

## بررسی خواص تازه و سخت شده بتن خود تراکم الیافی

مهدی قبادی<sup>۱</sup>، ساسان معتقد<sup>۲\*</sup>، محبوبه میرزایی علی آبادی<sup>۳</sup>، یدالله غرابی<sup>۴</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان، بهبهان، ایران  
 ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان، بهبهان، ایران  
 ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان، بهبهان، ایران  
 ۴- استادیار، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، بهبهان، ایران

### چکیده

حدود چهار دهه از توسعه بتن خود تراکم می‌گذرد، اما همچنان استفاده از آن محدود می‌باشد. بخشی از مشکلات بتن خودتراکم شامل جدا شدگی، عدم قابلیت جاری شدن و پرکنندگی و پتانسیل ترک خوردگی بالا است. در این پژوهش خواص بتن خودتراکم حاوی عامل اصلاح لزجت مورد بررسی قرار گرفته است. در ساخت بتن، الیاف پلیمری با دوز ۰/۱، ۰/۱۲۵، ۰/۱۵۰، ۰/۱۷۵ و ۰/۲۰ و الیاف فولادی قلاب‌دار با دوز ۰/۵۰، ۱، ۲/۱، ۵/۰ و ۲/۵۰ درصد وزن سیمان استفاده شده و آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه و سخت شده انجام گرفته است. نتایج آزمایشات بتن تازه نشان می‌دهد که افزایش هر دو نوع الیاف در بتن باعث کاهش جریان اسلامپ و افزایش مدت زمان  $T_{50}$  می‌شود. در آزمایش قیف  $V$ ، کاهش مدت زمان تخلیه بتن خود تراکم مسلح به الیاف پلیمری تا دوز ۰/۱۲۵ درصد وزن سیمان مشاهده می‌شود. افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مدت زمان آزمایش قیف  $V$  می‌شود. افزودن هر دو نوع الیاف قابلیت عبور بتن در آزمایش جعبه  $L$  را کاهش می‌دهد. آزمایشات بتن سخت شده نشان می‌دهد که با افزایش دوز الیاف فولادی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری در بتن مسلح به الیاف پلیمری در سن ۷ و ۲۸ روزه تا دوز الیاف ۰/۱۵۰ درصد افزایش یافته است. با افزایش هر دو نوع الیاف، مقاومت کششی افزایش پیدا می‌کند. نتایج آزمایش ترک خوردگی نشان می‌دهد که طول و عرض ترک‌ها با افزایش الیاف کاهش می‌یابد. افزودن الیاف فولادی تعداد ترک‌ها را می‌افزاید.

کلمات کلیدی: عامل اصلاح لزجت (VMA)، الیاف پلی پروپیلین، الیاف فولادی قلاب‌دار، ترک خوردگی، دال

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.102143.1366	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.102143.1366	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۲/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۰۹
ساسان معتقد				*نویسنده مسئول:	
motaghd@bkatu.ac.ir				پست الکترونیکی:	

# Study of the fresh and hardened properties of fiber self-compacting concrete

M. Ghobadi<sup>1</sup>, S. Motaghd<sup>2\*</sup>, M. Mirzaie Aliabadi<sup>3</sup>, Y. Gharayebi<sup>4</sup>

1-M.Sc., Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

2-Assistant Prof., Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

3-Assistant Prof., Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

4- Assistant Prof, Islamic Azad University Behbahan Branch, Behbahan, Iran.

## ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC). was developed about four decades before since that time it has been used very scarcely due to a number of problems including : separation, lack of flowability and filling ability, high cracking potential, and thereupon low compressive and tensile strength. In this study, properties of SCC containing viscosity modifying agent, steel and polypropylene fibers were investigated. polypropylene fibers with dosages of 0.1, 0.125, 0.20, 0.150, 0.185, 0.205, and hook end steel fibers with volume fractions of 0.5, 1, 1.5, 0.2 and 2.5 were employed; fresh and hardened SCC were examined. The results of the fresh concrete tests revealed that rise of the both fiber types reduces the slump flow and raises the T50 time. In the V-funnel test, the time shortened with polypropylene fibers up to dosage of 1.25%, and then soars. Growing steel fibers elongate the time of the V-funnel test. Adding both types of the fibers reduces the passing ability of concrete in the L box test. Hardened concrete tests indicated that the compressive strength is falling by rising the dosage of steel fibers. The compressive strength at the age of 7 and 28 days improves up to the polypropylene fiber dosage of 1.50% and then declines. At the age of 90 days, strength trend changes in dosage of 0.1. Tensile strength grows as the both fibers increase. The crack test results show that the length and width of the cracks lower with the growth of the fibers. Adding steel fibers boosts the number of cracks.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 31 October 2017

Revise Date: 09 May 2018

Accept Date: 03 July 2018

## Keywords:

VMA

Polypropylene fibers

Hook end steel fibers

Cracking

slab

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.102143.1366

\*Corresponding author: Sasan Motaghd.

Email address: motaghd@bkatu.ac.ir

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم بتنی است که قابلیت جریان پذیری داشته و تحت اثر وزن خود تراز می شود. این بتن به طور کامل قالب های نازک را بدون ضربه و ویبره پر می کند؛ حتی اگر در قالب ازدحام آرماتور وجود داشته باشد [۱ و ۲]. قابلیت جریان و ویسکوزیته این بتن با استفاده از ابر روان کننده ها و عامل اصلاح لزجت کنترل می شود. عامل اصلاح لزجت ( $VMA^1$ ) به صورت یک زنجیره در هم آمیخته در مخلوط کار می کند که مانع جدا شدن دانه ها از هم می شود وظیفه ی این زنجیره گرفتن و نگه داشتن آب است. انتظار می رود استفاده از عامل اصلاح لزجت تنها ویسکوزیته مخلوط را تحت تأثیر قرار داده و در خاصیت های دیگر مخلوط اثر نگذارد. طرح اختلاط بتن هایی که در آن از ابر روان کننده ها استفاده شده است به تغییرات جزئی آب به پودر بسیار حساس است، که این تغییرات می تواند بتن را دچار پدیده آب- انداختگی و جداسازی دانه ها کند. نتایج محققان گذشته نشان می دهد که بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بزرگتر از ۷۰۰ میلی متر ممکن است دچار آب انداختگی و جداسازی شود [۳ و ۴].

عامل اصلاح لزجت با وزن مولکولی بالا می تواند خاصیت رئولوژی بتن خودتراکم را تثبیت کند. تحقیقات گذشته نشان می دهد که بتن های حاوی عامل اصلاح لزجت به مراتب پایدارتر از بتن هایی است که با بالابردن پودر سنگ ویسکوزیته بتن را کنترل می کنند [۴]. لیمن و وینفلد نشان داده اند که استفاده از  $VMA$  شیمیایی سرعت هیدراتاسیون را افزایش داده در صورتی که استفاده از عامل اصلاح لزجت طبیعی اثری بر سرعت هیدراتاسیون سیمان نداشته است [۵]. تحقیقات چانگ در سال ۱۹۹۶ و کوریک در سال ۲۰۰۳ اثر منفی استفاده از عامل اصلاح لزجت های شیمیایی بر مقاومت بتن را نشان داده است [۶ و ۷].

استفاده از الیاف با قابلیت تغییر طول، باعث بهبود ویژگی جذب انرژی در ماتریس سیمان می شود. همچنین افزودن الیاف به منظور ارتقای مقاومت کششی و خمشی و خصوصیات دینامیکی در بتن استفاده می شود [۸-۱۰]. الیاف می توانند از جنس شیشه ای، فولادی، پلیمری و غیره باشد. انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک ها و ریز ترک ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک ها می شود. چنین ریز ترک هایی در سطح دانه های درشت متمرکز می شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک ها در بتن منتشر می شوند [۱۱ و ۱۲] بتن الیافی به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریز ترک ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می شود [۱۳ و ۱۴]. نتایج مطالعات جنسل و همکاران در سال ۲۰۱۱، بر روی کارایی و عملکرد الیاف فولادی در بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی، نشان می دهد که وجود الیاف کاهش کارایی و افزایش مقاومت کششی بتن می شود [۱۴]. پونیکویسکی و کاتزر در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که وجود الیاف باعث کاهش شدید جریان اسلامپ می- باشد [۸]. تحقیقات خالو و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی بررسی خواص مکانیکی بتن های خودتراکم مسلح به الیاف فولادی نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و خمشی نمونه می شود [۱۵]. کورینالدسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان داد که با افزایش الیاف پلیمری مقاومت فشاری افزایش می یابد [۱۶]. نتایج تحقیقات یوسفیه و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر الیاف در ترک خوردگی انقباضی را بررسی کرده و نشان دادند که ترک خوردگی در بتن الیافی به شدت به مدول الاستیسیته الیاف بستگی دارد [۱۷]. تیوا و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که الیاف پالم ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی را در سنین اولیه بتن خود تراکم کاهش می دهد [۱۸].

در این مقاله سعی شده است طرح اختلاط مناسبی برای بتن خود تراکم الیافی با استفاده از عامل اصلاح لزجت ( $VMA$ ) برای مصالح بومی ارائه شود. به این منظور ۲۰ مخلوط بتن خود تراکم حاوی مقادیر متفاوت  $VMA$  طراحی و ساخته شد. برای هر مخلوط آزمایشات بتن تازه شامل جریان اسلامپ،  $T50$ ، قیف  $V$  و جعبه  $L$  انجام گرفت. همچنین به منظور بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار بر خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم، ۲۲ مخلوط با دوزهای متفاوت الیاف پلیمری و فولادی قلاب دار ساخته شد که علاوه بر آزمایشات بتن تازه، آزمایش مقاومت فشاری، کششی و ترک خوردگی نیز بر روی هر کدام از آنها انجام گرفته است.

