

ارائه مدل تجربی تاثیر تغییرات ابعاد نمونه بتنی مسلح به الیاف ماکروسینتتیک بر انرژی شکست

محمد دانشفر^۱، ابوالفضل حسنی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد و عضو هیئت علمی گروه راه و ترابری دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی رفتاری شکننده دارد. افزودن الیاف به بتن بر رفتار شکل پذیری و برخی مشخصات مکانیکی بتن اثر میگذارد. به همین منظور پژوهشی آزمایشگاهی جهت ارائه مدل تجربی تاثیر اندازه نمونه بتن مسلح به الیاف ماکروسینتتیک بر تغییرات انرژی شکست انجام شد. در این پژوهش نمونه‌های تیرچه بتنی به صورت بتن معمولی و بتن مسلح به الیاف ماکروسینتتیک و با سه ضخامت و سه عرض مختلف ساخته شده، انرژی شکست نمونه‌ها اندازه‌گیری و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت نمونه، مقدار انرژی شکست به میزان $۶۳/۱-۱۵/۳$ درصد و همچنین با افزایش عرض نمونه، انرژی شکست به میزان $۵۰/۷۲-۴۲/۰۴$ درصد افزایش می یابد. بتن الیافی یکی از انواع بتن می باشد که با الیاف ترکیب شده است. الیاف مختلفی برای تهیه بتن الیافی استفاده می شود مانند الیاف شیشه، پلیمری، کربن و فولاد. در این پژوهش از الیاف پلیمری ماکروسینتتیک استفاده شد. از کاربرد های الیاف ماکروسینتتیک در بتن میتوان به کاهش میزان جمع شدگی بتن تازه و سخت، افزایش شکل پذیری، ضربه پذیری و سختی بتن، افزایش مقاومت در برابر تنش های خستگی، افزایش دوام و طول عمر بتن، بهبود ویژگی های مکانیکی بتن (مقاومت کششی، خمشی و...)، کنترل ترک های ثانویه/حرارتی بتن، جلوگیری از گسترش ترک ها به عمق، قابلیت بارپذیری پس از ایجاد ترک، کاهش نفوذپذیری در مقابل یون های کلر و سولفات. پژوهش های متعددی در زمینه بتن الیافی انجام گرفته است. در این پژوهش با استفاده از مفهوم مکانیک شکست مدل های انرژی تغییر ضخامت ارائه شد.

کلمات کلیدی: بتن مسلح به الیاف، الیاف ماکرو سینتتیک، انرژی شکست، طاقت خمشی، تیرچه بتنی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.119794.1471	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.119794.1471	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۴/۰۴	۱۳۹۶/۱۱/۲۹
			*نویسنده مسئول:		ابوالفضل حسنی
			پست الکترونیکی:		hassani@modares.ac.ir

Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data

abolfazl hassani *¹, mohammad daneshfar²

1- school of civil and environment , tarbiat modares university, tehran, iran.

2-school of civil and environment, tarbiat modares university

ABSTRACT

Concrete has a brittle behavior as one of the most frequently used construction materials. Adding fibers to concrete can enhance its ductility and some of its mechanical properties. For this purpose, a laboratory study was conducted in order to present an experimental model to investigate the effect of size of micro-synthetic-fiber-reinforced concrete on fracture energy changes. In this study, concrete beam specimens were manufactured and evaluated with three different thicknesses and widths. Results indicated that by increasing the thickness of the specimens, fracture energy was respectively increased by 15.3-63.1%. Moreover, by increasing the width of the specimen, fracture energy was respectively increased by 42.04-50.72 %. Fiber-reinforced concrete is a type of concrete that is mixed with fiber. Various types of fibers are used to produce fiber-reinforced concrete, which include glass, polymer, carbon and steel. In the present research, macro-synthetic polymer fibers were used. Some of the consequences of applying macro-synthetic fibers in concrete include reduced shrinkage of fresh and hardened concrete, increased ductility, vulnerability and hardness of concrete, increased strength against fatigue stresses, increased durability and lifetime of concrete, improved concrete mechanical properties (tensile strength, flexural strength, etc.), control of secondary/thermal cracks of concrete, preventing the in-depth propagation of cracks, post-cracking chargeability and reduced permeability against chloride and sulfate ions. To date, numerous studies have been conducted on fiber-reinforced concrete, most of which have been focused on the evaluation of fiber-reinforced concrete using steel and plastic fibers or their combination.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 February 2018

Revise Date: 25 June 2018

Accept Date: 07 August 2018

Keywords:

fiber-reinforced concrete
macro synthetic
fracture energy
flexural toughness
concrete beam

