

ظرفیت برشی تیرهای پیش‌تنیده پلها با شرایط استاتیکی مختلف و استفاده از پیش‌تنیدگی قائم

علیرضا رهایی*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
احمد شکوه‌فر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: rahaie@aut.ac.ir

دریافت: ۸۹/۰۵/۰۶ - پذیرش: ۸۹/۱۱/۲۰

چکیده

مقاومت برشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده پلها، با و بدون پیش‌تنیدگی قائم، در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا چندین مدل تیر پیش‌تنیده و بتن آرمه انتخاب و با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل شدند. در همین رابطه صحت مطالعات عددی با استفاده از تعدادی از نتایج آزمایشگاهی بررسی گردید. در قسمت دوم مطالعه دو نمونه تیر ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفته و الگوی ترک‌خوردگی و منحنی بار تغییر مکان آنها بررسی و نتایج مدلهای آزمایشگاهی با مدلهای عددی مقایسه شد. با استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی، شیب ترکهای برشی و نسبت آرمانور برشی مورد بررسی قرار گرفته و اثر پیش‌تنیدگی افقی و قائم روی پارامترهای اشاره شده ارزیابی گردید. همچنین نتایج شیب ترکهای برشی به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ای و برخی روابط پیشنهادی و مطالعات عددی بررسی و مقایسه شد. نتایج مطالعات عددی نشان‌دهنده این است که پیش‌تنیدگی قائم در تیرهایی که رفتار برشی در آنها حاکم است، ظرفیت باربری را تا ۲۰٪ افزایش و همچنین زاویه دستک فشاری را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی، تیرهای پس‌کشیده، پیش‌تنیدگی قائم، کابلها، میدان تنش

۱. مقدمه

در تیرهای بتنی پیش‌تنیده، تنش برشی عموماً همراه با تنش عمودی ناشی از پیش‌تنیدگی به طور همزمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در طراحی برشی این تیرها، لازم است تنشهای کششی اصلی در جان محاسبه و به حد مشخصی محدود شود. نیروی پیش‌تنیدگی دارای دو مؤلفه قائم و افقی در طول تیر است که مقدار این دو جزء بستگی به شیب کابل در هر مقطع از تیر دارد. در این تحقیق به منظور ایجاد تنش فشاری در جان تیر، پیش‌تنیدگی قائم داخلی با استفاده از میلگردهای مناسب عمود بر محور طولی تیر اعمال شد.

نظریه‌های مختلفی به منظور بررسی مقاومت برشی تیرهای بتنی ارائه شده است. روندهای طراحی برشی بتن آرمه که در آنها برای

تعیین ظرفیت برشی از تغییر شکلهای میلگردهای عرضی و طولی و دستکهای فشاری قطری بهره گرفته می‌شود، به عنوان روش میدان فشاری شناخته می‌شوند. Collins و Mitchel روشی را برای تعیین زاویه دستک فشاری برای تمامی حالات بارگذاری به دست آوردند که نظریه میدان فشاری (CFT) نامیده می‌شود [ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion, 1998].

آنها براساس یک سری نتایج آزمایشگاهی، روابطی را بین تنش فشاری اصلی و کرنش فشاری اصلی برای بتنی که به صورت قطری ترک خورده و با فرض یک نمودار ساده دو خطی، برای تنش - کرنش فولاد به دست آوردند. براساس این روابط، شرایط

اعتبارسنجی صحت تحلیل غیرخطی، مورد استفاده قرار گرفتند [Ruiz and Muttoni, 2008]. نتایج آزمایشها و تحلیل غیرخطی بویژه در مورد حداکثر ظرفیت باربری، حداکثر تغییر مکان و حالت شکست، تا حد زیادی به یکدیگر نزدیک هستند. سپس با استفاده از تحلیل عددی یاد شده به بررسی ظرفیت برشی و اثر پیش‌تنیدگی قائم بر سازوکار باربری و تغییرات زاویه دستک فشاری در طول تیر پرداخته شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این تحقیق می‌توان گفت پیش‌تنیدگی قائم تنها در سازوکار باربری و مقاومت برشی تیرهای با نسبت برشی پایین و بویژه تیرهای عمیق، دارای تأثیر قابل ملاحظه است. پیش‌تنیدگی قائم در تیرهایی که رفتار برشی در آنها حاکم است (همانند تیرهای عمیق) می‌تواند ظرفیت باربری را تا ۲۰٪ افزایش و همچنین زاویه دستک فشاری را کاهش دهد.

۲. اهمیت تحقیق

برخی تیرهای اصلی پلهای موجود، مقاومت برشی مورد نیاز را تأمین نمی‌کنند. این مقاله به شرح یک مطالعه عددی بر روی ۱۸ مدل عددی تیر دو سر ساده و پیوسته که تمام حالات شکست برشی به جز شکست خردشدگی جان را در بر می‌گیرند، می‌پردازد. همچنین نتایج عددی به منظور بررسی دقت چندین روش تحلیلی تخمین زاویه دستک فشاری این قبیل اعضای مورد استفاده قرار گرفت و نیز زاویه دستک فشاری به منظور بررسی میزان تأثیر پیش‌تنیدگی قائم بر روی مقاومت برشی بتن پیش‌تینده بکار گرفته شد. نتایج آزمایشگاهی به منظور تأیید اعتبار رفتار این مدلها استفاده شد.

