایب این روش به علت عدم انطباق خرابای فرضی روش بست و بند و نواحی تنش واقعی سازه ایجاد می‌شود. استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل FH<sup>۲</sup> برای تعیین مدل خرابایی روش بست و بند را می‌توان از جمله راه‌های اصلاح آن دانست. در این پژوهش با هدف بررسی روش FH، ۴ تیر عمیق بتن مسلح با بازشو ساخته و آزمایش شده‌اند. این نمونه‌ها شامل ۲ نمونه بتن مسلح و ۲ نمونه بتن مسلح با الیاف فولادی بوده‌اند. خرابای مدل بست و بند نمونه‌های بتن مسلح براساس الگوی حاصل از روش بهینه‌سازی FH تعیین و بر این اساس نمونه‌ها طراحی و ساخته شده‌اند. نتایج استفاده از روش FH نشان داده است که تیرهای بتن مسلح که خرابای اولیه‌ی آنها با استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل تعیین شده بود، با کمیته‌ی تقویت ممکن بار مناسبی را تحمل کرده‌اند.

mehdimoradi@live.com  
 esfahani@um.ac.ir

واژگان کلیدی: تیر عمیق، بتن مسلح، بهینه‌سازی، بازشو، بست و بند.

## ۱. مقدمه

قرارگیری در رفتار و مقاومت مناسبی را در تیر فراهم کنند.<sup>[۱]</sup> در نظر گرفتن این نواحی در تیرهای عمیق ساده، که رفتاری تقریباً شناخته‌شده دارند، مشکل به نظر نمی‌رسد، اما در تیرهای عمیق با بازشو، که نواحی تنش بسیار پیچیده‌ی دارند، تعیین مناطق قرارگیری المان‌های روش بست و بند و همچنین پوشش این مناطق کار دشواری است.

حضور بازشو در تیرهای عمیق غالباً مورد نیاز سازه‌هاست، اما آیین‌نامه‌های معتبر، روشی برای طراحی این اعضا ارائه نکرده‌اند.<sup>[۲]</sup>

بررسی آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح با بازشو نشان داده است که شکل نمودار نیرو-تغییر مکان به شدت تحت تأثیر مدل خرابایی است.<sup>[۱]</sup> همچنین انتخاب طرح خرابایی نامناسب موجب ترک‌های غیرقابل قبول در باری کمتر از بار سرویس می‌شود.<sup>[۱]</sup> برای حل این مشکل، که در واقع دلیل آن نبود تقویت مناسب در محل‌های بحرانی در بتن است (نواحی دارای تنش کششی بیش از حد ترک‌خوردگی بتن)، پژوهشگران با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به اصلاح روش بست و بند پرداخته‌اند.<sup>[۳-۶]</sup> پژوهشگران در سال ۲۰۰۱ از روش بهینه‌سازی پیکره با معیار کمیته‌ی میلگرد برای یافتن مدل خرابایی بهینه استفاده کرده‌اند و بررسی‌های آزمایشگاهی مدل‌های بست و بند حاصل از روش مذکور نشان داده است که این مدل‌ها قادر به تحمل تغییر شکل‌های خمیری قابل توجهی بوده‌اند، اما

در روش‌های عمومی طراحی سازه‌های بتنی معمولاً از فرضیه‌ی برنولی استفاده می‌شود. اما زمانی که در سازه، ناپیوستگی هندسی شدید یا اعمال نیروی متمرکز یا هر شرایطی که توزیع کرنش را به مقدار قابل توجهی غیرخطی کند، وجود داشته باشد، استفاده از این فرض موجب خطای قابل توجهی در پاسخ می‌شود. تیرهای عمیق به علت کرنش غیرخطی و توزیع تنش پیچیده به وسیله‌ی تئوری برنولی قابل تحلیل و طراحی نیستند و جزء سازه‌های ناپیوسته در نظر گرفته می‌شوند. روش بست و بند را می‌توان به‌عنوان یک روش قدرتمند در طراحی مستقیم این اعضا نام برد. طراحی به روش بست و بند بر این فرض استوار است که در مناطق ناپیوسته، جریان تنش موجود در عضوهایی با تنش تک‌محور خرابایی ایده‌آل‌سازی می‌شود. در نتیجه با در نظر گرفتن خرابایی فرضی متشکل از اعضاء فشاری و اعضاء کششی درون سازه‌های بتنی، این سازه قابل تحلیل و طراحی می‌شود. برای یک هندسه‌ی مشخص، مدل‌های خرابایی متفاوتی ارائه می‌شود. این مدل‌ها اگرچه از نظر استاتیکی مقاومت مناسبی را ارائه می‌کنند، اما پژوهش‌های پیشین نشان داده است که دستک‌های فشاری و کششی باید منطبق بر نواحی تنش مربوط به خود

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۵/۲۱، پذیرش ۱۳۹۳/۷/۲۸

## ۲. بهینه‌سازی پیکره‌ی سازه با استفاده از روش

### بهینه‌سازی همگن کامل (FH)

اگر بار  $f$  در بخش  $\Gamma$  از مرز نمونه اعمال شود و تغییر مکان آن ناحیه با  $u$  نشان داده شود، کار انجام شده توسط نیروی  $f$  از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است: [۸]

$$w = \int_{\Gamma} f \cdot u \, ds \quad (1)$$

پس اگر یک آرایش خاص تقویت در بین تمام حالات ممکن، کمینه‌ی کار را منجر شود، آن آرایش سختی نمونه را بیشینه می‌سازد. در روش بهینه‌سازی FH، سازه به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود. [۹] بدین معنا که دو ماده در نظر گرفته می‌شود که به خوبی با هم ترکیب شوند (ماده‌ی ۱ با سختی زیاد و یک ماده با سختی بسیار کم). سازه به میکروسازه‌هایی تقسیم و چگالی بهینه‌ی مصالح سخت ( $\theta_{opt}$ ) در هر میکروسازه محاسبه می‌شود. [۹] پیکره‌ی حاصل از بهینه‌سازی به صورت یک ماده‌ی مرکب است و ساخت سازه بر اساس آن، بسیار هزینه بر تمام می‌شود. پس برای اینکه نیاز به استفاده از مصالح مرکب نباشد، باید مقدار چگالی اصلاح شود، تا مقداری بین ۰ و ۱ داشته باشد. برای این کار از مصالح ساختگی همسان‌گرد با اعمال تابع جریمه استفاده و پیکره اصلاح می‌شود. [۹] پس از اصلاح پیکره، چگالی به‌عنوان تابعی از مختصات مصالح مقداری بین ۰ و ۱ اختیار می‌کند، به طوری که چگالی ۱ به معنای وجود و چگالی صفر به معنای عدم وجود مصالح سخت بیان می‌شود. پیکره‌ی حاصل، پاسخ نهایی مسئله‌ی بهینه‌سازی خواهد بود.

برای حل مسائل بهینه‌سازی از نرم‌افزار رایگان Free FEM استفاده می‌شود. [۱۰] نرم‌افزار Free FEM یک نرم‌افزار اجزاء محدودی است که برای استفاده از آن باید مسئله‌ی بهینه‌سازی شامل روابط بهینه‌سازی و مشخصات سازه (مشخصات مصالح، مرزها، شرایط مرزی، چگونگی شبکه‌بندی، و غیره) از طریق یک کد ++C وارد آن شود. در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، [۱] برای روش بهینه‌سازی همگن کامل کد نرم‌افزاری مناسبی آماده شده است. در ادامه، پژوهشگران دیگری برای سازه‌های بتن مسلح از این کد نرم‌افزاری استفاده کرده‌اند. [۸] در این پژوهش نیز از همین کد برای استخراج شکل بهینه‌سازی شده برای نمونه‌های بتن مسلح استفاده شده است.

## ۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

بررسی طرح‌های خرابایی مختلف بست و بند نیاز به تعداد نمونه‌های فراوانی دارد، که منجر به هدررفت هزینه و زمان زیادی می‌شود. برای اجتناب از این کار از پژوهش‌های پیشین، نمونه‌هایی انتخاب شده‌اند. در این پژوهش با حفظ شرایطی نزدیک به آزمایش‌های پیشین، مدل‌های بهینه‌سازی شده با طرح‌های پیشین مقایسه شده‌اند. بر این اساس، ۴ تیر عمیق با بازو جهت انجام آزمایش در نظر گرفته شده است. دو تیر عمیق از بتن مسلح (RC#۱ و RC#۲) و دو تیر عمیق از بتن مسلح با الیاف فولادی (SFRC#۱ و SFRC#۲) ساخته شده‌اند. مشخصات هندسی این نمونه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

### ۱.۳. مشخصات مصالح

در جدول ۱، مشخصات بتن مصرفی و در جدول ۲، مشخصات آرماتورهای فولادی استفاده شده در نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

برخی از نمونه‌ها در باری کمتر از بار پیش‌بینی شده توسط روش بست و بند گسیخته شده‌اند. [۶] برخی پژوهشگران در پژوهش دیگری در همان سال، [۲] محیط پیوسته‌ی سازه با پوشش تعداد زیادی از اعضاء خرابایی را به یک محیط گسسته با یک خرابای نامعین تبدیل کرده و تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی آنها، حجم خرپا بوده است. در فرایند بهینه‌سازی طبق روش مذکور، المان‌های خرابایی با توجه به ناحیه‌ی تنش حاصل از تحلیل المان محدود اصلاح یا حذف می‌شوند و مدل خرابای نهایی روش بست و بند حاصل می‌شود. این روش پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات، عملکرد خوبی برای دست‌یابی به مدل خرابایی مناسب برای تیرهای عمیق بتن مسلح داشته است، اما تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ی در زمینه‌ی امکان‌پذیری کاربرد روش ذکر شده در تیرهای عمیق با بازو انجام نشده است. [۷] همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)، [۸] برای اصلاح روش بست و بند از روش بهینه‌سازی همگن کامل (FH) استفاده شده است. در روش مذکور ضمن تخمین شکل قرارگیری مصالح، سختی سازه به میزان بیشینه‌ی خود می‌رسد. این روش برخلاف روش‌های استفاده شده در مطالعات پیشین، [۷] مشخصات الگوریتمی مناسبی دارد. به عبارت دیگر، همیشه به پاسخ بهینه هم‌گراست، مقادیر اولیه‌ی محدود نیاز دارد، و هزینه‌ی محاسباتی آن مناسب است. [۸] با در نظر گرفتن چهارچوب و به کارگیری روش بهینه‌سازی، می‌توان محل قرارگیری دقیق خرپای فرضی را مشخص کرد.

