

تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مقاومت کششی بتن‌های الیافی با مقاومت زمینه یکسان

نیما وظیفه‌خواه^۱ و علیرضا مناف‌پور^{۲*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه ارومیه

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی و پلی پروپیلن با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف الیاف می‌پردازد. الیاف فولادی به میزان ۰/۰، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۰، ۰/۲، ۰/۴ حجم بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برنامه آزمایش‌ها شامل آزمایش شکافت نمونه برای سه اندازه متفاوت استوانه‌ای به ابعاد (ارتفاع × قطر): ۱۵۰×۳۰۰mm، ۱۰۰×۲۰۰mm، ۷۵×۱۵۰mm و آزمایش خمش برای نمونه منشوری شکل به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰mm بود. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه برای تعیین مقاومت کششی مورد استفاده قرار گرفتند. در تمامی نمونه‌ها طرح اختلاط بتن ثابت در نظر گرفته شد تا از تأثیر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر روی نتایج آزمایشات جلوگیری شود. در کلیه مخلوط‌ها از سیمان تیپ ۱ استفاده شده و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۵ انتخاب گردید و هیچ نوع ماده افزودنی به بتن اضافه نگردید. مقاومت فشاری متوسط ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰mm برای بتن بدون الیاف حدود ۳۰ مگا پاسکال به دست آمده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف فولادی موجب افزایش محسوس مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای و منشوری شده ولی تأثیر الیاف پلی پروپیلن بسیار محدودتر بوده و مخصوصاً در نمونه منشوری شکل تقریباً قابل نظر کردن است.

واژگان کلیدی: مقاومت کششی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، بتن مسلح الیافی، مقاومت زمینه یکسان.

۱- مقدمه

بتن مسلح الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است که یک پارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل‌پذیر را فراهم می‌آورد. امروزه در دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف برای کاربردهای گوناگون در بتن وجود دارد که از پر کاربردترین آن‌ها می‌توان به الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن اشاره کرد.

اولین تلاش اصلی برای مسلح کردن بتن به وسیله جاگذاری الیاف فولادی توسط Ramualdi و Baston در دهه ۱۹۶۰ در کشور آمریکا صورت گرفت. بعد از آن، تحقیقات و کاربردهای صنعتی بسیار زیادی درباره بتن مسلح با الیاف فولادی صورت گرفته است [۵]. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آید. این نوع الیاف به اشکال ظاهری گوناگون (مستقیم، انتهای قلاب‌دار، دندانه‌دار و ...) جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت است و همچنین اختلاط آن‌ها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام‌پذیر است [۶]. با افزودن الیاف فولادی به بتن، خواص مکانیکی آن نظیر استحکام، شکل‌پذیری، دوام و عملکرد تحت بار دینامیکی و ضربه بهبود می‌یابد [۷-۹]. الیاف فولادی،

امروزه بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. اقتصادی بودن، در دسترس بودن اجزا تشکیل دهنده، مقاومت خوب آن در مقابل آتش‌سوزی و عوامل جوی، قابلیت قرارگیری در شکل‌ها و قالب‌های مختلف و همچنین مقاومت فشاری بالا عواملی است که سبب مقبولیت عمومی در استفاده از بتن به عنوان یک ماده ساختمانی می‌گردد [۱]. از طرفی بتن تحت نیروی کششی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشد که این ضعف در عمل به وسیله میلگردها و یا فولادهای پیش تنیدگی جبران می‌شود.

استفاده از میلگرد در همه جا امکان‌پذیر نبوده یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن تا حد امکان، در چند دهه اخیر استفاده از الیاف که در تمام حجم بتن به صورت یکنواخت پراکنده می‌شود متداول شده است. هم اکنون از بتن الیافی در کاربردهای مختلف از قبیل روسازی جاده‌ها، کف سالن‌های صنعتی، پل‌ها، تونل‌ها، دال‌ها، ساخت پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره و ساخت باند فرودگاه‌ها استفاده وسیع به عمل می‌آید [۲-۴].

سال ۱۹۷۲ و در آمریکا انجام شد. پس از اجرای دال، سطحی صاف و عاری از الیاف و با حداقل ترک ممکن به دست آمد که در سال‌های بعد نیز در برابر باران، یخبندان و گرما مقاومت خوبی از خود نشان داد [۱۶]. در طول چند دهه اخیر تحقیقات متعددی در زمینه بتن‌های مسلح شده با الیاف صورت گرفته است. در این قسمت به چند نمونه از این تحقیقات اشاره شده است.