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.119794.1471

*Corresponding author: abolfazl hassani

Email address: hassani@modares.ac.ir

۱- مقدمه

بتن الیافی یکی از انواع بتن می باشد که با الیاف ترکیب شده است. الیاف مختلفی برای تهیه بتن الیافی استفاده می شود مانند الیاف شیشه، پلیمری، کربن و فولاد [۱]. در این پژوهش از الیاف پلیمری ماکروسینتتیک استفاده شد. از کاربردهای الیاف ماکروسینتتیک در بتن میتوان به کاهش میزان جمع شدگی بتن تازه و سخت، افزایش شکل پذیری، ضربه پذیری و سختی بتن، افزایش مقاومت در برابر تنش های خستگی، افزایش دوام و طول عمر بتن، بهبود ویژگی های مکانیکی بتن (مقاومت کششی، خمشی و...)، کنترل ترک های ثانویه/حرارتی بتن، جلوگیری از گسترش ترک ها به عمق، قابلیت بارپذیری پس از ایجاد ترک، کاهش نفوذپذیری در مقابل یون های کلر و سولفات [۲]. پژوهش های متعددی در زمینه بتن الیافی انجام گرفته است. در اغلب این پژوهش ها بتن الیافی با استفاده از الیاف فولادی، پلیمری و یا ترکیبی از آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بانتیا و یئول یو در سال ۲۰۱۶ بر روی مشخصات مکانیکی بتن الیافی با عملکرد بالا پژوهش انجام دادند و گزارش کردند که استفاده از انواع الیاف فلزی مشخصات مکانیکی بتن را بهبود می بخشد. همچنین افزودن الیاف ماکرو فلزی به بتن معمولی مقاومت کششی، ظرفیت کرنش و مقاومت خمشی را به نسبت الیاف میکرو فلزی بهبود می بخشد [۳]. یئول یو، کیم و پارک در سال ۲۰۱۷ بر روی مقایسه رفتار خمشی بتن با عملکرد بالا با الیاف فلزی ترکیبی مطالعه انجام دادند و نشان دادند که الیاف با طول متوسط و بلند عملکرد خمشی را بهبود می بخشند. همچنین استفاده از الیاف ترکیبی کوتاه و بلند چقرمگی و رفتار ترک خوردگی را بهبود می بخشند [۴]. جمشیدی، لطیفی و پاکروان در سال ۲۰۱۷ مرور منابعی در رابطه با استفاده از الیاف مرکب در بتن انجام دادند. ایشان گزارش کردند که ترکیب انواع مختلف الیاف نتایج بهتری در چقرمگی و جذب انرژی بتن به همراه دارد [۵].

کلی و جادهاو در سال ۲۰۱۳ بر روی عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف مرکب مطالعه کردند و گزارش دادند که استفاده از این الیاف عملکرد خمشی تیر بتن مسلح به الیاف را بهبود می بخشند [۶]. جیابایو و همکاران در سال ۲۰۰۴ بر روی طاقت و کنترل ترک بتن الیافی و مزایا و ویژگی های اضافه کردن الیاف مصنوعی به بتن تحقیقات انجام دادند. اضافه کردن الیاف میکرو به میزان ۰.۱٪ حجم بتن بر جمع شدگی پلاستیک تاثیر گذار است و اضافه کردن به میزان ۱٪ حجم بتن بر طاقت خمشی، مقاومت ضربه و مقاومت خستگی بتن سخت شده تاثیر گذار است. همچنین مقاومت خمشی معادل را برای مقاومت پس از ترک خوردگی برای نمونه های مختلف را اندازه گیری کردند [۷]. رائو و آبا در سال ۲۰۱۰ بر روی شاخص های طاقت خمشی بتن الیافی فولادی با بارگذاری مود ۲ مطالعه انجام دادند و نشان دادند که مقاومت و طاقت بتن در مود ۲ بارگذاری با افزودن الیاف به بتن بهبود می یابد و مقاومت برشی بتن الیافی با افزایش حجم الیاف افزایش می یابد [۸]. بردلن، رسلر در سال ۲۰۰۹ بر روی بتن مسلح به الیاف مطالعه انجام دادند. ایشان در این پژوهش الیاف فولادی، مصنوعی و شبکه مش فولادی را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که استفاده از الیاف موجب کاهش ضخامت روسازی بتنی می گردد [۹]. چاری در سال ۲۰۱۵ پارامترهای شکست مود یک را در بتن پر مقاومت مسلح به الیاف فلزی را بررسی کرد. نتایج بدست آمده نشان داد که انرژی شکست با افزایش سایز تیر افزایش می یابد [۱۰]. آقای گوستاوسون در پژوهشی تیرهای بتنی پر مقاومت مسلح به الیاف فلزی را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش تنش برشی سه تیر با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط حاوی الیاف فلزی مقاومت بهتری را نتیجه می دهد [۱۱]. کریگر در سال ۲۰۱۲ بر روی مدلی جهت توضیح مد یک شکست بتن مسلح به الیاف فلزی بتن با عملکرد بالا مطالعه کرده و نشان داد که با افزایش درصد الیاف انرژی شکست افزایش می یابد. همچنین با افزایش نسبت طول دهانه به عمق تیر ماکزیمم نیروی شکست تیر کاهش می یابد [۱۲]. در جدول (۱) خلاصه ای از پژوهش های دیگر صورت گرفته در خصوص بتن مسلح به الیاف نشان داده شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از تاثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی [۱۳].