۳. مطالعه عددی

برای بررسی حالت دستکهای فشاری در تیرهای بتن پیش‌تینده و تغییرات شیب آنها در طول تیرها، مدلهای مختلفی از تیرهای پیش‌تینده ساده و پیوسته، با و بدون پیش‌تنیدگی قائم و دارای کابلهای سهمی شکل انتخاب و با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل گردید. نمونه‌ها تحت اثر بار یکنواخت قرار داشته و از پروفیل سهمی شکل استفاده شده است. تحلیل با استفاده از رفتار غیرخطی مصالح انجام شده است و مصالح بتنی براساس نظریه

تعادل و روابط سازگاری، آنها توانستند زاویه دستک فشاری را تعیین کنند. در روش (CFT) فرض می‌شود که هیچ تنش کششی در بتن پس از ترک‌خوردگی ایجاد نمی‌شود. در آزمایشهای متعدد بر روی اجزای تیر بتن آرمه به اثبات رسید که حتی پس از یک ترک‌خوردگی ممتد، تنشهای کششی هنوز در بتن ترک‌خورده وجود دارد. Collins و Vecchio در یافتند که با افزایش کرنش اصلی پس از ترک‌خوردگی تنش اصلی کششی در بتن کاهش می‌یابد.

نظریه میدان فشاری اصلاح شده (MCFT) که در سال ۱۹۸۶ و توسط Collins و Vecchio به دست آمد نظریه‌ای است بر پایه میدان فشاری (CFT) که در آن اثر تنشهای کششی در بتن ترک‌خورده مد نظر قرار می‌گیرد. تنشها و کرنشهای متوسط و زاویه θ برای هر مرحله از بارگذاری تا شکست، با استفاده از شرایط تعادل، روابط تنش-کرنش برای میلگرد، روابط تنش-کرنش برای بتن ترک‌خورده در کشش و فشار قابل تعیین است [Vecchio and Collins, 1986].

Ramirez و Breen در سالهای ۱۹۸۸ و ۱۹۹۱ نیز روش مدل خرابایی اصلاح شده را برای تیرها با پیش‌فرضهای مشابه پایه‌ریزی کردند [Ramirez and Breen, 1991]. روش میدان تنش که در سال ۱۹۹۷ توسط Muttoni، Schwartz و Thurliman توسعه یافت، یک حل تعادل براساس کرانه پایین‌تر نظریه کشسانی است که برای تعیین ابعاد اعضای بتن آرمه و پیش‌تینده مناسب است [Ruiz and Muttoni, 2007]. میدان تنشی که برای المان سازه‌ای در نظر گرفته می‌شود این امکان را می‌دهد تا با استفاده از دستکهای فشاری تنشهای موجود در بتن به دست آید.

در این مقاله مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه و بتن پیش‌تینده در سه حالت مختلف: بتن آرمه، بتن پیش‌تینده و بتن پیش‌تینده با پیش‌تنیدگی قائم با استفاده از یک مطالعه عددی براساس نظریه میدان تنش پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است و برای شبیه‌سازی دقیق‌تر، نمونه‌ها با استفاده از مدل کشسانی آسیب بتن مدل شده‌اند [Lee and Fenves, 1998].

دو آزمایش نیز به منظور تعیین شیب دستک فشاری و ظرفیت خمشی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت گرفت. نتایج این آزمایشها و آزمایشهای Fernandez و Muttoni به منظور

دارای پیش‌تینیدگی قائم نسبت به حداکثر ظرفیت باربری همان مدلها بدون پیش‌تینیدگی قائم که در شکل ۱ نشان داده شده است، مورد بررسی قرار داد. حداکثر باربری و بیشترین تغییر شکل وسط تیر در مدل‌های عددی در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هر مقدار نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقطع کاهش یابد به همان میزان تأثیر پیش‌تینیدگی قائم در نسبت ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد. در تیرهای عمیق، پیش‌تینیدگی قائم می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری تا ۲۰٪ شود.

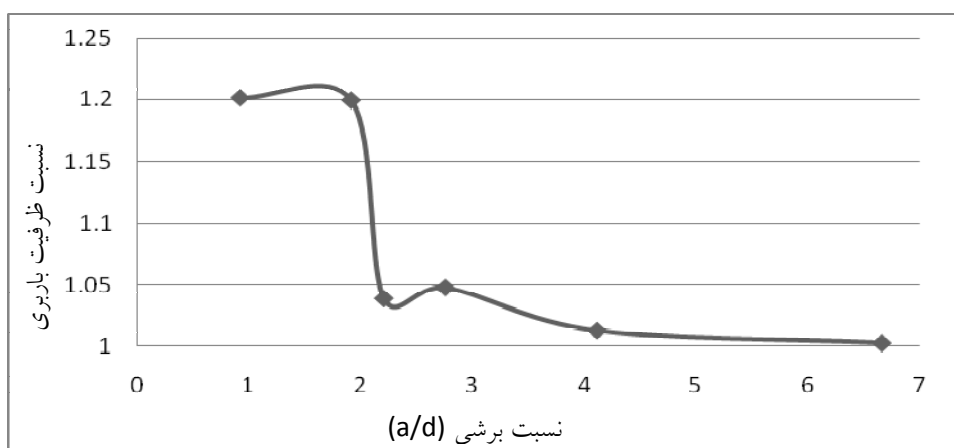
همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است با حرکت از تکیه‌گاهها به سمت وسط تیر زاویه دستک فشاری افزایش می‌یابد. در مدل‌های پیوسته شیب زاویه دستک فشاری در نزدیکی تکیه‌گاه میانی نسبت به تکیه‌گاههای کناری بیشتر است، به این دلیل که نیروی برشی در تکیه‌گاه میانی بیشتر است. خلاصه‌ای از حداقل و حداکثر زاویه دستک فشاری در طول دهانه برشی در جدول ۱ ارائه شده است. اثر پیش‌تینیدگی قائم بر شیب زاویه دستک فشاری در تیرهای عمیق (با نسبت دهانه برشی به عمق کمتر) بیشتر از مدل‌های دارای نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقطع بیشتر است.