Nili و Afroughsabet [۱۷] تأثیر نرمة سیلیس^۱ و الیاف فولادی بر مقاومت ضربه‌ای و خواص مکانیکی بتن را بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی و خمشی بهبود می‌یابد. همچنین با اضافه کردن الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی نرمة سیلیس، مقاومت ضربه‌ای و شکل‌پذیری بتن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

Rodrigues و همکاران [۱۸] رفتار ستون‌های بتنی مسلح به الیاف را تحت آتش‌سوزی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق چهار ستون به ابعاد 0.25×0.25 متر و ارتفاع ۳ متر که با فولادگذاری طولی متفاوت مسلح شده بودند (به ترتیب برای ستون‌های شماره ۱ تا ۴، $4\phi 10$ ، $4\phi 16$ ، $4\phi 20$ و $4\phi 25$) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ستون‌های ۱ تا ۳ به ترتیب حاوی $3.8/8$ ، $2.7/24$ و $16/56$ کیلوگرم الیاف فولادی و $1/5$ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن در هر متر مکعب می‌باشند همچنین ستون شماره ۴ فاقد الیاف می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در بتن، رفتار ستون‌ها را تحت آتش‌سوزی بهبود می‌بخشد. الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند ورقه ورقه شدن بتن را کنترل کند. همچنین ستون همواره به مقداری میلگردهای فولادی برای مقاومت در برابر آتش نیازمند است. بنابراین جایگزینی میلگردهای فولادی با الیاف فولادی راه حل خوبی برای موقعیت‌های آتش‌سوزی در بتن نمی‌باشد.

Vandewalle [۱۹] آزمایشاتی را بر روی بتن مسلح الیافی Hybrid انجام داد. وی از سه نوع الیاف فولادی (الیاف بسیار کوتاه به طول ۶ mm، الیاف کوتاه به طول ۱۳ mm و الیاف بلند انتهایی قلاب‌دار به طول ۳۵ mm) استفاده کرد. در انجام آزمایشات از تیرهایی به طول ۵۵۰ mm تا ۶۰۰ mm عرض و ارتفاع ۱۵۰ mm استفاده شد. میزان الیاف مصرفی از ۰ تا ۹۰ کیلوگرم در هر متر مکعب متغیر بوده که به صورت مجزا و همچنین مخلوطی از دو یا سه نوع الیاف به مخلوط بتن اضافه

انرژی شکست تحت بار ضربه را تقریباً $2/5$ برابر برای بتن با مقاومت معمولی و تقریباً $3/5$ برابر برای بتن با مقاومت بالا افزایش می‌دهد [۱۰]. این مزیت‌ها سبب می‌شود که الیاف فولادی بیشترین کاربرد را نسبت به سایر انواع الیاف داشته باشد. الیاف پلی‌پروپیلن نیز با توجه به ارزان بودن آن نسبت به سایر انواع الیاف، از پر مصرف‌ترین الیاف مصنوعی مورد استفاده در بتن محسوب می‌شوند و عمدتاً جهت کنترل ترک‌های پلاستیک در بتن به کار می‌رود [۱۱-۱۳]. کاهش ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها، خاصیت شیمیایی ثابت، غیر آهن‌ربایی، وزن کم و کاهش نفوذپذیری در بتن از مزایای الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد. همچنین در برابر بسیاری از مواد خوردنده مانند اسیدها و بازها مقاوم است و تخریب نمی‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن مؤثرترین الیاف در کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی در بتن می‌باشد که حتی در درصدهای مصرف پایین نیز باعث کاهش میزان خسارت می‌شود [۱۴ و ۱۵].

با در نظر گرفتن مطالب فوق، تحقیق حاضر به بررسی مقاومت کششی بتن مسلح با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف الیاف می‌پردازد. مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از آزمایش شکافت نمونه (آزمایش برزیلی) و مقاومت کششی نمونه‌های منشوری شکل با استفاده از آزمایش خمش مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر و با نمونه بدون الیاف مقایسه می‌شوند.

از آنجا که هدف اصلی بررسی تأثیر الیاف در مقاومت کششی نمونه‌های بتن الیافی می‌باشد، تمامی شرایط آزمایش برای کلیه نمونه‌ها بجز نوع و درصد حجمی الیاف ثابت در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر تمامی نمونه‌ها دارای طرح اختلاط ثابت بوده و مقاومت زمینه آن‌ها یکسان می‌باشد. این موضوع ضمن تسهیل انجام آزمایشات از تأثیر عوامل دیگر همچون مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان، نسبت دانه‌های سنگی، کارایی و ... در نتایج آزمایشات جلوگیری می‌کند.

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

کمیت ۵۴۴ انجمن بتن آمریکا (ACI) اولین گزارش خود را در خصوص بتن الیافی در سال ۱۹۷۳ منتشر نمود که در سال‌های اخیر مورد بازبینی مجدد قرار گرفته است [۵]. اولین پروژه‌ای که توسط پیمانکار و در ازای دریافت مبلغ معلوم و قرارداد مشخصی صورت گرفته (خارج از محیط‌های آزمایشگاهی و به عنوان یک پروژه واقعی) مربوط به اجرای یک دال به ابعاد $22/9 \times 7/6$ متر و به ضخامت میانگین $4/9$ سانتی‌متر بود که در

باعث کاهش مقاومت خمشی بتن می‌شود اما با افزودن ۳ کیلو گرم الیاف پلی‌پروپیلن به هر متر مکعب بتن می‌توان تأثیر سوء شرایط محیطی خلیج فارس را بر مقاومت خمشی بتن خنثی کرد. تکلو و همکاران [۲۳] تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن با چهار درصد حجمی مختلف الیاف (۰٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪) را بر روی طاقت خمشی بتن بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن در بتن، میزان جذب انرژی و به خصوص طاقت خمشی بتن افزایش می‌یابد.