مقاومت فشاری	کشش غیر مستقیم	مقاومت خمشی	جذب انرژی	نوع بتن	مشخصات الیاف			سال	نویسنده		
					درصد حجمی الیاف (%)	طول (mm)	نوع				
(۴.۵۷-۲۶.۳۲)% کاهش	(۰.۸۴-۳۴.۲۹)% افزایش	(۱۹.۶-۸۱.۶۹)% افزایش	-	بتن معمولی	۰.۴۰، ۴۰.۶	۳۸	پلی پروپیلن	۲۰۱۷	دانشگر و همکاران [۱۴]		
۳% افزایش، ۸% کاهش، ۴% افزایش	(۸، ۹.۲۷)% افزایش	-	-	پرمقاومت	۰.۲۵، ۰.۷۵، ۱.۲۵	۳۹	پلی پروپیلن	۲۰۱۷	فلاح و نعمت زاده [۱۵]		
-	-	حداقل ۲۰.۸% افزایش	افزایش	معمولی	۰.۲۵، ۰.۳۷۵، ۰.۵	۲۰.۳۰، ۴۰	فلزی	۲۰۱۷	لی و همکاران [۱۶]		
کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	خود تراکم	۰.۳۳	۳۵	فلزی	۲۰۱۷	آبرتی و همکاران [۱۷]		
					۰.۵	۶۰	پلی پروپیلن				
افزایش ۲%، کاهش ۵%	(۱۹.۲۷)% افزایش	(۲۶، ۳۳)%	-	خود تراکم	۰.۱۰، ۱.۲	۶۰	پلی پروپیلن	۲۰۱۶	حسامی و همکاران [۱۸]		
کاهش ۲%	افزایش ۹۸%	-	-	معمولی	۴ (درصد سیمان)	۵۰	فلزی	۲۰۱۶	سیدانی و همکاران [۱۹]		
کاهش ۵%	افزایش ۶۵%	-	-		۴ (درصد سیمان)	۵۰	پلی پروپیلن				
(۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۹)% کاهش	(۱۵، ۲۲، ۳۸، ۵۷)% افزایش	(۱۴، ۲۸، ۳۶، ۶۱)% افزایش	-	پر مقاومت	۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۴۵، ۱	۶۰	فلزی	۲۰۱۵	افروغ ثابت و ازبکالکلو [۲۰]		
(۵، ۱۱، ۱۵)% افزایش	(۸، ۲۴، ۳۳)% افزایش	(۲۹، ۳۱، ۴۰)% افزایش	-	سیک	۰.۲۵، ۰.۳۷۵، ۰.۵	۵۴	پلی پروپیلن (درهم تنیده)	۲۰۱۵	ینو و همکاران [۲۱]		
(۳، ۱۰، ۱۴)% افزایش	(۱۰، ۱۹، ۲۷)% افزایش	(۱۸، ۲۲، ۳۰)% افزایش	-							۳۰	
(۴، ۱۰، ۱۴)% افزایش	(۱۳، ۱۴، ۲۱)% افزایش	(۶، ۱۰، ۲۰)% افزایش	-							۲۰	پلی پروپیلن (صاف)
N.S	-	۲۴% افزایش	-	آرسی سی	۱.۵	۵۰	فلزی	۲۰۱۵	کارادلیس و یوگو [۲۲]		
افزایش ۲۴%	افزایش ۳۳%	۱۹% افزایش	-	متخلخل	۰.۵	۳۶	فلزی	۲۰۱۴	حسامی و همکاران [۲۳]		
افزایش ۲۸%	افزایش ۳۷%	۲۱% افزایش	-							۰.۳	۵۴
افزایش ۳۲%	افزایش ۲۸%	۱۷% افزایش	-							۰.۲	۱۲

پژاک ویونیکبوسکی [۲۴]	۲۰۱۳	فلزی	۳۰	۰,۵,۱,۱,۵	خود تراکم	-	۵۵%, ۱۵۱%, ۳۳۹% افزایش	-	(۳۴, ۳۲, ۲۰) افزایش %
سینگ و همکاران [۲۵]	۲۰۱۰	پلی پروپیلن (شبهه ای)	۳۵	۱	معمولی	افزایش	۸۰% افزایش	-	افزایش % ۱۸
			۶۰						
سیلوا تامانورگو [۲۶]	۲۰۰۲	پشم سنگ	۲۰	۲,۳,۵	ژئوپلیمر	۸۰% افزایش	-	-	-

با این وجود در این پژوهش تاثیر اندازه نمونه بتن مسلح شده به الیاف ماکرو سینتتیک با استفاده از تغییرات انرژی شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مورد ارزیابی این پژوهش انرژی شکست تیرچه بتنی شکافدار بود. الیاف مورد استفاده از نوع درهم تنیده با مقدار مصرف ۰/۴ درصد حجمی به مخلوط بتنی اضافه شد. از هر کدام از نمونه‌های مورد نظر سه نمونه ساخته شده و نتایج میانگین‌گیری و در جداول مربوطه درج شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- متغیرهای آزمایش و مصالح مصرفی

برای ارزیابی تاثیر اندازه نمونه بتن الیافی تمام نمونه‌های بتنی با یک طرح اختلاط یکسان و افزودن الیاف درهم تنیده به میزان ۰/۴ درصد حجمی ساخته شد. مصالح مصرفی با مشخصات ذیل مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۱- سیمان

سیمان استفاده شده در این پژوهش سیمان تیپ ۱ پرتلند معمولی کارخانه سیمان آبیگ می‌باشد که مشخصات آنالیز شیمیایی و فیزیکی آن در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان تیپ ۱ مورد استفاده در پژوهش

ب: ترکیبات شیمیایی												الف: مقاومت فشاری	
Oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	LOI	days	Compressive strength (MPa)
(%)	۱۹,۹۸	۳,۵	۴,۱۱	۶۴,۷۳	۲,۰۷	۳,۷۹	۰,۱۵	۰,۶۳	۰,۲۷	۰,۲	۰,۳۵	۳	۲۲,۳
												۷	۲۵,۶
												۲۸	۳۵,۱

۲-۱-۲- الیاف

در این پژوهش از الیاف به شکل درهم تنیده و از جنس پلی الیفین استفاده شد. از مزایای این نوع الیاف نسبت به الیاف فلزی می توان به عدم گلوله‌ای شدن و جمع شدن در بتن (بواسطه مصرف کمتر)، قابلیت کاربرد در بتن‌های با ضخامت کم، اجرای ساده تر و با کیفیت تر سطح پرداخت شده نهایی و حذف احتمال خوردگی در محیط‌های مستعد خوردگی اشاره کرد.

شکل الیاف استفاده شده در شکل (۱) و مشخصات الیاف در جدول (۳) نشان داده شده است [۲۷]. با توجه به اینکه ACI 360 محدوده مصرف را بین ۰ تا ۱ درصد حجمی پیشنهاد داده است و با توجه به مشکلات اجرای بتن با مقادیر زیاد الیاف، مقدار ۰/۴ درصد حجمی به عنوان میزان مصرف الیاف برای همه نمونه‌های پژوهش انتخاب شد [۲۸].



