

اثر هندسه‌ی مقطع نمونه در مقاومت فشاری بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل

ایمان عباسی نتاج عمرانی (کارشناس ارشد)

عزیزاله اردشیر بهرستاقی* (استادیار)

سید علی سعیدیان (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - ۳۷، شماره ۲/۴، ص. ۱۱۳-۱۲۰، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، اثر هندسه‌ی مقطع نمونه در مقاومت فشاری بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل بررسی شده است. بدین منظور سه طرح اختلاط مربوط به بتن‌های خودتراکم مسلح به درصد‌های مختلف از الیاف پلی‌وینیل الکل، در ابعاد متفاوت از قالب‌هایی با شکل‌های استوانه‌یی و مکعبی طراحی شده‌اند. تأثیر اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل در ویژگی‌های تازه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خودتراکم بررسی و رابطه‌ی میان مقاومت فشاری قالب‌های استوانه‌یی و مکعبی به صورت توابع خطی ارائه شده است. همچنین از رابطه‌ی بازانته به منظور تعیین شدت اثر اندازه استفاده شده و ضرایب مجهول این رابطه با استفاده از رگرسیون غیرخطی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. اضافه شدن ۰/۸٪ حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، مؤلفه‌ی اندازه‌ی انتقالی رابطه‌ی بازانته (D_0) را برای نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی به ترتیب به میزان‌های ۱۷۰/۳۹ و ۱۰۵/۸۶ درصد افزایش داده است، که نشان از تأثیر چشم‌گیر الیاف پلی‌وینیل الکل در کاهش شدت اثر اندازه در بتن خودتراکم دارد.

واژگان کلیدی: اثر شکل نمونه، بتن خودتراکم، الیاف پلی‌وینیل الکل، اثر اندازه‌ی نمونه، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

همواره پژوهش‌گران و طراحان به مقاومت فشاری به‌عنوان یکی از محوری‌ترین ویژگی‌های مکانیکی بتن توجه داشته‌اند. مقاومت فشاری فقط تابع طرح اختلاط و مؤلفه‌های درونی بتن نیست و به عوامل متعدد دیگر، نظیر اندازه و هندسه‌ی مقطع نمونه نیز وابسته است. پدیده‌ی مذکور که به عنوان اثر شکل و اندازه شناخته می‌شود، برآمده از ماهیت غیرهمگن بتن است. بتن، فرآورده‌ی برهم‌کنش المان‌های متعددی، نظیر: سنگ‌دانه‌ها، آب، افزودنی‌های شیمیایی و غیره است، که به وسیله‌ی ملات سیمانی به یکدیگر پیوند خورده‌اند. ریزترک‌های موجود در ساختار ملات سیمانی سخت شده و حفره‌های مابین سنگ‌دانه‌ها و ملات سیمانی موجب می‌شود تا بتن رفتاری ترد و شکننده داشته باشد و خصایص ذکر شده، نقاط ضعف اصلی محصول‌های بتنی هستند.

رفتار غیرخطی بتن در محدوده‌ی درونی، با عنوان محدوده‌ی شکل‌گیری شکست موجب می‌شود تا مشخصات مکانیکی بتن تحت تأثیر اندازه و شکل نمونه قرار گیرد. محدوده‌ی مذکور غالباً در اوج تنش، در درون ساختار بتن توسعه می‌یابد.^[۱] لذا میزان مقاومت محاسبه شده در محیط‌های آزمایشگاهی، غالباً با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۲/۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۱۳

DOI:10.24200/G30.2021.58023.2950

میزان حقیقی مقاومت در محیط‌های کاربردی و بیرونی تفاوت دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت موجود میان شکل و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی و المان‌های سازه‌یی باشد. بنابراین پُر کردن خلاء موجود و دست‌یابی به رابطه‌یی جهت تبدیل مقاومت یک شکل به شکلی دیگر، از دغدغه‌های شایان توجه در زمینه‌ی طراحی است.

کشورهای مختلف بنا بر شرایط ویژه‌ی خود، هندسه‌های متفاوتی را به‌عنوان نمونه‌ی استاندارد آزمایشگاهی برشمرده‌اند. نمونه‌ی استوانه‌یی (۱۵۰ × ۳۰۰) در کشورهای نظیر آمریکا و کانادا به‌عنوان مرجع شناخته می‌شود، حال آنکه آلمان، بریتانیا و غالب کشورهای اروپایی از نمونه‌ی مکعبی (۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰) با عنوان نمونه‌ی استاندارد آزمایشگاهی بهره می‌جویند.^[۲] از طرفی هندسه‌ی مقطع ستون‌ها غالباً به فرم مربع است، لذا حصول رابطه‌یی عددی جهت تبدیل مقاومت نمونه‌های استوانه‌یی آزمایشگاهی به نمونه‌هایی با مقطع مربعی، مزیتی کاربردی خواهد داشت.

واکاوی اثر شکل و اندازه‌ی نمونه در رفتار بتن موضوع برخی از پژوهش‌ها در سال‌های اخیر بوده است. فلادر^[۱] و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲] با ساخت اندازه‌های متفاوت از نمونه‌های مکعبی و تیرها، اثر اندازه را در مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های مقاومت بالای مسلح به الیاف بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج گزارش شده در پژوهش