۳- برنامه آزمایش‌ها

برنامه آزمایش‌ها شامل آزمایش شکافت نمونه (آزمایش برزیلی) برای سه اندازه متفاوت نمونه استوانه‌ای به ابعاد (ارتفاع × قطر): ۱۵۰×۳۰۰mm، ۱۰۰×۲۰۰mm و ۷۵×۱۵۰mm و آزمایش خمش برای نمونه منشوری شکل به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰mm می‌باشد. الیاف فولادی مصرفی به میزان ۰٪، ۰/۳٪، ۰/۶٪، ۰/۹٪ و ۱/۲٪ و الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی به میزان ۰٪، ۰/۲٪، ۰/۴٪ حجم بتن می‌باشند. نمونه‌ها برای تعیین مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰mm برای بتن بدون الیاف برابر ۳۰/۲ مگاپاسکال به دست آمده است. شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب نمونه‌های استوانه‌ای و منشوری شکل را تحت آزمایشات شکافت نمونه و خمش نشان می‌دهند. روند انجام آزمایشات نمونه منشوری بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C1018-97 بوده است. فواصل تکیه‌گاهی در آزمایشات نمونه منشوری مطابق استاندارد برابر ۴۵۰ میلی‌متر بوده و از بارگذاری در نقاط یک سوم دهانه استفاده گردیده است. لازم به ذکر می‌باشد که مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت نمونه و خمش به ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

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

در رابطه (۱)، F_{ct} مقاومت کششی بتن، P حداکثر نیروی آزمایش، L طول نمونه و D قطر نمونه می‌باشد.

$$f_r = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، f_r مدول گسیختگی، P حداکثر مجموع بارهای اعمالی، L طول دهانه، b عرض تیر و d عمق تیر می‌باشد.

گردید. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک^۱ نشان داد که الیاف ۶ و ۱۳ میلی‌متری در مناطق با بازشدگی ترک‌های کوچک بسیار مؤثر هستند. درحالی که الیاف ۳۵ میلی‌متری شکل‌پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تأمین می‌کنند. ترک‌های ریز رشد می‌کنند و به هم متصل می‌شوند و به ترک‌های بزرگ می‌پیوندند. الیاف بلند با انتهای قلاب‌دار در اتصال این ترک‌ها بسیار فعال می‌شوند.

Song و همکاران [۲۰] آزمایشاتی را با اضافه کردن الیاف فولادی به بتن با مقاومت بالا انجام دادند. بتن مسلح شده توسط الیاف فولادی در قالب‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰mm ریخته شدند. آزمایش‌های مقاومت ضربه‌ای بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفت و مهم‌ترین نتیجه گرفته شده از کار آن‌ها این بود که مقاومت ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی به مقدار قابل توجهی در مقایسه با بتن با مقاومت بالا (فاقد الیاف) بهبود می‌یابد.

خالو و افشاری [۲۱] اثر نوع و مقدار الیاف فولادی و مقاومت بتن روی شکل‌پذیری دال‌های کوچک بتنی به ابعاد ۸۰×۸۲۰×۸۲۰mm را تحت آزمایش خمشی بررسی کردند. متغیرهای آزمایش شامل دو طول الیاف متفاوت با چهار درصد حجمی مختلف (۰٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪) و همچنین دو مقاومت زمینه ۳۰ و ۴۵ مگا پاسکال بوده است. نتایج آزمایشات نشان داد که برای مقاومت‌های مختلف بتن، به طور کلی با افزایش مقدار الیاف و نیز افزایش نسبت طول به قطر الیاف، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. همچنین نوع شکست از حالت ترد برای نمونه‌های فاقد الیاف به حالت شکل‌پذیر برای نمونه‌های دارای الیاف تغییر می‌یابد. همچنین استفاده از مقادیر خیلی کم الیاف به دلیل کاهش ناگهانی نیروی حداکثر و همچنین استفاده مقادیر خیلی زیاد الیاف به دلیل ایجاد ناپیکنواختی توصیه نمی‌شود. پیشنهاد شده است میزان حجم الیاف در محدوده ۰/۷۵ - ۱/۷۵ قرار گیرد.