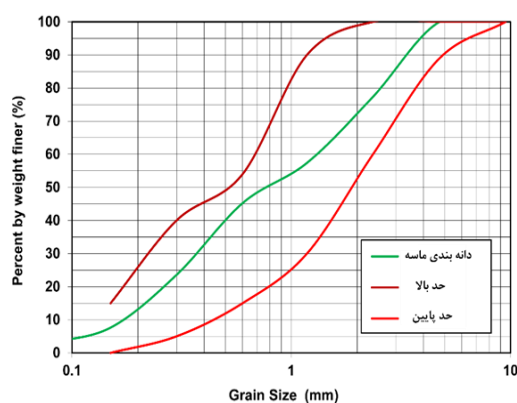
شکل ۱: الیاف درهم تنیده

جدول ۳: مشخصات الیاف مورد استفاده در آزمایشات [۲۷].

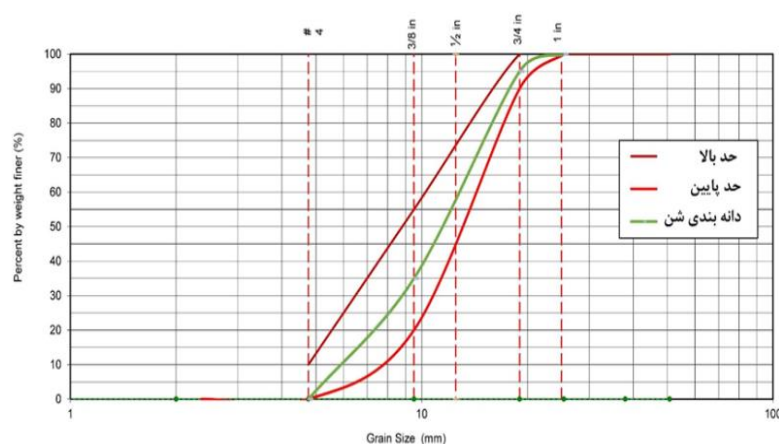
جنس	شکل	رنگ	چگالی gr/cm ³	طول mm	قطر mm	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa	نقطه اشتعال °C	نقطه ذوب °C	جذب آب	مقاومت در محیط‌های اسیدی و قلیایی
پلی الیفین	تک رشته ماکرو متشکل از ریز رشته‌های به هم چسبیده	طوسی	۰/۰-۹۱/۹۶	۳۸	≥ ۰/۳	۶۶۰- ۵۷۰	≥ ۴/۲	≥ ۵۹۰	≥ ۱۲۰	ندارد	عالی

۲-۱-۳- مصالح سنگدانه ای درشت دانه و ریزدانه بتن

مصالح سنگدانه‌ای درشت‌دانه و ریزدانه برای ساخت بتن از معادن رودخانه‌ای منطقه شهریار کرج تهیه شده بودند که توسط سنگ‌شکن شکسته شده‌اند. شکل سنگ دانه‌ها علیرغم شکستگی آن‌ها در یک وجه غالباً گرد گوشه می‌باشد. مشخصات دانه‌بندی مصالح درشت دانه و ریزدانه به ترتیب در نمودار (۱) ارائه شده است. سایر مشخصات الزام آور و مورد نیاز برای طرح اختلاط بتن در جدول (۴) مشخص شده است.



ب: دانه بندی مصالح ریز دانه



الف: دانه بندی مصالح درشت دانه

نمودار ۱: نمودار دانه بندی درشت دانه و ریز دانه

جدول ۴: مشخصات فیزیکی، دوام و مکانیکی مصالح درشت دانه و ریزدانه مصرفی در بتن

ریزدانه	درشت دانه	استاندارد مربوطه	مشخصات سنگدانه‌ها
-	۱۲/۵	ASTM C136	حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (mm)
-	۱۶۴۸	ASTM C127	وزن حجمی (kg/m ³)
۲/۴	۱/۲	ASTM C127	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک (٪)
۲/۸۸	-	ASTM C136	مدول نرمی
-	-	ASTM D2419	درصد ارزش ماسه ای (٪)
۲/۶۵	۲/۶۷	ASTM C127,128	وزن مخصوص
.۱	۰/۰۷	ASTM C142	کلوخه های رسی و ذرات سست (٪)
-	۱۱/۳	ASTM C131	درصد سایش (٪)
-	۵/۲	ASTM C88	سلامت سنگدانه‌ها (درصد افت وزنی در سولفات سدیم) (٪)
-	۱۶/۶	ASTM D4791	ضریب تورق (٪)
-	۱۷/۸	ASTM D4791	ضریب تطویل (٪)

۲-۲- ساخت نمونه

برای اندازه‌گیری و ارزیابی انرژی شکست نمونه‌ها، طرح اختلاط نمونه‌های بتنی بر مبنای استاندارد ACI 211 انجام شد که در جدول (۵) نشان داده شده است [۲۹]. ابعاد نمونه‌های تیرچه بتنی طبق استاندارد JCI-S-001-2003 انتخاب شده، نمونه‌ها ساخته شده و در مرکز دهانه شکافی به عمق ۳ سانتی‌متر زده شد [۳۰]. مشخصات ابعاد نمونه‌ها، ابعاد شکاف مرکز دهانه و همچنین شکل و مقدار مصرف الیاف در نمونه‌های پژوهش در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۵: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

الیاف	فوق روان کننده	آب	سیمان	ماسه	شن	مصالح
۳/۶	۲/۲	۱۹۹	۴۴۲	۷۸۹	۸۸۰	وزن واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)