اخیر، طرح اختلاط بتن، اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های موجود در بتن و حدود مقاومت بتن، از جمله عوامل تأثیرگذار در میزان شدت اثر اندازه در نمونه‌های بتنی هستند. به‌عنوان مثال، اثر اندازه در بتن‌های مقاومت بالای دارای سنگ‌دانه‌های نسبتاً ریز و کوچک، به علت همبستگی بالای ساختار در بتن‌های مقاومت بالا، پایین ارزیابی شده است. وو^۲ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۵] با ساخت اندازه‌های مختلف از نمونه‌های استوانه‌یی، مکعبی و تیرمانند، اثر شکل نمونه را در مقاومت فشاری بتن‌های حاوی تکه بتن‌های منهدم شده بررسی کردند. بر مبنای نتایج گزارش شده، نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌یی ۱/۳ و نسبت مقاومت تیرهای ساخته شده به نمونه‌های استوانه‌یی، ۱/۰۸ ارزیابی و مدل‌های عددی به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری شکل‌های مذکور ارائه شده‌اند. لی^۳ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۶] با استفاده از قالب‌های استوانه‌یی و مکعبی، اثر شکل و اندازه‌ی نمونه را در مقاومت فشاری بتن تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند و دریافته‌اند که اثر شکل نمونه در حالت بارگذاری دینامیکی ناچیز است و در بارگذاری استاتیکی پُررنگ می‌شود. همچنین نحوه‌ی انتشار امواج تنش در نمونه‌های استوانه‌یی، تک‌بعدی است و در نمونه‌های مکعبی حالتی پیچیده به خود می‌گیرد. موچاچا^۴ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۷] با استفاده از قوانین متعدد اثر اندازه و ساخت اندازه‌های مختلف از نمونه‌های استوانه‌یی ستون مانند، اثر اندازه را در بتن‌های معمولی تحت شکست فشاری مطالعه کرده‌اند. یه^۵ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۸] اثر اندازه‌ی نمونه را در مقاومت خمشی بتن‌های شکل‌پذیر با عملکرد بالا بررسی کردند و دریافته‌اند که به سبب گسترش محدودی شکل‌گیری شکست در بتن شکل‌پذیر با عملکرد بالا، شکست محصول از حالت ترد و یک‌ترکی به حالت چندترکی گذار می‌کند؛ لذا بتن میزان انرژی بیشتری را در ناحیه‌ی شکل‌گیری شکست مصرف می‌کند و رفتار شکل‌پذیری را از خود نشان می‌دهد. وجود الیاف نیز خصوصیات ذکر شده را در بتن شکل‌پذیر تقویت می‌کند. بنابراین اثر اندازه‌ی نمونه در بتن‌های شکل‌پذیر با عملکرد بالا، به نسبت بتن‌های معمولی ناچیز خواهد بود. و خورشوی^۶ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۹] اثر شکل و اندازه‌ی نمونه را در مقاومت‌های فشاری و کششی بتن‌های سبک‌وزن دارای پلی‌استیرین بررسی و مدل‌هایی بر مبنای مکانیسم شکست به منظور ارزیابی اثر شکل و اندازه ارائه کرده‌اند. چن^۷ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰] با نظر به اثر اندازه‌ی نمونه در نمودار تنش - کرنش بتن‌های تحت فشار محوری، مدل‌هایی وابسته به اندازه‌ی قالب را به‌منظور پیش‌بینی رفتار تنش - کرنش بتن پیشنهاد کردند. مطابق با نتایج گزارش شده در پژوهش مذکور، افزایش قطر ستون از ۱۵۰ میلی‌متر به ۴۶۰ میلی‌متر، به ترتیب تنش و کرنش بیشینه را در بتن به میزان‌های ۱۲/۷ و ۱۷/۳ درصد کاهش داده است. سعیدیان و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۱] با ساخت ۴ اندازه‌ی متفاوت از نمونه‌های استوانه‌یی، اثر اندازه‌ی نمونه را در مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن بررسی کرده و مطابق با مشاهده‌های ایشان، اضافه شدن الیاف پلی‌پروپیلن، ضمن کاهش مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها، شدت اثر اندازه را در بتن خودتراکم کاهش داده است. اکبری و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۲] اثر شکل و اندازه‌ی نمونه را در رفتار فشاری بتن‌های خودتراکم مسلح به الیاف فلزی مطالعه کردند و بر اساس داده‌های ارائه شده در پژوهش خود دریافته‌اند که نمونه‌های استوانه‌یی پس از اضافه شدن الیاف فلزی، رفتار شکل‌پذیرتری را در مقایسه با نمونه‌های مکعبی از خود بروز می‌دهند.

در پژوهش حاضر، بتن‌های خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل طراحی و استفاده شده‌اند. الیاف پلی‌وینیل الکل، الیافی مصنوعی است که به سبب داشتن مزیت‌های اقتصادی و مکانیکی، نظیر مقاومت کششی بالا، در تکنولوژی بتن

مطرح است. همچنین الیاف به سبب جذب آب بالای خود، پیوندی مستحکم را با ملات سیمانی برقرار می‌کند و با کنترل و مهار انتشار ریزترک‌های درون ساختار، وظیفه‌ی تسلیح بتن را به خوبی انجام می‌دهد.^[۱۳] لذا بتن‌های مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل، غالباً ظرفیت کششی و شکل‌پذیری قابل توجهی از خود نشان می‌دهند.^[۱۴، ۱۵] لیکن ساختار بتن‌های مسلح به الیاف، حساس است و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها به راحتی در معرض تهدید قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، ویریه‌ی نامناسب می‌تواند به انتشار یکدست الیاف ضربه وارد کند و مزایای تسلیح با الیاف را کاهش دهد. بنابراین بتن مسلح به الیاف باید کارایی و روانی مناسبی نیز داشته باشد، تا حضور الیاف در ساختار آن منتج به بروز معضلاتی نظیر جداشدگی نشود. بر این اساس، بتن خودتراکم مسلح به الیاف، ترکیبی مناسب است که مزایای بتن خودتراکم، نظیر کارایی و روانی بالا را در کنار مشخصات مکانیکی اصلاح شده‌ی بتن مسلح به الیاف می‌گذارد و کیفیتی مساعد را به ارمغان می‌آورد. به بیانی دیگر، ترکیب دو فرم ذکر شده در تکنولوژی بتن، مزیت‌های کاربردی و چشم‌گیری را به همراه داشته است.^[۱۶] بتن خودتراکم مسلح به الیاف نیازی به ویریه ندارد و تحت وزن خود به تراکم می‌رسد، لذا علاوه بر مهیا کردن بستری مناسب جهت انتشار یکدست الیاف می‌تواند در مقاطع نازک با شکل‌های پیچیده نیز استفاده شود.

پیش از این، تأثیر افزودن الیاف پلی‌وینیل الکل بر عملکرد ملات‌های سیمانی و نمونه‌های بتنی مطالعه شده است. بر مبنای نتایج پژوهش سان^۸ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۷] اضافه شدن ۲٪ حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، موجب افزایش چشمگیر ظرفیت کششی و شکل‌پذیری کامپوزیت‌های سیمانی شده است. خوارز^۹ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۸] نشان دادند که اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل می‌تواند تعداد و ضخامت ریزترک‌های برآمده از انقباض خمیری را در بتن، به میزان قابل ملاحظه‌یی کاهش دهد. بر اساس گزارش‌های انوار حسین^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳)،^[۱۵] افزودن ۱۲۵٪ حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، در عین افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن خودتراکم، سبب کاهش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های مذکور شده است. کاو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۹] نشان دادند که افزایش درصد حجمی الیاف پلی‌وینیل الکل، تنش تسلیم و ویسکوزیته‌ی ملات سیمانی را افزایش می‌دهد. یگانه و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۰] مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم سبک‌وزن را در حضور الیاف مختلف، نظیر الیاف پلی‌وینیل الکل و الیاف پلی‌اتیلن پر چگالی مطالعه کردند و دریافته‌اند که اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل موجب کاهش مقاومت فشاری محصول، به میزان بیش از ۱۵٪ افزایش تعداد ترک‌ها و کاهش ضخامت ترک‌ها در لحظه‌ی شکست شده است. همچنین مقاومت کششی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بتن خودتراکم سبک‌وزن در حضور الیاف پلی‌وینیل الکل افزایش یافته است. لی^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۱] تأثیر افزودن الیاف پلی‌وینیل الکل را به‌صورت منفرد و همراه با الیاف فلزی در کارایی، مشخصات مکانیکی، خزش و انقباض بتن خودتراکم مقاومت بالا بررسی کرده‌اند. مطابق نتایج گزارش شده، الیاف پلی‌وینیل الکل تأثیر سازنده‌تری را در حضور الیاف فلزی از خود نشان داده و ترکیب دو الیاف پلی‌وینیل الکل و فلزی، ضمن ارتقاء مشخصات مکانیکی محصول، مانع از وقوع خزش و انقباض در بتن شده است.

