



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی بتن سبک

بررسی اثر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر انرژی شکست بتن سبکدانه ساخته شده با پومیس

نیکلاس علی لیبر^۱، مهرداد ماهوتیان^۳، سجاد بهرادی یکتا^۴
^۱ مدیر پژوهشی انستیتو مصالح ساختمانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
^۳ دانشگاه آلبرتا، دانشکده عمران، ادمونتون، کانادا
^۴ کارشناس انستیتو مصالح ساختمانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

چکیده

پدیده شکست در مواد نیمه ترد نظیر بتن پدیده ای غیر خطی است. وجود الیاف در بتن نه تنها باعث بهبودی برخی از خواص مکانیکی آن نظیر مقاومت در برابر ایجاد و رشد ترک، مقاومت برشی و مقاومت ضربه ای می شود؛ بلکه باعث افزایش شکل پذیری و انرژی لازم برای شکست بتن نیز می گردد. تا کنون تحقیقات گسترده ای در ارتباط با تعیین انرژی شکست بتن الیاف دار پرداخته می شود. شش سری طرح اختلاط بتن سبکدانه الیاف دارمورد مطالعه قرار گرفته است. در این طرح اختلاط ها از الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن با درصدهای مختلف استفاده شده است. آزمایش های فشاری و کششی بر روی نمونه های استوانه ای انجام شده است. برای محاسبه انرژی شکست از تیرهای منشوری بدون شکاف و تیرهای استوانه ای شکاف دار استفاده شده است. علت استفاده از نمونه های استوانه ای سهولت ساخت آن و امکان استفاده از آن در ارزیابی سازه های موجود می باشد. برای تعیین انرژی شکست از روش پیشنهادی RILEM استفاده شده است. براساس نتایج بدست آمده مهمترین اثر الیاف در بتن، افزایش شکل پذیری و انرژی شکست آن می باشد. به طوریکه با افزودن ۰/۵ و ۱/۰ درصد الیاف فولادی به بتن، انرژی شکست آن به ترتیب ۷۷ و ۱۳۲ برابر افزایش یافت.

کلمات کلیدی: الیاف پلی پروپیلن، الیاف فولادی، انرژی شکست، پومیس، بتن سبکدانه

۱- مقدمه

در سال های اخیر، تحقیقات گسترده ای در مورد خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف صورت گرفته است. بتن مسلح به الیاف فولادی در مقاوم سازی و تعمیر سازه های بتنی، پوشش تونل ها، پایدارسازی شیروانی ها و غیره مورد استفاده قرار می گیرند. تحقیقات نشان می دهد که کاربرد الیاف، مقاومت های کششی و خمشی بتن را تغییر چندانی نمی دهد بلکه تاثیر عمده الیاف بر رفتار پس از بار گسیختگی است. افزایش شکل پذیری و افزایش طاقت خمشی از مهمترین مزایای افزودن الیاف به بتن است. دو

نوع الیافی که به صورت گسترده در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن هستند. از سویی دیگر استفاده از بتن سبک به علت مزایایی که دارد، مورد توجه می‌باشد. از این مزایا می‌توان به کاهش وزن سازه و در نتیجه کاهش نیروی زلزله وارد بر آن اشاره نمود. این موضوع در مناطق لرزه خیز می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. یکی دیگر از کاربردهای بتن سبک استفاده از آن در تولید قطعات بتنی پیش ساخته است.