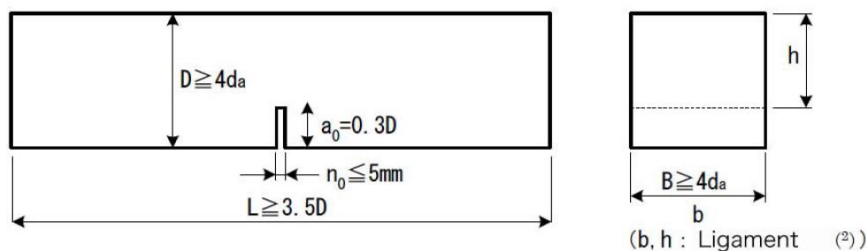
جدول ۶: مشخصات نمونه‌ها

نمونه	اندازه نمونه (mm)	مشخصات شکاف (mm)	شکل الیاف	درصد حجمی الیاف (%)
E1-H8	۸۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
E2-H10	۱۰۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
E3-H15	۱۵۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
E4-B5	۱۰۰×۵۰×۳۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
E5-B10	۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
E6-B15	۱۰۰×۱۵۰×۳۵۰	۲×۳۰	در هم تنیده	۰/۴
N1-H8	۸۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	-	۰
N2-H10	۱۰۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	-	۰
N3-H15	۱۵۰×۱۲۰×۴۵۰	۲×۳۰	-	۰
N4-B5	۱۰۰×۵۰×۳۵۰	۲×۳۰	-	۰
N5-B10	۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰	۲×۳۰	-	۰
N6-B15	۱۰۰×۱۵۰×۳۵۰	۲×۳۰	-	۰

۳-۲- تنظیمات آزمایشگاهی و اندازه گیری ها

۳-۲-۱- انرژی شکست

انرژی شکست به عنوان میزان انرژی مورد نیاز برای ایجاد ترک در واحد سطح در صفحه‌ای به صورت موازی با جهت ترک تعریف می شود. مهم ترین پارامتری که در این پژوهش اندازه گیری می شود، انرژی شکست است. در این پژوهش برای محاسبه انرژی از روش موسسه بتن ژاپن استفاده می شود. در این استاندارد طراحی ابعاد و هندسه نمونه‌ها باید مطابق ابعاد شکل (۲) انتخاب شود. سپس با استفاده از دستگاه یونیورسال نمونه‌ها تحت بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفته و نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک ترسیم می شود. مساحت زیر نمودار محاسبه شده و از روابط (۱) و (۲) انرژی شکست بدست می آید [۳۰].



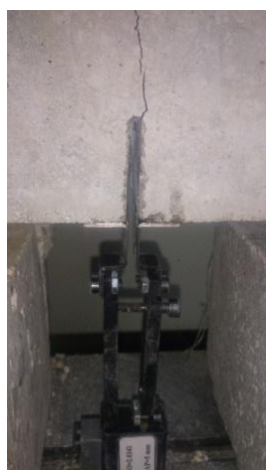
شکل ۲: طرح هندسی نمونه تحت آزمایش [۳۰]

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_C \quad (2)$$

که در روابط ۱ و ۲، G_F انرژی شکست (N/mm^2)، W_0 مساحت زیر نمودار بازشدگی ترک تا شکست نمونه ($N \cdot mm$)، W_1 کار وزن نمونه ($N \cdot mm$)، A_{lig} مساحت سطح مقطع شکست (mm^2)، m_1 وزن نمونه (kg)، S طول دهانه (mm)، L طول نمونه (mm)، m_2 وزن تجهیزات نصب شده روی نمونه (kg)، g شتاب گرانشی ($9.807 m/s^2$) و $CMOD_C$ بازشدگی دهانه ترک در هنگام شکست (mm) می باشند [۳۰].

نحوه تنظیم دستگاه و نمونه در شکل (۳) شماره نشان داده شده است.



ب- نحوه قرارگیری سنسور اندازه گیری بازشدگی دهانه ترک



الف- تنظیم نمونه و دستگاه یونیورسال

شکل ۳: نحوه تنظیم دستگاه و نمونه جهت اندازه گیری نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک

۳- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل

برای بدست آوردن انرژی شکست، نمونه‌های بتن الیافی طبق استاندارد JCI-S-001-2003 و مطابق شکل (۲) به صورت شکافدار با سه ضخامت و سه عرض مختلف ساخته شده و به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شد. شکل (۴) ساخت نمونه بتن الیافی و حوضچه عمل‌آوری را نشان می‌دهد.



ب- عمل‌آوری نمونه بتن الیافی



الف- ساخت نمونه‌های بتنی

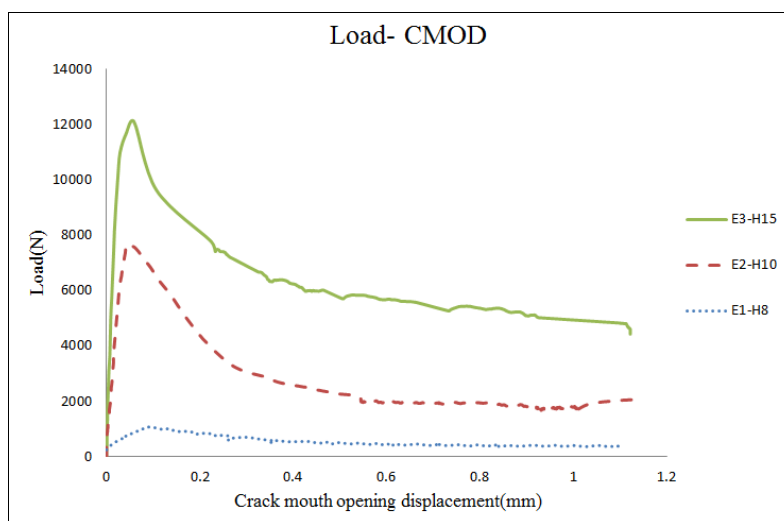
شکل ۴: ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