تاکنون اثر شکل و اندازه‌ی نمونه در مورد بتن‌های مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل چندین مطالعه نشده است. همان‌طور که اشاره شده است،^[۲] اثر شکل و اندازه‌ی نمونه در رفتار بتن تا حدود بسیار زیادی تابع طرح اختلاط و نوع بتن است؛ لذا مدل‌های اثر شکل و اندازه باید برای انواع مختلف بتن آزمایش و بررسی شوند. بنابراین در پژوهش حاضر، دو میزان متفاوت از الیاف پلی‌وینیل الکل با طول ۶ میلی‌متر،

جدول ۱. مشخصات الیاف مصرفی.

مشخصات	میزان
چگالی (kg/m^3)	۱۳۰۰
طول (mm)	۶
مقاومت کششی (MPa)	۱۴۰۰
مدول یانگ (GPa)	۳۲
قطر (mm)	۰/۰۴
درصد کشیدگی	۷

۲.۲. طرح اختلاط

مقدار مصالح موجود در طرح اختلاط‌های مختلف، پس از طی شدن پروسه‌ی تجربی، به گونه‌ی تنظیم شده‌اند تا بتن به دست آمده، ساختاری منسجم و کارآمد داشته باشد. طراحی بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل، شامل کنار هم گذاشتن دو المان متضاد است؛ از طرفی بتن به دست آمده باید با داشتن روانی مناسب در سطح تازه، خواص خودتراکمی داشته باشد و از سوی دیگر، جذب آب بالای الیاف پلی‌وینیل الکل، روانی بتن تازه را کاهش می‌دهد. بنابراین ایجاد تعادل میان دو عامل اخیر، امری کلیدی در طراحی بتن ذکر شده است.

طرح اختلاط‌های موجود در پژوهش حاضر، در حضور دو درصد حجمی متفاوت از الیاف پلی‌وینیل الکل تنظیم شده‌اند. درصد الیاف مصرفی در طرح‌های مذکور، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی (نسبت به حجم کل بتن) است. پیش از این، درصد‌های بالاتری از الیاف پلی‌وینیل الکل در کامپوزیت‌های سیمانی به مصرف رسیده است، اما به علت خواص ویژه‌ی بتن خودتراکم در سطح تازه، مقادیر اخیر باید در بتن خودتراکم، محدودتر در نظر گرفته شوند. بر اساس مشاهده‌های صورت گرفته در پروسه‌ی تجربی پژوهش حاضر، افزودن بیش از ۰/۱٪ حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل به ساختار بتن خودتراکم، سبب کاهش چشمگیر کارایی بتن تازه می‌شود و محصول را از محدوده‌ی استاندارد خودتراکمی خارج می‌کند. نتایج مشابه در پژوهش انوار حسین و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۵]، گزارش شده است. همچنین مشکل اشاره شده از طریق افزایش میزان آب مصرفی و فوق روان‌کننده نیز رفع نمی‌شود، چرا که به کارگیری تمهیدات اخیر می‌تواند انسجام درونی بتن و به دنبال آن، مقاومت محصول سخت شده را مضمحل سازد.

نسبت آب به سیمان برای طرح شاهد و طرح‌های دارای الیاف یکسان بوده است؛ اما مقدار آب و سیمان موجود در طرح‌های دارای الیاف، با حفظ نسبت ثابت بیشتر در نظر گرفته شده است. این تمهید به منظور تأمین میزان مناسب هیدراسیون ریزدانه‌های سیمانی اندیشیده شده است، زیرا جذب آب بالای الیاف پلی‌وینیل الکل می‌تواند موجب از دست رفتن بخشی از آب درونی بتن شود، که نتیجه‌ی آن، بروز جدایش و کرم شدن نمونه‌ی بتنی است. در جدول ۲، طرح اختلاط‌های به کار رفته ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مجموع ۳ طرح اختلاط به کار گرفته شده‌اند، که طرح SCC به عنوان بتن خودتراکم بدون الیاف (طرح شاهد) و طرح‌های SCC.F5 و SCC.F8 به ترتیب معرف بتن‌های خودتراکم مسلح به ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل هستند.

۳.۲. مشخصات قالب‌ها

به جهت بررسی اثر شکل نمونه بر مقاومت فشاری بتن‌های طراحی شده، قالب‌هایی

به طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم اضافه و با استفاده از قالب‌های استوانه‌ی و مکعبی، نمونه‌های آزمایش ساخته شده‌اند. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط استاندارد، مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه‌ی عددی موجود میان مقاومت فشاری نمونه‌های مذکور بر مبنای هندسه‌ی مقطع و مکانیسم شکست به دست آمده است.

۱.۱. اثر شکل و اندازه‌ی بتن بر مبنای مکانیسم شکست

بازانت^{۱۳} برای نخستین بار قانون اثر اندازه (SEL)^{۱۴} را بر مبنای مکانیسم شکست، برای نمونه‌هایی با هندسه و ترک‌های اولیه‌ی همسان صورت‌بندی کرده است. او با مینا قرار دادن میزان انرژی رها شده در هنگام شکست، وابستگی مقاومت بتن به ابعاد نمونه را به تغییر فاز مصالح از محدوده‌ی شکست به محدوده‌ی انرژی، مربوط ساخته،^[۲۳،۲۲] و رابطه‌ی اثر اندازه را به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه کرده است:

$$f_c(D) = \frac{B f_{cs}}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (1)$$

که در آن، $f_c(D)$ مقاومت فشاری نمونه در شکست، f_{cs} مقاومت فشاری نمونه‌ی استاندارد (استوانه‌ی $150 \times 300 \times 150$ و مکعب $150 \times 150 \times 150$)، D قطر نمونه و B و D_0 ضرایب مجهول هستند، که با استفاده از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری آنالیز رگرسیون غیرخطی به دست می‌آیند.