مدرسی و همکاران [۲۲] تأثیر آب خلیج فارس بر خواص مقاومتی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. برای ساخت بتن از مصالح سنگی سیلیسی و سیمان پرتلند تیپ ۵ استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن کاهش می‌یابد و با افزایش میزان الیاف، تأثیر سوء شرایط مخرب خلیج فارس بر مقاومت فشاری بتن کمتر می‌شود. همچنین شرایط محیطی خلیج فارس

توسط مخلوط کن به مدت دو دقیقه مخلوط شده و در پایان الیاف فولادی یا پلی پروپیلن که تمیز و عاری از هرگونه مواد زائد و روغن بود به تدریج به داخل مخلوط کن ریخته می‌شود. پس از اتمام اضافه کردن الیاف به بتن، اجازه داده می‌شود که مخلوط کن به مدت سه دقیقه دیگر کار کند تا الیاف در تمام فضای بتن پخش شده و مخلوط کاملاً یکنواختی حاصل گردد [۱۲ و ۲۴]. سپس بتن الیافی در قالب‌ها ریخته شده و در گروه‌های ۲ تایی روی میز لرزه قرار می‌گیرند. پس از لرزاندن بتن و نوشتن مشخصات بتن ریخته شده روی آن‌ها، نمونه‌ها با نایلون و کیسه‌های پلاستیکی پوشانده می‌شوند تا از تبخیر آب آن تا هنگام انتقال به حوضچه آب جلوگیری شود. پس از طی ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به داخل حوضچه آب منتقل می‌شوند. نمونه‌ها ۱ ساعت قبل از آزمایش از حوضچه آب بیرون آورده شده و سپس تحت آزمایش قرار می‌گیرند.

جدول ۱- جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی

سیمان/آب	آب (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)
۰/۵۵	۲۲۰/۶	۸۸۶/۵	۹۴۷/۸	۴۰۰

شن مورد استفاده از نوع سنگ شکسته و ماسه مصرفی از نوع رودخانه‌ای می‌باشد. همچنین سیمان مصرفی سیمان پرتلند تیپ ۱ کارخانه سیمان ارومیه بوده و آب مصرفی از آب تأسیسات شبکه آبرسانی آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه ارومیه برداشت شده است. الیاف پلی پروپیلن مصرفی دارای طول ۶ و ۱۲ میلیمتر و از نوع ریشه‌ای می‌باشد. همچنین الیاف فولادی مصرفی به شکل موج‌دار با انتهای قلاب‌دار می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که هر دو نوع الیاف از شرکت BASF ایرانیان تهیه شده است. سایر مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده به صورت زیر می‌باشد [۱۲]:

طول: $L=36\text{mm}$

قطر: $D=0.8\text{mm}$

نسبت طول به قطر الیاف: $L/D = 45$

وزن مخصوص: 7850 kg/m^3

ارتفاع انتهای قلاب: 2.5 mm

طول انتهای قلاب: 6 mm

زاویه انتهای قلاب: 40° درجه

شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن مورد استفاده در آزمایشات را نشان می‌دهند.



شکل ۱- طرز قرارگیری نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه آزمایش شکافت

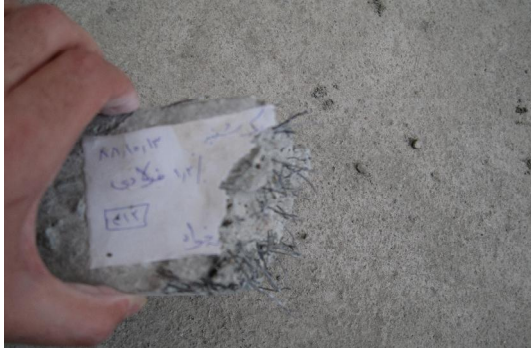


شکل ۲- طرز قرارگیری نمونه‌های منشوری در دستگاه آزمایش خمش

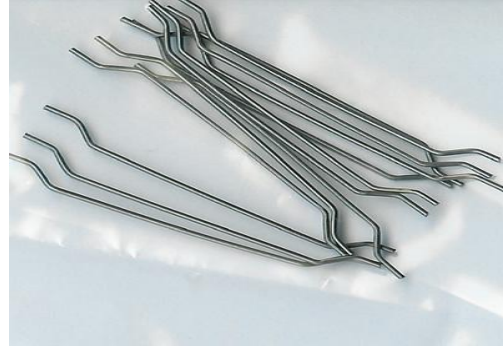
۴- طرح اختلاط و مشخصات مصالح مورد استفاده

معمولاً بتن مسلح به الیاف فولادی همانند بتن ساده ریخته و متراکم می‌شود. الیاف به خاطر آسانی پخش باید به صورت خشک وارد مخلوط شود. در فرایند ساخت بتن الیافی باید از ایجاد پدیده گلوله‌ای شدن، جلوگیری به عمل آید. این مشکل اغلب به دلیل استفاده از مقادیر زیاد الیاف و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد به وجود می‌آید [۱۰]. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده، سبب کاهش کارایی مخلوط بتن و در نتیجه کاهش مقاومت و نرمی بتن سخت شده می‌شود [۶]. کیفیت مناسب و اقتصادی بودن یک طرح ساخته شده با بتن مسلح به الیاف به اختلاط، جا دادن، پرداخت سطح تمام شده و کنترل کیفیت مناسب نیازمند است.