همچنین هرچه نسبت دهانه برشی به عمق کمتر باشد، ظرفیت خمشی بیشتر و حداکثر تغییر شکل وسط تیر کمتر می‌شود. حالت شکست نمونه‌ها نیز با بهره‌گیری از مدل کشسانی آسیب بتن به دست آمده که از دو نوع شکست قطری و کششی برشی هستند.

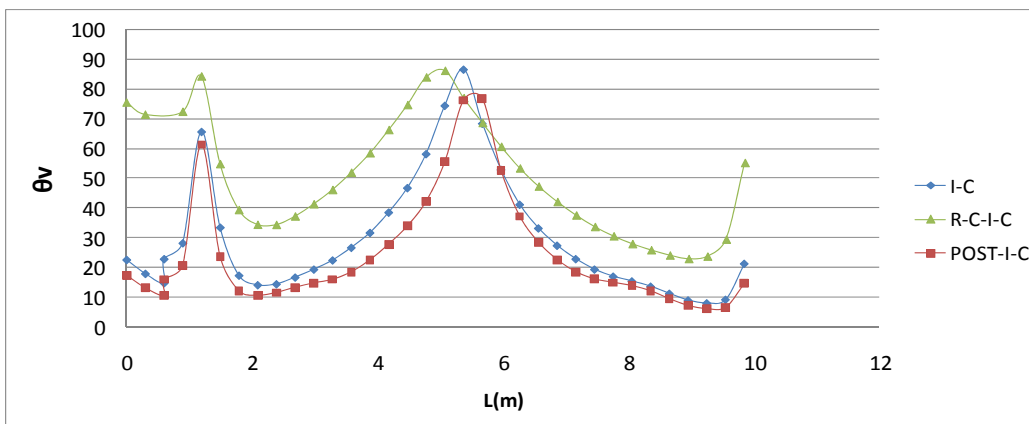
کشسانی آسیب بتن و با استفاده از نمودارهای تنش- کرنش آزمایشگاهی و مصالح فولادی نیز با استفاده از نمودارهای تنش- کرنش و به صورت پلاستیک تعریف شده‌اند.

از آنجا که خود کابل مدل نشده است، نیروی پیش‌تینیدگی مؤثر کابل به صورت دو نیروی متمرکز در ابتدا و انتهای تیرها و یک نیروی خطی یکنواخت رو به بالا در طول کابل اعمال گردیده و به منظور افزایش دقت نتایج، ابعاد المانها در ناحیه کابل کاهش یافته است. از شرایط اولیه برای تعریف پیش‌تینیدگی در میلگردها استفاده می‌شود. در چنین مواردی در ABAQUS/STANDARD سازه قبل از بارگذاری فعال به وسیله یک گام تحلیل استاتیک اولیه، بدون هیچگونه نیروی خارجی اعمال شده (یا فقط با بارهای مرده) باید به یک حالت تعادل برسد. لازم به ذکر است که این امر فقط در مواردی که میلگرد با استفاده از تکنیک لایه میلگرد تعریف شده است، میسر می‌باشد.

در خصوص گامهای تحلیل استاتیکی، در ابتدا پیش‌تینیدگی، سپس بار وزن و پس از آن بارهای خارجی به نمونه‌ها اعمال شده است و به منظور تعیین ظرفیت باربری در گام سوم از تحلیل استاتیکی ریسک استفاده شده است. پس از تعریف مدل اجزای محدود، شرایط بارگذاری و مرزی، مدل‌های مختلف تحلیل شده و شیب دستکهای فشاری و مقاومت خمشی به منظور بررسی اثرات پیش‌تینیدگی قائم و افقی بر روی رفتار تیرهای بتن پیش‌تینیده تعیین شد. اثر پیش‌تینیدگی قائم روی ظرفیت باربری تیر پیش‌تینیده را می‌توان با استفاده از نمودار حداکثر باربری مدل‌های



شکل ۱. افزایش ظرفیت خمشی در اثر پیش‌تینیدگی قائم



شکل ۲. زاویه دستک فشاری در طول مدل‌های پیوسته I-C

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج تحلیل عددی

حالت شکست			حداقل و حداکثر زاویه دستک فشاری در طول دهانه برشی (mm)	حداکثر تغییر شکل وسط تیر (mm)	حداکثر ظرفیت خمشی تیر (kN/m)	نسبت a/d دهانه برشی به ارتفاع تیر	نوع تیر	نام تیر
کششی برشی	قطری	خمشی						
✓			23 ≤ □ ≤ 43	96	33/0.3	6/66	بتن آرمه	R-C-T-S
	✓		40 ≤ □ ≤ 49	25/43	151/37	4/11	بتن آرمه	R-C-I-S
	✓		14 ≤ □ ≤ 24	70/63	211/89	2/76	بتن آرمه	R-C-T-C
	✓		19 ≤ □ ≤ 32	11	294/384	2/21	بتن آرمه	R-C-O-S
✓			22 ≤ □ ≤ 40	9	498/75	1/92	بتن آرمه	R-C-I-C
✓			25 ≤ □ ≤ 45	7	624/75	0/92	بتن آرمه	R-C-O-C
✓			19 ≤ □ ≤ 40	96/62	80/377	6/66	بتن پیش تنیده	T-S
	✓		20 ≤ □ ≤ 34	25/44	553/879	4/11	بتن پیش تنیده	I-S
	✓		10 ≤ □ ≤ 20	72/17	40.4/1	2/76	بتن پیش تنیده	T-C
	✓		10 ≤ □ ≤ 19	11	760/2	2/21	بتن پیش تنیده	O-S
✓			9 ≤ □ ≤ 20	10/7	1677/55	1/92	بتن پیش تنیده	I-C
✓			4 ≤ □ ≤ 25	7	2450/35	0/92	بتن پیش تنیده	O-C
✓			19 ≤ □ ≤ 40	386/5	80/64	6/66	با پیش تنیدگی قائم	POST T-S
	✓		20 ≤ □ ≤ 33	86/28	561/229	4/11	با پیش تنیدگی قائم	POST I-S
	✓		15 ≤ □ ≤ 20	60/69	410/4	2/76	با پیش تنیدگی قائم	POST T-C
	✓		10 ≤ □ ≤ 18	18	760/3	2/21	با پیش تنیدگی قائم	POST O-S
✓			9 ≤ □ ≤ 15	39/62	1989/75	1/92	با پیش تنیدگی قائم	POST I-C
✓			3 ≤ □ ≤ 23	12/5	2943/85	0/92	با پیش تنیدگی قائم	POST O-C