پژوهشگران در سال ۲۰۱۲ نیز از روش بهینه‌سازی (FH) برای تعیین مدل بست و بند چند نمونه‌ی به کار برده شده در ادبیات بست و بند استفاده کرده‌اند. سپس با به کار بردن یک روش المان محدود غیرخطی نتایج حاصل از مدل‌های بهینه شده را با نتایج دیگر طرح‌های موجود مقایسه کرده‌اند. آنها ثابت کردند که طرح خرابایی آنها هم‌زمان با تحمل باری مناسب، موجب کاهش ترک‌های سازه و کمینه‌سازی وزن آرماتور مورد نیاز می‌شود. [۸] اگرچه این روش بهینه‌سازی در اصل به‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی برای استفاده در حالت کشسان خطی در نظر گرفته شده بود، اما برای مسائلی با رفتار غیرخطی نیز مفید واقع شده بود. [۸]

یکی از مشکلات اصلی در طراحی سازه‌ها با روش بست و بند، انتخاب یک مدل خرابایی منطبق بر نواحی واقعی تنش است. استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل برای به دست آوردن مدل خرابایی، نتایج امیدوارکننده‌ی در بر داشته است، که حاصل مدل‌سازی رایانه‌ی بوده‌اند. مدل‌سازی رایانه‌ی همواره همراه با فرض‌های ساده‌ساز است و بسیاری از مسائل کاربردی در این مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی به خصوص برای تیرهای عمیق با بازو، که رفتار ناشناخته‌ی دارند بدون تأیید کار آزمایشگاهی، قابل اعتماد نیستند. با در نظر گرفتن مطالب عنوان شده و همچنین پیشنهاد برخی پژوهشگران (۲۰۱۲)، [۸] مبنی بر نیاز بررسی آزمایشگاهی، روش و کاربرد آن برای نمونه‌های بیشتر، راستی‌آزمایی نتایج روش بهینه‌سازی همگن کامل به صورت آزمایشگاهی ضروری به نظر می‌رسد.

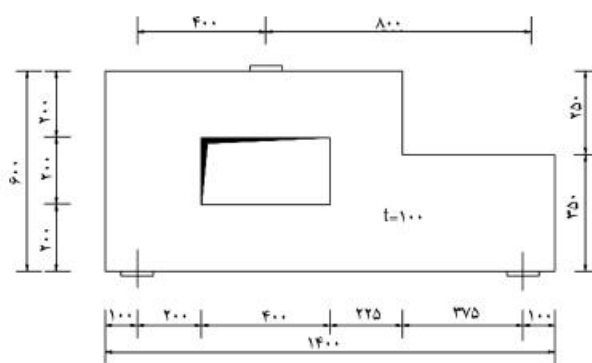
در این نوشتار برای اولین بار روش FH به صورت آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن نمونه‌ی متفاوت بررسی و نتایج حاصل از کاربرد آن با نتایج آزمایشگاهی دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. بررسی نسبت ظرفیت آزمایشگاهی به وزن می‌گردد با به‌عنوان عامل کنترل بهینه‌سازی و اثر الیاف فولادی در رفتار تیرهای عمیق از جمله اهداف این پژوهش بوده‌اند. موارد پر اهمیتی چون گسترش ترک، مود شکست، بار اولین ترک و طراحی نواحی برنولی متصل به نواحی ناپوسته نیز بررسی شده‌اند.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن در نمونه‌های آزمایشگاهی.

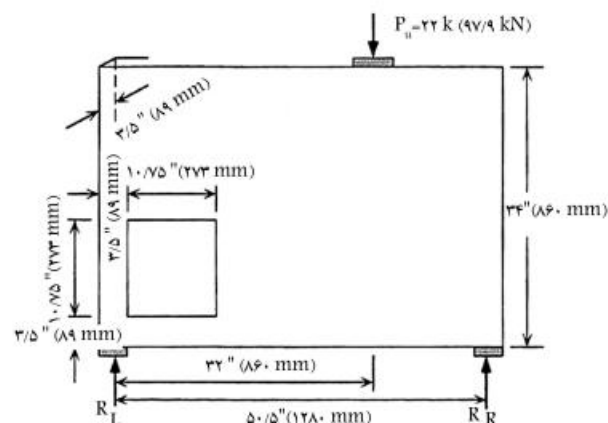
نام نمونه				واحد	
SFRC#۲	SFRC#۱	RC#۲	RC#۱		
۰٫۴۹۶	۰٫۴۰۶	۰٫۵۲	۰٫۴۵۴	-	نسبت آب به سیمان
۲۸٫۳	۴۱٫۴	۲۸٫۳	۴٫۴۱	MPa	مقاومت فشاری ۲۸ روزه پیش‌بینی شده
۳۶۹	۵۲۵	۳۴۳	۴۵۱	kg/m <sup>۳</sup>	سیمان
۹۲۸	۸۵۴	۹۶۵	۹۰۰	kg/m <sup>۳</sup>	ماسه
۷۶۰	۶۸۷	۷۹۰	۷۴۱	kg/m <sup>۳</sup>	شن
۱۱۰	۷۵	۹۵	۸۰	mm	اسلامپ
۰٫۶۴۱	۰٫۶۵۶	-	-	kg/m <sup>۳</sup>	فوق روان‌کننده
۱٫۵	۱٫۵	-	-	-	درصد الیاف فولادی
۳۵	۴۴	۳۵	۴۶	MPa	مقاومت فشاری ۲۸ روزه میانگین

۲.۳. مشخصات نمونه‌ها

شکل ۱، یکی از مثال‌های طراحی پر استفاده در ادبیات تیرهای عمیق با بازشو است.<sup>[۱۲]، [۱۳]</sup> دلیل انتخاب این هندسه را می‌توان پیچیدگی قابل توجه توزیع تنش در آن دانست. این تیر دو بازشو دارد، که یکی در زیر محل بارگذاری و دیگری در بخش بالایی قرار دارد. ردینک در ویژه‌نامه‌ی ACI-۳۱۸، چهار طرح متفاوت بست و بند را برای تیر شکل ۱ پیشنهاد کرده و راه دستیابی به طرح مناسب را فقط ارزیابی آزمایشگاهی این طرح‌ها دانسته (شکل ۳) و تأکید کرده است که اگر روشی مناسب برای طراحی این تیر استفاده شود، برای طراحی بسیاری از تیرهای مشابه نیز مناسب خواهد بود.<sup>[۱۱]</sup> این طرح‌ها در ادامه در پژوهش دیگری (۸، ۲۰۰۸)،<sup>[۱۲]</sup> برای دستیابی به مدلی مناسب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش نیز از مجموع ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی، دو نمونه با نام‌های RC#۱ و SFRC#۱، که مشابه با مثال مذکور هستند، با طرح خرابی بهینه‌سازی و به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. در سال ۱۹۸۷ پژوهشگران برای طراحی تیر عمیق شکل ۱۲ سه مدل بست و بند (شکل ۴ الف، ب، ج) را براساس روش نواحی تنش با تغییراتی تجربی ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup> اگرچه دو طرح الف و ب در شکل ۴ را به‌عنوان مدل‌هایی مناسب برای طراحی این تیر معرفی کرده‌اند، اما برای طراحی از مدل شکل ۴ ج، به‌صورت ترکیبی از دو مدل اول استفاده کرده و علت این کار را در نظر گرفتن تنش‌های کشسانی دانسته‌اند.<sup>[۱۲]</sup> مکسول و برین در پژوهش دیگری (۲۰۰۵)،<sup>[۱۲]</sup> ۴ تیر عمیق با هدف بررسی ۳ مدل ارائه‌شده در پژوهش اخیر،<sup>[۱۲]</sup> و یک مدل دیگر به‌صورت آزمایشگاهی را بررسی کرده‌اند. مدل چهارم با فرض تحمل کشش در زیر بازشو با تغییراتی در مدل شکل ۴ ج، حاصل شده است.<sup>[۱۲]</sup> از ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی پژوهش مذکور ۲ نمونه‌ی آزمایشگاهی با نام‌های RC#۲ و SFRC#۲ مشابه نمونه‌ی تیر عمیق با بازشو شکل ۴ هستند. در این طرح، بازشو در مسیر بار - تکیه‌گاه قرار دارد و این حالت بحرانی‌ترین شکل برای قرارگیری بازشو در تیرهای عمیق است. لذا در پژوهش مذکور برای طراحی این سازه از باری استفاده شده است که طبق روش STM، بار قابل تحمل بیشینه برای این تیر نیست.<sup>[۱۲]</sup> از این رو، این تیر مورد مناسبی برای بررسی روش بهینه‌سازی همگن، با باری کمتر از ظرفیت (بالقوه) تیر است. بنابراین با توجه به اهداف این پژوهش، دو نمونه از بتن مسلح و دو نمونه از بتن مسلح با الیاف فولادی (SFRC) ساخته و آزمایش شده‌اند. نمونه‌های RC#۱ و SFRC#۱ با توجه به بیشینه‌ی ظرفیت قابل تحمل برای سازه طراحی و برای طراحی نمونه‌های RC#۲ و SFRC#۲ از بار پیشنهادی مکسول و برین،<sup>[۱۲]</sup> استفاده



