بررسی تأثیر الیاف در رفتار فشاری و کششی بتن از طریق: مطالعه‌ی تجربی، روش همبستگی تصاویر دیجیتال و روش اجزاء محدود

میلاد آرام پرتان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمید اسکندری نداف (دانشیار)

مجتبی لژی نظراکه* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

مرتضی فارونی نیک (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۲ - ۳۵، شماره ۴، ص. ۲۰-۱۱)

بهبود خواص کششی - فشاری بتن در صنعت ساخت‌وساز، اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر، با استفاده از ۷ طرح اختلاط، نمونه‌های مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف ماکروستتیک و پلیمری ساخته و بررسی شدند. آزمایش‌های فشاری یک‌محوره و شکافت (کشش برزیلی) انجام و برای هر طرح، مقادیر تنش - کرنش، بار - جابه‌جایی، جذب انرژی، الگوی ترک‌خوردگی و شکل‌پذیری بررسی شدند. همچنین تغییرات کرنش بر روی سطح نمونه‌ها با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) محاسبه شده است. در انتها، نمونه‌ها به روش اجزاء محدود (FEM) مدل‌سازی و نتایج حاصل از روش‌های مذکور با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد وجود الیاف در بتن، تأثیر به‌سزایی در کاهش اندازه و تعداد ترک، افزایش میزان جابه‌جایی در مقایسه با بتن معمولی دارد. همچنین میزان جابه‌جایی در لحظه‌ی گسیختگی در کشش و فشار برای بتن‌های الیافی بیش از نمونه‌ی معمولی بوده است. نتایج روش DIC در مقابل نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شدند که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای روش DIC برای تشخیص ترک و مود شکست و اندازه‌گیری کرنش‌های افقی است، به‌طوری که نواحی با کرنش زیاد حتی در مراحل اولیه‌ی بارگذاری نیز قابل تشخیص هستند و روند رشد ترک به راحتی مشاهده می‌شود. همچنین ترکیب نتایج روش‌های FEM و DIC درک خوبی از رفتار بتن در مراحل مختلف بارگذاری می‌دهد که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیست.

واژگان کلیدی: الیاف ماکروستتیک، الیاف پلیمری، مقاومت فشاری و کششی،

همبستگی تصاویر دیجیتال، روش اجزاء محدود.

۱. مقدمه

یکی از راهکارهای تولید بتن توانمند، اضافه کردن الیاف به بتن است که عنوان آن، بتن مسلح دارای الیاف (FRC)^۱ است. با توجه به جنس الیاف، می‌توان آن‌ها را به ۳ دسته‌ی اصلی: پلیمری، فلزی و طبیعی تقسیم کرد. بدیهی است که استفاده از هر کدام از الیاف براساس خواسته‌ی موردنیاز، محدودیت‌ها و نتایج منحصر به فردی را در بر خواهد داشت.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۲۵، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۲۹.

DOI:10.24200/J30.2018.5137.2207

در میان انواع مختلف الیاف، پلی‌پروپیلن توانسته است محبوبیت خاصی پیدا کند. مزایای الیاف پلی‌پروپیلن عبارت از مقاومت کششی بالا و شکل‌های مختلف، مقاومت در برابر محیط‌های قلیایی، استفاده‌ی راحت و هزینه‌ی پایین، تولید آسان، از لحاظ شیمیایی غیرفعال بودن، دمای ذوب بالا و آب‌گریز بودن. کاربرد اصلی الیاف پلی‌پروپیلن برای افزایش شکل‌پذیری و کاهش ترک‌ها در بتن‌ها (نظیر: جاده‌سازی و روسازی، سقف‌ها، دیوارها، تونل‌سازی و غیره) البته به همراه میلگرد به صورت ترکیبی است. در بتن حتی قبل از بارگذاری، ترک‌های ریز (میکروتک) در اثر انقباض به‌وجود می‌آیند. پس از بارگذاری، رشد میکروتک‌ها موجب تشکیل ترک‌های

milad.aram@gmail.com
hamiidiisc@yahoo.com
m.lezgy@hsu.ac.ir
gharouni@doctor.com

بزرگ و طولی (ماکروتک) می شود و ادامه ی روند ذکر شده باعث شکست بتن می شود.

الیاف با ایجاد پل در محل میکروتک های ایجاد شده از شکل گیری و گسترش آن ها جلوگیری می کند، شکل پذیری بتن را افزایش می دهد و در ضمن موجب کاهش نفوذ پذیری بتن و ورود مواد به داخل بتن می شود و خوردگی را کاهش می دهد. براساس حالت فیزیکی و شکل الیاف، آن ها قادر به تحمل نیرو فقط در جهت طولی و به صورت کشش هستند. بنابراین در حالت تئوری نباید تأثیر خاصی در مقاومت فشاری بتن داشته باشند، اما می توانند در مقاومت کششی و خمشی تأثیرگذار باشند.^[۲] حتی در مواردی گزارش شده است که تأثیر ذکر شده موجب کاهش مقاومت فشاری و کششی شده است، اما مقاومت خمشی را افزایش داده است.^[۳]

برای سنجش کرنش بتن در روش آزمایشگاهی، حسگر سنجش جابه جایی - بار استفاده می شود. این وسیله برای سنجش کرنش در راستای بار، روش قابل قبولی است؛ اما برای اندازه گیری کرنش در جهت های دیگر و کرنش های سطحی، میزان خطای آزمایشگاهی زیاد می شود. به همین منظور استفاده از روش های نوین می تواند عملکرد بهتری داشته باشد. در سال های اخیر، به استفاده از روش های رایانه ای و نرم افزاری و توسعه ی آن توجه شده است. در این میان روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC)^۲ به خوبی اثبات و تأیید شده است.^[۴]