یکی از پارامترهای اساسی در بررسی رفتار بتن بخصوص پس از رسیدن به بار اوج، انرژی لازم برای ایجاد سطح واحد ترک می‌باشد که به آن انرژی شکست بتن (GF) می‌گویند. روش‌های گوناگونی برای تعیین انرژی شکست بتن وجود دارد. روش مستقیم تعیین انرژی شکست انجام آزمایش کشش مستقیم می‌باشد. اگرچه برخی محققین از این روش برای تعیین انرژی شکست استفاده می‌کنند ولی انجام چنین آزمایشی برای بتن مشکلات زیادی بهمراه دارد. برای تعیین انرژی شکست روش‌های دیگری نیز پیشنهاد شده است که انجام آن‌ها ساده تر و دشواری‌های آزمایش کشش مستقیم را ندارد. روش دو پارامتری شاه، روش اثر اندازه بازانت- کاظمی و روش هیلبرگ از جمله این روش‌ها می‌باشد. [۲،۱] در این روش‌ها تیرهای بتنی منشوری تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار می‌گیرند. از روی نمودار نیرو- تغییر مکان بدست آمده می‌توان انرژی شکست بتن را به دست آورد. روش ساده تر دیگری برای تعیین انرژی شکست توسط کاظمی و همکاران توسعه یافته است. در این روش از نمونه‌های استوانه‌ای شکافدار به جای تیرهای بتنی استفاده می‌شود. ساخت و قالب‌گیری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد $\times 3015$ به دلیل در دسترس بودن این قالب‌ها با سهولت بیشتری انجام می‌شود. وی نشان داد که انرژی شکست تیرهای بتنی با انرژی شکست نمونه استوانه‌ای مشابه تفاوت چندانی نمی‌کند [۳]. این روش بخصوص برای ارزیابی سازه‌های موجود بوسیله مغزه‌گیری از آن‌ها مفید می‌باشد. همچنین ساخت این نمونه‌ها آسان تر از تیرهای بتنی منشوری است. تا کنون تحقیقات مختلفی بر روی تعیین انرژی شکست بتن‌های معمولی صورت گرفته است، با این حال مطالعات انجام گرفته بر روی انرژی شکست بتن سبکدانه الیافی محدود می‌باشد. در این مقاله انرژی شکست بتن سبکدانه حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر انرژی شکست، مقاومت‌های کششی و فشاری نیز ارائه خواهد شد.

۲- تعیین انرژی شکست

اولین آزمایش تعیین انرژی شکست در دهه ۱۹۶۰ توسط Dugdale, Barenblatt صورت پذیرفت. انرژی شکست نشان دهنده میزان انرژی لازم برای گسترش ترکی به عرض واحد است. این پارامتر به جنس سنگدانه، میزان آب به سیمان، جنس، آرایش و مقدار الیاف و سن نمونه بستگی دارد. تا کنون محققان مختلفی نظیر Peel, Giurgitiv بر روی انرژی شکست تیرهای بتنی تحقیق نموده‌اند.

در این مقاله برای تعیین انرژی شکست از طریق منحنی نیرو- جابجایی از روش کار شکست هیلبرگ، پذیرفته شده توسط RILEM TC-50 استفاده شد. روش RILEM برای انواع المان‌های ترک دار و بی ترک به کار می‌رود [۵]. این روش به ابعاد بستگی دارد و در نهایت یک مدل غیر واقعی از ترک را بیان می‌کند. در این روش کل انرژی لازم برای شکست نمونه از لحظه شروع بارگذاری تا لحظه شکست نمونه محاسبه می‌شود و به سطح مقطع اولیه بتن، که شکاف اولیه در آن نفوذ نکرده است، تقسیم می‌شود تا انرژی شکست بتن GF بدست آید. دو اصلاح برای مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه باید صورت گیرد. اولین اصلاح مربوط به دستگاه آزمایش است. در ابتدای آزمایش و تا زمانیکه فک دستگاه به صورت کامل بر روی نمونه قرار گیرید، اغتشاشی در نتایج دیده می‌شود. با توجه اینکه قسمت اول منحنی نیرو- جابجایی خطی است، می‌توان این ناهماهنگی را اصلاح نمود. همچنین به دلیل عدم دسترسی به قسمت انتهایی منحنی نیرو- جابجایی، به علت شکست نمونه تحت وزن خودش، مقدار سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی بدست آمده از آزمایش (W_0) مقدار کمتری از انرژی لازم برای شکست نمونه می‌باشد و باید اصلاح شود. در این مرحله انرژی لازم برای شکست نمونه (WF) به صورت معادله شماره ۱ اصلاح گردید:

$$W_F = W_0 + 2P_0u_0 \quad (1)$$

در این رابطه P_0 معادل مقدار نیرو در وسط تیر است که لنگری برابر لنگر وزن (M_0) در وسط تیر ایجاد می‌کند و u_0 بیشینه جابجایی مشاهده شده در آزمایش است. برای تیر با دهانه S می‌توان معادله را به صورت رابطه شماره ۲ نوشت:

$$P_0 = \frac{4M_0}{S} \quad (2)$$

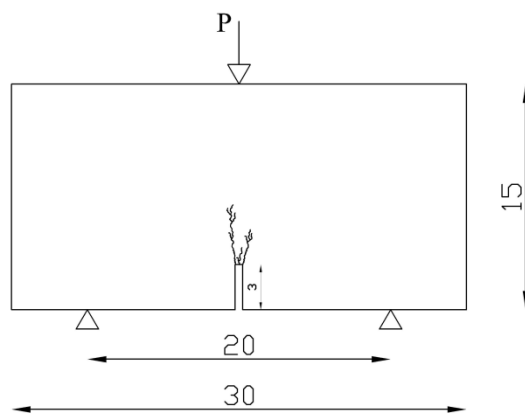
و انرژی شکست به صورت معادله شماره ۳ محاسبه می‌شود:

$$G_F = \frac{W_F}{A} \quad (3)$$

که در آن A سطح مقطع اولیه تیر استوانه ای تیر شکافدار، که شکاف اولیه در آن نفوذ نکرده است می باشد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

جهت بررسی اثر الیاف فولادی و پلی پروپیلن روی رفتار بتن به خصوص پس از ایجاد ترک اولیه، آزمایش های مقاومت کششی، فشاری و خمش تک نقطه ای بر روی نمونه ها انجام پذیرفت. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی 15x15x15، آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های استوانه x3015 و آزمایش خمش تک محوره بر روی نمونه های استوانه ای شکافدار x3015 صورت پذیرفت. آزمایش خمش تک نقطه ای توسط دستگاه یونیورسال و به صورت کنترل بار تا شکست کامل انجام شد. نمونه های مورد استفاده در آزمایش خمش تک نقطه ای، دارای طول دهانه 200 میلیمتر و طول شکاف اولیه 30 میلی متر بودند. محل شکاف و محل بارگذاری مطابق شکل شماره 1 در میان دهانه تیر در نظر گرفته شد. از هر طرح اختلاط بتن دو نمونه برای آزمایش خمش و دو نمونه برای آزمایش کشش مورد استفاده قرار گرفت و میانگین نتایج به دست آمده مورد استفاده قرار گرفته است. در آزمایش مقاومت فشاری از هر طرح سه نمونه مکعبی قالبگیری شده و جواب نهایی از میانگین مقاومت فشاری این نمونه ها حاصل گردید. پنج طرح اختلاط با درصد های حجمی مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن ساخته شدند. در یک طرح اختلاط هم ترکیبی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن استفاده شده است.



شکل ۱- شکل شماتیک تیرهای استوانه ای تحت آزمایش (ابعاد بر حسب cm می باشد)

مصالح اصلی بکار رفته در ساخت بتن، سیمان پرتلند تپ دو، ماسه رودخانه ای، سبکدانه پومیس، آب، فوق روان کننده و الیاف فولادی و پلی پروپیلن می باشد. تهیه و قالب گیری بتن بر اساس استاندارد ACI-544 صورت پذیرفت [4]. سبکدانه پومیس از معادن شهرستان دماوند تهیه گردید. این سبکدانه تحت آزمایش سایش لس آنجلس قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان دهنده خردشدگی برابر 30٪ وزنی است. میزان جذب آب بیست و چهار ساعته سبکدانه ها نیز 46 درصد می باشد. از سبکدانه به عنوان درشت دانه در طرح استفاده گردید. به منظور افزایش کارایی و همچنین کاهش نسبت آب به سیمان، از فوق روان کننده ممتاز با پایه پلی کربوکسیلات استفاده گردید. الیاف فولادی و پلی پروپیلن به ترتیب دارای مقاومت کششی 1100 و 450 مگا پاسکال می باشند. مشخصات مربوط به این الیاف در جدول شماره 1 ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی و پلی پروپیلن