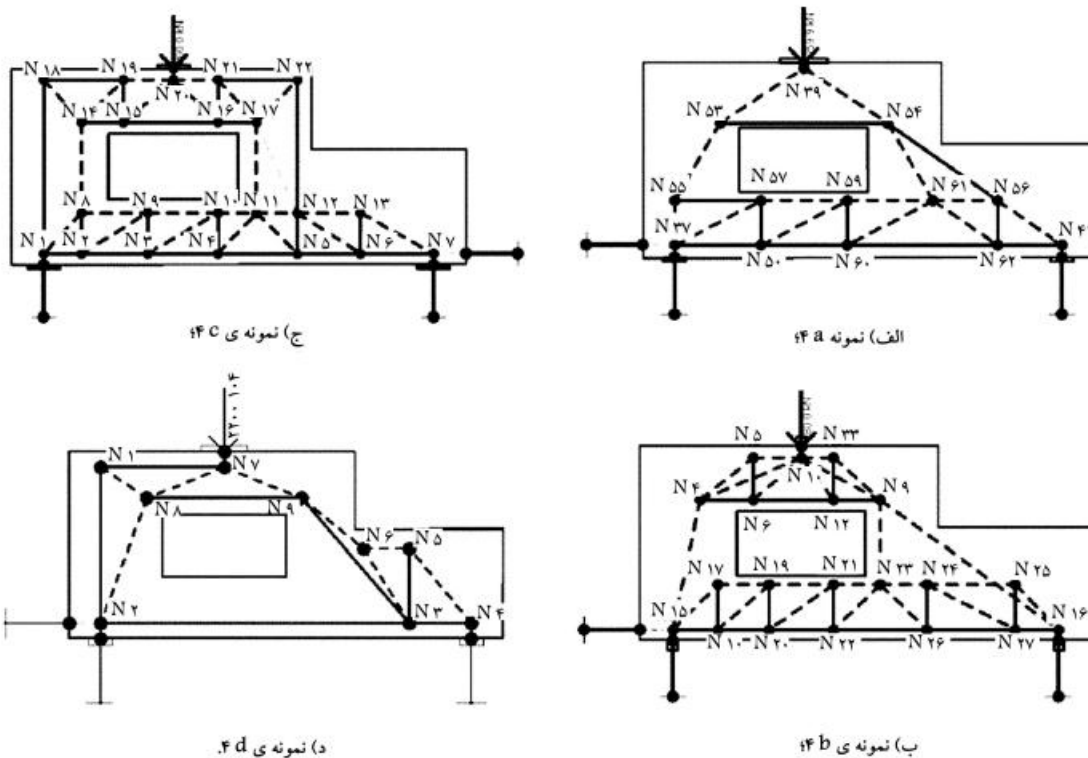
شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های RC#۱ و SFRC#۱ (میلی‌متر).<sup>[۱۱]</sup>



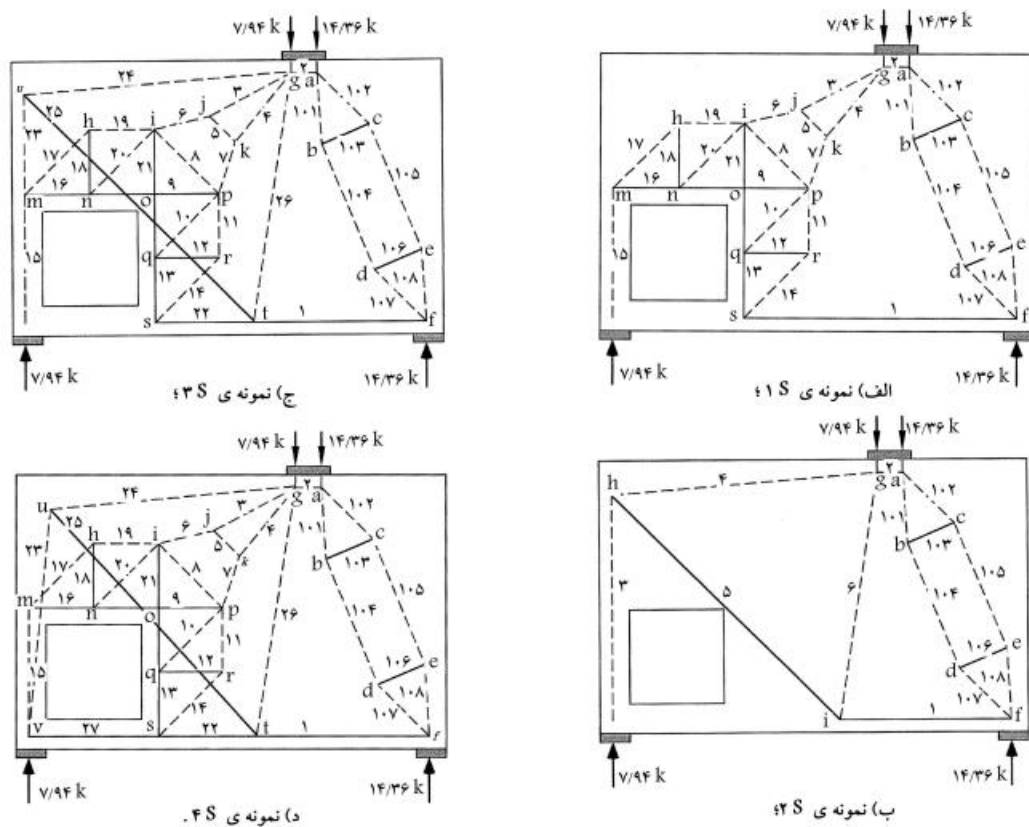
شکل ۲. مشخصات هندسی نمونه‌های RC#۲ و SFRC#۲ (میلی‌متر).<sup>[۱۲]</sup>

جدول ۲. خواص میلگردهای فولادی در نمونه‌های آزمایشگاهی.

اندازه‌ی میلگرد	سطح مقطع (mm <sup>۲</sup> )	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)
Φ۱۲	۱۲۰٫۳	۵۹۷	۷۲۲
Φ۱۰	۸۳٫۵	۳۷۸	۶۰۹
Φ۸	۵۸٫۹	۳۵۵	۵۱۴



شکل ۳. مدل‌های بستم و بند پیشنهادی رینیک [۱۱]



شکل ۴. مدل‌های بستم و بند استفاده‌شده در آزمایش‌های مگسول و برین [۱۴]

جدول ۳. خلاصه‌ی مشخصات نمونه‌ها.

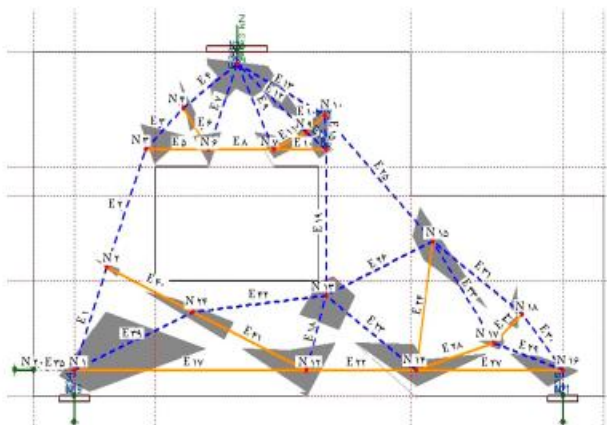
نام نمونه	RC#۱	RC#۲	SFRC#۱	SFRC#۲
مصالح مصرفی	بتن مسلح		بتن مسلح با ۱٫۵٪ الیاف فولادی	
هندسه‌ی نمونه				
هدف	ارزیابی تأثیر استفاده از روش FH در تعیین خرابی مدل بست و بند		بررسی تأثیر الیاف فولادی در رفتار تیرهای عمیق با بازشو	