نمونه‌های ساخته شده تحت بارگذاری خمشی سه نقطه ای قرار گرفته و نمودار بارگذاری- بازشدگی دهانه ترک برداشت می‌شود. با استفاده از محاسبه مساحت زیر منحنی و از رابطه (۱) و (۲) انرژی شکست نمونه‌های مختلف بتنی بدست می‌آید. شکل (۵) نحوه ترک خوردن نمونه از ناحیه شکاف وسط دهانه را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نحوه ترک خوردن نمونه از ناحیه شکاف مرکز دهانه

نمودار (۲) نمودار بار- بازشدگی دهانه ترک نمونه ای از نمونه‌های بتن الیافی با شکافدار با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش انرژی شکست برای تیرچه‌های با ضخامت متفاوت در جدول (۷) نشان داده شده است.

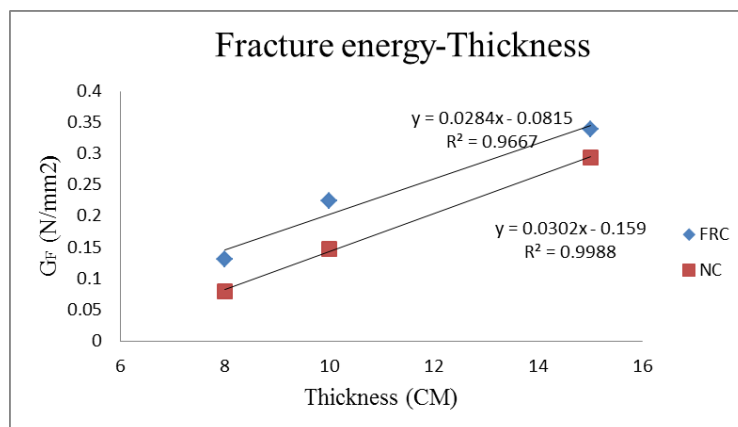


نمودار ۲: نمودار بارگذاری- بازشدگی دهانه ترک نمونه های بتن الیافی با ضخامت های مختلف

جدول ۷: انرژی شکست برای نمونه های با ضخامت متفاوت

نمونه	ضخامت (سانتی متر)	GF میانگین (بتن معمولی)	GF میانگین (بتن الیافی)	درصد تغییرات (%)
۱	۸	۰/۰۸	۰/۱۳۰	۶۳/۱۰
۲	۱۰	۰/۱۴۷	۰/۲۲۳	۵۱/۵۹
۳	۱۵	۰/۲۹۳	۰/۳۳۸	۱۵/۳۰

همانطور که در جدول (۷) نشان داده شد که با افزایش ضخامت انرژی شکست نمونه های بتنی معمولی و الیافی افزایش خواهد یافت همچنین با افزودن الیاف به میزان ۰/۴ درصد حجمی به میزان ۱۵/۳۰ - ۶۳/۱۰ درصد به انرژی شکست نمونه اضافه می شود. این نتایج نشان دهنده افزایش جذب انرژی و کاهش سختی و افزایش انعطاف پذیری بتن مسلح به الیاف می باشد. همچنین نتایج جدول (۷) نشان داد که با افزایش ضخامت نمونه، تاثیر افزودن الیاف کاهش می یابد که این امر نشان دهنده تاثیر بیشتر ضخامت نسبت به الیاف در مقدار انرژی شکست نمونه های بتنی دارد. مدل های تجربی بدست آمده حاصل از رگرسیون منحنی تغییرات انرژی شکست در نمودار (۳) و جدول (۸) نشان داده شده است.

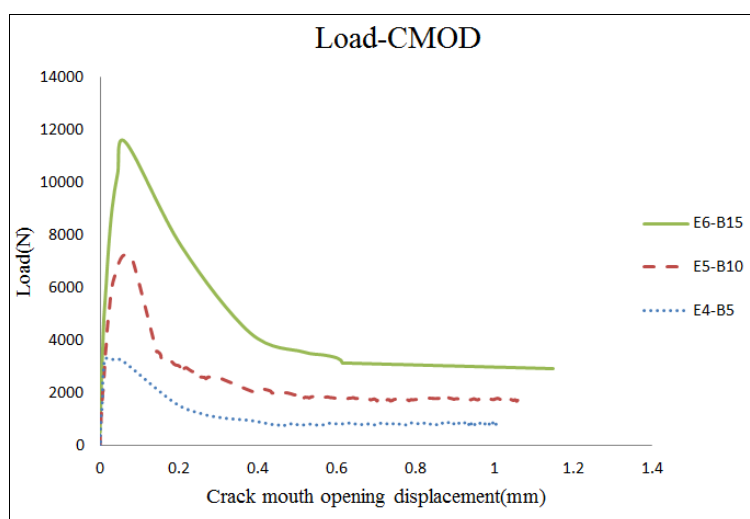


نمودار ۳: تغییرات انرژی شکست نمونه‌های بتنی با ضخامت‌های مختلف

جدول ۸: مدل‌های تجربی تغییرات انرژی شکست با تغییر ضخامت

R ²	مدل تجربی	نمونه
۰/۹۶۶۷	$G_F = 0.0284H - 0.0815$	بتن الیافی
۰/۹۹۸۸	$G_F = 0.0302H - 0.159$	بتن معمولی

نمودار (۴) نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک نمونه‌ای از تیرچه‌های بتنی الیافی شکافدار با عرض‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش انرژی شکست برای تیرچه‌های با عرض‌های متفاوت در جدول (۹) نشان داده شده است.