همان‌طور که مشاهده می‌شود دارای تطابق خوبی هستند. خلاصه‌ای از نتایج این قسمت در جدول ۲ ارائه شده است. در تحلیل غیر خطی از کشسانی آسیب بتن در تعریف مصالح بتنی استفاده شده و به این ترتیب با استفاده از تحلیل می‌توان محدوده ترک‌خوردگی برشی جان تیر را نشان داد (شکل ۶).

۵. مطالعات آزمایشگاهی

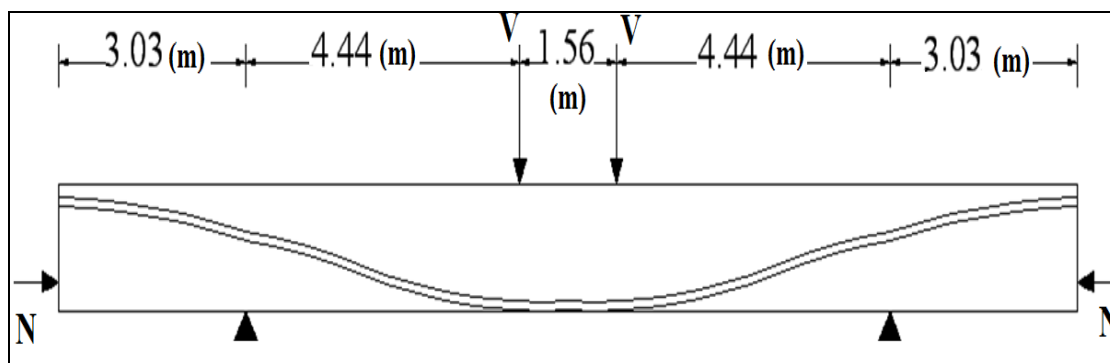
با وجود آن که صحت تحلیل عددی در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، برای اطمینان بیشتر از صحت مطالعات صورت گرفته، دو آزمایش با استفاده از تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه سازه دانشگاه امیرکبیر صورت گرفت. تیرها با ابعاد 400×200 میلیمتر و با یک کابل پیش‌تینیدگی قرار گرفته در یک غلاف پلاستیکی به قطر ۲۰ میلیمتر ساخته شده و کابل‌های پیش‌تینیدگی که شامل ۷ رشته ۲ میلیمتری بودند، ۹۰ روز پس از بتن‌ریزی تحت کشش قرار گرفتند. این آزمایشها با هدف بررسی رفتار حقیقی این اعضا تحت شرایط بارگذاری دو نقطه‌ای و ارزیابی اعتبار مطالعات عددی صورت گرفت. طول تیر، اندازه دهانه و فاصله نقاط بارگذاری به ترتیب $4/4$ ، ۳ و $1/8$ متر هستند. مشخصات بتن برای نمونه‌های تیرهای پیش‌تینیده برای هر نمونه با ساخت یکسری از نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای ارزیابی شد. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در (جدول ۳) ارائه شده است. برای به حداقل رساندن واتنش نیروی پیش‌تینیدگی کابلها در سه مرحله کشیده شدند. مقدار پیش‌تینیدگی مؤثر انتهایی ۱۰۰ کیلو نیوتن است و اطلاعات کامل درباره کشش کابلها در جدول ۴ ارائه شده است.