جدول (۱) جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی را نشان می‌دهد. به هنگام بتن‌ریزی، شن، ماسه، سیمان و آب با یکدیگر



شکل ۶- نمونه منسوری حاوی الیاف فولادی پس از آزمایش
خمش



شکل ۳- الیاف فولادی مورد استفاده در آزمایشات

۵- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش

نتایج حاصل از آزمایش شکافت نمونه (آزمایش برزلی) در سنین ۷ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق جدول (۲)، در مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای $150 \times 300 \text{ mm}$ در سن ۷ روزه با اضافه کردن درصد حجمی الیاف فولادی به میزان 0.3% ، تغییری مشاهده نمی‌شود؛ ولی با اضافه کردن الیاف فولادی به میزان 0.6% ، 0.9% و 1.2% مقاومت کششی نسبت به نمونه بدون الیاف به ترتیب $3/5\%$ ، 1.4% و $3.8/8\%$ افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات در سن ۲۸ روزه کم شده و با اضافه کردن مقادیر الیاف فولادی از 0% تا 1.2% ، مقاومت کششی به ترتیب 0.8% ، 3% ، $8/5\%$ و $2.5/9\%$ افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}$ و $75 \times 150 \text{ mm}$ رفتار مشابهی داشته و با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. به طور کلی ملاحظه می‌شود که مقاومت کششی بتن با الیاف فولادی از افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به بتن بدون الیاف برخوردار بوده و همچنین با افزایش نسبت الیاف، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. همچنین میزان تأثیر الیاف فولادی در مقاومت عمر ۷ روزه به طور کلی از مقاومت عمر ۲۸ روزه بیشتر است.

علاوه بر آن مشاهده می‌شود که مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به میزان 0.2% در سنین ۷ و ۲۸ روزه، نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش می‌یابد ولی به طور کلی نمونه‌های حاوی 0.4% الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه بدون الیاف دارای افزایش مقاومت چشمگیری نبوده و حتی در دو مورد کاهش مقاومت به میزان $1/4$ و $4/1$ درصد نیز مشاهده می‌شود. همچنین در مجموع ملاحظه می‌شود که تأثیر الیاف



شکل ۴- الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در آزمایشات

همچنین شکل (۵) نمونه استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی پس از انجام آزمایش شکافت نمونه و شکل (۶) نمونه منسوری حاوی الیاف فولادی پس از انجام آزمایش خمش را نشان می‌دهند.



شکل ۵- نمونه استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی پس از آزمایش
شکافت

بدون الیاف دارا می‌باشند. پس از آن، نمونه‌های استوانه‌ای حاوی ۰/۹٪ الیاف فولادی و ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف دارا می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که اضافه کردن میزان ۰/۳٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن تأثیر چندانی در افزایش مقاومت کششی ندارد.

پلی‌پروپیلن در مقاومت کششی کلیه اندازه‌های مختلف نمونه‌های استوانه‌ای، در عمر ۷ روزه بیشتر از عمر ۲۸ روزه می‌باشد. با مقایسه نوع و میزان الیاف در مقاومت کششی بتن برای نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روزه می‌توان به این نتیجه رسید که مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی ۰/۲٪ الیاف فولادی، بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های

جدول ۲- مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سنین ۷ و ۲۸ روزه

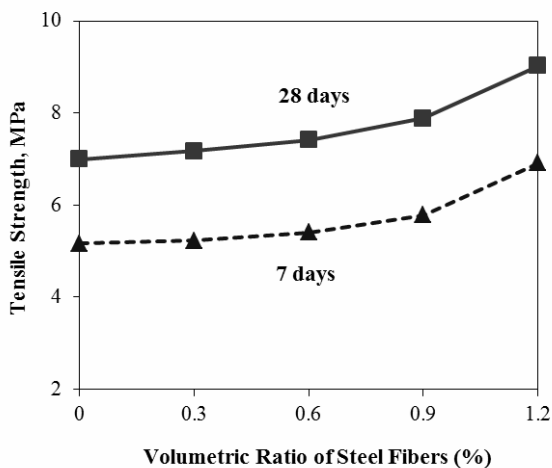
مقاومت کششی ۲۸ روزه		مقاومت کششی ۷ روزه		درصد حجمی الیاف	نوع الیاف	اندازه نمونه استوانه‌ای (ارتفاع×قطر)
درصد افزایش*	MPa	درصد افزایش*	MPa			
۰/۰	۳/۶۳	۰/۰	۲/۸۶	۰/۰	فولادی	۱۵۰×۳۰۰ mm
۰/۸	۳/۶۶	۰/۰	۲/۸۶	۰/۳		
۳	۳/۷۴	۳/۵	۲/۹۶	۰/۶		
۸/۵	۳/۹۴	۱۴	۳/۲۴	۰/۹		
۲۵/۹	۴/۵۷	۳۸/۸	۳/۹۷	۱/۲		
۰/۰	۳/۶۳	۰/۰	۲/۸۶	۰/۰	پلی پروپیلن	۱۵۰×۳۰۰ mm
۹/۴	۳/۹۷	۱۲/۶	۳/۲۲	۰/۲		
-۱/۴	۳/۵۸	۳/۵	۲/۹۶	۰/۴		
۰/۰	۳/۶۷	۰/۰	۲/۴۵	۰/۰	فولادی	۱۰۰×۲۰۰ mm
۳/۳	۳/۷۹	۲/۴	۲/۵۱	۰/۳		
۸/۲	۳/۹۷	۱۹/۶	۲/۹۳	۰/۶		
۲۶/۴	۴/۶۴	۵۱/۴	۳/۷۱	۰/۹		
۲۸/۶	۴/۷۲	۶۶/۱	۴/۰۷	۱/۲		
۰/۰	۳/۶۷	۰/۰	۲/۴۵	۰/۰	پلی پروپیلن	۱۰۰×۲۰۰ mm
۱۵/۵	۴/۲۴	۴۲	۳/۴۸	۰/۲		
۰/۸	۳/۷	۲۲	۲/۹۹	۰/۴		
۰/۰	۳/۸۱	۰/۰	۲/۷۱	۰/۰	فولادی	۷۵×۱۵۰ mm
۲/۴	۳/۹	۴/۴	۲/۸۳	۰/۳		
۶/۳	۴/۰۵	۲۰/۷	۳/۲۷	۰/۶		
۱۸/۴	۴/۵۱	۴۰/۶	۳/۵۳	۰/۹		
۳۱/۸	۵/۰۲	۶۴/۲	۴/۴۵	۱/۲		
۰/۰	۳/۸۱	۰/۰	۲/۷۱	۰/۰	پلی پروپیلن	۷۵×۱۵۰ mm
۱۳/۱	۴/۳۱	۲۸/۸	۳/۴۹	۰/۲		
۴/۲	۳/۹۷	-۴/۱	۲/۶	۰/۴		

* درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه بدون الیاف

مطابق جدول (۳)، مقاومت کششی نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف فولادی با افزایش درصد حجمی الیاف، افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در سن ۷ روزه تقریباً مشابه سن ۲۸ روزه می‌باشد. همچنین با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان 0.2% مقاومت کششی نمونه منشوری $100 \times 100 \times 500$ mm در سن ۷ روزه 1.1% نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش پیدا می‌کند؛ ولی به ازای 0.4% الیاف، تغییری در مقاومت کششی مشاهده نمی‌شود. در سن ۲۸ روزه با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان 0.2% مقاومت کششی 2.9% افزایش می‌یابد؛ ولی با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان 0.4% ؛ مقاومت کششی به میزان 2.7% کاهش پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن روند چندان مشخصی از نظر افزایش یا کاهش مقاومت کششی نمونه منشوری شکل به دست نمی‌دهد.

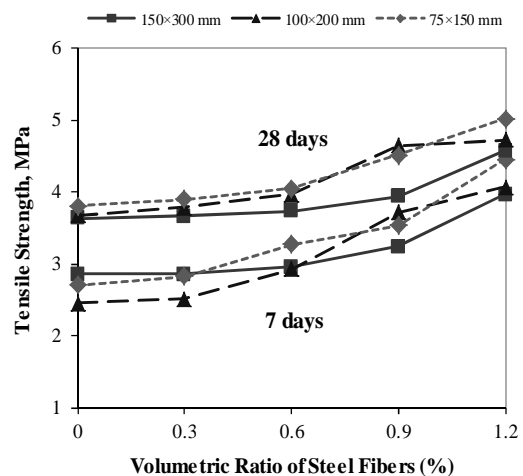
با مقایسه نوع و میزان الیاف در مقاومت کششی بتن برای نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm در سن ۲۸ روزه می‌توان به این نتیجه رسید که مقاومت کششی نمونه منشوری حاوی 1.2% ، 0.9% و 0.6% الیاف فولادی به ترتیب بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف دارا می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن و همچنین میزان 0.3% الیاف فولادی به بتن تأثیری در افزایش مقاومت کششی ندارد.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب تغییرات مقاومت کششی نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهند.

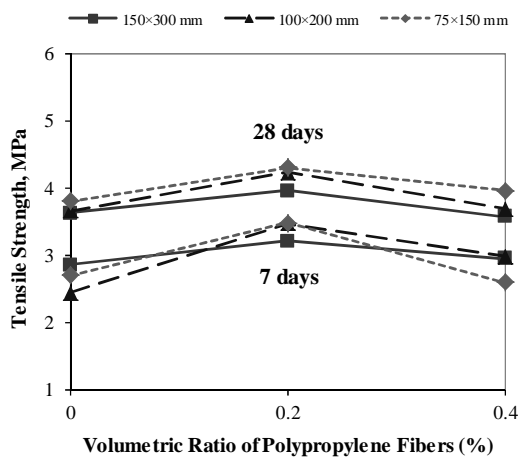


شکل ۹- تغییرات مقاومت کششی نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف فولادی

شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهند. مطابق شکل مشاهده می‌شود که مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف، افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن به میزان 0.2% در افزایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بیشتر از 0.4% می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف حاوی الیاف فولادی



شکل ۸- تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف حاوی الیاف پلی‌پروپیلن

نتایج حاصل از آزمایش خمش نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقاومت کششی نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن در سنین ۷ و ۲۸ روزه

مقاومت کششی ۲۸ روزه		مقاومت کششی ۷ روزه		درصد حجمی الیاف	نوع الیاف
درصد افزایش*	MPa	درصد افزایش*	MPa		
۰/۰	۷	۰/۰	۵/۱۷	۰/۰	فولادی
۲/۴	۷/۱۷	۱/۲	۵/۲۳	۰/۳	
۵/۹	۷/۴۱	۴/۶	۵/۴۱	۰/۶	
۱۲/۶	۷/۸۸	۱۱/۸	۵/۷۸	۰/۹	
۲۸/۹	۹/۰۲	۳۳/۷	۶/۹۱	۱/۲	
۰/۰	۷	۰/۰	۵/۱۷	۰/۰	پلی پروپیلن
۲/۹	۷/۲	۱۰/۱	۵/۶۹	۰/۲	
-۲/۷	۶/۸۱	۰/۰	۵/۱۷	۰/۴	

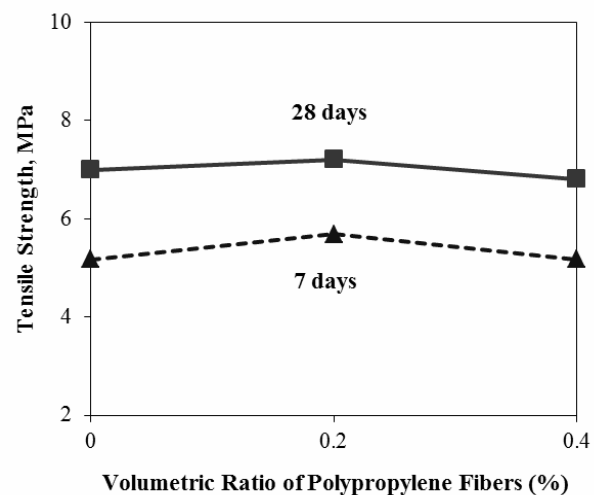
* درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه بدون الیاف

۱- مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف فولادی در آزمایش‌های شکافت نمونه و خمش با افزایش درصد حجمی الیاف از ۰٪ به ۰/۶٪، عمدتاً به مقدار کمی افزایش پیدا می‌کند؛ ولی با افزایش درصد حجمی الیاف از ۰/۶٪ به ۱/۲٪، شاهد افزایش محسوس مقاومت کششی همه نمونه‌ها خواهیم شد.

۲- مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۲٪ در سنین ۷ و ۲۸ روزه، نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش می‌یابد؛ ولی به طور کلی نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن نسبت به نمونه بدون الیاف دارای افزایش مقاومت چشمگیری نبوده و حتی در دو مورد کاهش مقاومت به میزان ۱/۴ و ۴/۱ درصد مشاهده می‌شود.

۳- نمونه‌های منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف پلی پروپیلن روند چندان مشخصی از نظر افزایش یا کاهش مقاومت کششی بتن به دست نمی‌دهند. به خصوص آن که تأثیر در مقاومت ۲۸ روزه قابل توجه نمی‌باشد.

۴- نمونه‌های استوانه‌ای حاوی ۱/۲٪ الیاف فولادی، بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در سنین ۷ و ۲۸ روزه دارا می‌باشند. پس از آن، نمونه‌های استوانه‌ای حاوی ۰/۹٪ الیاف فولادی و ۰/۲٪ الیاف پلی پروپیلن بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف دارا می‌باشند. همچنین اضافه کردن میزان ۰/۳٪ الیاف

شکل ۱۰- تغییرات مقاومت کششی نمونه منشوری شکل $100 \times 100 \times 500$ mm حاوی الیاف پلی پروپیلن