از مزیت های روش DIC، به دست آوردن کرنش های سطحی و تغییر شکل ها در جهت های مختلف و مشاهده ی مود شکست است که اندازه گیری آن ها با روش های سنتی (حسگرهای الکتریکی) به سهولت قابل دست یابی نیست.^[۵-۷] از جمله پژوهش های انجام شده برای بررسی رفتار فشاری بتن، پژوهشی در سال ۱۹۹۷ است که با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال کرنش طولی (در راستای بارگذاری) در مقیاس میکروسکوپی اندازه گیری و با نتایج حسگر جابه جایی سنج خطی (LVDT)^۳ مقایسه و تغییر شکل های غیرهمسان در سطح بتن به صورت منحنی های تراز در مراحل مختلف بارگذاری به تصویر کشیده شده است.^[۸] همچنین کر^۴ و همکاران (۲۰۰۷)،^[۹] با استفاده از روش DIC، کرنش های سطحی برای تعیین چسبندگی بین پلیمرهای مسلح شده ی الیاف کربن (CFRP)^۵ و بتن و همچنین نحوه ی تشکیل ترک در ناحیه ی اتصال سنگ دانه و سیمان را اندازه گیری کرده اند. لاور^۶ و همکاران (۲۰۰۱)، نیز برای بررسی ترک های سطحی و درونی در فرایند شکست از دو روش غیرمخرب DIC و میکروتوموگرافی اشعه ی ایکس استفاده کردند و نشان دادند که روش DIC در تعیین عرض و محل ترک های کوچک، عملکرد بهتری دارد.^[۱۰] همچنین کادوف^۷ و وان میر (۲۰۱۰)، از روش DIC به صورت سه بعدی برای بررسی الگوی رشد ترک و جهت آن، قبل و بعد از بار نهایی برای ۳ ماده ی مختلف، شامل: بتن معمولی و پرمقاومت و سیمان فوم استفاده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده اند.^[۱۱]

نتایج مطالعات انجام شده، نشان دهنده ی دقت بالای روش DIC به عنوان یک روش غیرتماسی و غیرمخرب در بررسی روند شکست بتن و شناسایی ترک ها (حتی در مراحل اولیه ی بارگذاری) و اندازه گیری طول و دهانه ی ترک است.

روش آزمایشگاهی با تمام مزیت هایی که دارد، محدودیت های زمانی و اجرایی و هزینه یی در پی خواهد داشت که برای غلبه بر آن ها، استفاده از روش های عددی می تواند راهکار مناسبی باشد. بدین منظور با توسعه ی یک روش عددی که با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شود، می توان با تغییر متغیرهای آزمایش مثل ابعاد، شرایط بارگذاری و غیره در هزینه و زمان صرفه جویی کرد.^[۱۲-۱۸] در میان روش های عددی، روش اجزاء محدود (FEM)^۸ توانسته است مقبولیت خوبی در بین پژوهشگران به دست آورد.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان.

ترکیب شیمیایی (%)		
تیپ ۵	تیپ ۲	
۲۱٫۲۰	۲۰٫۱۹	SiO_2
۴٫۲۰	۴٫۲۷	Al_2O_3
۳٫۸۰	۳٫۸۰	Fe_2O_3
۶۴٫۶۰	۶۴٫۵۱	CaO
۱٫۹۴	۱٫۹۴	MgO
۰٫۵۷	۰٫۶۸	K_2O
۲٫۲۰	۲٫۳۹	SO_2
۶۱٫۹۴	۶۸٫۲۴	C_2S
۱۴٫۰۸	۶٫۴۳	C_1S
۴٫۷۰	۴٫۸۹	C_3A
۲۰٫۹۶	۲۱٫۳۴	$2C_2A + C_4AF$

به منظور اعتبارسنجی روش اجزاء محدود (FEM) می توان از نتایج روش DIC استفاده کرد.^[۱۹-۲۱] در همین راستا، اخیراً پژوهشی در سال ۲۰۱۷، رفتار فشاری نمونه های بتنی سبک با ترکیب دو روش FEM و DIC را بررسی کرده و در مراحل مختلف بارگذاری، نحوه ی تشکیل ترک در بتن مشخص شده است.^[۱۶] در پژوهش حاضر، به منظور درک رفتار فشاری و کششی بتن حاوی الیاف، نمونه های مختلف مکعبی با درصد های مختلف الیاف و نوع متفاوت از آن ها (ماکرو و میکرو) ساخته شدند. نمونه های ساخته شده تحت بارگذاری تک محوره ی فشاری و آزمایش شکافت قرار گرفتند. برای سنجش تغییر شکل و مود شکست و ترک ها علاوه بر روش آزمایشگاهی، همچنین روش های همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) و اجزاء محدود (FEM) استفاده و با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه، نحوه ی انجام آزمایش، خروجی، و نتایج ارائه شده است.

۲. برنامه ی آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات مصالح مصرفی

در برنامه ی آزمایشگاهی حاضر، از دو نوع سیمان پرتلند تیپ II و V محصول کارخانه ی سیمان بجنورد در دو رده ی مقاومتی ۵۲۵ و ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان ها در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند. دانه بندی سنگ دانه مورد استفاده با بیشینه ی قطر سنگ دانه ی ۹٫۵ میلی متر و مطابق با آیین نامه ی ASTM C۷۷۸-۰۶،^[۲۲] بوده است (شکل ۱). الیاف مورد استفاده از نوع الیاف تکرشته یی بر پایه ی پلی پروپیلن و چندرشته یی ماکروسنتتیک (مصنوعی فورتا) به صورت پیچیده ی در هم بوده است (شکل ۲). مشخصات الیاف مورد استفاده در جدول ۳ مشاهده می شود.

۲.۲. نحوه ی ساخت و آزمایش نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی شامل ۷ طرح اختلاط مختلف هستند که جزئیات آن ها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول ۴ و تفاوت رده ی مقاومتی سیمان های

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان بنجورد.