۴. ارزیابی صحت مطالعات عددی با استفاده از

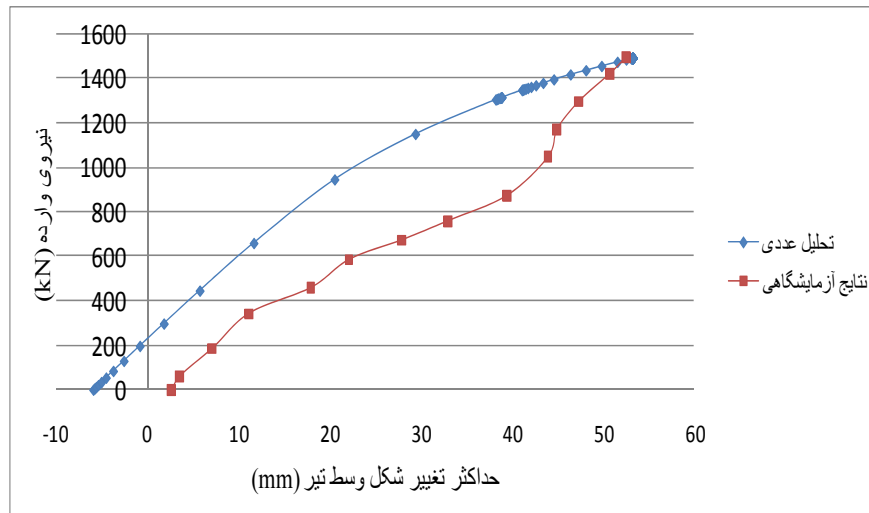
نتایج آزمایشهای Fernandez و Muttoni

Muttoni و Fernandez شش آزمایش بر روی تیرهای جدا شده از پل Viaduct Viadotto Sopra le Cantine در کشور سوئیس انجام دادند. این آزمایشها به منظور بررسی رفتار این اعضا و مطالعه اثر پیش‌تینیدگی قائم روی حالت ترک‌خوردگی در جان تیر صورت گرفت [Ruiz and Muttoni, 2008]. در این تحقیق صحت مطالعات عددی انجام شده با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایشهای مختلف بر روی یکی از این تیرها انجام شده است. این تیر از دو قسمت دال و قسمت پیش ساخته تشکیل شده که مقاومت فشاری بتن در این دو قسمت به ترتیب $48/2$ و $53/4$ مگاپاسکال است. مقدار حقیقی تنش پیش‌تینیدگی در نمونه آزمایشگاهی پس از کم کردن واتنش‌ها $\sigma_{pe} = 530$ مگاپاسکال است. نتایج شامل نمودار بارگذاری- تغییر مکان وسط دهانه، نمودار زاویه دستک فشاری در طول تیر و حالت شکست نمونه هستند. نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی در شکل‌های ۴-۶ نشان داده شده است.

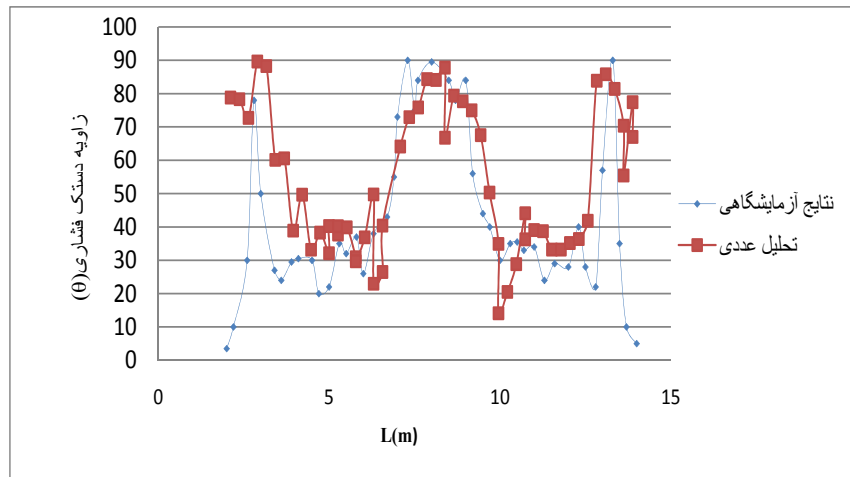
دلیل تفاوت بین نمودار بار تغییر مکان وسط تیر در تحلیل و آزمایش در تعریف بتن در مدل عددی است که براساس نتایج تنش- کرنش آزمایشهای مختلف به‌دست آمده است. همچنین در آزمایش صورت گرفته نتایج بار- تغییر مکان از لحظه اعمال بار ثبت شده در حالی که نتایج تحلیل غیر خطی از ابتدای اعمال پیش‌تینیدگی به ثبت رسیده است. در (شکل ۵) نمودار شیب زاویه دستک فشاری در طول تیر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داده شده و



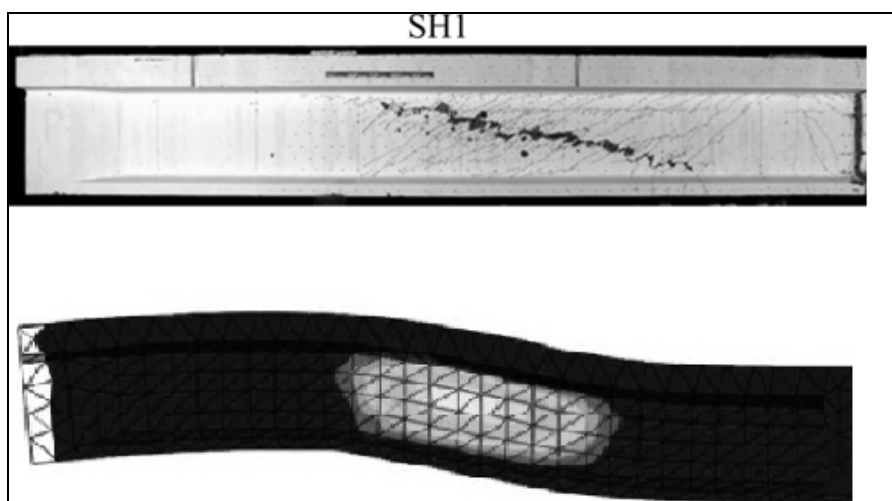
شکل ۳. بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی



شکل ۴. نمودار بار- تغییر مکان وسط تیر در تحلیل غیر خطی و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۵. زاویه دستک فشاری