رابطه‌ی اثر اندازه، نخست به منظور بررسی در حالت شکست کششی ارائه شده بود؛ اما پژوهش‌گران متعددی با نظر به اینکه شکست فشاری نیز همانند شکست حالت اول،^{۱۵} بر اساس انتشار ترک‌ها رخ می‌دهد، از معادله‌ی اخیر برای بررسی حالت شکست فشاری محوری نیز بهره برده‌اند.^[۲۳،۱۲،۱۱] در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ی بر مبنای رابطه‌ی اثر اندازه تحلیل شده است.

۲. مراحل آزمایشگاهی

در بخش حاضر، مراحل آزمایشگاهی مختلف به جهت ساخت بتن، نظیر: مشخصات مصالح مصرفی، نحوه‌ی آماده‌سازی طرح اختلاط‌ها، مشخصات قالب‌ها، شرایط تمهید و شیوه‌ی آماده ساختن نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های گوناگون بحث شده‌اند.

۱.۲. مشخصات مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر، از سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM C150 استفاده شده است. درشت‌دانه‌ی مصرفی از نوع شن طبیعی رودخانه‌ی با قطر بیشینه‌ی ۱۲/۵ میلی‌متر، چگالی ویژه‌ی ۲/۶۷ و درصد جذب آب ۱/۳ بوده است. ریزدانه‌ی استفاده شده، ماسه‌ی طبیعی رودخانه‌ی با چگالی ویژه‌ی ۲/۶۳ و درصد جذب آب ۱/۹۵ است. همچنین از پودر سنگ آهک، با چگالی ویژه‌ی ۲/۶ و سطح مخصوص 480 kg/m^2 ، به عنوان عنصر پرکننده (فیلر) برای افزایش حجم ملات و کاهش اصطکاک میان سنگ‌دانه‌ها استفاده شده است.

فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کریبوسیلیات با وزن مخصوص ۱/۱، عنصرافزودنی دیگر است که به تأمین روانی مناسب بتن خودتراکم کمک می‌کند. آب مصرفی جهت ساخت بتن، آب شهری است. الیاف استفاده شده، الیاف پلی‌وینیل الکل با طول ۶ میلی‌متر بوده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف استفاده شده، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط‌های استفاده شده (kg/m^3).

مصالح	SCC	SCC.F5	SCC.F8
آب	۱۹۲	۲۴۰	۲۴۰
سیمان	۴۰۰	۵۰۰	۵۰۰
آب / سیمان	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸
شن	۶۶۷	۶۶۷	۶۶۷
ماسه	۸۵۰	۸۵۰	۸۵۰
پودر سنگ آهک	۶/۵	۸/۱۲۵	۸/۱۲۵
فوق‌روان‌کننده الیاف PVA	-	۰/۶۵	۱/۰۴

جدول ۳. مشخصات قالب‌های استفاده شده.

شکل قالب	نام قالب	ابعاد (میلی‌متر)
استوانه‌یی	Cy1	قطر: ۱۰۰، ارتفاع: ۲۰۰
	Cy2	قطر: ۱۵۰، ارتفاع: ۳۰۰
مکعبی	Cu1	اضلاع: ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰
	Cu2	اضلاع: ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰

به اشکال استوانه‌یی و مکعبی در دو اندازه‌ی متفاوت، انتخاب شده‌اند. در جدول ۳ مشخصات قالب‌های مورد استفاده ارائه شده است.

۴.۲. شیوه‌ی ساخت بتن

در پژوهش حاضر از یک مخلوط کن آزمایشگاهی برای ساخت بتن استفاده شده است. نخست، درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌های سنگی به مدت ۱۰ ثانیه در مخلوط کن با یکدیگر مخلوط شدند. سپس، ترکیب سیمان و پودر سنگ آهک به مخلوط سنگ‌دانه‌ها اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط کن به چرخش خود ادامه داده است. پس از طی شدن مدت زمان اخیر، ۶۵٪ از آب تعبیه شده به مخلوط اضافه شد و مخلوط کن برای ۳۰ ثانیه‌ی دیگر ترکیب‌ها را با هم مخلوط ساخت. پس از گذشت ۳۰ ثانیه، مابقی آب به همراه فوق‌روان‌کننده‌ی طرح، در حالی به مخلوط اضافه شد که مخلوط کن در حال چرخش بوده است. باید دقت شود که آب و فوق‌روان‌کننده به تمام قسمت‌های مخلوط نفوذ کنند. پس از چرخش مخلوط کن به مدت ۱ دقیقه، الیاف پلی‌وینیل‌الکل به تدریج به مخلوط در حال چرخش افزوده شدند. عملیات مخلوط شدن پس از اضافه شدن الیاف به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت، تا انتشار هر چه بهتر الیاف پلی‌وینیل‌الکل در ساختار بتن تأمین شود.

۵.۲. عمل‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها

پس از اتمام فرایند ساخت بتن، بتن تازه بلافاصله برای انجام آزمایش‌های مرتبط آماده شد. مطابق با استانداردهای EFNARC و ACI-237R [۲۷،۲۶] در خصوص بتن خودتراکم، از آزمایش‌های اسلامپ (قطر و زمان)، V-funnel و L-box، به جهت سنجش ویژگی‌های بتن تازه استفاده شده است. آزمایش‌های اسلامپ بیان‌گر سرعت جاری شدن و خاصیت روانی بتن خودتراکم در محیط‌های باز، آزمایش V-funnel بیان‌گر خاصیت پُرکنندگی و ویسکوزیته‌ی بتن خودتراکم و آزمایش L-box بیان‌گر خاصیت عبور بتن خودتراکم است. پس از انجام آزمایش‌های ذکر شده بر بتن تازه، بتن به دست آمده بدون لرزش

و به‌صورت یکنواخت در قالب‌های استوانه‌یی و مکعبی ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگه داشته شد. قالب‌های مکعبی و استوانه‌یی، پس از ۱ روز باز و نمونه‌های به دست آمده تا زمان انجام آزمایش مقاومت (۲۸ روزه)، مطابق با استاندارد ASTM C192، در حوضچه‌ی آب عمل‌آوری شدند. پس از گذشت ۲۸ روز، نمونه‌ها از آب خارج و به جهت آماده شدن برای آزمایش مقاومت فشاری، مطابق استاندارد ASTM C1231 به وسیله‌ی لایه‌های نئوپرنی کپی‌نگ شدند. آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از یک جک فشاری ۲۰۰ کیلونیوتنی صورت پذیرفته است، که بار را مطابق با استاندارد ASTM C39، به‌صورت محوری و با سرعت ۳۰۰ نیوتن بر ثانیه بر نمونه‌ها اعمال می‌کرد.

۳. بررسی نتایج

در بخش کنونی با استناد به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، ویژگی‌های بتن تازه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن و اثر هندسه‌ی مقطع نمونه در مقاومت آن‌ها بررسی شده است.

۱.۳. ویژگی‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، اضافه شدن ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل‌الکل، مدت زمان ثبت شده در آزمایش اسلامپ - زمان را برای بتن خودتراکم، به ترتیب به میزان‌های ۲۷/۱۴ و ۶۵ درصد افزایش داده است. همچنین با نظر به نتایج آزمایش اسلامپ - قطر، افزودن ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل‌الکل، میزان جاری شدن بتن خودتراکم را به ترتیب، به میزان‌های ۴/۴۲ و ۲۱/۴ درصد کاهش داده است. محدوده‌ی استاندارد خودتراکمی برای آزمایش اخیر، قطر بیشتر از ۵۲ میلی‌متر بوده است، که تمام طرح‌ها در آن قرار گرفته‌اند. [۲۷،۲۶]

مطابق نتایج آزمایش V-Funnel، اضافه شدن ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل‌الکل، موجب کاهش خاصیت پُرکنندگی بتن خودتراکم، به میزان ۵/۷ و ۱۲/۵۸ درصد شده است. محدوده‌ی استاندارد خودتراکمی برای آزمایش V-Funnel، بین ۷ تا ۲۷ ثانیه است، که تمام طرح‌ها در محدوده‌ی اخیر واقع شده بودند. [۲۷،۲۶]

بر اساس نتایج آزمایش L-Box، اضافه شدن ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل‌الکل، خاصیت عبور بتن خودتراکم را به ترتیب به میزان ۵ و ۱۵ درصد کاهش داده است. با توجه به محدوده‌ی استاندارد خودتراکمی، نتایج آزمایش L-Box، باید بیشتر از ۰/۷۵ باشد، که تمام طرح‌ها به جز طرح SCC.F8، در محدوده‌ی ذکر شده قرار داشتند [۲۷،۲۶]. مؤلفه‌های H1 و H2 در آزمایش L-Box، به ترتیب بیان‌گر میزان ارتفاع بتن جاری شده در محدوده‌ی جلویی و عقبی محفظه‌ی آزمایش است.

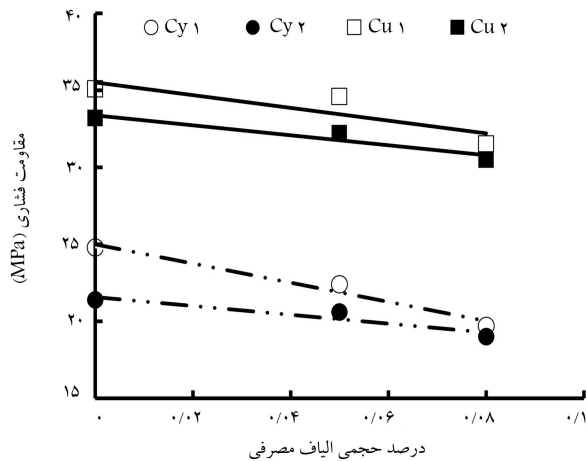
مطابق انتظار، خاصیت آبدوستی الیاف پلی‌وینیل‌الکل موجب کاهش کارایی و روانی بتن خودتراکم شده است و افزایش درصد الیاف مصرفی، تأثیر کاهنده را برجسته‌تر ساخته است؛ اما با نظر به استانداردهای موجود در باب بتن خودتراکم، [۲۷،۲۶] تأثیر کاهنده‌ی مذکور در آن حد نیست که طرح‌های مسلح به الیاف را از محدوده‌ی استاندارد خارج کند. لذا بتن‌های خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل‌الکل در پژوهش حاضر، همچنان خواص خودتراکمی لازم را از خود بروز داده‌اند.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های بتن تازه.

نام طرح	اسلامپ زمان (ثانیه)	اسلامپ قطر (میلی‌متر)	v - funnel (ثانیه)	L - box (H ₂ /H ₁)
SCC	۱٫۴	۶۷۷٫۵	۸٫۴۲	۰٫۸
SCC.F5	۱٫۷۸	۶۴۷٫۵	۸٫۹	۰٫۷۶
SCC.FA	۲٫۳۱	۵۳۲٫۵	۹٫۴۸	۰٫۶۸

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال).

نام نمونه	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	مقاومت متوسط
SCC - Cy ₁	۲۶٫۱	۲۳٫۳	۲۵٫۱	۲۴٫۸
SCC - Cy ₂	۲۳٫۶	۱۹٫۹	۲۰٫۸	۲۱٫۴
SCC.F5 - Cy ₁	۲۳٫۹	۲۲٫۴	۲۱	۲۲٫۴
SCC.F5 - Cy ₂	۲۳٫۸	۱۸٫۹	۱۹٫۱	۲۰٫۶
SCC.FA - Cy ₁	۲۱٫۱	۱۸٫۷	۱۹٫۴	۱۹٫۷
SCC.FA - Cy ₂	۲۲٫۱	۱۸٫۱	۱۷	۱۹
SCC - Cu ₁	۳۱٫۴	۳۶٫۳	۳۷٫۸	۳۵٫۱
SCC - Cu ₂	۳۰٫۹	۳۴٫۵	۳۴٫۲	۳۳٫۲
SCC.F5 - Cu ₁	۳۵	۳۴٫۷	۳۴٫۳	۳۴٫۶
SCC.F5 - Cu ₂	۳۰٫۶	۳۴٫۶	۳۱٫۶	۳۲٫۲
SCC.FA - Cu ₁	۳۰	۳۲٫۵	۳۲٫۱	۳۱٫۵
SCC.FA - Cu ₂	۳۳٫۱	۲۸٫۷	۲۹٫۷	۳۰٫۵



شکل ۱. تأثیر حضور الیاف پلی‌وینیل الکل در مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی.

جدول ۶. تابع مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی بر حسب درصد حجمی الیاف PVA.

تابع	نمودار
$f_{cy1} = -۶۲٫۱۴۳x + ۲۴٫۹۹۳$	Linear (Cy ₁)
$f_{cy2} = -۲۸٫۵۷۱x + ۲۱٫۵۷۱$	Linear (Cy ₂)
$f_{cu1} = -۴۱٫۴۲۹x + ۳۵٫۵۲۹$	Linear (Cu ₁)
$f_{cu2} = ۳۲٫۳۴۷x + ۳۳٫۳۶۸$	Linear (Cu ₂)

با نظر به معادلات موجود در جدول ۶، شیب کاهش مقاومت نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (Cy₁)، به میزان ۴۹٫۹٪ از شیب کاهش مقاومت نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر (Cu₁) تندتر بوده و شیب کاهش مقاومت نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر (Cy₂)، به میزان ۱۱٫۶۷٪ از شیب کاهش مقاومت نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر (Cu₂)، کندتر بوده است. نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر، با داشتن تندترین شیب، بیشترین کاهش مقاومت را در حضور الیاف پلی‌وینیل الکل از خود نشان داده‌اند.

در شکل ۲، ارتباط میان مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌یی، در قالب نمودارهای خطی و برای طرح‌های مختلف جدول ۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مقاومت‌های فشاری کلیه‌ی نمونه‌های مربوط به هر طرح در یک دسته قرار گرفته‌اند و بدین ترتیب، ۳ دسته داده (SCC.FA, SCC.F5, SCC) مشاهده می‌شود. به جهت حصول رابطه‌ی عددی میان مقاومت فشاری نمونه‌های هر دسته، مدل خطی از میان داده‌های مذکور عبور داده شده است تا گرایش تقریبی داده‌ها را صورت‌بندی کند. با استفاده از معادلات استخراج شده توسط تمهید مذکور، می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی هر طرح را به نمونه‌های مکعبی مربوط به همان طرح تبدیل کرد. معادلات استخراج شده و ضرایب اصلاح (R^2)، در کنار هر یک

۲.۳. مقاومت فشاری

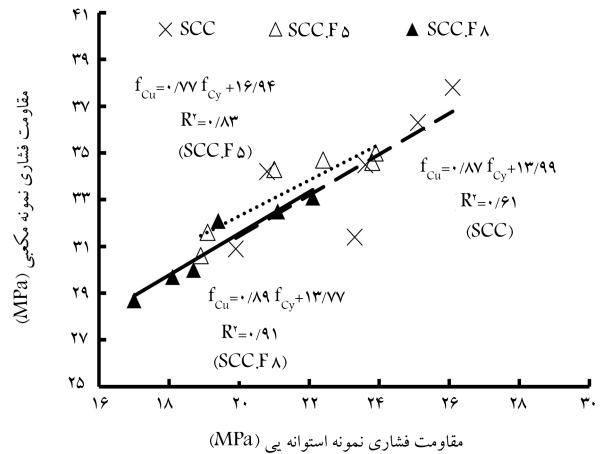
تعداد سه نمونه برای هر اندازه‌ی قالب تهیه شده است، که در مجموع ۳۶ نمونه آماده و آزمایش شدند. در جدول ۵، نام نمونه‌ها و نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی آنها ارائه شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس نام طرح (جدول ۲) و شکل نمونه (جدول ۳) بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل سبب کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌یی شده است. تأثیر مذکور به سبب عملکرد دو جانبه‌ی الیاف پلی‌وینیل الکل در ساختار بتن است؛ بدین معنا که پیوند مستحکم میان الیاف پلی‌وینیل الکل و ملات سیمانی می‌تواند در عین کنترل انتشار ریزترک‌ها و بهبود شکل‌پذیری نمونه، سبب ایجاد خلل و فرج‌هایی درون‌ساختاری در ماتریس بتن شود، که منجر به کاهش مقاومت فشاری آن می‌شود.

۳.۳. اثر شکل نمونه‌ها

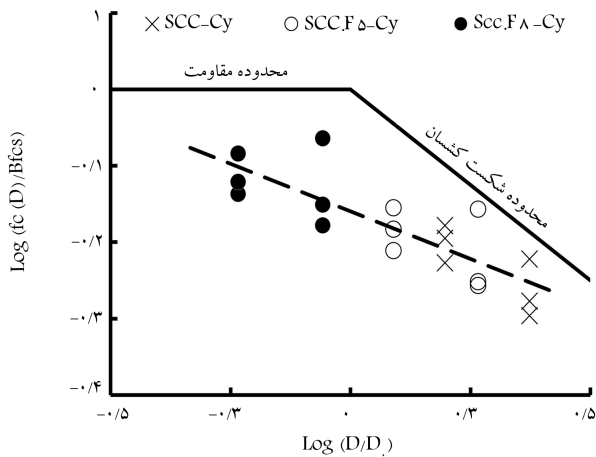
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در تمام ابعاد، از نمونه‌های استوانه‌یی بیشتر بوده است، که قابل انتظار بوده است. به‌منظور تعیین رابطه‌یی عددی برای بررسی میزان تأثیر الیاف پلی‌وینیل الکل در مقاومت فشاری نمونه‌ها، نمودار تغییرات خطی مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی، بر حسب درصد الیاف مصرفی، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در جدول ۶، توابع خطی مربوط به نمودارهای شکل ۱ ارائه شده است. در نمایش توابع، f_{cy1} و f_{cy2} معرف مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی و f_{cu1} و f_{cu2} معرف مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی است و متغیر x ، درصد حجمی الیاف PVA را نشان می‌دهد.

جدول ۷. ضرایب مدل بازانت برای نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی.

R^2	D_0	B	نام طرح
۰٫۹۹	۶۳٫۴۷	۱٫۸۴	SCC - Cy
۰٫۹۸	۸۱٫۲۵	۱٫۶۶	SCC.F۵ - Cy
۰٫۹۹	۱۷۱٫۶۲	۱٫۳۵	SCC.F۸ - Cy
۰٫۹۹	۱۹۱٫۳۳	۱٫۳۱	SCC - Cu
۰٫۹۹	۲۶۲٫۹۲	۱٫۲۶	SCC.F۵ - Cu
۰٫۹۹	۳۹۳٫۸۸	۱٫۱۶	SCC.F۸ - Cu



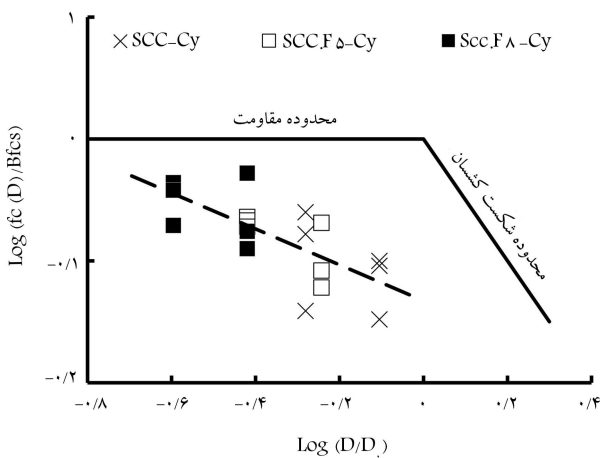
شکل ۲. ارتباط مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌یی برای طرح‌های مختلف.