نوع سیمان	چگالی (kg/m^3)	سطح مخصوص (cm^2/gr)	زمان گیرش (دقیقه) اولیه نهایی	انقباض طولی (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)
تیپ ۲	۳۱۶۴	۳۴۶۷	۱۷۶	۰/۰۳	۴۹۹
تیپ ۵	۳۱۸۵	۳۷۵۰	۱۵۵	۰/۰۳	۵۴۰

جدول ۳. مشخصات الیاف. [۲۳]

مواد اولیه	چگالی (kg/m^3)	طول (mm)	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	قابلیت جذب آب
پلی پروپیلن	۹۰۰	۱۸	۳۵۰	۰/۰۲	خیر
ماکروسنتتیک	۹۱۰	۵۴	۵۷۰-۶۶۰	۰/۳۴	خیر

جدول ۴. طرح اختلاط بتن.

نام طرح	نام سیمان	W/C	سنگدانه (kg) شن ماسه	سیمان (kg)	آب (kg)	فوق روان کننده (kg)	حجم الیاف (%) پلی پروپیلن ماکروسنتتیک
NF	تیپ ۲	۰/۴	۱۵۰	۱۵۰	۳۶	۰/۲	-
F۱	تیپ ۲	۰/۴	۱۵۰	۱۵۰	۳۶	۰/۲	۰/۱
F۲	تیپ ۲	۰/۴	۱۵۰	۱۵۰	۳۶	۰/۲	۰/۱۵
NPP	تیپ ۵	۰/۵	۱۵۰	۱۵۰	۴۵	-	-
PP۱	تیپ ۵	۰/۵	۱۵۰	۱۵۰	۴۵	-	۰/۲
PP۲	تیپ ۵	۰/۵	۱۵۰	۱۵۰	۴۵	-	۰/۳
PP۳	تیپ ۵	۰/۵	۱۵۰	۱۵۰	۴۵	-	۰/۳۵

مصرفی در آزمایش، برای رسیدن به مقاومت برابر بر اساس آیین نامه ی بتن ایران (آبا)، میزان نسبت آب به سیمان به عنوان عامل تعدیل کننده در نظر گرفته شده و از دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ استفاده شده است. برای رسیدن به کارایی برابر در نمونه های الیافی، فوق روان کننده نیز اضافه شده است. در آزمایش انجام شده، برای هر طرح اختلاط نمونه های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ ساخته و به مدت ۲۸ روز در حوضچه ی آب شرب عمل آوری شده اند.

آزمایش های انجام شده در پژوهش حاضر، شامل آزمایش فشاری یک محوری و آزمایش شکافت (کشش برزیلی) برای نمونه های مکعبی مطابق با EN, ۱۲۳۹۰-۶ B. بوده است. [۲۴] کلیه ی نمونه ها توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ تن و با سرعت بارگذاری 1 mm/min برای آزمایش فشاری و 0.5 mm/min برای آزمایش شکافت آزمایش شده اند.

شکل ۱. دانه بندی مصالح مورد استفاده در ساخت بتن.

۳.۲. نتایج آزمایشگاهی

۳.۲.۱. بررسی رفتار فشاری

جهت بررسی مقاومت فشاری، نمونه های حاوی الیاف تحت آزمایش فشار قرار گرفتند. نتایج حاصل در شکل ۳ مشاهده می شود. با توجه به نمودار تنش - کرنش مربوط به آزمایش فشاری نمونه های الیافی ماکروسنتتیک (شکل ۳ب) مشاهده می شود که افزایش درصد الیاف از ۰/۱ به ۰/۱۵، باعث کاهش مقاومت فشاری شده است که برخی از پژوهشگران نیز در این زمینه به نتایج مشابهی دست یافته اند. [۲۵] نمونه ی F۱ در حالی بیشترین مقاومت را در بین نمونه های مسلح شده با الیاف ماکروسنتتیک کسب کرده است که نسبت به نمونه ی کنترل، کاهش ۲۷ درصدی داشته

(الف) پلی پروپیلن؛ (ب) ماکروسنتتیک.

شکل ۲. الیاف استفاده شده.

شکل ۳. نمودار تنش - کرنش فشاری نمونه‌های مسلح شده با الیاف.

شکل ۴. نمودار بار - جابه‌جایی (در راستای بار) نمونه‌های کششی مسلح شده با الیاف.

حجمی الیاف ماکروستتیک می‌تواند موجب بهبود مقاومت کششی بتن به میزان ۱۵٪ شود.^[۲۷] اما نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد مقدار الیاف مصرفی، تأثیر زیادی در افزایش یا کاهش مقاومت کششی دارد.

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی نتایج نزدیک‌تری به نمونه‌ی کنترل (NPP) را نشان می‌دهد (شکل ۴ ب)، به‌طوری‌که در طرح PP۱، بیشترین مقدار نیروی کششی در بین نمونه‌های الیافی مشاهده می‌شود. افزایش مقدار الیاف در ساخت نمونه‌ها، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که طرح PP۲، کمترین نیروی تحمل شده را دارد و بیشترین جابه‌جایی در کل نمونه‌هاست. از طرفی، افزایش بیشتر الیاف (طرح PP۳)، باعث افزایش نیروی تحمل و کاهش شکل‌پذیری شده است.

در روند آزمایش مشاهده شد که نمونه‌های ساده بلافاصله پس از ترک‌خوردگی دچار گسیختگی شده‌اند، در حالی که نمونه‌های مسلح شده با الیاف شکل خود را حفظ کرده‌اند که نشان‌دهنده‌ی توانایی بتن‌های مسلح شده با الیاف در جذب انرژی پس از ترک‌خوردگی است که نتایج مشابهی در این زمینه توسط برخی پژوهشگران،^[۲۷] صورت گرفته است.