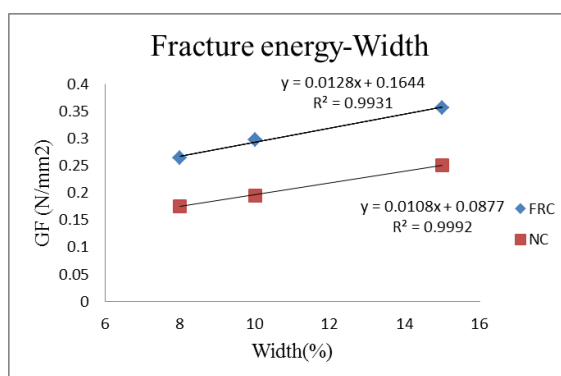


نمودار ۴: بار بازشدگی دهانه ترک نمونه‌های بتنی الیافی با عرض‌های متفاوت

جدول ۹: انرژی شکست برای نمونه‌های با عرض متفاوت

نمونه	عرض (سانتی متر)	G_f میانگین (بتن معمولی)	G_f میانگین (بتن الیافی)	درصد تغییرات (%)
۱	۵	۰/۱۷۴۹	۰/۲۶۳۶	۵۰/۷۲
۲	۱۰	۰/۱۹۴۴	۰/۲۹۶۶	۵۲/۵۶
۳	۱۵	۰/۲۵۰۰	۰/۳۵۵۰	۴۲/۰۴

نتایج جدول (۹) نشان داد که با افزایش عرض انرژی شکست نمونه‌های بتنی معمولی و الیافی افزایش خواهد یافت همچنین با افزودن الیاف به میزان ۰/۴ درصد حجمی به میزان ۴۲/۰۴-۵۰/۷۲ درصد به انرژی شکست نمونه اضافه می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده افزایش جذب انرژی و کاهش سختی و افزایش انعطاف پذیری بتن مسلح به الیاف می‌باشد. همچنین نتایج جدول (۹) نشان داد که با افزایش عرض نمونه، تاثیر افزودن الیاف کاهش می‌یابد که این امر نشان دهنده تاثیر بیشتر عرض نسبت به الیاف در مقدار انرژی شکست نمونه‌های بتنی دارد. مدل‌های تجربی بدست آمده حاصل از رگرسیون منحنی تغییرات انرژی شکست در نمودار (۵) و جدول (۱۰) نشان داده شده است.



نمودار ۵: تغییرات انرژی شکست نمونه‌های بتنی با عرض‌های مختلف

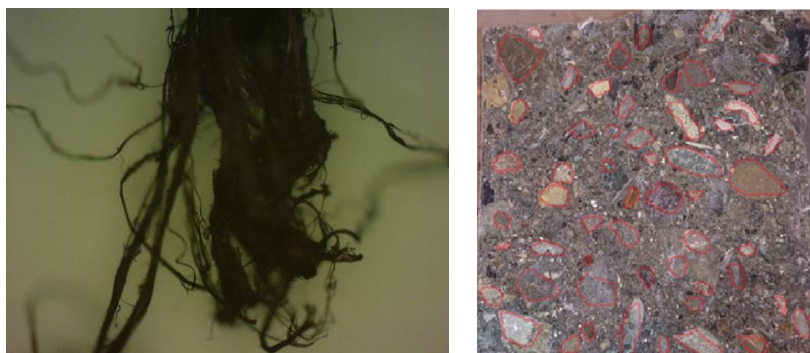
جدول ۱۰: مدل‌های تجربی تغییرات انرژی شکست با تغییر عرض

R^2	مدل تجربی	نمونه
۰/۹۹۳۱	$G_F = ۰/۰۱۲۸ B + ۰/۱۶۴۴$	بتن الیافی
۰/۹۹۹۲	$G_F = ۰/۰۱۰۸ B + ۰/۰۸۷۷$	بتن معمولی

۴- بررسی سطح مقطع شکست و الیاف

پس از شکست نمونه‌ها، سطح مقطع شکست نمونه و نوک الیاف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که شکست از ناحیه سنگدانه‌ها اتفاق افتاده است. این امر نشان‌دهنده عملکرد مطلوب ملات و مقاومت کافی آن جهت انتقال نیرو به سنگدانه‌ها می‌باشد. همچنین بررسی عکس میکروسکوپی نوک الیاف نشان داد که الیاف در هنگام شکست نمونه دچار کشیدگی و پارگی شده و بیرون

کشیدگی الیاف رخ نداده است که نشان از عملکرد مطلوب الیاف دارد. نمونه‌ای از سطح مقطع شکست و نوک الیاف نمونه‌های بتن الیافی در شکل (۶) نشان داده شده است.



ب- عکس میکروسکوپی نوک الیاف

الف - سطح مقطع شکست

شکل ۶: سطح مقطع شکست و نوک الیاف نمونه‌های بتن الیافی

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش انرژی شکست برای نمونه های بتن مسلح به الیاف ماکرو سینتتیک با طرح اختلاط و با سه ضخامت و سه عرض مختلف اندازه گیری و مدل تجربی تغییرات آن برای بتن مسلح به الیاف و بتن معمولی ارائه شد.

نتایج جدول (۷) و (۹) و نمودارهای (۳) و (۵) نشان داد که نمونه های بتن الیافی عملکرد بهتری در انرژی شکست نسبت به بتن معمولی دارند. نتایج جدول (۷) نشان داد که اضافه نمودن الیاف به نمونه های با ضخامت مختلف موجب افزایش انرژی شکست به میزان $15/30 - 63/10$ درصد نسبت به بتن معمولی می گردد.