شکل ۶. حالت شکست در آزمایش و تحلیل

جدول ۲. خلاصه‌ای از نتایج

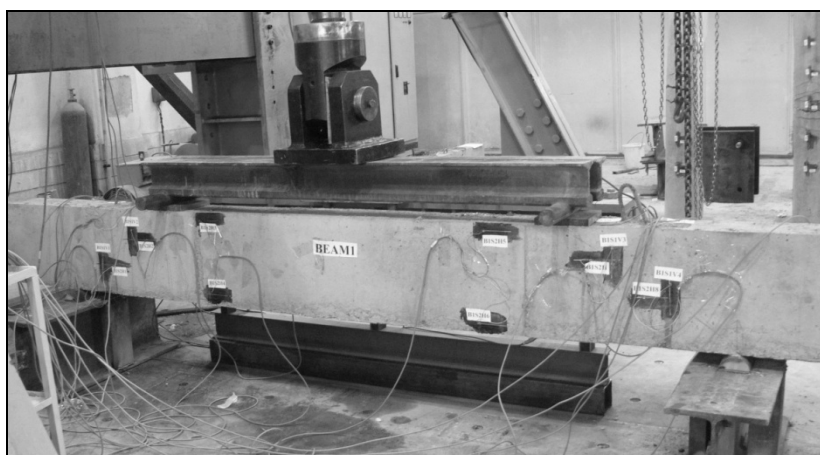
تیر	حالت شکست	حداکثر ظرفیت خمشی (kN)	حداکثر تغییر شکل وسط تیر (mm)
مدل عددی	پکیدگی جان تیر	$V=1491\text{kN}$, $N=3580\text{kN}$	۵۳/۱۲ mm
مدل آزمایشگاهی	پکیدگی جان تیر	$V=1491\text{kN}$, $N=3580\text{kN}$	۵۲/۶ mm

جدول ۳. مشخصات مکانیکی نمونه‌های بتنی

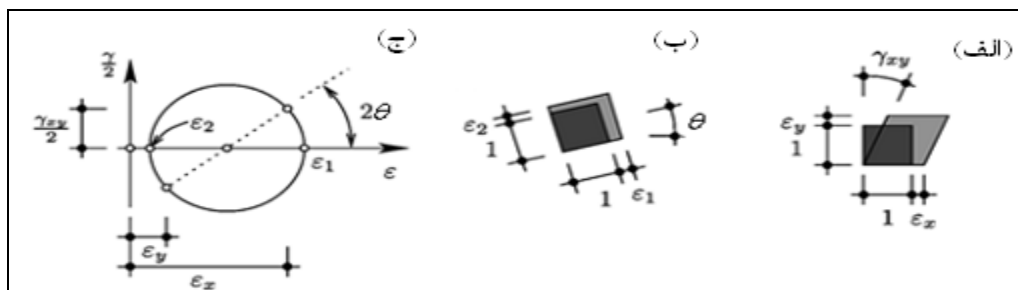
نوع و تعداد نمونه‌ها	نتایج آزمایش فشاری ۷ روزه (مگا پاسکال)	نتایج آزمایش فشاری ۱۱ روزه (مگا پاسکال)	نتایج آزمایش فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال)	نتایج آزمایش فشاری در روز آزمایش (مگا پاسکال)
۳ مکعبی	۳۳	۴۱	۴۴	-----
۳ استوانه‌ای	-----	-----	-----	۴۴

جدول ۴. مراحل کشش کابلها

نوع کابل	نیروی پیش‌تینیدگی مؤثر (kN)	کشش در مرحله اول (MPa)	افزایش طول در مرحله اول (mm)	کشش در مرحله دوم (MPa)	افزایش طول در مرحله دوم (mm)	کشش در مرحله سوم (MPa)	افزایش طول در مرحله سوم (mm)
T13	۱۰۰	۵	۱	۱۵	۵	۲۱/۲	۱۳



شکل ۷. نحوه قرارگیری کرنش‌سنجها



شکل ۸. تعیین شیب دستکهای فشاری به وسیله دایره موهر، (الف) کرنش، (ب) دایره موهر و کرنشهای اصلی، (ج) جهات کرنشهای اصلی [Ruiz, and Muttoni, 2007]

۶. زاویه دستک فشاری در آیین‌نامه‌ها و

مطالعات گذشته

همان‌طور که از نتایج تحلیل غیرخطی بر می‌آید، کرانه پایین‌تر، زاویه دستک فشاری در بتن پیش‌تنیده ۱۵ درجه است، در حالی که در برخی از آیین‌نامه‌ها مانند آیین‌نامه (ACI) این مقدار ۴۵ درجه در نظر گرفته می‌شود [ACI, 2005]. اثر نیروی پیش‌تنیدگی در روش گراسر (GRA) که براساس آیین‌نامه EC2 [EC2, 2004] hsj بیشتر از روشهای دیگر است. روش فرانسوی (BPEL-FRANCE) [معمدی، م، ۱۳۷۸] و AS-3600-1988 [AS-3600-1988, 1988] در اکثر مدلها دارای نتایج یکسانی هستند. در روش فرانسوی و AS-3600-1988 اثر پیش‌تنیدگی قائم و جزء قائم پیش‌تنیدگی در کابلهای سهمی شکل با استفاده از یک پارامتر در روابط زاویه دستک فشاری در نظر گرفته می‌شود. اما با توجه به شکل ۱۱ هیچ‌یک از این روشها در تخمین زاویه دستک فشاری به حد کافی دقیق نیستند. زاویه دستک فشاری را با استفاده از روش میدان تنش پیوسته که براساس دایره موهر بوده و همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است و نتایج آزمایشگاهی دقت آن را تصدیق می‌کنند، می‌توان به دست آورد.