۳.۳.۲. تأثیر درصد الیاف در پارامترهای مختلف

در شکل ۵، تأثیر درصد الیاف در مقاومت فشاری، کرنش در بیشینه‌ی تنش فشاری، مدول کشسانی (به دست آمده از قسمت خطی نمودار تنش - کرنش^[۱۶])، چگالی، بیشینه‌ی نیروی کششی و جابه‌جایی در بیشینه‌ی نیروی کششی مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری از الگوی یکسانی پیروی نمی‌کند، به‌گونه‌ای که با افزایش درصد الیاف ماکروستتیک، کاهش مقاومت مشاهده می‌شود؛ ولی در خصوص الیاف پلی‌پروپیلن، افزایش مقدار الیاف باعث افزایش مقاومت شده است. نمونه‌های مسلح شده با الیاف ماکروستتیک، مدول کشسانی بالاتری نسبت به نمونه‌های پلی‌پروپیلن دارند. بیشترین

است. با مقایسه‌ی نمودارهای نمونه‌های الیافی و نمونه‌ی کنترل مشاهده می‌شود که شیب منحنی در قبل از نقطه‌ی اوج، تقریباً برابر است؛ اما بعد از نقطه‌ی اوج، شیب منحنی برای نمونه‌های الیافی (ماکروستتیک) به‌طور محسوسی کاهش یافته است که نشان‌دهنده‌ی نقش الیاف در کنترل ترک است. از ترک خوردن و در خصوص نمونه‌های مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن شرایط کمی متفاوت‌تر است.

بررسی نمودار تنش - کرنش فشاری نمونه‌های مذکور (شکل ۳ الف)، نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت فشاری در اثر افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش الیاف از ۰٫۲٪ به ۰٫۳٪ و ۰٫۳۵٪ موجب افزایش مقاومت شده است، به‌گونه‌ای که نمونه‌ی PP۳ بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های مسلح شده به الیاف پلی‌پروپیلن کسب کرده است. از طرفی نمونه‌ی PP۳ نسبت به نمونه‌ی کنترل، کاهش مقاومت ۱۲٫۵ درصدی داشته است. به‌طور کلی استفاده از الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی شده است، همچنین در پژوهش سال ۲۰۰۵ به نتایج مشابهی در این زمینه رسیده‌اند.^[۲۶]

۲.۳.۲. بررسی رفتار کششی

نتایج آزمایش شکافت برای تمامی نمونه‌ها را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. نتایج حاصل از آزمایش شکافت بر روی نمونه‌های حاوی الیاف ماکروستتیک در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود. هم‌پوشانی نمودار طرح F۱ با نمودار NF، نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری برابر و مقاومت کمتر نمونه‌ی الیافی ماکروستتیک است. با توجه به نمودار، افزایش مقدار الیاف از ۰٫۱٪ به ۰٫۱۵٪ درصد باعث کاهش شکل‌پذیری شده است. از طرفی، نمونه‌ی F۲ پس از تحمل بیشینه‌ی بار دچار شکست نرم شده است که نشان‌دهنده‌ی کنترل ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها توسط الیاف ماکروستتیک است. نمونه‌ی F۱ با ۰٫۱٪ الیاف، مقاومت کششی و شکل‌پذیری بالاتری دارد؛ ولی رفتار نمونه در پساترک، نشان‌دهنده‌ی شکست ناگهانی آن است. در پژوهشی که در این زمینه انجام شده، نشان داده شده است که افزودن ۰٫۳۳٪ تا ۰٫۵۱٪ درصد

شکل ۵. تأثیر درصد حجمی الیاف در خواص مکانیکی.

کشش افزایش داشته‌اند. در مورد الیاف پلی پروپیلن با اینکه افزودن الیاف موجب کاهش مقاومت فشاری، مدول کشسانی، نیروی کششی و چگالی شده است، ولی با افزایش درصد الیاف، اختلاف مذکور کاهش یافته و در مقابل، کرنش فشاری و جابه‌جایی بیشینه در کشش افزایش داشته‌اند.

۴.۳.۲. ارزیابی میزان جذب انرژی

میزان جذب انرژی معادل سطح زیر منحنی بار- جابه‌جایی است.^[۲۸] برای محاسبه انرژی جذب شده، سطح زیر منحنی بار- جابه‌جایی تا نقطه‌ای اوج منحنی محاسبه شده است.^[۲۹] شکل ۱۶ الف، مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه‌های مسلح شده با الیاف ماکروسنتتیک تحت فشار را نمایش می‌دهد. با توجه به نمودارهای مذکور، استفاده از الیاف ماکروسنتتیک در ساخت نمونه‌های مکعبی باعث کاهش جذب انرژی نسبت به نمونه‌ی کنترل شده است. البته افزایش استفاده از الیاف ماکروسنتتیک منجر به افزایش جذب انرژی می‌شود، اما همچنان این مقدار با اختلاف زیادی، کمتر از نمونه‌ی کنترل است. در این گروه، طرح F₂ بالاترین مقدار جذب انرژی را دارد. با توجه به روند افزایشی مقاومت فشاری در نمونه‌های مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن انتظار می‌رود این روند در رابطه با جذب انرژی نیز حاکم باشد. پس از محاسبه مساحت سطح زیر منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی، نتایج حاصل در شکل ۱۶ ب نمایش داده شده است. بیشترین جذب انرژی متعلق به طرح (PP₃) بیشترین مقدار الیاف) است که اختلاف کمی با نمونه‌ی کنترل دارد. به‌طور کلی استفاده از الیاف پلیمری، تأثیر مثبتی در میزان جذب انرژی در فشار داشته است. تأثیر الیاف ماکروسنتتیک در میزان جذب انرژی نمونه‌های مکعبی تحت آزمایش شکافت در شکل ۱۶ ج نمایش داده شده است. مقدار بیشینه‌ی انرژی جذب شده مربوط به طرح F₂ و کمترین مقدار مربوط به طرح F₁ است. مقدار انرژی جذب شده در نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن تحت آزمایش شکافت، در شکل ۱۶ د

مقدار مدول کشسانی متعلق به نمونه دارای ۰/۱٪ الیاف ماکروسنتتیک است که با افزایش درصد الیاف دچار کاهش شده است، ولی همچنان مدول کشسانی بیشتری را نسبت به نمونه‌های مسلح شده با پلی پروپیلن نشان می‌دهد.