شکل هندسی	(MPa) f_t	L/D	قطر (mm)	طول (mm)	چگالی (Kg/m ³)	نوع الیاف
قلاّب دار	1100	64	55/0	35	8000	فولادی
مستقیم	450	300	04/0	12	900	پلی پروپیلن

پس از این که نمونه ها به مدت یک روز در قالب نگه داری شدند، از قالب بیرون آورده و به مدت 28 روز در آب با دمای $20 \pm 2^\circ \text{C}$ عمل آوری شدند. پس از طی این مدت آزمایش های لازم بر روی آن ها صورت پذیرفت. جزئیات طرح اختلاط های

ساخته شده در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط

شماره نمونه	سیمان (Kg/m3)	ماسه (Kg/m3)	درشتدانه ((Kg/m3	W/C	الیاف فولادی (Kg/m3)	الیاف پلی پروپیلن (Kg/m3)
P1	500	800	450	26/0	0	0
P2	500	800	450	29/0	0	6/3
P3	500	800	450	29/0	80	0
P4	500	800	450	29/0	40	8/1
P5	500	800	450	29/0	40	0

۴- نتایج آزمایش ها

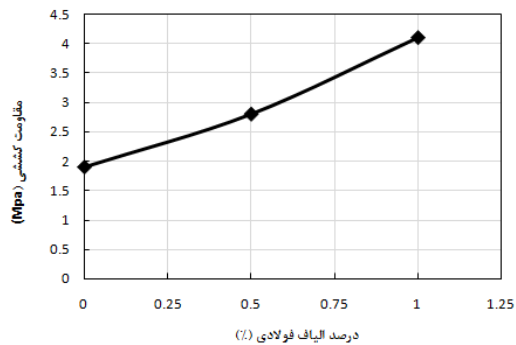
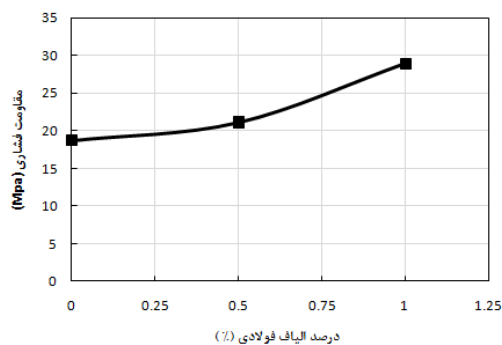
۴-۱- مقاومت فشاری و کششی برزیلی

آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM C39 و ASTM C496 صورت گرفته است. در جدول شماره ۳ نتایج مربوط به مقاومت فشاری و کششی آورده شده است. نتایج نشان می دهد که افزودن هر دو نوع الیاف فولادی و پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی بتن نسبت به بتن شاهد می شود. اما تاثیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت کششی بسیار بیشتر از تاثیر الیاف پلی پروپیلن است. حداکثر افزایش مقاومت کششی در هنگام استفاده از ۱ درصد الیاف فولادی به دست می آید که نسبت به نمونه شاهد بیش از دو برابر افزایش نشان می دهد. افزایش مقاومت کششی و کاهش جزئی مقاومت فشاری بتن در هنگام استفاده از الیاف پلی پروپیلن قابل توجه است. همچنین نتایج نشان می دهد که مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف فولادی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. از سوی دیگر مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن نسبت به بتن شاهد کاهش یافته است. این امر می تواند به دلیل جلوگیری از تراکم کافی و همچنین جلوگیری از برهم کنش مناسب بین ملات و سنگدانه باشد.

جدول ۳- مقاومت کششی و فشاری

نمونه	P1	P2	P3	P4	P5
مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	۱۸/۷	۱۷/۱	۲۸/۹	۲۴/۷	۲۱/۱
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۱/۹	۲/۴	۴/۱	۳/۸	۲/۸