شکل ۴. دیاگرام مدل SEL برای نمونه‌های استوانه‌یی.



شکل ۳. حالت شکست نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی.



شکل ۵. دیاگرام مدل SEL برای نمونه‌های مکعبی.

مشتیک، ضرایب اصلاح فرمول‌های ارتقاء یافته‌ی اشاره شده مشخص شده است. نزدیکی مقدار ضرایب اصلاح مذکور به عدد ۱، نشانگر قابلیت مناسب مدل‌های صورت‌بندی شده به جهت سنجش شدت اثر اندازه در نمونه‌های موجود است. همچنین در شکل‌های ۴ و ۵، دیاگرام مدل SEL برای نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی مشاهده می‌شود.

بر اساس داده‌های موجود در جدول ۷، اضافه شدن ۵٪ و ۸٪ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، مؤلفه‌ی اندازه‌ی انتقالی (D_0) را در نمونه‌های استوانه‌یی، به میزان ۲۸٪ و ۱۷۰٪ افزایش داده است. مطابق شکل ۴، افزایش این مؤلفه به منزله‌ی انتقال نقاط نمونه از محدوده‌ی کشسان خطی

از نمودارها نوشته شده‌اند. نزدیکی ضرایب اصلاح به عدد ۱، نشان‌دهنده‌ی دقت معادله‌ی ارائه شده است. در معادلات اخیر، f_{Cu} معرف مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و f_{Cy} معرف مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی است.

۴.۳. الگوی شکست

در شکل ۳، نحوه‌ی انتشار ترک و چگونگی شکست در نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی مشاهده می‌شود. در نمونه‌های استوانه‌یی، ترک‌های پدیدار شده به هنگام شکست، در امتداد محور قائم و به صورت ممتد است، که بیانگر شکست محوری فشاری است؛ حال آنکه نمونه‌های مکعبی، به صورت برشی می‌شکنند. مطابق شکل ۳، شکست نمونه‌ی مکعبی به فرم ساعت شنی بوده است، که به دلیل تمرکز تنش و تجمع ریزترک‌ها در گوشه‌های نمونه‌ی مکعبی بوده است.

۵.۳. تحلیل نظری اثر شکل و اندازه بر اساس فرمول بازانت

ضرایب مجهول رابطه‌ی ۱، مربوط به قانون اثر اندازه، از طریق آنالیز رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار مشتیک^{۱۶} به دست آمده است. در جدول ۷، نیز ضرایب مذکور برای نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی ارائه شده است. با نظر به ضرایب به دست آمده، مدل بازانت برای نخستین بار برای بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل استفاده شده است. همچنین با الصاق بهترین مدل غیرخطی در نرم‌افزار

دارای الیاف پلی‌وینیل الکل همچنان در محدوده‌ی استاندارد خودتراکمی قرار گیرند. علاوه بر این، اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی شده است. بر مبنای نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، افزودن ۰/۵ و ۰/۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر را به ترتیب، به میزان‌های ۹/۶۷ و ۲۰/۵۶ درصد کاهش داده و به ترتیب موجب کاهش متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر، به میزان‌های ۳/۷۳ و ۱۱/۲۱ درصد شده است. همچنین اضافه شدن ۰/۵ و ۰/۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر را به ترتیب، به میزان‌های ۱/۴۲ و ۱۰/۲۵ درصد و متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر را به ترتیب به میزان‌های ۳/۰۱ و ۸/۱۳ درصد کاهش داده است.

روابط عددی به‌منظور تبدیل مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی هر طرح اختلاط به نمونه‌های مکعبی همان طرح ارائه شده است. با بررسی اثر شکل و اندازه‌ی نمونه بر مبنای مکانیسم شکست و به دست آوردن ضرایب مجهول فرمول قانون اثر اندازه، مدل بازانته برای نخستین بار برای بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل استفاده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده در روش اخیر، الیاف پلی‌وینیل الکل با انتقال نقاط مدل SEL از محدوده‌ی شکست کشسان به سمت محدوده‌ی مقاومت، شدت اثر اندازه را در نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی کاهش داده و موجب شکل‌پذیرتر شدن رفتار نمونه‌های مذکور شده است. بر اساس داده‌های به دست آمده، اضافه شدن ۰/۵ و ۰/۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل، مؤلفه‌ی اندازه‌ی انتقالی (D_0) را در نمونه‌های استوانه‌یی، به ترتیب به مقادیر ۲۸/۰۱ و ۱۷۰/۳۹ درصد افزایش داده و به ترتیب موجب افزایش مؤلفه‌ی مذکور در نمونه‌های مکعبی، به مقادیر ۳۷/۴۱ و ۱۰۵/۸۶ درصد شده است. افزایش چشمگیر مؤلفه‌ی اندازه‌ی انتقالی و حرکت نقاط مدل SEL به سمت محدوده‌ی شکست خمیری، نشان از کاهش قابل توجه شدت اثر اندازه در نمونه‌های مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل دارد.

به محدوده‌ی مقاومت است. لذا اضافه شدن الیاف پلی‌وینیل الکل در ساختار نمونه‌های استوانه‌یی، نقاط مدل را از محدوده‌ی شکست کشسان به محدوده‌ی مقاومت می‌کشاند و اثر اندازه را در نمونه‌های استوانه‌یی کم‌رنگ‌تر می‌کند. کم‌رنگ‌تر ساختن اثر اندازه در بتن، به معنای افزایش شکل‌پذیری بتن در حضور الیاف پلی‌وینیل الکل است. الیاف پلی‌وینیل الکل با برقراری پیوند مستحکم با ملات سیمانی، انتشار ریزترک‌ها را مهار و مانند پلی میان حفره‌ها عمل می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشهود است، افزایش درصد الیاف پلی‌وینیل الکل موجب نزدیک‌تر شدن نقاط نمونه به محدوده‌ی مقاومت شده است. همچنین بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۷، اضافه شدن ۰/۵ و ۰/۸ درصد حجمی از الیاف پلی‌وینیل الکل در نمونه‌های مکعبی، موجب افزایش مؤلفه‌ی اندازه‌ی انتقالی (D_0) به میزان‌های ۳۷/۴۱ و ۱۰۵/۸۶ درصد شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزایش درصد حجمی الیاف پلی‌وینیل الکل موجب انتقال نقاط مدل، از محدوده‌ی (LEFM)^{۱۷} به محدوده‌ی مقاومت می‌شود. کشش نقاط به سمت محدوده‌ی مقاومت، گواه از کاهش وابستگی مقاومت فشاری بتن به ابعاد نمونه دارد.