۷. جمع‌بندی و نتایج

این مقاله نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی و عددی را بر روی رفتار تیرهای پیش‌تنیده با پیش‌تنیدگی قائم ارائه می‌دهد. دو نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل ساخته شدند و تحت شکست برشی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آزمایشگاهی به منظور بررسی صحت مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌های اصلی مطالعات عددی عبارتند از: ۱- قابلیت یک میدان تنش در مدل‌سازی رفتار حقیقی یک عضو به مقدار قابل توجهی بستگی به سازگاری کرنشی آن دارد. مناسب‌ترین میدان تنش، میدان تنشی است که در آن تنشها در دو دستک فشاری مجاور به صورت ناگهانی تغییر نمی‌کند. این نوع میدان تنش، میدان تنش پیوسته نامیده می‌شود. نیروی برشی در اجزای مختلف تیر (جان، بالها، و کابلهای پیش‌تنیدگی) را می‌توان با استفاده از نتایج میدان تنش پیوسته تعیین کرد. دلیل استفاده از این روش در تعیین زاویه

نحوه قرارگیری اجزای آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. کرنشها در سه جهت در تیر مورد آزمایش توسط کرنش سنجهای PL-60-11 اندازه‌گیری شدند.

براساس این نتایج جهت کرنش اصلی فشاری قابل تعیین است. از آنجا که این نوع از کرنش‌سنجها کرنش را تنها در یک جهت اندازه‌گیری می‌کنند، بنابراین همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، زاویه دستک فشاری با استفاده از دایره موهر و مقادیر کرنشها در سه جهت از طریق فرمول زیر به دست آمده است:

$$\tan 2\theta = \frac{2\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (1)$$

منحنیهای بارگذاری- تغییر شکل وسط تیر در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. کرنشهای مهم در دو طرف تیر در لحظه شکست اندازه‌گیری شده است. زوایای دستک فشاری در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج تحلیل غیر خطی نیز با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۰ و جدول ۵ مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است شکست در هر دوی نمونه‌ها از نوع شکست کششی برشی و خردشدگی بتن در نقطه بارگذاری است.

ظرفیت باربری نهایی و حداکثر تغییر شکل وسط تیر در نمونه او نمونه ۲ و تحلیل غیر خطی به ترتیب ۳۱۰ کیلو نیوتن، ۳۶۰ کیلو نیوتن، ۳۳۳ کیلو نیوتن و ۴۰/۸۲ میلی‌متر، ۴۳/۲ میلی‌متر و ۴۴/۷ میلی‌متر هستند. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است تحلیل عددی و آزمایشگاهی نتایج تقریباً یکسانی دارند.

جدول ۵. زاویه دستک فشاری در آزمایشهای دانشگاه امریکیر

زاویه دستک فشاری		نقاط
نتایج آزمایش	نتایج تحلیل	
۴۳	۴۰	S1,2
۳۷	۳۳	S3,4
۲۱	۱۵	S5,6
۲۶	۲۵	S7,8

است. معمولاً شیب زاویه دستک فشاری در تیرهای با نسبت برشی بالاتر، بیشتر است.

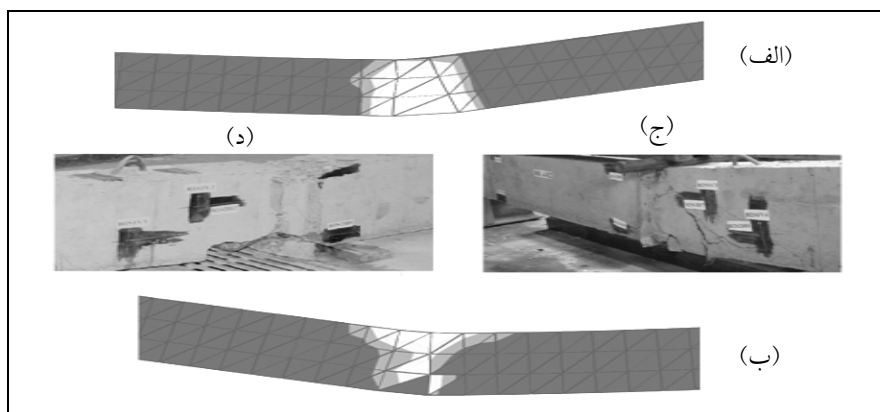
۴- خاموتهای پیش‌تنیده باید در مقاطع بحرانی در برش مورد استفاده قرار گیرند. به این ترتیب با شبیه‌سازی این تیرها و مشخص نمودن نواحی آسیب دیده در برش می‌توان مشخصات این خاموتها را با استفاده از روش آزمون و خطا تعیین کرد.

۵- پیش‌تنیدگی افقی یک اثر قابل ملاحظه بر روی تغییرات زاویه دستک فشاری در طول تیر داشته و در برخی موارد آن را تا حدود ۶۰٪ پایین می‌آورد. این کاهش به نیروی پیش‌تنیدگی مؤثر بستگی دارد. پیش‌تنیدگی قائم تنها در سازوکار باربری و مقاومت برشی تیرهای با نسبت برشی پایین و بویژه تیرهای عمیق، دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای است. پیش‌تنیدگی قائم در تیرهایی که رفتار برشی در آنها حاکم است (همانند تیرهای عمیق) می‌تواند ظرفیت باربری را تا ۲۰٪ افزایش دهد و همچنین زاویه دستک فشاری را کاهش می‌دهد.