شده است. مشخصات این نمونه‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

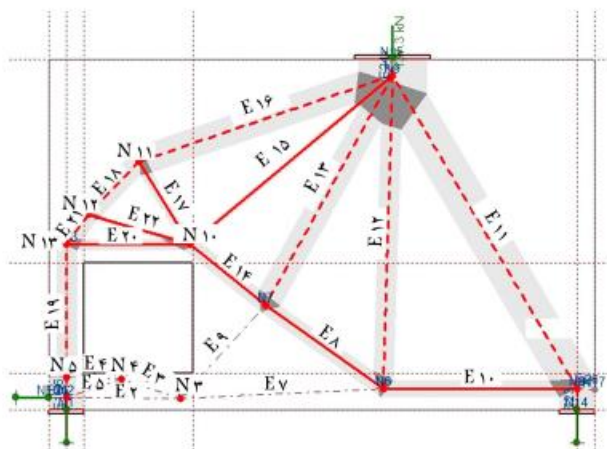
### ۳.۳. طراحی نمونه‌های بتن مسلح

برای ارزیابی تأثیر استفاده از روش FH در تعیین خرابی مدل بست و بند، دو نمونه‌ی بتن مسلح با هندسه‌ی معرفی شده در شکل‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند. پس از به‌کارگیری کد تهیه شده برای روش FH در نرم‌افزار Free FEM برای نمونه‌ها، پیکره‌ی خروجی روش حاصل می‌شود. این پیکره نشان‌دهنده‌ی توزیع ماده‌ی سخت در سازه است، که در شکل‌های ۵الف و ۶الف به‌صورت نواحی قهوه‌یی رنگ نمایش داده شده‌اند. با ساده‌سازی برخی از منحنی‌ها از خم به خطوط مستقیم، یک مدل خرابی‌ی اولیه حاصل می‌شود (شکل‌های ۵ب و ۶ب). این مدل خرابی‌ی عموماً پایدار نیست، پس برای پایداری خرابی، کمینه‌ی تغییرات در مدل خرابی‌ی انجام می‌شود. بدین معنا که برخی از میله‌ها برای معین‌سازی استاتیکی خرابی اضافه می‌شوند (در شکل‌های ۵ج و ۶ج، میله‌های اضافه شده با خط چین مشخص شده‌اند). طرح خرابی‌ی نهایی دو نمونه در شکل‌های ۵د و ۶د قابل مشاهده هستند. در شکل‌های

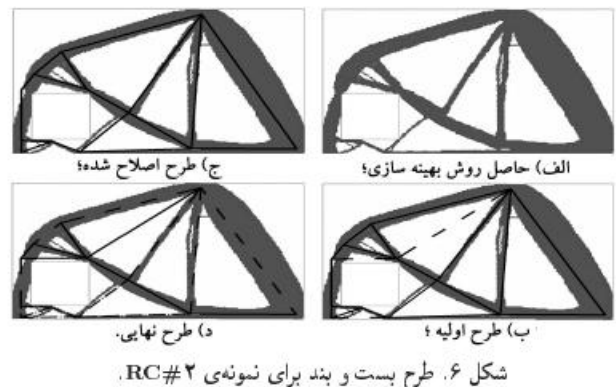
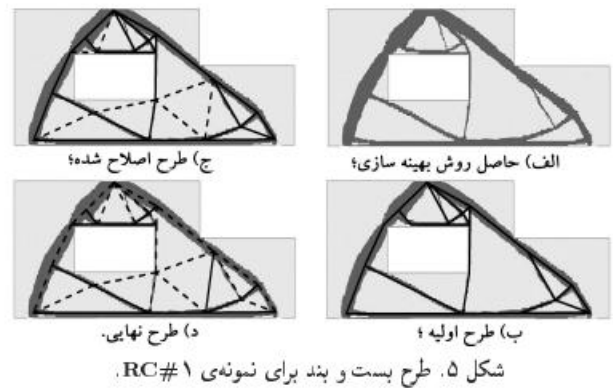
مذکور، دستک‌ها با خط چین و کش‌ها با خطوط توپر نمایش داده شده‌اند. برای طراحی نمونه‌ها به روش بست و بند از نرم‌افزار CAST استفاده شده است.<sup>[۱۵]</sup> این نرم‌افزار بر مبنای طراحی دستی ارائه شده در پیوست A آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸<sup>[۱۶]</sup> شکل گرفته است و فقط به ساده‌سازی محاسبات کمک می‌کند. برای طراحی نمونه‌های بتن مسلح از ضرایب ACI-۳۱۸<sup>[۱۶]</sup> برای تعیین مقاومت دستک‌ها و کش‌ها استفاده شده است. در طول طراحی چون مقاومت‌های واقعی مصالح فرض شده بودند، ضرایب کاهش مقاومت ۱٫۴ واحد در نظر گرفته شده‌اند. همچنین با توجه به مدل اولیه‌ی نمونه‌ها، یکی از تکیه‌گاه‌ها به‌صورت غلتکی (با واکنش عمودی) و تکیه‌گاه دیگر مفصلی (با دو واکنش) مدل شده‌اند. در شکل‌های ۷ و ۸، شماره‌ی گره‌ها و المان‌های RC#۱ و RC#۲ مشخص شده است.



شکل ۷. شماره‌ی المان‌ها و گره‌های نمونه‌ی RC#۱ در نرم‌افزار CAST.



شکل ۸. شماره‌ی المان‌ها و گره‌های نمونه‌ی RC#۲ در نرم‌افزار CAST.



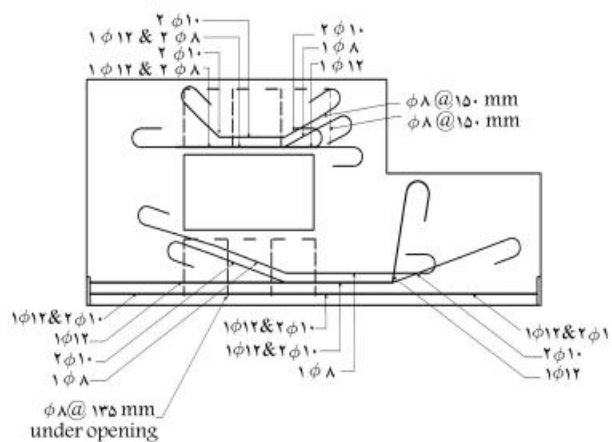
۱.۳.۳. نمونه RC#۱

مدل متناظر خرابایی این نمونه در شکل ۷ قابل مشاهده است، که در آن خط ممتد نشان دهنده ی کش، خط چین نماینده ی دستک و خط - نقطه اعضاء صفر نیرو را نمایش می دهند. شش عضو خرابایی برای ایجاد خرابایی معین استاتیکی به آن اضافه شده است (اعضاء شماره ۵، ۶، ۲۳، ۲۴، ۲۸، ۳۹ و ۴۲). دستک زیر بازشوی مستطیلی نزدیک تکیه گاه چپ و همچنین دستک کوچک بالای تکیه گاه سمت راست، زاویه یی کمتر از ۲۵ درجه با کش ها داشتند؛ که این زاویه کمتر از مقدار مجاز بین دستک و کش براساس آیین نامه ی ACI [۲۷] است (دستک های ۲۹ و ۳۹). برای محاسبه ی ظرفیت این دستک ها از آیین نامه ی AASHTO [۵] استفاده شده است. برای افزایش بیشتر ظرفیت نمونه، دستک های دوکی شکل بالا و پایین بازشو نیاز به افزایش در ضریب مقاومت داشته اند. بنابراین برای نواحی مذکور شبکه ی تقویت مورد نیاز، دستک دوکی شکل طبق روابط ACI-۳۱۸ [۲۷] تأمین شده است. شکل ۹، آرایش تقویت حاصل از طراحی را برای نمونه ی RC#۱ نشان می دهد. برای مهاری میلگردها در تکیه گاه با توجه به پیشنهاد کوچما و همکاران [۶] از صفحات فولاد استفاده شده است، تا ضمن ایجاد مهاری مناسب به محدود شدن تکیه گاه در این نواحی کمک کنند. همچنین برای مهاری دیگر میلگردها از قلاب ۱۸۰ درجه ی استاندارد ACI استفاده شده است. این کار به علت پیشنهاد برخی پژوهشگران [۶] در این مورد انجام شده است. با توجه به پیچیدگی زیاد طرح در برخی مناطق از ۲ تا ۳ لایه ی تقویت فولادی استفاده شده است، که جزئیات آرایش تقویت این نمونه در شکل ۹ ارائه شده است.

خروجی نرم افزار CAST برای نمونه ی RC#۱ در جدول ۴ ارائه شده است. شماره ی المان های این نمونه در شکل ۷ مشخص شده اند.

۲.۳.۳. نمونه RC#۲

مدل متناظر خرابایی این نمونه در شکل ۸ قابل مشاهده است. همانند مدل خرابایی نمونه ی RC#۱، ۳ عضو خرابایی برای معین سازی استاتیکی طرح خرابایی به آن اضافه شده است (اعضاء شماره ۲، ۱۵ و ۲۰). آرایش تقویت حاصل از طراحی نمونه در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. آرایش تقویت در ناحیه ی برنولی حول بازشو نیاز به توجه ویژه یی دارد. طبق توصیه ی آیین نامه ی ACI-۳۱۸ [۲۷] برش در این ناحیه با قوانین برش در اعضاء عادی باید کنترل شود. اما به علت نبود امکان تعیین برش با توجه به مدل بست و بند (طرح کشسان) از آرماتور کمیته ی خمشی و برشی در این ناحیه استفاده شده است (شکل ۱۰). در این نمونه برای مهاری میلگردها در تکیه گاه از صفحات فولاد استفاده شده است.