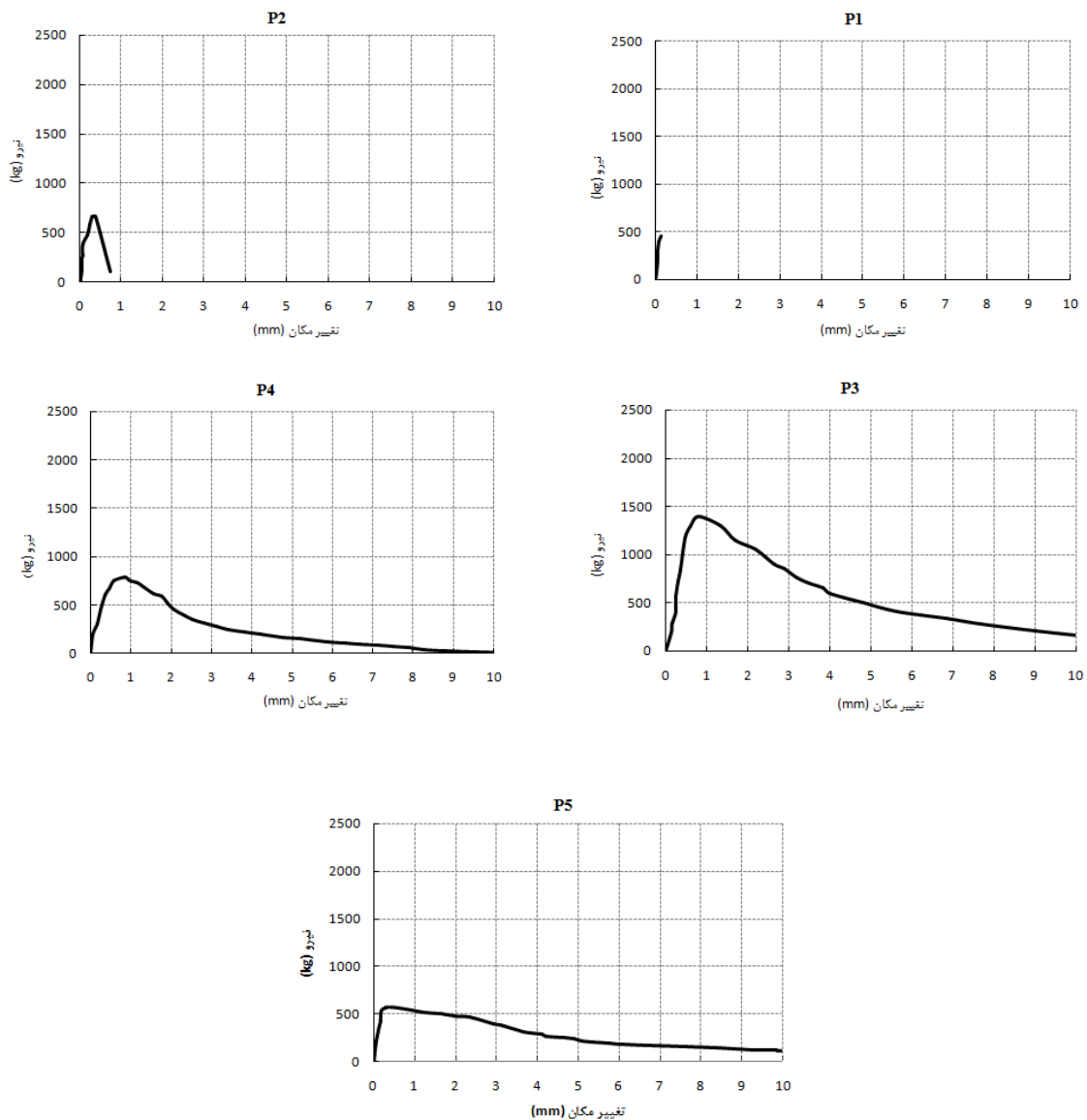
شکل شماره ۲ تاثیر میزان الیاف فولادی را بر مقاومت کششی و فشاری بتن نشان می دهد. به نظر می رسد رابطه بین درصد الیاف و مقاومت کششی در درصد های کم الیاف، به صورت خطی باشد. برای تأیید این موضوع به آزمایش های بیشتری، با درصد الیاف مختلف مورد نیاز است.



شکل ۲- تاثیر الیاف بر مقاومت کششی و فشاری نمونه ها

۴-۲- خمش تک نقطه ای

منحنی های نیرو- جابجایی از طریق انجام آزمایش خمش تک نقطه ای تا شکست کامل نمونه بدست آمد. همانطور که اشاره گردید، به علت قرارگیری فک بارگذاری بصورت متمرکز و غیر یکنواخت بر وجه بالایی تیر و همچنین عدم صلبیت کامل دستگاه اندازه گیری، نمودار نیرو- جابجایی بخصوص قسمت قبل از بار اوج نیاز به اصلاح داشتند. به همین دلیل این نمودار ها با در نظر گرفتن مدول ارتجاعی مناسب برای بتن اصلاح گردید. مدول ارتجاعی مورد استفاده بر اساس رابطه $E_c = 0.135 \gamma_c^{1.5} \sqrt{f_c}$ که در آن f_c و E_c بر حسب Kg/cm^2 و γ_c بر حسب Kg/m^3 می باشند، بدست آمد. این رابطه در آیین نامه بتن ACI برای تعیین مدول الاستیسیته بتن های سبک و معمولی پیشنهاد شده است. قبل از بار اوج تغییر شیب اولیه نمودار به کمک مدول ارتجاعی مناسب انجام گرفت. پس از بار اوج نیز، هر نقطه از نمودار به میزان جابجایی نقطه متناظر خود در قبل از بار اوج به سمت مبدا جابجا شد. این اصلاح بر این فرض استوار است که جابجایی اندازه گیری شده شامل جابجایی ارتجاعی فک دستگاه آزمایش نیز است که متناسب با بار وارده می باشد [۶]. نمودارهای اصلاح شده نیرو- جابجایی بتن سبک بدون الیاف و بتن سبک الیافی در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمودار نیرو جابجایی

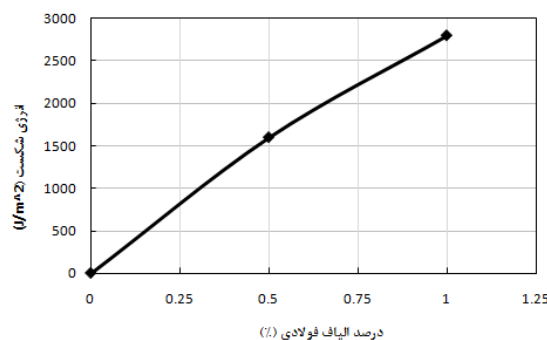
همانطور که در شکل شماره ۳ دیده می شود، بیشترین تاثیر الیاف پس از بار اوج می باشد به این ترتیب که شکل پذیری بتن را بسیار افزایش می دهد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش درصد الیاف، شیب نمودار پس از بار حداکثر کاهش می یابد و بیانگر این موضوع می باشد که کاهش مقاومت بتن با سرعت کمتری صورت می گیرد. در نمونه شاهد بدون الیاف، به علت تردی، شکست در تغییر مکان کم و تقریباً بلافاصله بعد از بار حداکثر صورت می گیرد. در این آزمون ها شکست به صورت ناگهانی و ترد بود و بعد از بار بیشینه قسمت نزولی منحنی ثبت نشد.

نتایج مربوط به منحنی های نیرو- جابجایی که شامل انرژی شکست تیر، بار حداکثر قابل تحمل تیر و بیشینه خیز تیر پیش از شکست می باشد، در جدول شماره ۴ آمده است. همانطور که از نمودار نیرو- جابجایی مشاهده می شود، تاثیر سطح زیر نمودار قبل از بار اوج در تعیین انرژی شکست ناچیز است، بطوریکه تاثیر آن به ندرت از ۲۰ درصد تجاوز می کند.

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمایش خمش تک نقطه ای

شماره نمونه	قطر آزمون (mm)	حداکثر تغییر مکان وسط بار حداکثر (Kg)	مساحت دهانه (mm ²)	مساحت زیر منحنی بار- جابجایی تا بار حداکثر (Kg.mm)	مساحت زیر منحنی بار- جابجایی تا بار گسیختگی (Kg.mm)	نسبت مساحت بار گسیختگی به مساحت بار حداکثر	انرژی شکست (J/m ²)
P1	151	450	14/0	17907	37	0/1	21
P2	150	660	074/0	17671	309	49/1	262
P3	151	1400	1/13	17907	906	56/5	2756
P4	152	790	8/10	18145	557	56/5	1695
P5	151	570	7/11	17907	411	14/7	1597

در ضمن، با توجه به نوع الیاف فولادی که قلاب انتهایی نداشته و موج کم دامنه ای دارند، جذب انرژی در بتن الیافی بیشتر از طریق بیرون کشیده شدن الیاف صورت گرفته است. تاثیر درصد الیاف بر انرژی شکست بتن در شکل شماره ۴ آورده شده است.



شکل ۴- تاثیر الیاف فولادی بر انرژی شکست

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش های صورت گرفته به موارد زیر می توان اشاره نمود :

۱- با توجه به ساده تر بودن ساخت نمونه های استوانه ای و از آنجاکه برای ارزیابی شکل پذیری مصالح سازه های موجود از سازه مغزه های استوانه ای شکل گرفته می شود، انجام آزمایش تعیین انرژی شکست بر روی آزمون های استوانه ای می تواند مفید باشد.

۲- با افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن، مقاومت فشاری تا حدی کاهش یافته و مقاومت کششی آن اندکی افزایش می یابد. حضور الیاف باعث می شود برهم کنش بین سنگدانه و ملات کم شود، از طرف دیگر مقاومت مکانیکی الیاف از بتن بیشتر است. این دو عامل در جهت عکس همدیگر عمل می کنند و ممکن است باعث کاهش و یا افزایش مقاومت بتن الیافی شوند. از

- سوی دیگر بتن های حاوی الیاف فولادی، از مقاومت کششی و فشاری بسیار بیشتری نسبت به بتن شاهد برخوردار هستند. افزایش مقاومت فشاری تا ۵۵٪ و افزایش مقاومت کششی تا ۱۱۵٪ در صورت استفاده از ۱٪ الیاف فولادی مشاهده شده است.
- ۳- نمونه بتنی بدون الیاف، پس از رسیدن به بار بیشینه دچار شکست شد و ناحیه ای پس از بار حداکثر حاصل نشد. این در حالی است که بدلیل شکل پذیری نمونه های حاوی الیاف، نمونه ها پس از بار بیشینه به تغییر شکل خود ادامه می دهند
- ۴- مهمترین اثر الیاف در بتن، افزایش شکل پذیری و انرژی شکست آن می باشد. به طوریکه با افزودن ۰/۵ و ۱/۰ درصد الیاف فولادی به بتن، انرژی شکست آن به ترتیب ۷۷ و ۱۳۲ برابر افزایش یافت.
- ۵- با افزودن الیاف، مکانیسم شکست از حالت ترد و ناگهانی به حالت شکل پذیری تغییر می یابد.

۶- مراجع

- [1] Shah, S. P., Swartz, S. E., Ouyang, C., "fracture mechanic of concrete", John Wiley and Sons, New York, USA, 1995.
- [2] Bazant, Z. P., Kazemi, M. T. "size effect in fracture of ceramics and its use to determine fracture energy and effective process zone length", J. Am. Ceram. Soc, Vol. 73, NO. 7, 1990, pp. 1841-1853.
- [۳] کاظمی، محمد تقی، ابراهیمی نژاد، محمد علی، " محاسبه انرژی شکست بتن الیافی به کمک تیرهای استوانه ای شکافدار، دومین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه، جلد اول، صفحه ۱۲۹-۱۳۹، ۱۳۸۴.
- [4] ACI committee 544, "guide for specifying, proportioning, mixing, placing and finishing steel fiber reinforcement concrete", ACI manual of concrete practice, ACI 544.3R, 1993.
- [5] RILEM TC-50 FMC, fracture mechanics of concrete, " determination of fracture energy of mortar and concrete by means of 3PB tests on notched beams", RILEM recommendation, materials and structures, Vol. 18, NO. 106, 1988, pp. 285-290.
- [6] Libre, N.A.; Shekarchi, M.; Mahoutian M., Soroushian P., Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Made with Natural Pumice, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 5, May (2011), Pages 2458-2464, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058