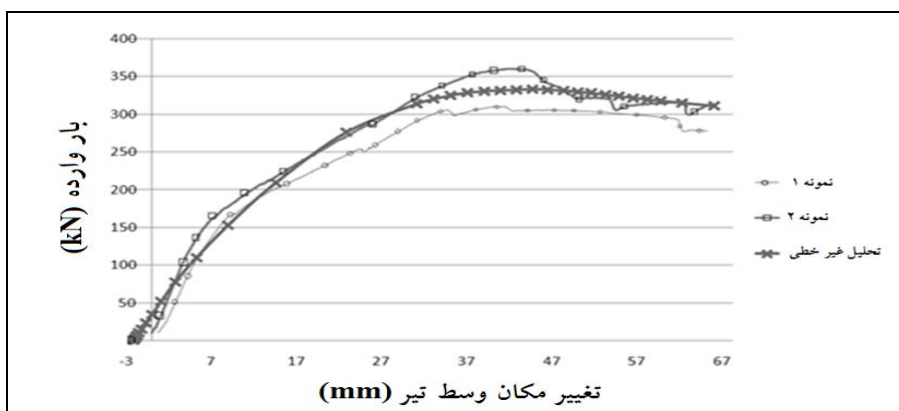
دستک فشاری در تحلیل غیرخطی تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی است. از آنجا که در میدان تنش پیوسته شیب دستکهای فشاری براساس دایره موهر و تنشهای اصلی به‌دست می‌آید، این روش مناسب‌ترین روش برای در نظر گرفتن پیش‌تنیدگی قائم است.

۲- نتایج آزمایشگاهی Muttoni و Fernandez و نتایج به‌دست آمده از آزمایشهای انجام شده در دانشگاه امریکیر نشان‌دهنده صحت تحلیل غیر خطی بویژه در تخمین ظرفیت باربری، حداکثر تغییر شکل تیر و زاویه دستک فشاری هستند.

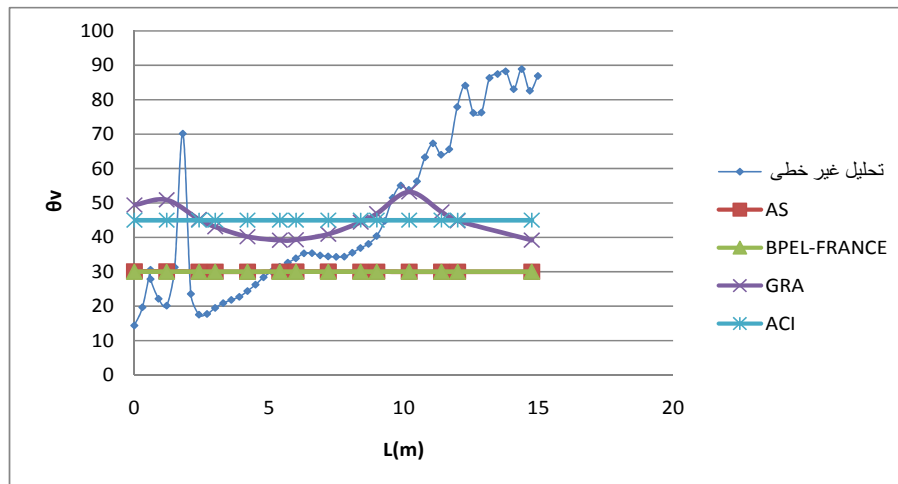
۳- نتایج تحلیل غیرخطی در تخمین زاویه دستک فشاری نشان می‌دهند با حرکت از تکیه‌گاهها به سمت وسط تیر، زاویه دستک فشاری افزایش می‌یابد. در مدل‌های پیوسته شیب زاویه دستک فشاری در نزدیکی تکیه‌گاه میانی نسبت به تکیه‌گاههای کناری بیشتر است، به این دلیل که نیروی برشی در تکیه‌گاه میانی بیشتر



شکل ۹. (الف) آسیب کششی بتن در تحلیل غیر خطی، (ب) آسیب فشاری بتن در تحلیل غیر خطی بتن، (ج) شکست در نمونه ۱، (د) شکست در نمونه ۲



شکل ۱۰. نمودار بار- تغییر مکان وسط تیر در نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی



شکل ۱۱. زاویه دستک فشاری در آیین‌نامه و مقالات در مقایسه با تحلیل غیرخطی در مدل POST-T-S

۸ مراجع

Journal of Engineering Mechanics, No. 124(5), pp. 892-900.

- Ramirez, J. A. and Breen, G. E. (1991) "Evaluation of a modified truss model approach for beams in shear", ACI Structural Journal, V. 88, no. 5, pp. 562-571.

- Ruiz, M. F. and Muttoni, A. (2008) "Shear strength of thin-webbed post-tensioned beams", ACI Structural Journal, No. 105(3), pp. 308-317.

- Ruiz, M. F. and Muttoni, A. (2007) "On development of suitable stress fields", ACI Structural Journal, No. 104(9), pp. 495-502.

- Standards Association of Australia (1988) "Australian standard for concrete structures (AS-3600-1988)", Sydney, Australia.

- Vecchio, F. J. and Collins, M. P. (1986) "The modified compression field theory for reinforced concrete elements Subjected o shear", ACI Journal, pp. 219-231.

- معتمدی (۱۳۷۸) "تحلیل غیر خطی تیرهای بتن پیش‌تنیده به منظور ارزیابی مقاومت برشی و مقایسه نتایج با آیین‌نامه‌های معتبر،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

- American Concrete Institute (2005) "Building code requirements for structural concrete (ACI-318-05)", Farmington Hills.

- ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998) "Recent approaches to shear design on structural concrete", Journal of Structural Engineering, V. 124, No. 12, pp. 1375-1417.

- British Standards Institution (2004) "The European Standard EN 1992-1-1.Eurocode 2: Design of concrete structures (EC2)", London: BSI.

- Lee, J. and Fenves, G. L. (1998) "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures",