



تعیین مدول گسیختگی بتن ساخته شده با سنگدانه‌های شکسته با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای

محمدرضا توکلی زاده^۱، کیومرث صاحبکار^۲، وهاب اسمعیلی^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

خلاصه

با توجه به این که هنوز روش استاندارد برای تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های استوانه‌ای ارائه نشده است، در این پژوهش آزمایشگاهی امکان کاربرد این نمونه‌ها در آزمایش خمشی بررسی می‌شود. برای این منظور ۴۸ تیر بتنی با مقطع مربعی و ۷۶ نمونه‌ی استوانه‌ای با چهار طرح اختلاط مختلف، ساخته شد و در نهایت با انجام تحلیل‌های آماری، به مقایسه‌ی نتایج و استخراج روابط لازم پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: مدول گسیختگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، نمونه‌ی بتنی استوانه‌ای

۱. مقدمه

مقاومت کششی بتن بسیار پایین بوده و در حدود ۸ تا ۱۲ درصد مقاومت فشاری آن است [۱]. معمولاً در طراحی اعضای بتن آرمه از این مقاومت صرف‌نظر می‌شود، مگر برای کنترل ترک خوردگی مقطع که دانستن این پارامتر ضروری است. برای تعیین مقاومت کششی بتن آزمایش‌های مختلفی وجود دارد، مانند آزمایش کشش مستقیم، آزمایش دو نیم شدن (Splitting) و آزمایش خمشی (سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای). مقدار مقاومت تعیین شده از آزمایش کشش مستقیم کمتر از آزمایش دو نیم شدن و آزمایش دو نیم شدن کمتر از آزمایش خمشی است. تنش نهایی کششی در آزمایش خمشی به مدول گسیختگی، f_r ، معروف است و از این پارامتر برای طراحی اعضای خمشی استفاده می‌شود.

مدول گسیختگی بتن در محاسبه‌ی لنگر ترک خوردگی تیرهای بتن مسلح و به ویژه اعضای پیش‌تنیده که ترک نخوردن عضو یک اصل است، نقش اساسی دارد. برای تعیین این پارامتر طبق روش‌های استاندارد فعلی، نیاز به برشی از تاوه و یا ساخت نمونه‌های با مقطع مربعی می‌باشد. از آنجایی که تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای ساده‌تر بوده و نمونه‌های حاصل از مغزه‌گیری نیز به شکل استوانه هستند، تدوین روشی برای انجام آزمایش خمشی بر روی چنین نمونه‌هایی سبب سهولت کار خواهد شد.

۲. پژوهش‌های پیشین

از زمانی که بتن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی شناخته شد، مقاومت کششی کم آن به عنوان بزرگترین عیب بتن معرفی گردید. این امر باعث شد که از این ماده تنها در قسمت‌هایی که همواره تحت فشار هستند، استفاده گردد. ضعف کششی بتن با قرار دادن میلگرد فولادی در آن برطرف شده و ماده‌ی جدیدی به نام بتن مسلح ایجاد شد. با توجه به مقاومت کششی بسیار کم بتن در برابر فولاد، در طراحی از مقاومت کششی بتن صرف‌نظر می‌شد. این امر باعث شد که مقاومت کششی بتن و عوامل مؤثر بر آن در نظر پژوهشگران کم اهمیت جلوه داده شده و پژوهشی در این زمینه صورت نگیرد.

با ساخته شدن راه‌های با رویه‌ی بتنی، مقاومت خمشی بتن اهمیت پیدا کرد؛ زیرا در این رویه‌ها امکان ایجاد تنش کششی در هر نقطه‌ای و در هر جهتی وجود داشت (به دلیل بارهای ترافیکی). در نتیجه طرح بهینه و اقتصادی یک رویه‌ی بتنی نازک که توانایی حمل بارهای زیاد ترافیکی را داشته باشد، تبدیل به یکی از مسائل مهندسی شد. واضح است که مسلح کردن این بتن به فولاد بسیار هزینه‌بر بوده و مقرون به صرفه نخواهد بود. در نتیجه پژوهش در مورد مقاومت خمشی بتن، عوامل مؤثر بر آن و رابطه‌ی آن با دیگر پارامترها آغاز شد که تا به امروز ادامه دارد.

یکی از اولین پژوهش‌های صورت گرفته، بررسی جامع مقاومت خمشی تیرهای بتنی عریض است که در سال ۱۹۲۲ توسط آقای آبرامز در شیکاگو ارائه شد. او در این پژوهش، ۷۵۰ نمونه‌ی بتنی مکعب مستطیلی با ابعاد و طرح‌های اختلاط مختلف را تحت آزمایش چهارنقطه‌ای قرار داد و اثر ۱۳ پارامتر مختلف از جمله مقاومت فشاری بتن، سن بتن و عمق مقطع را بر مقاومت خمشی بتن بررسی کرد. نتایج پژوهش او همگی بیان‌گر این نکته بودند که ارتباط تنگاتنگی بین f_r و f_c' وجود دارد. او در نوشته‌ی خود رابطه‌ی غیرخطی بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ارائه داد [۲]. رافائل در سال ۱۹۸۴، روش‌های مختلف تعیین مقاومت کششی بتن (کشش مستقیم، دو نیم شدن، خمشی) را مورد بحث و بررسی قرار داد و سعی کرد دلایل اختلاف مقاومت به دست آمده از آزمایش‌های مختلف را بیابد [۳].

با توجه به اهمیت مدول گسیختگی بتن در تعیین لنگر ترک خوردگی عضو و میزان فولاد کمینه، آیین‌نامه‌های معتبر دنیا نیز بخشی را به مقاومت خمشی بتن و چگونگی تعیین آن برای مقاصد طراحی اختصاص داده‌اند که با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی بتن این روابط نیز در حال اصلاح و تکمیل می‌باشند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها مربوط به بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۴۰ مگاپاسکال هستند. اما امروزه با پیشرفت تکنولوژی بتن، مقاومت فشاری بتن بسیار فراتر از این مقدار رفته است و نیاز به اصلاح روابط آیین‌نامه‌ای می‌باشد. لگرون و پالتر در سال ۲۰۰۰، با تحلیل آماری بر روی ۳۹۵ داده‌ی به دست آمده از بتن‌هایی با مقاومت تا ۱۳۰ مگاپاسکال روابط جدیدی بین مدول گسیختگی بتن با مقاومت فشاری آن برقرار کردند [۴]. بازان و نوک در سال ۲۰۰۱، با توجه به روش استاندارد موجود برای تعیین مقاومت خمشی، دو روش را برای تعیین اثر اندازه‌ی نمونه بر مدول گسیختگی بتن، پیشنهاد نمودند [۵].

قابل توجه است که همگی پژوهشگران آزمایش‌های خمشی خود را با نمونه‌های مکعب مستطیلی انجام دادند و در نتیجه تمامی روابط به دست آمده بر اساس این نمونه‌ها معتبر می‌باشد. این امر باعث می‌شود که همواره از دو نوع قالب متفاوت برای تعیین f_r و f_c' بهره گرفته شود. با توجه به این مطلب، پژوهش حاضر می‌تواند زمینه را برای ارائه‌ی روش آزمایش استاندارد تعیین مقاومت خمشی بتن با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای مشابه آنچه در آزمایش فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، هموار کند.

۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، از چهار طرح اختلاط مختلف استفاده شده که مقاومت آن‌ها در بازه‌ی ۳۰ تا ۷۰ مگاپاسکال می‌باشد. در هر طرح اختلاط، برای هر یک از آزمایش‌های فشاری، خمشی سه نقطه‌ای و خمشی چهارنقطه‌ای حدود شش نمونه‌ی استوانه‌ای ریخته شده و افزون بر آن به منظور مقایسه و رابطه‌سازی، برای هر یک از آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای، شش تیر بتنی با مقطع مربعی نیز ساخته شده است. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر و نمونه‌های مکعب مستطیلی به طول ۳۵ سانتیمتر و با مقطع مربعی به ضلع ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شدند. به منظور سهولت در بتن‌ریزی، نمونه‌ها کوچکتر از نمونه‌های استاندارد ساخته شد. با توجه به مثبت بودن نتایج حاصل از این پژوهش که نشان از امکان تعیین مدول گسیختگی با استفاده از نمونه‌های



استوانه‌ای دارد، می‌توان با گسترش این آزمایش‌ها به بتن‌های با مقاومت‌های مختلف، سنگدانه‌های گوناگون و استانداردهای ابعاد نمونه‌ها، مسیر را برای ارائه‌ی روش آزمایش خمشی استاندارد بر اساس این نمونه‌ها، فراهم نمود. در صورت تحقق چنین هدفی، کمک شایانی به پژوهشگران و مهندسان، جهت استفاده از نمونه‌های مغزه‌گیری شده یا ساخته شده با قالب استوانه‌ای استاندارد، در آزمایش خمشی و تعیین مدول گسیختگی خواهد شد.

۳-۱. مصالح مورد استفاده

شن مورد استفاده، شن شکسته‌ی شسته بوده و در ساخت نمونه‌ها از یک دپوی ماسه اما با دو دانه‌بندی متفاوت بهره گرفته شده است؛ به این صورت که در مخلوط‌های سوم و چهارم برای افزایش مقاومت با شستن ماسه دانه‌های بسیار ریز آن جدا و دانه‌بندی اصلاح شده است. ویژگی بارز ماسه‌ی مورد استفاده مدول نرمی بالای آن بوده که باعث کاهش کارایی بتن و افزایش مقاومت آن می‌شود. مشخصات شن و ماسه‌ی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. سیمان مورد استفاده در ساخت بتن از نوع پرتلند تیپ II می‌باشد و چگالی نسبی آن، ۳/۱۵ در نظر گرفته شده است. از افزودنی فوق روان‌کننده و دیرگیرکننده، مطابق با ASTM-C494-Type G، در مخلوط‌های سوم و چهارم و همچنین از میکروسیلیس با چگالی نسبی ۲/۲، در مخلوط چهارم بهره گرفته شده است [۶].

جدول ۱ - مشخصات شن و ماسه

مشخصه‌ی اندازه‌گیری شده	شن	ماسه
چگالی دانه‌ها (kg/m^3)	2710	2370
(%) درصد رطوبت اشباع با سطح خشک	1.00	2.74
چگالی خشک میله‌کوبیده (kg/m^3)	1600	---

۳-۲. طرح اختلاط

دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای مخلوط‌های مختلف در جدول ۲ و چهار طرح اختلاط مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲ - دانه‌بندی سنگدانه‌ها

الک	درصد عبوری			
	مخلوط اول	مخلوط دوم	مخلوط سوم	مخلوط چهارم
1"	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	78.46	76.37	100.00	100.00
3/8"	64.11	60.62	76.95	76.97
#4	52.14	47.50	42.36	42.40
#8	37.82	34.45	36.06	36.10
#16	20.21	18.41	22.63	22.65
#30	8.11	7.39	11.02	11.03
#50	2.41	2.20	2.97	2.97
#100	0.59	0.54	0.59	0.59
#200	0.16	0.15	0.02	0.02

جدول ۳ - طرح اختلاط برای یک متر مکعب بتن

مخلوط	اول	دوم	سوم	چهارم
شن (kg)	898	910	985	1020
ماسه (kg)	978	823	725	751
سیمان (kg)	287	483	725	535
آب (kg)	187	184	227	174
(%) نسبت آب به سیمان	65	38	31	32
(%) نسبت میکروسیلیس به ماده‌ی چسبنده	---	---	---	10
(%) نسبت فوق روان‌کننده به ماده‌ی چسبنده	---	---	0.43	1.17
چگالی بتن (kg/m^3)	2350	2400	2665	2540

۳-۳. ساخت نمونه‌ها

قالب تیرهای مکعب مستطیلی از قطعات MDF، که با پیچ به یکدیگر اتصال دارند، به صورت سه‌قلو ساخته شده و با باز کردن پیچ‌های اتصال نمونه‌ها خارج می‌شوند. قالب‌های استوانه‌ای از لوله‌ی PVC فشار قوی، که انتهای آن با دیسک چوبی به‌طور مناسبی بسته شده، تهیه و برای خارج کردن نمونه‌ها از فشار هوا استفاده شده است. هر یک از مخلوط‌های بتنی، با توجه به طرح اختلاط و اسلامپ حدود ۶۰ میلیمتر، در یک روز و در حجمی در حدود ۱۰۰ لیتر ریخته شده و مخلوط‌کن مورد استفاده از نوع جام دوار می‌باشد. آزمایش اسلامپ، در شکل ۱ و مخلوط‌کن، در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا لحظه‌ی انجام آزمایش در آب اشباع از کلسیم هیدروکسید قرار گرفته‌اند. نمونه‌های استوانه‌ای پیش از آزمایش فشاری، مطابق استاندارد ASTM-C617، کلاهک‌گذاری شدند [۷]. عمل‌آوری اولیه در قالب، در شکل ۳، عمل‌آوری نهایی نمونه‌ها، در شکل ۴، کلاهک‌گذاری، در شکل ۵ و نمونه‌های حاصل از یک مخلوط، در شکل ۶ به نمایش درآمده است.



شکل ۳ - عمل‌آوری اولیه در قالب



شکل ۲ - مخلوط‌کن



شکل ۱ - آزمایش اسلامپ



شکل ۶ - نمونه‌های حاصل از یک مخلوط



شکل ۵ - عملیات کلاهک‌گذاری



شکل ۴ - عمل‌آوری نهایی نمونه‌ها

۴. روش آزمایش

آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌ها شامل آزمایش فشاری و خمشی بوده، که در ادامه مختصری به آن‌ها پرداخته شده است. آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (f_c): نمونه‌ها پس از کلاهک‌گذاری، مطابق استاندارد ASTM-C39 تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند [۸]. بار بایستی به گونه‌ای اعمال شود، که تنش در نمونه با نرخ ۰/۲۰-۰/۳۰ مگاپاسکال بر ثانیه افزایش یابد. بنابراین سرعت بارگذاری، ۲ کیلونیوتن بر ثانیه منظور گردید. شایان توجه است که دلیل استفاده از علامت f_c به جای f'_c این است که ابعاد نمونه‌ها کوچک‌تر از ابعاد استاندارد و سن آن‌ها در لحظه‌ی آزمایش بیش از ۲۸ روز بوده است؛ که البته این امر خللی در ماهیت مقایسه‌ای این پژوهش ایجاد نخواهد کرد. نمونه‌های کلاهک‌گذاری شده در شکل ۷، دستگاه آزمایش فشاری در شکل ۸ و نمونه‌های گسیخته شده تحت فشار در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷- نمونه‌های کلاهک‌گذاری شده شکل ۸- دستگاه آزمایش فشاری شکل ۹- نمونه‌های گسیخته شده تحت فشار

آزمایش تعیین مقاومت خمشی (f_r): مقاومت خمشی تیرهای مکعب مستطیلی به دو صورت چهارنقطه‌ای، مطابق استاندارد ASTM-C78، و سه‌نقطه‌ای، مطابق استاندارد ASTM-C293، تعیین شد. در حالت چهارنقطه‌ای، بار به گونه‌ای اعمال می‌گردد که بیشینه تنش در وجه کششی (دورترین تار کششی) با نرخ ثابت ۰/۸۶-۱/۲۱ مگاپاسکال بر دقیقه افزایش یابد [۹]. در حالت سه‌نقطه‌ای، بار به گونه‌ای اعمال می‌گردد که بیشینه تنش در وجه کششی (دورترین تار کششی) با نرخ ثابت ۰/۹-۱/۲ مگاپاسکال بر دقیقه افزایش یابد [۱۰]. دستگاه مورد استفاده، از نوع جک دستی با نمایشگر دیجیتالی بوده که در شکل ۱۰ نشان داده شده است و شکل ۱۱ نشان‌دهنده‌ی یک تیر مکعب مستطیلی تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای می‌باشد. لازم به یادآوری است که یکی از اهداف بلند مدت این پژوهش، ایجاد استاندارد برای آزمایش خمشی تیرهای استوانه‌ای است. در آزمایش خمشی تیر استوانه‌ای، در محل واکنش‌های تکیه‌گاهی تمرکز تنش رخ خواهد داد. از این رو ممکن است پیش از گسیختگی خمشی، تیر دچار گسیختگی موضعی در تکیه‌گاه گردد. برای حل این مشکل، همان‌گونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، از نوار چوبی با ضخامت ۳ میلیمتر و عرض ۲۰ میلیمتر بین نمونه و سطح تکیه‌گاه استفاده شد. در این مقاله، نشانه‌های به کار رفته برای مدول گسیختگی حاصل از آزمایش‌های خمشی سه‌نقطه‌ای تیر مکعب مستطیلی، چهارنقطه‌ای تیر مکعب مستطیلی، سه‌نقطه‌ای تیر استوانه‌ای و چهارنقطه‌ای تیر استوانه‌ای، به ترتیب $f_{rc(3)}$ ، $f_{r(4)}$ ، $f_{rc(4)}$ و $f_{rc(3)}$ می‌باشد.



شکل ۱۰- دستگاه آزمایش خمشی شکل ۱۱- خمش چهارنقطه‌ای تیر مکعب مستطیلی شکل ۱۲- استفاده از نوار چوبی در تکیه‌گاه تیر استوانه‌ای

۵. جمع‌آوری و بررسی داده‌ها

نکته‌ی قابل توجه در جمع‌آوری داده‌ها این بود که در تمامی نمونه‌های تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای که در خمش گسیخته شدند، گسیختگی از وجه کششی در یک سوم میانی طول دهانه‌ی تیر آغاز شد. تیرهای استوانه‌ای تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای، که در محل تکیه‌گاه آن‌ها از نوار چوبی استفاده نشده بود، همانند شکل ۱۳، دچار گسیختگی موضعی در تکیه‌گاه شدند. نمونه‌های گسیخته شده، در شکل ۱۴ و داده‌های خام، در جدول ۴ ارائه شده‌اند. خلاصه‌های آماری شامل میانگین، به عنوان شاخص تمایل مرکزی، و ضریب تغییرات، به عنوان شاخص پراکندگی، در جدول ۵ آمده است. با بررسی این خلاصه‌های آماری و همانطور که در شکل ۱۵ نمایش داده شده، ملاحظه می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری، ضریب تغییرات داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش خمشی نیز افزایش می‌یابد. شایان توجه است که در نمودارها داده‌ها با منحنی‌هایی که از مبدأ مختصات می‌گذرد برازش شده‌اند.

جدول ۴- داده‌های خام آزمایشگاهی (تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال)

	شماره نمونه	f_c	$f_{r(3)}$	$f_{rc(3)}$	$f_{r(4)}$	$f_{rc(4)}$
مخلوط اول	1	32.5	4.03	6.38	3.85	---
	2	31.7	3.85	---	3.58	4.78
	3	36.0	4.31	6.12	3.85	---
	4	35.3	4.08	5.26	3.74	4.96
	5	30.2	3.83	5.26	4.05	4.68
	6	---	4.42	---	4.03	---
مخلوط دوم	1	55.8	5.95	7.73	5.14	5.52
	2	53.2	6.44	6.72	5.95	6.18
	3	52.3	6.10	7.59	5.35	5.33
	4	53.6	6.73	7.34	5.88	6.26
	5	55.0	5.66	7.93	5.48	5.86
	6	44.9	6.61	6.31	5.63	5.10
	7	---	---	6.68	---	5.31
مخلوط سوم	1	54.0	6.46	8.85	5.22	7.57
	2	55.9	6.12	10.28	4.80	7.22
	3	52.0	6.31	8.43	5.28	8.05
	4	56.7	5.72	8.81	4.77	8.29
	5	55.6	5.96	8.21	5.02	7.85
	6	56.3	4.75	8.84	4.29	8.37
	7	51.5	---	8.02	---	6.74
مخلوط چهارم	1	66.5	---	10.10	5.85	8.54
	2	65.5	6.85	8.16	6.22	6.92
	3	65.1	5.15	9.50	6.41	6.64
	4	60.1	6.70	10.93	6.41	8.64
	5	61.6	6.57	9.03	4.55	6.77
	6	63.8	5.73	9.46	5.53	6.50



شکل ۱۳ - گسیختگی موضعی در تکیه‌گاه تیر استوانه‌ای تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای

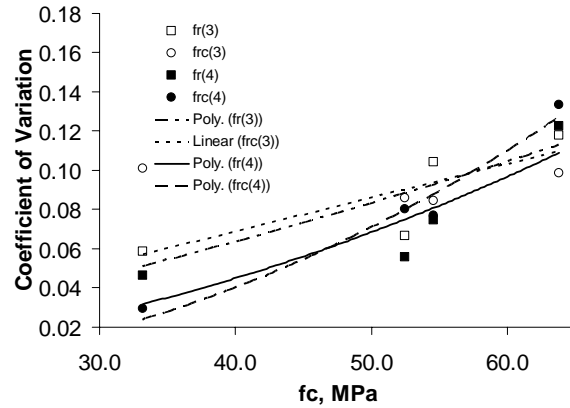


شکل ۱۴ - نمونه‌های گسیخته شده تحت آزمایش فشاری و خمشی

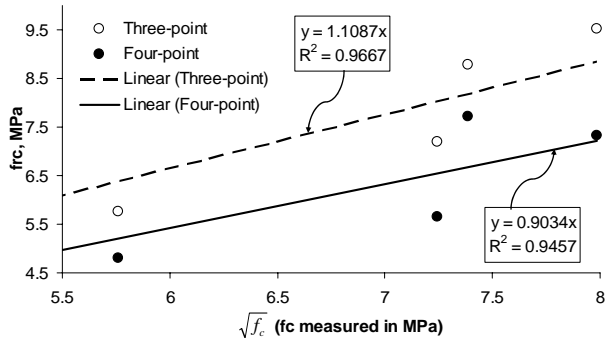
مقاومت خمشی بتن معمولی با $0/62$ تا $0/84$ برابر جذر مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال تخمین زده می‌شود [۱]. این محدوده به همراه رابطه‌ی بین f_r و $\sqrt{f_c}$ برای آزمایش‌های سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای به صورت جداگانه در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، اکثر داده‌های آزمایشگاهی در محدوده‌ی تخمین زده شده بوده و برای مقاومت فشاری یکسان، مقادیر حاصل از آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای می‌باشند. همچنین رابطه‌ی بین f_r و $\sqrt{f_c}$ برای آزمایش‌های سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای به صورت جداگانه در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. آن‌چه که نخست در این نمودارها خودنمایی می‌کند، آن است که می‌توان به تعیین مدول گسیختگی بتن با استفاده از تیرهای استوانه‌ای امیدوار بود. در این‌جا نیز مشابه حالت پیشین مشاهده می‌شود که برای مقاومت فشاری یکسان، مقادیر حاصل از آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای است. شیب خطوط برازش‌دهنده‌ی داده‌ها در این حالت بیش از شرایط متناظر آن‌ها در حالت پیشین است. این مطلب گویای آن است که مدول گسیختگی حاصل از آزمایش خمشی بر روی تیرهای استوانه‌ای، بزرگ‌تر از مدول گسیختگی حاصل از آزمایش خمشی بر روی تیرهای مکعب‌مستطیلی است. بدیهی است که برای رابطه‌سازی‌های دقیق‌تر به ساخت نمونه‌های بیش‌تر نیاز است. از آن‌جایی که طراحی‌ها بر اساس مدول گسیختگی حاصل از آزمایش خمشی بر روی تیرهای مکعب‌مستطیلی انجام می‌شوند، لازم است بتوان با داشتن f_r ، f_{rc} را تعیین کرد. رابطه‌ی بین f_r و f_{rc} برای آزمایش‌های سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای به صورت جداگانه در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. در جدول ۶ نسبت نتایج آزمایش خمشی تیر مکعب‌مستطیلی به استوانه‌ای، برای مخلوط‌های مختلف و همچنین میانگین آن‌ها برای هر یک از حالت‌های سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای و میانگین کلی آورده شده است. اما از دیدگاه طراحی، بیشتر کران پایین این نسبت‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.

جدول ۵ - خلاصه‌های آماری داده‌های آزمایشگاهی

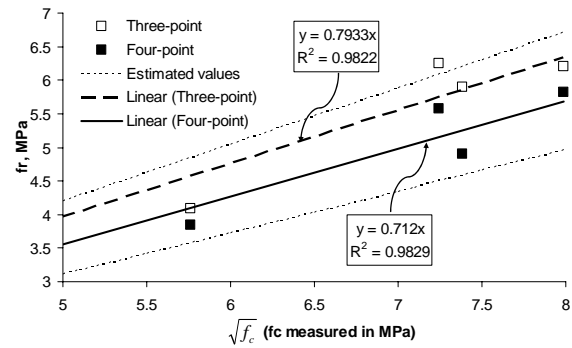
مخلوط	f_c	$f_{r(3)}$	$f_{rc(3)}$	$f_{r(4)}$	$f_{rc(4)}$	
اول	33.2	4.09	5.76	3.85	4.80	f_{avg} , MPa
	0.07	0.06	0.10	0.05	0.03	C_v
دوم	52.5	6.25	7.19	5.57	5.65	f_{avg} , MPa
	0.07	0.07	0.09	0.06	0.08	C_v
سوم	54.6	5.89	8.78	4.90	7.73	f_{avg} , MPa
	0.04	0.10	0.08	0.07	0.08	C_v
چهارم	63.8	6.20	9.53	5.83	7.34	f_{avg} , MPa
	0.04	0.12	0.10	0.12	0.13	C_v



شکل ۱۵-رابطه‌ی ضریب تغییرات داده‌های آزمایشگاهی خمش با مقاومت فشاری



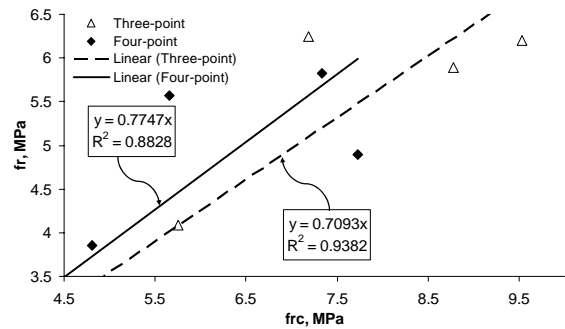
شکل ۱۷-نمودار f_c بر حسب $\sqrt{f_c}$ برای تیرهای استوانه‌ای مکعب مستطیلی



شکل ۱۶-نمودار f_r بر حسب $\sqrt{f_c}$ برای تیرهای مکعب مستطیلی

جدول ۶ - نسبت نتایج آزمایش خمشی تیر مکعب مستطیلی به استوانه‌ای

مخلوط	$f_{r(3)}/f_{rc(3)}$	$f_{r(4)}/f_{rc(4)}$
اول	0.71	0.80
دوم	0.87	0.99
سوم	0.67	0.63
چهارم	0.65	0.79
میانگین	0.73	0.80
میانگین کل	0.76	



شکل ۱۸ - نمودار بین f_r و f_c برای آزمایش‌های سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای



۶. نتیجه گیری

- نتایج به دست آمده نشان می دهند که می توان به تعیین مدول گسیختگی بتن با استفاده از تیرهای استوانه‌ای، به جای تیر مکعب مستطیلی، امیدوار بود. مهم ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش را می توان به صورت زیر بیان کرد:
- با افزایش مقاومت فشاری، ضریب تغییرات داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش خمشی نیز افزایش می یابد.
 - با اعمال یکای مگاپاسکال برای تنش‌ها، ضریب تبدیل $\sqrt{f_c}$ به $f_{r(3)}$ ، برابر 0.79 بوده و این ضریب برای $f_{r(4)}$ به 0.71 کاهش یافته است.
 - با اعمال یکای مگاپاسکال برای تنش‌ها، ضریب تبدیل $\sqrt{f_c}$ به $f_{rc(3)}$ ، برابر $1/11$ بوده و این ضریب برای $f_{rc(4)}$ به 0.90 کاهش یافته است.
 - ضریب تبدیل $f_{rc(3)}$ به $f_{r(3)}$ ، برابر 0.71 بوده و این ضریب برای تبدیل $f_{rc(4)}$ به $f_{r(4)}$ ، به 0.77 افزایش یافته است. اما چنانچه از دیدگاه طراحی مسئله مورد بررسی قرار گیرد؛ کران پایین نسبت نتایج آزمایش خمشی تیر مکعب مستطیلی به استوانه‌ای، یعنی 0.63 ، بیشتر جلب توجه می نماید.
 - در انجام آزمایش خمشی بر روی تیرهای استوانه‌ای، بایستی در محل تکیه گاه از نوار چوبی نازک زیر نمونه استفاده شود تا مانع از گسیختگی موضعی تیر در محل تکیه گاه گردد.

۷. قدردانی

شایسته است در پایان از گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، به دلیل حمایت مالی از این طرح پژوهشی، و مسئولان آزمایشگاه‌های سازه و مصالح ساختمانی و دیگر دوستانی که ما را در ساخت نمونه‌ها و همچنین شکستن و آزمایش آن‌ها یاری داده‌اند، سپاسگزاری کنیم.

۸. مراجع

- 1- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., (2002), "Design and Control of Concrete Mixtures", (14th Edition), Portland Cement Association
- 2- Abrams, D.A., (1922), "Flexural Strength of Plain Concrete", Bulletin 11, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago
- 3- Raphael, J.M., (1984), "Tensile Strength of concrete", Journal Proceedings of ACI, 81 (2), pp 158-165
- 4- Legeron, F., Paultre, P., "Prediction of Modulus Of Rupture Of Concrete", Materials Journal of ACI, 97 (2), pp 193-200
- 5- Bazant, Z.P., Novak, D., "Proposal of Standard Test of Modulus of Rupture of Concrete with Its Size Dependence", Materials Journal of ACI, 98 (1), pp 79-87
- 6- ASTM Standard C494-08a, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete"
- 7- ASTM Standard C617-98 (Reapproved 2003), "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens"
- 8- ASTM Standard C39-05, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens"
- 9- ASTM Standard C78-08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)"
- 10- ASTM Standard C293-08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)"