در اثر افزایش مقدار الیاف پلی پروپیلن، مدول کشسانی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار کرنش رسم شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که افزایش ۰/۵ درصدی الیاف ماکروسنتتیک تأثیر بسیار کمی در کرنش داشته است. تغییرات کرنش در قبال افزایش الیاف پلی پروپیلن الگوی منظمی ندارد، به‌گونه‌ای که نمونه‌ی حاوی ۰/۳٪ از الیاف، بیشترین کرنش را در نقطه‌ی تنش بیشینه نشان می‌دهد. رفتار نمونه در تحمل نیروی کششی برای الیاف ماکروسنتتیک و پلی پروپیلن متفاوت است. با افزایش درصد الیاف ماکروسنتتیک، کاهش نیروی کششی تحمل شده مشاهده می‌شود؛ در حالی که برای الیاف پلی پروپیلن، افزایش الیاف روندی نزولی و سپس صعودی مشاهده می‌شود، به‌طوری که افزایش الیاف از ۰/۳ به ۰/۳۵ درصد باعث افزایش نیروی کششی شده است.

بیشترین نیروی کششی تحمل شده مربوط به نمونه‌ی حاوی ۰/۳۵ الیاف پلی پروپیلن است. چگالی نمونه‌های الیافی با افزایش درصد الیاف، کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل وزن کم الیاف و یا حفره‌هایی باشد که در نمونه‌های الیافی ایجاد می‌شوند. با بررسی جابه‌جایی در بیشینه‌ی نیروی کششی مشاهده شد که افزایش درصد الیاف ماکروسنتتیک باعث کاهش جابه‌جایی شده است. در نمونه‌های پلی پروپیلن، بیشترین جابه‌جایی متعلق به نمونه‌ی حاوی ۰/۳٪ است. افزایش یا کاهش الیاف از درصد ذکر شده‌ی اخیر باعث کاهش ۵۰ درصدی جابه‌جایی می‌شود.

در بررسی نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف ماکروسنتتیک، مقاومت فشاری، کرنش در بیشینه‌ی تنش فشاری، چگالی، بیشینه‌ی نیروی کششی نسبت به نمونه‌ی کنترل کاهش دارند، ولی مدول کشسانی و جابه‌جایی بیشینه در

(J) انرژی جذب شده

(ب) پلی پروپیلن در آزمایش رفتاری و نمونه های مسلح شده با الیاف.

(I) انرژی جذب شده

(الف) ماکروستتیک؛

(J) انرژی جذب شده

(د) پلی پروپیلن در آزمایش شکافت.

(J) انرژی جذب شده

(ج) ماکروستتیک؛

شکل ۶. میزان انرژی جذب شده ی نمونه های مسلح شده با الیاف.

NF

F1

F2

NPP

PP1

PP2

PP3

شکل ۷. الگوی ترک خوردگی در نمونه های فشاری.

بیشترین مقدار الیاف)، ترک ها در محدوده ی میانی اتفاق افتاده اند که شامل دو ترک با طولی معادل ارتفاع نمونه و تعدادی ترک کوتاه تر با طولی معادل نصف ارتفاع نمونه هستند. بازشدگی کلیه ی ترک ها در کمترین مقدار خود در مقایسه با دیگر نمونه ها بوده است و الیاف توانایی کنترل ترک خوردگی را داشته اند.^[۳۰] همچنین استفاده از مقدار مناسب الیاف، تأثیر مثبتی در شروع اولین ترک و جلوگیری از وقوع ماتریس های ناگهانی ترک خوردگی دارد. عرض و فاصله ی بین ترک ها پس از شکست، کاهش پیدا کرده اند.

۳. همبستگی تصاویر دیجیتال

روش DIC به عنوان یک روش عمومی غیرتداخل سنجی می تواند تغییر شکل ها و کرنش های تمام میدانی را با مقایسه ی شدت نور پیکسل های تصاویر قبل و بعد از

نمایش داده شده است. نمونه ی کنترل، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. افزایش میزان الیاف در ساخت نمونه ها، باعث افزایش کاهش انرژی نسبت به نمونه ی کنترل شده است.

۵.۳.۲. بررسی الگوی ترک خوردگی

الگوی ترک خوردگی در نمونه های کنترل و مسلح شده با الیاف در شکل ۷ مشاهده می شود. نمونه ی NF پس از بارگذاری دچار ترک خوردگی در طرفین نمونه شده است که ترک ها از نوع عمیق با بازشدگی زیاد هستند و در تمامی ارتفاع نمونه ادامه پیدا کرده اند.

در نمونه ی F1، گستردگی ترک ها در کل سطح نمونه مشاهده می شود که این امر باعث کاهش طول، عمق و بازشدگی دهانه ی ترک ها شده است. ترک های اخیر به صورت مویرگی رشد کرده و تا نصف ارتفاع نمونه، پیشروی کرده اند. محدوده ی وقوع ترک در نمونه ی F2 ارتباط نزدیکی با نمونه ی NF دارد، ولی از نظر بازشدگی دهانه و عمق ترک، مقادیر کمتری مشاهده می شود. همچنین تعداد ترک ها بیشتر شده است.

نمونه ی NPP که فاقد الیاف است، در طرفین دچار ترک خوردگی شده است. گستره ی ترک در محدوده ی ۵٪ طول نمونه از طرفین است. همچنین ترک در کل ارتفاع نمونه ادامه پیدا کرده است (طول ۱۵۰ میلی متر). میزان بازشدگی و عمق ترک ها نیز در شکل مشهود است. در نمونه ی PP1 (دارای پایین ترین مقدار الیاف)، وقوع دو ترک نسبتاً عمیق در محدوده ی ۵٪ از طرفین به همراه تعدادی ترک با طول و بازشدگی کم مشاهده می شود، که ترک های طولی در محدوده ی ۹۰٪ ارتفاع نمونه پیشروی کرده اند. در نمونه ی PP2، تعداد ترک ها به مراتب افزایش و عمق و بازشدگی آن ها کاهش پیدا کرده است. طول ترک ها متغیر است، که بلندترین آن به ۸۰٪ ارتفاع نمونه می رسد.

محدوده ی ترک خوردگی شامل کل سطح نمونه است. در طرح (PP3) دارای

سمت چپ نمونه، محل وقوع ترک تشخیص داده می‌شود. این موضوع در شکل ۹ قسمت ۷ قابل تشخیص است که در واقع محل شروع اولین ترک است. با افزایش بار به مقدار بیشینه خود، که منجر به ایجاد ترک در نمونه می‌شود، تغییر طیف‌ها و تمرکز آن‌ها در اطراف محل ترک خوردگی، به‌خوبی محدوده و شکل ترک را نشان می‌دهد.

۴. بررسی رفتار بتن با استفاده از روش اجزاء محدود

۱.۴. معرفی مدل اجزاء محدود

در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار آباکوس جهت بررسی رفتار فشاری نمونه‌های فشاری و کششی به روش اجزاء محدود استفاده شده است. جهت مدل‌سازی اجزاء محدود، به دلیل رفتار سه بعدی آن المان سالیید از نوع C3D8R که المانی پیوسته، سه بعدی، ۸ گره‌یی با انتگرال کاهش یافته و با ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره است، استفاده شده است. المان مذکور قابلیت ترک خوردن در کشش و فشار را دارد و المانی مناسب برای بتن است و برای الگوی رفتاری آسیب‌دیدگی خمیری استفاده شده است. مقادیر مدول کشسانی بین ۱۰ تا ۲۷ گیگاپاسکال و همچنین میزان چگالی برابر ۲۱۷۰-۲۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون، زاویه‌ی اتساع و ویسکوزیته به ترتیب برابر ۰/۱۸، ۰/۵ و ۰ در نظر گرفته شده است. برای نمونه‌های فشاری، قسمت تحتانی مدل با شرایط مرزی محدود و جابه‌جایی یکنواختی متناسب با نتایج آزمایشگاهی بر قسمت فوقانی اعمال شده است. تمامی مدل‌ها با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی مبنی بر حل گر نیوتن بررسی شده‌اند.

۲.۴. مقایسه‌ی نتایج روش‌های FEM با DIC و آزمایشگاه

مدل‌سازی در محیط نرم‌افزاری، با توجه به وجود محدودیت‌ها در اعمال شرایط واقعی بارگذاری، ممکن است به نتایجی غیرهمسو با نتایج آزمایشگاهی منجر شود، در نتیجه مدل‌سازی روش FEM با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال و نمودار تنش - کرنش بررسی شده است که نتایج حاصل در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه نتایج تحلیل روش DIC تا لحظه‌ی شکست نمونه قابل استفاده است (خرابی سطح نمونه)، برای بررسی صحت‌سنجی نتایج روش FEM، به قسمت خطی نمودار تنش - کرنش (نیرو - جابه‌جایی) تا لحظه‌ی شکست اکتفا شده است. شکل (۱۰ الف و ب)، به ترتیب مربوط به نمونه‌ی فشاری F1 و نمونه‌ی کششی F2 است. نتایج حاصل از هر ۳ روش با اختلاف قابل قبولی که ناشی از اختلاف دقت دستگاه‌های مورد استفاده است، یکدیگر را تأیید می‌کنند. در ابتدای بارگذاری، قسمت هم‌پوشانی مقدار بیشینه‌ی خود را دارد و با افزایش بار، شیب نمودار حاصل از روش FEM کاهش پیدا کرده است.

با توجه به محدودیت انتخاب تصاویر جهت پردازش در روش همبستگی تصاویر دیجیتال، نمودار کرنش ترسیم شده در نقطه‌ی اوج متوقف شده است (تصاویر انتخابی در بازه‌ی شروع بارگذاری تا بیشینه‌ی بار تحمل شده هستند). با توجه به پارامترهای تأثیرگذار در روش DIC، شامل: نورپردازی، تخلخل سطح نمونه، فاصله و زاویه‌ی دوربین می‌توان نتایج حاصل از ۳ روش را تأییدکننده‌ی یکدیگر دانست. در نتیجه، این مدل می‌تواند برای دیگر نمونه‌های الیافی گسترش یابد. با توجه به تطبیق نتایج،

شکل ۸. سیستم تصویربرداری و نورپردازی در روش همبستگی تصاویر دیجیتال.

تغییر شکل فراهم کند. برای به‌دست آوردن جابه‌جایی و کرنش‌ها، یک نقطه انطباقی بین دو تصویر انتخاب و تغییرات آن بررسی می‌شود با توجه به اینکه نمی‌توان از یک پیکسل به‌عنوان نقطه‌ی انطباقی استفاده کرد، از یک ناحیه‌ی چند پیکسلی که توزیع منحصر به فردی از شدت نور دارد، با عنوان زیرمجموعه^۹ استفاده می‌شود. با جست‌وجو برای زیرمجموعه‌ی مشابه در تصاویر بعد از تغییر شکل، جابه‌جایی‌ها قابل محاسبه خواهند بود.

در آزمایش حاضر از یک دوربین دیجیتال با رزولوشن 1920×1080 پیکسل^{۱۰} برای ثبت تصاویر استفاده شده است. به‌منظور کاهش خطا، یک پایه‌ی نگه‌دارنده برای ثابت نگه داشتن دستگاه و جلوگیری از لرزش آن در حین عملیات و همچنین یک دستگاه نورافکن (منبع نور) به‌کار رفته است.^[۱۱] با توجه به سرعت بارگذاری، تصویربرداری از نمونه در بازه‌ی زمانی بار صفر تا نقطه‌ی شکست نمونه به‌صورت ثبت ۶ عکس در دقیقه بوده است. برای پردازش تصاویر از نرم‌افزار VIC۲D استفاده شده است. شکل ۸، سیستم تصویربرداری و نحوه‌ی نورپردازی را نشان می‌دهد. در روش DIC، جابه‌جایی‌های به‌دست آمده بر حسب واحد پیکسل هستند بنابراین برای تبدیل واحد مقادیر اندازه‌گیری شده نیاز به تنظیم نرم‌افزار (کالیبره) است. روش تنظیم نرم‌افزار به این صورت است که با مشخص کردن طول یک پاره‌خط از تصویر و وارد کردن طول حقیقی آن بر حسب واحد دلخواه می‌توان میزان جابه‌جایی‌ها را براساس واحد معرفی شده به‌دست آورد. بعد از اتمام فرایند جست‌وجو و تطبیق زیرمجموعه‌های مشخص شده در تصاویر مرجع و تصاویر تغییر شکل یافته، میزان جابه‌جایی برای هر زیرمجموعه و به طبع آن کل پیکسل‌های تصویر محاسبه شدند که به‌صورت گراف‌های رنگی قابل نمایش بودند.

۱.۳. بررسی کرنش افقی با استفاده از روش DIC

جهت بررسی بهتر نتایج حاصل از روش DIC در نمونه‌های فشاری، موقعیت عکس‌های ورودی به نرم‌افزار، بر روی نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل ۹ نشان داده شده است. پس از تحلیل تصاویر مشخص شده و تعیین جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های سطحی نسبت به تصویر مرجع، نتایج خروجی از نرم‌افزار به‌صورت طیف‌های رنگی، مقادیر کرنش را در هر تصویر نشان می‌دهند. روند تغییرات طیف‌های رنگی در تصاویر انتخابی نشان می‌دهد که در ابتدا بیشترین جابه‌جایی مربوط به پُ سمت چپ نمونه بوده و در ادامه به قسمت‌های میانی و پُ سمت راست منتقل شده است (شکل ۹ قسمت ۱ الی ۳). با ادامه‌ی بارگذاری، افزایش جابه‌جایی در هر ۳ منطقه در حال اتفاق افتادن بوده است. طیف‌های قرمز و نارنجی و زرد این مسئله را به‌خوبی نمایش می‌دهند (شکل ۹ قسمت ۳ الی ۵)، در نهایت در پُ

شکل ۹. بررسی کرنش افقی در نمونه‌های مکعبی فشاری مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن (طرح PP۳).

الف) آزمایش فشاری نمونه F۱

ب) آزمایش شکافت نمونه F۲

شکل ۱۰. اعتبارسنجی مدل‌سازی اجزاء محدود با استفاده از روش DIC و نتایج تجربی.

خطاها در پارامترهای ε_{xx} و U بیشترین و در پارامتر V ، کمترین مقدار خود را دارند که می‌تواند متأثر از کمتر بودن پارامترهای عرضی نسبت به طولی باشد. شرایط نامطلوب بارگذاری می‌تواند از عوامل مؤثر بروز خطا در روش DIC باشد. با ادامه‌ی بارگذاری، امکان جدا شدن قشر رویه‌ی نمونه وجود دارد که در این صورت بررسی همبستگی تصاویر به دلیل حذف تصاویر مبنا دچار مشکل می‌شود. در نمونه‌ی انتخابی، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از روش‌های DIC و FEM مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی همبستگی مناسب دو روش مذکور است، همچنین این موضوع در دیگر نمونه‌ها نیز صادق است، در نتیجه می‌توان جهت بررسی اعتبارسنجی مدل‌سازی روش FEM از روش DIC استفاده کرد. با وجود مطابقت‌های موجود، اختلاف‌هایی در گراف‌های ترسیمی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط بارگذاری، تغییر

استفاده‌ی همزمان از دو روش FEM و DIC، راهکاری سریع و مقرون به صرفه جهت تحلیل کرنش‌های سطحی نمونه است.

۳.۴. مقایسه‌ی نتایج روش‌های اجزاء محدود و DIC

با توجه به انجام اعتبارسنجی و تأیید آن، گراف‌های خروجی مرتبط با پارامترهای ε_{xx} (کرنش افقی)، U (جاب‌جایی افقی) و V (جاب‌جایی قائم) با استفاده از دو روش FEM و همبستگی تصاویر دیجیتال در شکل ۱۱ بررسی شده است. جهت مقایسه‌ی بهتر، گراف‌ها در مقادیر بار نهایی ترسیم شده‌اند. تأثیرپذیری مستقیم روش DIC از شکل ظاهری نمونه، باعث بروز خطای تخریب سطح روی نمونه می‌شود. این

شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج اجزاء محدود و همبستگی تصاویر دیجیتال برای نمونه‌های فشاری F۱.

شد و نتایج نشان داد که الیاف در مقاومت فشاری تأثیر خنثی و حتی منفی دارند و در صورتی که از مقدار بهینه برای الیاف استفاده نشود، می‌تواند موجب کاهش چشم‌گیری در مقاومت فشاری شود.

۲. وجود الیاف در بتن باعث افزایش کرنش نهایی در فشار و کشش می‌شود. همچنین موجب جایگزینی ترک‌های بلند و عمیق با ترک‌های ریز و تعداد بیشتر می‌شوند.

۳. در آزمایش شکافت، پس از تحمل بیشترین بار، نمونه‌های حاوی الیاف ماکروسنتتیک گسیخته نشدند و شکل اولیه‌ی نمونه کاملاً حفظ شده است که نشانگر پیوستگی بسیار خوب نمونه‌هاست.

۴. نتایج روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) بررسی و در مقابل نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شدند که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای روش DIC برای تشخیص ترک و مود شکست است. ترکیب نتایج روش‌های FEM و DIC، درک خوبی از رفتار بتن در مراحل مختلف بارگذاری می‌دهد که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیست.

نور و ایجاد سایه‌ها بر روی شکل باشد. همچنین امکان بروز خطا در روش FEM به دلیل عدم امکان شبیه‌سازی کامل شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری قابل توجه است. [۴۱]

۵. نتیجه‌گیری

نمونه‌های مکعبی با درصد‌های مختلفی از الیاف ماکروسنتتیک و پلی‌پروپیلن ساخته شدند و تحت آزمایش‌های فشاری یک محوره و شکافت قرار گرفتند. نتایج حاصل در قالب نمودارهای تنش - کرنش و نیرو - جابه‌جایی ترسیم و تأثیرگذاری الیاف در پارامترهای مختلف بررسی شدند، همچنین از روش‌های DIC و FEM جهت تحلیل و مدل‌سازی نمونه‌ها استفاده شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. این ایده که الیاف می‌توانند باعث افزایش مقاومت فشاری در بتن شوند، بررسی

پانویس‌ها

1. fiber reinforced concrete
2. digital image correlation
3. linear variable displacement transformer (LVDT)
4. Corr
5. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP)
6. Lawler
7. Caduff
8. finite element method (FEM)
9. subset
10. pixel

منابع (References)

1. Brandt, A.M. "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering", *Composite Structures*, **86**(1), pp. 3-9 (2008).
2. Sivakumar, A. and Santhanam, M. "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres", *Cement and Concrete Composites*, **29**(8), pp. 603-608 (2007).
3. Richardson, A.E. "Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions", *Structural Survey*,

- 24(2), pp. 138-153 (2006).
4. Yao, W. and Zhong, W. "Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, **22**(1), pp. 52-55 (2007).
5. Pan, B. "Recent progress in digital image correlation", *Experimental Mechanics*, **51**(7), pp. 1223-1235 (2011).
6. Anzelotti, G., Nicoletto, G. and Riva, E. "Mesomechanic strain analysis of twill-weave composite lamina under unidirectional in-plane tension", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39**(8), pp. 1294-1301 (2008).
7. Bing, P., Hui-min, X. and Fu-long, D. "Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation", *Measurement Science and Technology*, **17**(6), 1615 (2006).
8. Bornert, M., Bremand, F., Doumalin, p. and et al. "Assessment of digital image correlation measurement errors: Methodology and results", *Experimental Mechanics*, **49**(3), pp. 353-370 (2009).
9. Bruck, H., McNeill, S.R., Sutton, M.A. and et al. "Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction", *Experimental Mechanics*, **29**(3), pp. 261-267 (1989).
10. Chu, T., Ranson, W. and Sutton, M. "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics", *Experimental Mechanics*, **25**(3), pp. 232-244 (1985).
11. Choi, S. and Shah, S. "Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation", *Experimental Mechanics*, **37**(3), pp. 307-313 (1997).
12. Corr, D., Accardi, M., Graham-Brady, L. and et al. "Digital image correlation analysis of interfacial debonding properties and fracture behavior in concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, **74**(1), pp. 109-121 (2007).
13. Lawler, J.S., Keane, D.T. and Shah, S.P. "Measuring three-dimensional damage in concrete under compression", *Materials Journal*, **98**(6), pp. 465-475 (2001).
14. Caduff, D. and Van Mier, J.G. "Analysis of compressive fracture of three different concretes by means of 3D-digital image correlation and vacuum impregnation", *Cement and Concrete Composites*, **32**(4), pp. 281-290 (2010).
15. Eskandari, H. and Madadi, A. "Investigation of ferrocement channels using experimental and finite element analysis", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **18**(4), pp. 769-775 (2015).
16. Madadi, A., Eskandari-Naddaf, H. and Gharouni-Nik, M. "Lightweight ferrocement matrix compressive behavior: Experiments versus finite element analysis", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **42**(9), pp. 4001-4013 (2017).
17. Jin, C., Buratti, N., Stacchini, M. and et al. "Lattice discrete particle modeling of fiber reinforced concrete: Experiments and simulations", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, **57**, pp. 85-107 (2016).
18. Shahbazi, S. and Rasoolan, I. "Meso-scale finite element modeling of non-homogeneous three-phase concrete", *Case Studies in Construction Materials*, **6**, pp. 29-42 (2017).
19. Nicoletto, G., Anzelotti, G. and Riva, E. "Mesoscopic strain fields in woven composites: Experiments vs. finite element modeling", *Optics and Lasers in Engineering*, **47**(3), pp. 352-359 (2009).
20. He, Y., Makeev, A. and Shonkwiler, B. "Characterization of nonlinear shear properties for composite materials using digital image correlation and finite element analysis", *Composites Science and Technology*, **73**, pp. 64-71 (2012).
21. Pop, O., Meite, M., Dubois, F. and et al. "Identification algorithm for fracture parameters by combining DIC and FEM approaches", *International Journal of Fracture*, **170**(2), pp. 101-114 (2011).
22. ASTM, C. 778-06, "Standard specification for standard sand", In American Society for Testing and Materials (2006).
23. Arafa, M., Alqedra, M. and Almassri, H. "Effect of forta-ferro fibers on fresh and mechanical properties of ultra high performance self compacting concrete", *Int. J. Eng. Tech. Res.*, **1**(7), pp. 43-47 (2013).
24. BS EN 12390-6 (2000), "Testing hardened concrete: Tensile splitting strength of test specimens", British Standard Institution, London (2009).
25. Hasan-Nattaj, F. and Nematzadeh, M. "The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica", *Construction and Building Materials*, **137**, pp. 557-572 (2017).
26. Choi, Y. and Yuan, R.L. "Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRP and PFRC", *Cement and Concrete Research*, **35**(8), pp. 1587-1591 (2005).
27. Hasan, M., Afroz, M. and Mahmud, H. "An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, **11**(3), pp. 18-23 (2011).
28. Mehta, P.K. "Concrete: Structure, properties and materials", Prentice - Hall (1986).
29. Graham, R.K., Huang, B., Shu, X. and et al. "Laboratory evaluation of tensile strength and energy absorbing properties of cement mortar reinforced with micro and meso-sized carbon fibers", *Construction and Building Materials*, **44**, pp. 751-756 (2013).
30. Beeby, A. "The prediction of crack widths in hardened concrete", *The Structural Engineer*, **57**(1), pp. 9-17 (1979).
31. Iadicola, M. and Banerjee, D. "A comparison of strain calculation using digital image correlation and finite element software", *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing (2016).