بنابر مشاهده‌های اخیر، حضور الیاف پلی‌وینیل الکل در نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی، موجب جهش چشمگیر نقاط مدل به سمت محدوده‌ی شکست خمیری شده است. به بیانی دیگر، الیاف پلی‌وینیل الکل شدت اثر اندازه را در نمونه‌های استوانه‌یی و مکعبی کاهش می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر اندازه و هندسه‌ی مقطع نمونه در مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌وینیل الکل بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش درصد الیاف پلی‌وینیل الکل موجب کاهش کارایی و روانی بتن خودتراکم در سطح تازه شده است، اما طرح اختلاط‌ها در پژوهش حاضر به گونه‌یی تنظیم شده‌اند که با وجود تأثیر کاهنده‌ی ذکر شده، طرح‌های

پانویس‌ها

1. Fládr
2. Wu
3. Li
4. Muciaccia
5. Ye
6. Vakhshouri
7. Chen
8. Sun
9. Juarez
10. Anwar Hossain
11. Cao
12. Li
13. Bazant
14. size effect law
15. Mode I failure

16. mathematica software
17. linear elastic fracture mechanism

منابع (References)

1. Bazant, Z.P. and Oh, B.H. "Crack band theory for fracture of concrete", *Matériaux et Constr*, **16**(3), pp. 155-177 (1983).
2. Torreti, J.M., Benaija, E.H. and Boulay, C. "Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression tests", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, **119**(12), pp. 2369-2384 (1993).
3. Yi, S.T., Yang, E. and Choi, J. "Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compres-

- sive strength of concrete”, *Nuclear Engineering and Design*, **236**(2), pp. 115-127 (2006).
4. Fládr, J. and Bilý, p. “Specimen size effect on compressive and flexural strength of high-strength fibre-reinforced concrete containing coarse aggregate”, *Composites Part B*, **138**, pp. 77-86 (2018).
 5. Wu, B., Yu, Y., Chen, Z. and et al. “Shape effect on compressive mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps”, *Construction and Building Materials*, **187**, pp. 50-64 (2018).
 6. Li, M., Hao, H., Shi, Y. and et al. “Specimen shape and size effects on the concrete compressive strength under static and dynamic tests”, *Construction and Building Materials*, **161**, pp. 84-93 (2018).
 7. Muciaccia, G., Rosati, G. and Luzio, G.D. “Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical specimens”, *Construction and Building Materials*, **137**, pp. 185-194 (2017).
 8. Ye, J., Yu, J., Cui, C. and et al. “Flexural size effect of ultra-high ductile concrete under different damage and ductility levels”, *Cement and Concrete Composites*, **115**, pp.1-10, 103852 (2021).
 9. Vakhshouri, B. and Nejadi, S. “Size effect and age factor in mechanical properties of BST light weight concrete”, *Construction and Building Materials*, **177**, pp. 63-71 (2018).
 10. Chen, P., Liu, C. and Wang, Y. “Size effect on peak axial strain and stress-strain behavior of concrete subjected to axial compression”, *Construction and Building Materials*, **188**, pp. 645-655 (2018).
 11. Saeedian, A., Dehestani, M., Asadollahi, S. and et al. “Effect of specimen size on the compressive behavior of self-consolidating concrete containing polypropylene fibers”, *J. Mater. Civ. Eng.*, **29**(11), pp.1-11, 04017208 (2017).
 12. Akbari, M., Khalilpour, S. and Dehestani, M. “Analysis of material size and shap effects for steel fiber reinforcement self-consolidating concrete”, *Eng. Frac. Mech.*, **206**, pp. 46-63 (2019).
 13. Wittmann, F. and Van Zijl, G. “Durability of strain-hardening fiber-reinforced cement-based composites (SHCC)”, *RILEM State of the Art Reports Book Series*, **4**(6), pp. 81-88 (2011).
 14. Noushini, A., Samali, B. and Vessalas, K. “Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete (PVA-FRC)”, *Mag. Concr. Res.*, **66**(1), pp. 1-19 (2014).
 15. Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Sammour, M. and et al. “Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibers”, *Constr. Build. Mater.*, **45**, pp. 20-29 (2013).
 16. Ferrara, L., Bamonte, P., Caverzan, A. and et al. “A comprehensive methodology to test the performance of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC)”, *Construction and Building Materials*, **37**, pp. 406-424 (2012).
 17. Sun, M., Chen, Y., Zhu, J. and et al. “Effect of modified polyvinyl alcohol fibers on the mechanical behavior of engineered cementitious composites”, *Materials*, **37**(1), pp.1-20 (2019).
 18. Juarez, C.A., Fajardo, G., Monroy, S. and et al. “Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite”, *Construction and Building Materials*, **91**, pp. 164-170 (2015).
 19. Cao, M. and Li, L. “New models for predicting workability and toughness of hybrid fiber reinforced cement-based composites”, *Constr. Build. Mater.*, **176**, pp. 618-628 (2018).
 20. Yeganeh, A.E., Kouroshezhad, F., Dadsetan, S. and et al. “Experimental investigation on mechanical properties of fiber reinforced lightweight self-consolidating concrete”, *RheoCon, SCC: Rheology and Processing of Construction Materials*, pp. 536-543 (2019).
 21. Li, K.F., Yang, C.Q., Huang, W. and et al. “Effects of hybrid fibers on workability, mechanical, and time-dependent properties of high strength fiber-reinforced self-consolidating concrete”, *Construction and Building Materials*, **277**, pp.1-12, 122325 (2021).
 22. Bažant, Z.P. “Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal”, *J. Eng. Mech.* **110**(4), pp. 518-535 (1984).
 23. Bažant, Z.P. and Planas, J. “Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials”, *CRC Press, Boca Raton, FL*, **16**, pp.291-297 (1997).
 24. Asadollahi, S., Saeedian, A., Dehestani, M. and et al. “Improved compressive fracture models for self-consolidating concrete (SCC)”, *Constr. Build. Mater.*, **123**, pp. 473-480 (2016).
 25. Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Sammour, M. and et al. “Influence of Polyvinyl Alcohol, Steel, and Hybrid Fibers on Fresh and Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.*, **24**, pp. 1211-1220 (2012).
 26. EFNARC. “European federation of national associations representing for concrete, specification and guidelines for self-compacting concrete”, Surrey, U.K. (2005).
 27. ACI. “American concrete institute, self-consolidating concrete”, ACI 237R-07, Farmington Hills, MI (2007).