شکل ۹. آرایش تقویت نمونه ی RC#۱

جدول ۴. نتایج خروجی نرم افزار CAST برای نمونه ی RC#۱

شماره ی المان	نیرو موجود (kN)	تنش موجود (MPa)	تنش بیشینه (MPa)	نسبت تنش
E1	-۱۳۸٫۵۰	۲۳٫۰۹	۳۹٫۲۰	۰٫۵۹
E2	-۱۳۸٫۷۰	۲۳٫۱۱	۳۹٫۲۴	۰٫۵۹
E3	-۲۰۳٫۸۰	۲۳٫۹۷	۲۹٫۴۱	۰٫۸۲
E4	-۲۰۶٫۸۰	۲۲٫۹۸	۲۹٫۴۲	۰٫۷۸
E5	۱۰۲٫۰۰	۳۴۸٫۵۷	۳۷۸٫۰۶	۰٫۹۲
E6	۲۸٫۴۰	۱۶۹٫۸۲	۳۷۸٫۲۲	۰٫۴۵
E7	-۲۳٫۸۰	۷٫۹۵	۲۹٫۴۴	۰٫۲۷
E8	۱۳۰٫۴۰	۲۸۳٫۸۱	۳۷۷٫۹۱	۰٫۷۵
E9	-۲۵٫۹۰	۵٫۱۸	۲۹٫۴۳	۰٫۱۸
E10	۵۷٫۸۰	۳۱۷٫۹۴	۳۷۸٫۰۵	۰٫۸۴
E11	۶۳٫۳۰	۲۸۴٫۷۰	۳۷۸٫۰۹	۰٫۷۵
E12	-۸۰٫۳۰	۲۵٫۰۸	۲۹٫۴۴	۰٫۸۵
E13	-۱۱۹٫۱۰	۲۳٫۸۱	۲۹٫۴۳	۰٫۸۱
E14	-۶۶٫۴۰	۲۶٫۵۵	۳۹٫۲۲	۰٫۶۸
E15	-۳۰٫۹۰	۱۰٫۳۱	۲۳٫۵۴	۰٫۴۴
E16	۶۰٫۱۰	۲۷۰٫۲۳	۳۷۷٫۹۴	۰٫۷۲
E17	۱۵۳٫۰۰	۲۸۸٫۲۰	۳۷۸٫۲۲	۰٫۷۶
E18	-۲۲٫۳۰	۲٫۲۳	۲۳٫۴۷	۰٫۱۰
E19	-۶۶٫۱۰	۱۸٫۳۵	۲۳٫۵۳	۰٫۷۸
E22	۲۱۸٫۴۰	۲۹۰٫۰۶	۳۷۸٫۱۷	۰٫۷۷
E23	-۱۰۹٫۷۰	۱۵٫۶۷	۲۳٫۵۳	۰٫۶۷
E24	۴۸٫۱۰	۲۶۴٫۱۸	۳۷۷٫۹۴	۰٫۷۰
E25	-۷۵٫۸۰	۱۵٫۱۶	۲۳٫۵۴	۰٫۶۴
E26	-۶۹٫۶۰	۱۳٫۹۳	۲۳٫۵۳	۰٫۵۹
E27	۸۲٫۴۰	۲۳۶٫۱۰	۳۷۷٫۷۶	۰٫۶۳
E28	۳۴٫۰۰	۲۰۳٫۵۳	۳۷۸٫۳۱	۰٫۵۴
E29	-۰٫۹۰	۰٫۶۱	۶٫۱۰	۰٫۱۰
E30	-۱۱۴٫۱۰	۲۲٫۸۲	۳۹٫۲۱	۰٫۵۸
E31	-۱۲۲٫۹۰	۱۷٫۵۵	۲۳٫۵۳	۰٫۷۵
E32	۳۱٫۰۰	۱۸۵٫۶۷	۳۷۸٫۱۵	۰٫۴۹
E33	-۱۳٫۸۰	۲٫۷۷	۲۳٫۴۷	۰٫۱۲
E34	-۱۶۰٫۲۰	۲۱٫۳۶	۲۹٫۴۲	۰٫۷۳
E35	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E36	-۸۰٫۱۰	۱۰٫۶۸	۲۹٫۴۲	۰٫۳۶
E38	-۲۴۰٫۳۰	۱۶٫۰۲	۲۹٫۳۹	۰٫۵۵
E39	-۱۰۲٫۴۰	۷٫۳۱	۸٫۸۹	۰٫۸۲
E40	۲٫۲۰	۳۹٫۴۸	۳۷۷٫۶۲	۰٫۱۰
E41	۶۱٫۴۰	۲۷۶٫۲۹	۳۷۷٫۹۶	۰٫۷۳
E42	-۱۵۳٫۰۰	۲۹٫۴۳	۲۹٫۴۳	۱٫۰۰ (O/S)

آزمایشگاهی و نمونه‌های استوانه‌یی به صورت یکجا ریخته و نمونه‌ها به شکل مناسبی ویریه شده‌اند. عملیات عمل‌آوری پس از ریختن نمونه‌ها آغاز و تمام نمونه‌ها پس از ۴۸ ساعت از قالب خارج شده‌اند. نتایج آزمایش این نمونه‌ها با نتایج مطالعات پیشین مقایسه شده است.

نمونه‌ها تحت بار یکنواخت افزایشی تا مرحله‌ی گسیختگی آزمایش شده‌اند. بار اعمالی، تغییر مکان زیر بار و الگوی گسترش ترک در این نمونه‌ها برداشت شده است. برای تعیین دقیق تغییر مکان زیر بار از ۳ تغییر مکان سنج استفاده شده است، که در زیر محل بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها (در محل فرضی گره‌های روش بست و بند)

خروجی نرم‌افزار CAST برای نمونه‌ی RC#۲ در جدول ۵ ارائه شده است. شماره‌ی المان‌های این نمونه در شکل ۸ مشخص شده‌اند.

### ۳.۳.۳. نمونه‌های SFRC#۱ و SFRC#۲

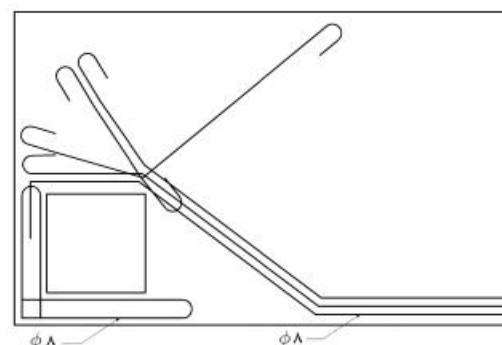
نمونه‌های SFRC#۱ و SFRC#۲ با در نظر گرفتن اثر الیاف فولادی طراحی شده‌اند. برای جزئیات بیشتر در مورد در نظر گرفتن اثر الیاف، به مرجع [۱۷] مراجعه شود. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، آرایش آرماتور این نمونه‌ها ارائه شده است. در این نمونه‌ها از ۱/۵٪ الیاف فولادی استفاده شده است.

### ۴.۳. بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی

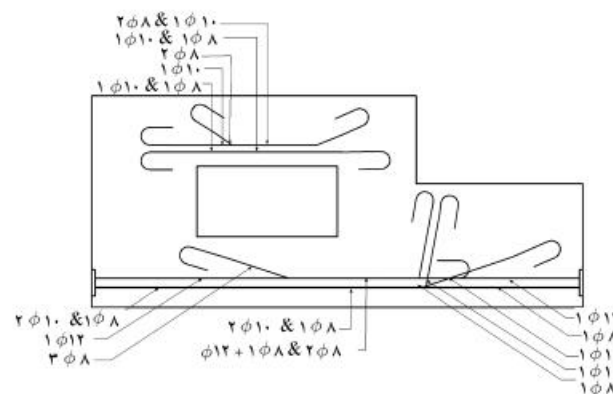
پس از طراحی، نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس نتایج طراحی ساخته شده‌اند (شکل ۱۳). بزرگ‌ترین اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها ۱۲/۵ mm بوده است. بتن نمونه‌های

جدول ۵. نتایج خروجی نرم‌افزار CAST برای نمونه‌ی RC#۲.

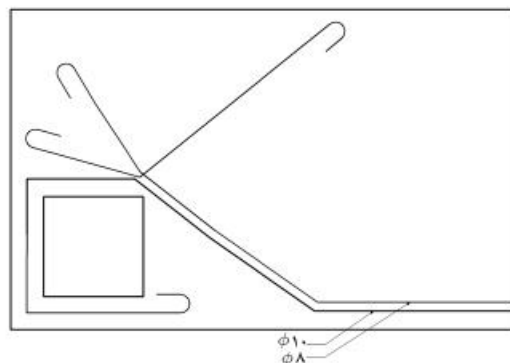
شماره‌ی المان	نیرو موجود (kN)	تنش موجود (MPa)	تنش بیشینه (MPa)	نسبت تنش
E1	-۴۹٫۶۰	۶٫۲۸	۲۹٫۷۶	۰٫۲۱
E2	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E3	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E4	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E5	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E6	-۴۹٫۶۰	۶٫۲۸	۲۹٫۷۶	۰٫۲۱
E7	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E8	۶۲٫۸۰	۳۵۵٫۱۸	۳۵۴٫۸۳	۱٫۰۰
E9	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E10	۵۲٫۶۰	۲۹۷٫۴۲	۳۵۴٫۹۲	۰٫۸۴
E11	-۱۰۲٫۲۰	۱۱٫۵۰	۱۷٫۸۶	۰٫۶۴
E12	-۳۶٫۰۰	۸٫۰۹	۱۷٫۸۶	۰٫۴۵
E13	-۳٫۵۰	۰٫۶۱	۱۷٫۹۴	۰٫۰۳
E14	۶۳٫۲۰	۳۵۷٫۶۸	۳۵۴٫۸۴	۱٫۰۱
E15	۱۶٫۱۰	۲۷۲٫۷۶	۳۵۵٫۱۶	۰٫۷۷
E16	-۶۵٫۶۰	۱۰٫۵۴	۲۹٫۷۷	۰٫۳۵
E17	۳٫۰۵	۲۵۹٫۱۶	۳۵۵٫۰۱	۰٫۷۳
E18	-۶۵٫۶۰	۱۴٫۷۵	۲۹٫۸۰	۰٫۵۰
E19	-۴۹٫۶۰	۱۱٫۱۶	۱۷٫۸۶	۰٫۶۳
E20	۳۵٫۹۰	۳۰۴٫۶۵	۳۵۵٫۰۷	۰٫۸۶
E21	-۶۱٫۲۰	۱۳٫۷۸	۲۹٫۷۶	۰٫۴۶
E22	۱٫۰۵	۱۷۸٫۲۳	۳۵۵٫۰۴	۰٫۵۰
E23	-۸۷٫۷۰	۱۱٫۰۹	۱۷٫۸۶	۰٫۶۲
E24	-۱۳۷٫۳۰	۹٫۰۸	۱۷٫۸۷	۰٫۵۱
E25	۰٫۰۰	NA	NA	NA
E26	۰٫۰۰	NA	NA	NA



شکل ۱۰. آرایش تقویت نمونه‌ی RC#۲.



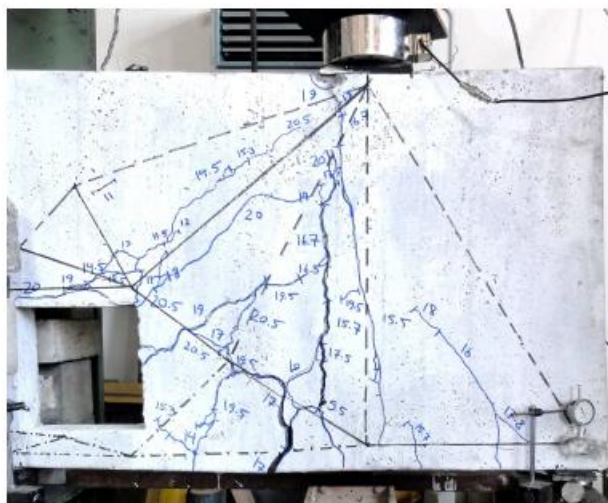
شکل ۱۱. آرایش تقویت نمونه‌ی SFRC#۱.



شکل ۱۲. آرایش تقویت نمونه‌ی SFRC#۲.



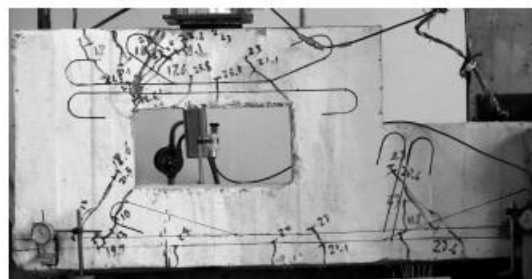
شکل ۱۳. قالب روغنی نمونه‌ی RC#۱.



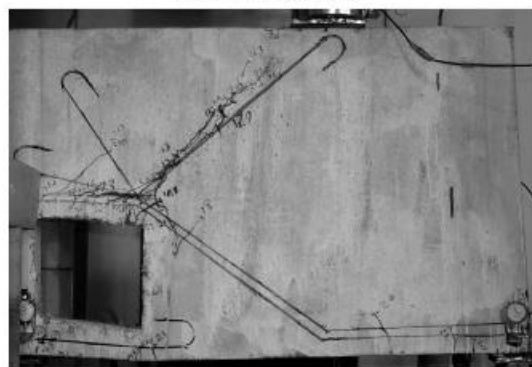
شکل ۱۶. گسترش ترک در نمونه RC#۲.



شکل ۱۷. پشت نمونه RC#۱ پس از ترک‌خوردگی.



الف) نمونه SFRC # ۱



ب) نمونه SFRC # ۲

شکل ۱۸. گسترش ترک در نمونه‌های SFRC.

نصب شده‌اند (شکل ۱۴). از یک نیروسنج ۵۰ تنی نیز برای اندازه‌گیری بار اعمالی به نمونه‌ها استفاده شده است.

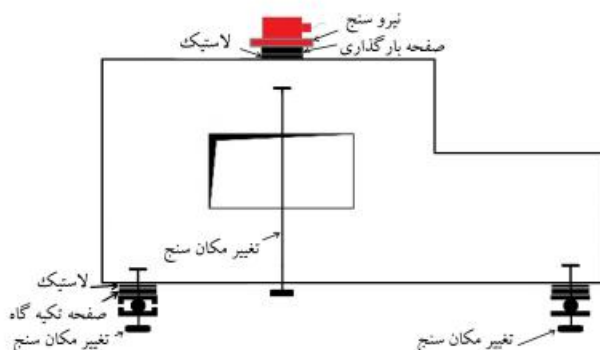
### ۱.۴.۳. گسترش ترک در نمونه‌های بتن مسلح

شکست نمونه RC#۱، مود برشی داشته است (شکل ۱۵). این تیر در گسترش ترک قطری، بین محل بارگذاری و تکیه‌گاه سمت چپ گسیخته شده است. به این ترتیب که با رسیدن ترک قطری به زیر ناحیه‌ی بارگذاری و ایجاد ترک‌های جانبی در دو طرف بخش بالایی تیر، در این قسمت صفحه‌ی برشی ایجاد و در اثر لغزش صفحه‌ی حاصل، تیر در بار ۲۶۳ kN گسیخته شده است. برخلاف نمونه RC#۱، نمونه RC#۲ به علت گسترش ترک‌های خمشی زیر ناحیه‌ی بارگذاری و رسیدن آنها به ناحیه‌ی بارگذاری با جاری شدن تقویت‌های تار زیرین، تیر در بار ۲۰۶ kN گسیخته شده است (شکل ۱۶).

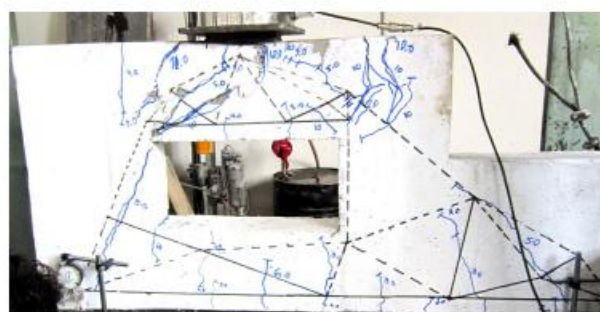
به علت توزیع مناسب تقویت در ضخامت نمونه‌ها گسترش ترک در دو طرف نمونه‌ها مشابه بوده است (شکل ۱۷). در نمونه‌ها هیچ‌گونه خردشدگی مؤثر در مود شکست در محل تکیه‌گاه‌ها به وجود نیامده است. دلیل این امر را می‌توان به اثر محدودکننده‌ی صفحات استفاده شده در محل تکیه‌گاه‌ها نسبت داد.

### ۲.۴.۳. گسترش ترک در نمونه‌های بتن مسلح با الیاف فولادی

در نمونه SFRC#۱، مود گسیختگی کاملاً مشابه نمونه RC#۱ بوده است (شکل ۱۸الف). این نمونه در اثر لغزش صفحه‌ی برشی در بخش بالایی تیر با تحمل بار ۲۵۴ kN گسیخته شده است. اما نمونه SFRC#۲ مود شکست متفاوتی با نمونه‌ی مشابه بتن مسلح خود داشته است (شکل ۱۸ب). این نمونه به علت ترک برشی ایجاد شده بین تکیه‌گاه چپ و ناحیه‌ی بارگذاری و گسترش آن به طرف محل بارگذاری با تحمل باری برابر ۲۶۱ kN گسیخته شده است. دلیل این مود شکست می‌تواند تقویت نمونه در ناحیه‌ی خمشی زیر بار به علت استفاده از

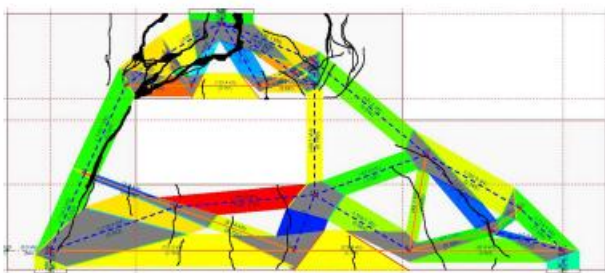


شکل ۱۴. وسایل اندازه‌گیری و شرایط بارگذاری نمونه‌ها.

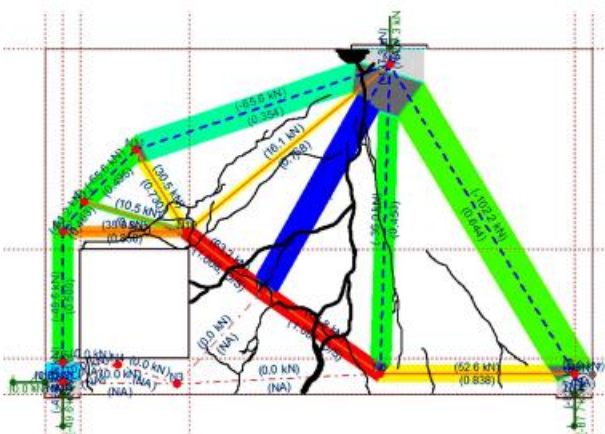


شکل ۱۵. گسترش ترک در نمونه RC#۱ (بار ترک‌ها با ضرب اعداد در ۲٫۵ بر حسب Ton قابل محاسبه است).





شکل ۱۹. در خروجی نرم افزار CAST برای بار نمونه‌ی ۱ RC# به همراه الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌ی واقعی.



شکل ۲۰. خروجی نرم افزار CAST برای بار نمونه‌ی ۲ RC# به همراه الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌ی واقعی.

## ۵. مقایسه‌ی نتایج

با توجه به هندسه‌ی نمونه‌ها، نتایج آزمایش‌ها در ۲ گروه بررسی شده‌اند. گروه اول شامل: نمونه‌های ۴a، ۴b، ۴c، ۴d و RC#۱ و SFRC#۱ هستند. نمونه‌های ۴a، ۴b، ۴c، ۴d توسط کوچما و همکاران<sup>[۴]</sup> بررسی شده بودند. گروه دوم نمونه‌ها شامل: نمونه‌های S۱، S۲، S۳، S۴ و RC#۲ و SFRC#۲ هستند. نمونه‌های S۱، S۲، S۳ نیز توسط مکسول و برین<sup>[۱۲]</sup> بررسی شده‌اند.

خلاصه‌ی نتایج نمونه‌های گروه اول در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در مطالعات پیشین نشان داده شده است، ظرفیت نهایی در نمونه‌های طراحی شده به روش FH به مقدار قابل توجهی از نمونه‌های مشابه کمتر است.<sup>[۴]</sup> اما نمونه‌های RC#۱ و SFRC#۱ تغییرمکان بسیار بیشتری را در سطح بار طراحی از خود نشان داده‌اند. بار اولین ترک در نمونه‌ی RC#۱ بسیار پایین است. این ترک در باری بسیار کمتر از بار سرویس ایجاد شده است. معمولاً برای بررسی میزان موفقیت طراحی تیرها به روش بست و بند، نسبت بار آزمایشگاهی به بار پیش‌بینی شده توسط این روش مقایسه می‌شود. هرچه این نسبت بزرگتر باشد، نشان‌دهنده‌ی طراحی محافظه‌کارانه‌تری است. برای ارزیابی مقدار بار پیش‌بینی شده در روش بست و بند لازم است مقاومت مصالح وارد شده در نرم‌افزار به مقاومت واقعی اصلاح شوند. در بسیاری از پژوهش‌ها به این مطلب توجهی نمی‌شود و تفاوت زیاد بین بار پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار CAST و بار آزمایشگاهی، به محافظه‌کارانه بودن روش نسبت داده می‌شود. در نمونه‌های بتن مسلح، بار پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار CAST و مقدار

الیاف فولادی باشد، که نهایت علاوه بر تغییر مود شکست موجب افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.

## ۴. بررسی مود شکست و نتایج خروجی نرم افزار CAST

### ۱.۴. نمونه‌ی ۱ RC#

یکی از ویژگی‌های نرم‌افزار CAST، پیش‌بینی ظرفیت مدل بست و بند است. بنابراین از این ویژگی استفاده و ظرفیت نمونه‌ها براساس مقاومت‌های واقعی مصالح برآورد شده است. بر این اساس مقاومت نهایی ۲۴۰ kN برای نمونه‌ی RC#۱ پیش‌بینی شده است.

برای پیش‌بینی مود شکست براساس خروجی نرم‌افزار CAST، نسبت تنش در اعضا بررسی شده است. اگر این مقدار بیش از ۱ شود، نشان‌دهنده‌ی شکست عضو از نظر نرم‌افزار است. با در نظر گرفتن این تعریف، دو ناحیه‌ی بحرانی در این نمونه وجود دارد (شکل ۱۹). با توجه به پیش‌بینی نرم‌افزار که داخل چهارگوش نشان داده شده است، تیر باید در اثر گسیختگی دستک فشاری حاضر در بخش زیرین تیر گسیخته شود. محل مناسب ثانویه برای گسیختگی تیر کش حاضر در بخش بالایی تیر است. برای بررسی پیش‌بینی‌های روش بست و بند برای این نمونه، الگوی ترک‌خوردگی آن در شکل ۱۹، بر روی خروجی نتایج نرم‌افزار CAST منطبق شده است.

با توجه به نتایج آزمایش، نمونه‌ی RC#۱ در اثر لغزش صفحه‌یی حاصل از ایجاد ترک برشی در بالای باز شو گسیخته شده است (شکل ۱۵). با در نظر گرفتن این مطلب می‌توان گفت پیش‌بینی اولیه‌ی روش بست و بند برای گسیختگی با مدل گسیختگی واقعی نمونه انطباق نداشته است. توجه به این نکته ضروری است که اولین ترک در محل اولیه‌ی پیش‌بینی شده‌ی روش بست و بند اتفاق افتاده است. اما گسیختگی نمونه در محلی روی داده است که طبق پیش‌بینی در اولویت بعدی برای گسیختگی است (شکل ۱۹).

### ۲.۴. نمونه‌ی ۲ RC#

با اصلاح مقاومت‌های واقعی مصالح در نرم‌افزار CAST، ظرفیت نهایی ۱۳۷ kN برای نمونه‌ی RC#۲ پیش‌بینی شده است. شکل ۲۰، مدل بست و بند این نمونه را در شرایط بار نهایی نشان می‌دهد. در نمونه‌ی RC#۲، دوکش مایل در سمت راست باز شو حالت بحرانی دارند. این اجزاء در یک چهارگوش در شکل ۲۰ مشخص شده‌اند. طبق روش بست و بند برای این نمونه پیش‌بینی می‌شود که شکست نمونه در اثر جاری شدن میلگردها در این ناحیه به وقوع بپیوندد.

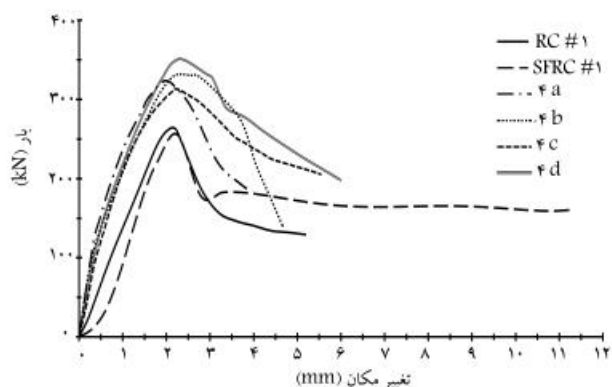
این نمونه براساس نتایج آزمایشگاهی در اثر گسترش ترک خمشی زیر ناحیه‌ی بارگذاری گسیخته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، گسیختگی در اثر جاری شدن تقویت مایل واقع در سمت راست تکیه‌گاه اتفاق افتاده است، که کاملاً منطبق بر پیش‌بینی روش بست و بند است. گسیختگی نمونه در اثر ترک خمشی، نشان‌دهنده‌ی موفقیت روش بست و بند در طراحی نمونه است، چون در نمونه‌های مشابه عموماً گسیختگی در اثر ترک برشی بوده است که از گوشه‌ی باز شو آغاز و به سمت ناحیه‌ی بارگذاری گسترش یافته است. نتیجه‌ی این امر افزایش باربری سازه نسبت به نمونه‌های مشابه بوده است.

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج طراحی و آزمایشگاهی نمونه‌های گروه اول.

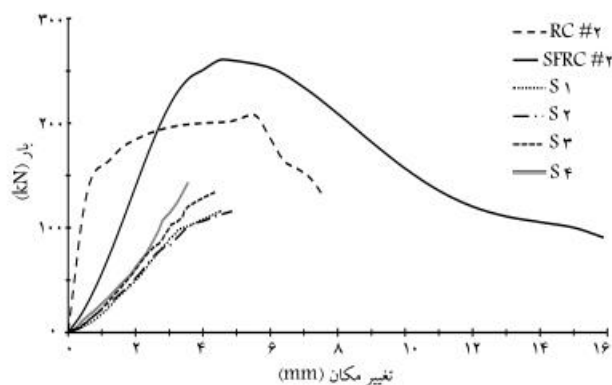
نام نمونه	بیشینه‌ی بار پیش‌بینی شده (kN)	بار آزمایشگاهی (kN)	بار اولین ترک (kN)	نسبت بار آزمایشگاهی به بار پیش‌بینی شده (kN)	وزن معادل تقویت فولادی (kg)	ضریب تأثیر (kN/kg)
RC#۱	۲۴۰	۲۶۳	۴۹	۱٫۱۰	۱۴٫۷۸	۱۸٫۸۲
SFRC#۱	۲۴۰	۲۵۴	۹۸	۱٫۰۶	-	-
۴a	۲۶۰	۳۲۵	۱۱۰	۱٫۲۵	۲۳٫۴۶	۱۳٫۹۴
۴b	۱۷۶	۳۳۴	۱۱۰	۱٫۸۹	۲۱٫۳۸	۱۵٫۶۲
۴c	۱۸۸	۳۱۲	۹۸	۱٫۶۶	۲۶٫۳۷	۱۱٫۸۳
۴d	۲۰۷	۳۵۶	۱۳۵	۱٫۷۲	۲۹٫۲۴	۱۲٫۱۷

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج طراحی و آزمایشگاهی نمونه‌های گروه دوم.

نام نمونه	بیشینه‌ی بار پیش‌بینی شده (kN)	بار آزمایشگاهی (kN)	بار اولین ترک (kN)	نسبت بار آزمایشگاهی به بار پیش‌بینی شده (kN)	وزن معادل تقویت فولادی (kg)	ضریب تأثیر (kN/kg)
RC#۲	۱۳۷	۲۰۶	۵۴	۱٫۵۰	۴٫۴۳	۴۶٫۲۳
SFRC#۲	۱۳۷	۲۶۱	۱۰۶	۱٫۹۱	-	-
S۱	-	۱۳۸	۷۶	۱٫۳۹	۶٫۷۰	۲۰٫۵۷
S۲	-	۱۴۷	۸۰	۱٫۴۸	۳٫۸۱	۳۸٫۵۱
S۳	-	۱۸۲	۸۰	۱٫۸۴	۵٫۶۵	۳۲٫۳۰
S۴	-	۱۹۱	۸۹	۱٫۹۳	۶٫۳۰	۳۰٫۳۶



شکل ۲۱. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - تغییر مکان در تیرهای گروه اول.



شکل ۲۲. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - تغییر مکان در تیرهای گروه دوم.

آزمایشگاهی آن بسیار نزدیک بوده است، که این امر نشان‌دهنده‌ی طراحی مناسب این تیرهاست.

یکی از اهداف این پژوهش، کمیته‌سازی وزن آرماتورهای فولادی بوده است. برای مقایسه‌ی مقدار فولاد در نمونه‌های مختلف از ضریب تأثیر استفاده شده است. این ضریب برابر با نسبت بار آزمایشگاهی به وزن تقویت‌های فولادی است. بدیهی است هر چه مقدار این ضریب بیشتر باشد، نمونه بار بیشتری را در مقابل وزن آرماتور کمتر تحمل کرده است. برای ایجاد امکان مقایسه در این پژوهش، وزن تقویت‌ها با توجه به مقدار تنش تسلیم تقویت‌های فولادی معادل‌سازی شده است. با بررسی ضرایب تأثیر برای نمونه‌های مختلف در جدول ۶، تفاوت قابل توجهی برای نمونه RC#۱ مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، نمونه RC#۱ با کمیته‌ی تقویت ممکن، ظرفیت مناسبی را فراهم کرده است. در نمونه SFRC#۱، که محتوای الیاف فولادی بوده است، اولین ترک در بار بیشتری نسبت به نمونه‌ی مشابه بتن مسلح آن رخ داده است.

پاسخ نیرو - تغییر مکان گروه اول در شکل ۲۱ ارائه شده است، که در آن تمامی نمونه‌ها پاسخی مشابه دارند. علت این تشابه، مود شکست تقریباً مشابه نمونه‌هاست. در تمامی نمونه‌ها، ابتدا ترکی برشی در بالای بازو شکل گرفته است، که موجب گسیختگی برخی از آنها شده است. در حالی که باقی نمونه‌ها در اثر تشکیل ترک برشی دیگری در زیر بازو گسیخته شده‌اند.

جدول ۷، نتایج نمونه‌های گروه دوم را نمایش می‌دهد. اولین ترک برای نمونه RC#۲، در باری نزدیک بار سرویس بوده است. بار اولین ترک دیگر نمونه‌ها بیش از حد سرویس بوده است. تغییر مکان نمونه‌های RC#۲ و SFRC#۲ بسیار کمتر از نمونه‌های مکسول و برین<sup>[۱۷]</sup> تحت بار طراحی بوده است. در جدول ۷، مقایسه‌ی بین بار پیش‌بینی شده با نرم افزار CAST و مقدار آزمایشگاهی آن انجام شده است.

تغییر مکان زیر بار و الگوی گسترش ترک در این نمونه‌ها برداشت شده است. نتایج به دست آمده از بررسی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه‌ها در این پژوهش را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

- استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل در تعیین خرپای اولیه مدل بست و بند موجب کمینه‌سازی تقویت فولادی شده است. علاوه بر این، نمونه‌های طراحی شده با این روش، ظرفیت نهایی بسیار نزدیک‌تر به بار طراحی و مقدار پیش‌بینی شده در نرم‌افزار CAST داشته‌اند. این امر موجب طراحی بهینه‌ی سازه از هر جهت شده است.
- در نمونه‌های بتن مسلح، ترک‌های زود هنگامی مشاهده شده است. حضور ترک در باری کمتر از بار سرویس موجب تخریب سازه در شرایط محیطی نامناسب می‌شود، که نیاز به توجه ویژه دارد. اضافه کردن الیاف موجب افزایش بار اولین ترک در نمونه‌ها شده است. به طوری که اولین ترک در این نمونه‌ها در باری حدود ۲ برابر نمونه‌های بتن مسلح رخ داده است.
- مودهای شکست پیش‌بینی شده با روش بست و بند، انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند. این پیش‌بینی مناسب، نشان‌دهنده‌ی مدل‌سازی مناسب سازه با روش بست و بند بر اساس مدل‌های خرپایی روش FH است.

## پانوشت‌ها

1. strut and tie method
2. full homogenization

## منابع (References)

1. Ruiz, M.F. and Muttoni, A. "On development of suitable stress fields for structural concrete", *ACI Structural Journal*, **104**(4), pp. 495-502 (July-Aug. 2007).
2. Kuchma, D., Yindeesuk, S., Nagle, T., Hart, J. and Lee, H.H. "Experimental validation of strut-and-tie method for complex regions", *ACI Structural Journal*, **105**(5), pp. 578-589 (Sep.-Oct. 2008).
3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Detroit (2011).
4. EN 1992-3, Eurocode 2, Design of Concrete Structures (2006).
5. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, First Edition, Washington, DC, 1994, 1091 pp., including interim revisions for 1996 and 1997 (1998).
6. Ali, M. and White, R.N. "Automatic generation of truss model for optimal design of reinforced concrete", *ACI Structural Journal*, **98**(4), pp. 431-442 (July-Aug 2001).
7. Biodini, F., Bontempi, F. and Malerba, P.G. "Stress path adapting strut-and-tie models in cracked and Un-cracked RC elements", *Structural Engineering and Mechanics*, **12**(6), pp. 658-692 (2001).
8. Herranz, J.P., Maria, H.S., Gutierrez, S. and Riddell, R. "Optimal strut-and-tie models using full homogenization

در تیر #۲ RC، بار پیش‌بینی شده بسیار کمتر از بار آزمایشگاهی بوده است. در نتیجه می‌توان طراحی آن را محافظه‌کارانه دانست. استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش بار اولین ترک در نمونه‌ی SFRC#۲ شده است. با توجه به جدول ۷، نمونه‌ی RC#۲ ضریب تأثیر بالایی نسبت به دیگر نمونه‌ها داشته است. در نتیجه نمونه‌ی ذکر شده با کمینه‌ی آرماتور فولادی بیشترین بار ممکن را تحمل کرده است. در نمونه‌های گروه دوم، مودهای شکست متفاوتی مشاهده شده است. این مودها در شکل نمودار نیرو- تغییر مکان مؤثر است. بنابراین میزان تغییر مکان در نمونه‌ها بسیار متفاوت هستند (شکل ۲۲). متأسفانه مکسول و برین<sup>[۱۲]</sup> نمودارهای کاملی برای پاسخ نیرو تغییر مکان تیرهای خود ارائه نکرده‌اند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ۴ تیر عمیق با باز شو با استفاده از مدل خرپایی بست و بند و الگوی حاصل از روش بهینه‌سازی همگن کامل (FH) بررسی شده‌اند. این تیرها تحت بار یکنواخت افزایشی تا مرحله‌ی گسیختگی تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. بار اعمالی،

optimization method", *ACI Structural Journal*, **109**(5), pp. 605-613 (Sep.-Oct. 2012).

9. Allaire, G., *Shape Optimization by Homogenization Method*, Springer-Verlag, New York, 456 p. (2002).
10. Allaire, G. and Pantz, O. "Structural optimization with free fem ++", *Struct Multidisc Optim*, **32**, pp. 173-181 (2006).
11. Reineck, K.H. "Modeling structural concrete with strut-and-tie models summarizing discussion of the examples as per appendix A of ACI 318-2002", Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models, SP-208, K. H. Reineck, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 225-242 (2002).
12. Schlaich, J., Schäfer, K. and Jennewein, M. "Toward a consistent design of structural concrete", *PCI Journal*, **32**(3), pp. 75-150 (May-June 1987).
13. Ley, M.T., Riding, K.A., Sungjin Bae, W. and Breen, J.E. "Experimental verification of strut-and-tie model design method", *ACI Structural Journal*, **104**(6), pp. 749-755 (Nov.-Dec. 2007).
14. Maxwell, B.S. and Breen, J.E. "Experimental evaluation of strut-and tie model applied to deep beam with opening", *ACI Structural Journal*, **97**(1), pp. 142-149 (Jan.-Feb. 2000).
15. Tjhin, T.N. and Kuchma, D.A. "Computer-based tools for design by strut-and-tie method: Advances and challenges", *ACI Structural Journal*, **99**(5), pp. 586-594 (Sep.-Oct. 2002).
16. Breña, S.F. and Morrison, M.C. "Factors affecting strength of elements designed using strut-and-tie models", *ACI Structural Journal*, **104**(3), pp. 267-277 (2007).
17. Moradi, M. "Investigation on behavior and effect of steel fiber on reinforced concrete deep beams with opening using STM method", Master Thesis, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (2013).