۶- نتیجه گیری

در این مقاله برای بررسی مقاومت کششی بتن با الیاف فولادی و پلی پروپیلن آزمایشاتی با نمونه‌های استوانه‌ای و منشوری شکل و با درصدهای مختلف الیاف برنامه‌ریزی و انجام شد. در کلیه آزمایشات انجام شده مقاومت زمینه بتن ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- "Influence of Fiber Ratio in the Size Effect", Proceedings, Int'l Conference Concrete: Construction's sustainable option, Dundee, UK, 2008, pp 123-130.
- [۶] خالو، ع. ر.، "رفتار و کاربردهای بتن الیافی"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس تکنولوژی بتن الیافی، دانشگاه صنعتی شریف، ۴ اسفند ۱۳۷۸، ص ۳۰-۱.
- [7] Sahin, Y., Koksak, F., "The Influences of Matrix and Steel Fibre Tensile Strengths on the Fracture Energy of High-Strength Concrete", Construction and Building Materials, 2011, 25, 1801-1806.
- [8] 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, 2011, 25, 2458-2464.
- [9] Yoon, Y. S., Yang, J. M., Lee, J. H., Lee, S. H., "Structural enhancement of High-Performance Concrete Members by Strategic Utilization of Steel fibers", The 9th International Symposium on High Performance Concrete - Design, Verification & Utilization, Rotorua, New Zealand, 2011.
- [10] ACI Committee 544, "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete", American Concrete Institute (ACI), report No. ACI 544.3R-93, 1998.
- [11] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R. N., "Experimental evaluation of Fiber Reinforced Concrete Fracture Properties", Composites Part B: Engineering, 2010, 41, 17-24.
- [۱۲] وظیفه‌خواه، ن.، "تأثیرات اندازه نمونه آزمایش بر مقاومت کششی بتن الیافی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۹.
- [۱۳] باقری، ع. ر.، زنگانه، ح.، شاهمرادی، م.، "اثر الیاف پلیمری نسل جدید بر مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح به الیاف"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- [۱۴] عطایی، ن. د.، "معرفی برخی ویژگی‌های الیاف پلی‌پروپیلن در بتن"، فصل‌نامه انجمن بتن ایران، ۱۳۸۷، ۱۷-۲۱.
- [15] Kim, J. S., Cho, C. H., Cho, C. G., Yoo, M. H., Cho, Y. H., Lee, S. J., "A Study on the Fire Resistance Performance of High Strength Fiber Reinforcement Concrete", The 9th International Symposium on High Performance Concrete - فولادی و ۰/۴ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن تأثیر چندانی در افزایش مقاومت کششی ندارد.
- ۵- مقاومت کششی نمونه منشوری ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ mm حاوی ۱/۲، ۰/۹ و ۰/۶ الیاف فولادی به ترتیب بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در سن ۲۸ روزه دارا می‌باشند. همچنین اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن و همچنین میزان ۰/۳ الیاف فولادی به بتن تأثیری در افزایش مقاومت کششی ندارد.
- ۶- بر اساس آزمایشات انجام شده، میزان حداکثر افزایش مقاومت کششی با استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن برای نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۷ روزه به ترتیب ۶۶/۱٪ و ۴۲٪ و در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۳۱/۸٪ و ۱۵/۵٪ می‌باشد. این حداکثر افزایش مقاومت کششی برای نمونه منشوری شکل در سن ۷ روزه به ترتیب ۳۳/۷٪ و ۱۰/۱٪ و در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۲۸/۹٪ و ۲/۹٪ می‌باشد.
- لازم به ذکر است که به دلیل مقاومت زمینه یکسان برای کلیه نمونه‌های بتن الیافی، نتایج به دست آمده در این مطالعات به خوبی اثرات تغییر در میزان مصرف الیاف را نشان می‌دهند. با این حال در برخی کاربردهای عملی به کارگیری بتن الیافی با کارایی مشخص ممکن است مد نظر باشد که تعمیم نتایج مطالعات حاضر برای چنین شرایطی نیازمند مطالعات تکمیلی خواهد بود.
- ### ۷- مراجع
- [۱] طاحونی، ش.، "طراحی ساختمان‌های بتن مسلح"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، ۱۳۸۳.
- [2] Manafpour, A. R., Vazifehkhah, N., "Tensile Strength of Fibre Reinforced Concrete with Steel and Polypropylene Fibres", The 9th International Symposium on High Performance Concrete - Design, Verification & Utilization, Rotorua, New Zealand, 2011.
- [3] Beddar, M., "Development of Steel Fiber Reinforced Concrete from Antiquity until the Present Day", Proceedings, Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK, 2008, pp 35-44.
- [4] Clarke, J. L., "Design Guidance for Fibre-Reinforced Concrete", Proceedings, Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK, 2008, pp 311-322.
- [5] Darwish, F. A., Oliveira, T. M., Coura, C. G., Kitamura, S., Barbosa, M. T. G., Santos, W.,

- [۲۱] خالو، ع. ر.، افشاری، م.، "عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی تحت بارهای خمشی"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
- [۲۲] مدرسی، م. ح.، رهنما، ح.، فراهانی، ا.، "تأثیر آب دریا بر خواص بتن با الیاف پلی‌پروپیلن"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- [۲۳] تکلو، م. ر.، و مرشد، ر.، "تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن روی میزان جذب انرژی بتن الیافی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۲۴] وظیفه‌خواه، ن.، مناف‌پور، ع. ر.، "بررسی آزمایشگاهی مقاومت کششی بتن با الیاف فولادی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.
- Design, Verification & Utilization, Rotorua, New Zealand, 2011.
- [16] Shah, S. P. Skadendahl, A., "Steel Fiber Reinforced Concrete", Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1986.
- [17] Nili, M., Afroughsabet, V., "Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete", International Journal of Impact Engineering, 2010, 37, 879-886.
- [18] Rodrigues, J. P., Laím, L., Correia, A. C., "Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire", Composite Structures, Vol 92, pp 1263-1268, 2010.
- [19] Vandewalle, L., "Hybrid Fiber Reinforced Concrete", Proceedings, Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK, 2008, pp 11-22.
- [20] Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S., Sheu, B. C., "Assessment of Statistical Variations in Impact Resistance of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete", Cement and concrete research, 2005, 35, 393-399.