در جدول (۹) نشان داده شد که اضافه نمودن الیاف به نمونه های با عرض مختلف موجب افزایش انرژی شکست به میزان $50/42 - 72/04$ درصد نسبت به بتن معمولی می گردد.

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت و عرض نمونه‌های آزمایش شده، انرژی شکست نمونه های بتنی معمولی و الیافی افزایش خواهد یافت همچنین با افزودن الیاف به میزان $0/4$ درصد حجمی به انرژی شکست نمونه های بتن الیافی اضافه خواهد شد.

نتایج این پژوهش نشاندهنده افزایش جذب انرژی و کاهش سختی و افزایش انعطاف پذیری بتن مسلح به الیاف نسبت به بتن معمولی دارد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت و عرض نمونه‌های مورد آزمایش، تاثیر افزودن الیاف کاهش می یابد که این امر نشان دهنده تاثیر بیشتر عرض نسبت به الیاف در مقدار انرژی شکست نمونه های بتنی دارد.

با توجه به نتایج بدست آمده استفاده از الیاف برای سازه هایی که در طراحی آنها خمش و کشش از اهمیت بالایی برخوردار است مانند روسازی بتنی (که معیار طراحی آن مقاومت خمشی است)، بسیار کاربردی بوده و لحاظ نمودن تاثیر الیاف در طراحی سازه های بتنی موجب افزایش دوام، ظرفیت باربری و طول عمر سازه و دستیابی به یک طراحی با هزینه فایده بالا خواهد گردید.

منابع و مراجع

- [1] Zongjin, L. (2011). *Advanced concrete technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Toledo Filho, R. and Sanjuan, M. (1999). *Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age*. Cement and Concrete Research, **29**(10), 1597-1604.
- [3] Yoo, D.-Y. and Banthia, N. (2016). *Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review*. Cement and Concrete Composites, **73**, 267-280.
- [4] Yoo, D.-Y., Kim, S.-W. and Park, J.-J. (2017). *Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers*. Construction and Building Materials, **132**, 219-229.
- [5] Pakravan, H., Latifi, M. and Jamshidi, M. (2017). *Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review*. Construction and Building Materials, **142**, 280-294.
- [6] Jadhav, H. and Koli, M. (2013). *Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete beams*. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, **2**(3), 211-88.
- [7] Jiabiao, J., Loh, S. and Gasho, T. (2004). *Synthetic structure fibers for toughness and crack control of concrete*. In: *29th Conference on our world in concrete & structures*. Singapore.
- [8] Rao, A.S. and Rao, G.A. (2014). *Fracture Mechanics of Fiber Reinforced Concrete: An Overview*. International Journal of Engineering Innovations and Research, **3**(4), 517.
- [9] Bordelon, A. and Roesler, J.R. (2009). *Fiber-reinforced concrete pavement design and material requirements*. in: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 8th International Conference (BCR2A'09)*.
- [10] Chari, K.B., *Investigation on Mode-I Fracture Parameters Using Steel Fibers in High Strength Concrete*.
- [11] Gustafsson, J. and Noghabai, K. (1999). *Steel fibers as shear reinforcement in high strength concrete beams*. NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS-, **22**, 35-52.
- [12] Kreiger, E.L. (2012) *A model to describe the mode I fracture of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete*. Michigan Technological University.
- [13] Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M. (2018) *Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology*. Construction and Building Materials, **159**, 517-529.
- [14] Daneshfar, M., et al. (2017). *Evaluating Mechanical Properties of Macro-Synthetic Fiber-Reinforced Concrete with Various Types and Contents*. Strength of Materials, 1-9.
- [15] Fallah, S. and Nematzadeh, M. (2017) *Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume*. Construction and Building Materials, **132**, 170-187.
- [16] Lee, J.-H., Cho, B. and Choi, E. (2017). *Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content*. Construction and Building Materials, **138**, 222-231.
- [17] Alberti, M., Enfedaque, A. and Gálvez, J. (2017). *Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres*. Composite Structures, **171**, 317-325.

- [18] Hesami, S., Hikouei, I.S. and Emadi, S.A.A. (2016). *Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber*. Journal of Cleaner Production, **133**, 228-234.
- [19] Saidani, M., Saraireh, D. and Gerges, M. (2016). *Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture*. Engineering Structures, **113**, 328-334.
- [20] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. (2015). *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers*. Construction and building materials, **94**, 73-82.
- [21] Lee, S.-C., Oh, J.-H. and Cho, J.-Y. (2015). *Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers*. Materials, **8**(4), 1442-1458.
- [22] Karadelis, J.N. and Lin, Y. (2015). *Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete*. Construction and Building Materials, **93**, 498-505.
- [23] Hesami, S., Ahmadi, S. and Nematzadeh, M. (2014). *Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement*. Construction and Building Materials, **53**, 680-691.
- [24] Pająk, M. and Ponikiewski, T. (2013). *Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers*. Construction and Building Materials, **47**, 397-408.
- [25] Singh, S., Singh, A. and Bajaj, V. (2010). *Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres*. Asian journal of civil engineering (building and housing), **11**(4), 495-507.
- [26] Silva, F. and Thaumaturgo, C. (2003). *Fibre reinforcement and fracture response in geopolymers mortars*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **26**(2), 167-172.
- [27] American Society for Testing Materials. (2015). *Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete*. astm International. West Conshohocken. PA.
- [28] Sorelli, L.G., Meda, A. and Plizzari, G.A. (2006). *Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter*. ACI Structural Journal, **103**(4), 551.
- [29] ACI, A. (2009). *211.1-Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*.
- [30] Standard, J. (2003). *Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam*. JCI-S-001-2003. Japan Concrete Institute (JCI).