<sup>1</sup> Viscosity Modifying Admixture

## ۲- مواد و مصالح مصرفی

### ۲-۱- سیمان

با توجه به اینکه در بتن‌های خودتراکم، حجم خمیر سیمان نسبت به بتن‌های معمولی بیشتر است، انتخاب نوع سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع پنج تولید کارخانه سیمان بهبهان استفاده شده است.

### ۲-۲- پودرسنگ آهک

یکی از مواد لازم جهت تأمین لزجت مناسب در بتن خودتراکم پودرسنگ است. پرکننده‌هایی چون پودرسنگ به دلیل دارا بودن ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی و حفره‌های موجود بین ذرات سیمان شده و لذا باعث کاهش تخلخل و افزایش درجه توپری بتن می‌گردند. این دسته از عناصر پرکننده به دلیل دارا بودن سطح ویژه بسیار زیاد، اصطکاک بین‌دانه‌ای را افزایش داده و باعث افزایش لزجت بتن می‌گردند، لذا استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها به منظور افزایش روانی بتن در ساخت چنین بتن‌هایی اجتناب‌ناپذیر است. نتایج تجزیه شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و پودرسنگ آهک در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۳- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های درشت از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلیمتر و سنگدانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلیمتر از نوع طبیعی شسته و از معادن بهبهان تأمین شده است. جنس هر دو نوع سنگدانه از سنگ آهک بوده که مشخصات فیزیکی و آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱: درصد مواد متشکله سیمان و پودرسنگ آهک

پودرسنگ	سیمان	مشخصات شیمیایی و فیزیکی
۲/۸۰	۲۲/۲۳	SiO <sub>2</sub>
۰/۳۵	۴/۸۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۵۰	۵/۴۵	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱/۸۰	۲/۸۹	MgO
۵۱/۲۲	۶۰/۱۸	CaO
۱/۲۴	۳/۰۰	SO <sub>3</sub>
--	۰/۶۷	K <sub>2</sub> O
۴۲/۰۶	۱/۱۱	کسر وزن در اثر سرخ شدن
۲/۸۰	۰/۷۴	باقی‌مانده نامحلول
۲۶۶۰	۳۰۵۰	وزن مخصوص دانه ای (kg/m <sup>3</sup> )

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

سنگدانه	جرم حجمی دانه ای (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد جذب آب
شن	۲/۶۲	۰/۸۵
ماسه	۲/۵۷	۳/۹

### ۲-۴- آب

آب مصرفی برای ساخت نمونه‌ها، آب آشامیدنی شهرستان بهبهان با میزان pH حدود ۵/۹ و غلظت یون کلرید ppm ۶۵ مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۵- افزودنی های شیمیایی

به منظور رسیدن به کارایی موردنظر در مخلوطها، با توجه به تأثیر مقدار آب اضافی بر روی بتن از جمله آب انداختگی، جداسازی و مقاومت، استفاده و انتخاب نوع روان کننده جهت کاهش اثر منفی آب زیاد بر روی خواص بتن تازه خودتراکم بسیار مورد اهمیت می باشد. چند پارامتر اصلی در انتخاب نوع روان کننده شامل میزان کارایی مورد نظر و مقدار دوز مصرفی، سازگاری با سیمان پرتلند و نوع روان کننده می باشد که بعد از بررسی تأثیر و تغییر چند نوع روان کننده بهترین گزینه جهت ساخت بتن موردنظر استفاده از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات با نام تجاری PC 5000 مطابق با استاندارد اروپایی EN-934-2 است. برای تولید یک مخلوط بتن خودتراکم از استارچ اتر<sup>۲</sup> به عنوان اصلاح کننده لزجت استفاده شده است. جدول ۳ خصوصیات ابر روان کننده، عامل اصلاح لزجت را نشان می دهد.

جدول ۳: خصوصیات ابر روان کننده، عامل اصلاح لزجت

افزودنی شیمیایی	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	گرانروی (پوآز)	PH خلوص	غلظت (%)
ابر روان کننده	۱/۱۰	-	-	۲۰
VMA	۱/۰۷	۴۰۰۰	۱۰	-

## ۲-۶- الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار

ترک های ناشی از جمع شدگی پلاستیک بعد از گیرش بتن ایجاد می شود. این ترک ها مسیری جهت هجوم مواد مضر به قسمت های داخلی بتن ایجاد می کند که در نهایت می تواند منجر به فساد، تخریب و از بین رفتن بتن گردد. در این پژوهش به منظور جلوگیری از ترک خوردگی بتن از الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار استفاده شده است. شکل ۱ و جدول ۴ به ترتیب شکل و مشخصه های مکانیکی و هندسی الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار را نشان می دهند.



شکل ۱: نمونه الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار

جدول ۴: مشخصات مکانیکی و هندسی الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب دار

نوع	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	طول (mm)	مدول الاستیسیته (MPa)
پلی پروپیلین	۴۰۰	۰/۹	۱۲	۳۶۰۰
فولادی قلاب دار	۸۰۹	۱/۵۰	۵۰	۴۴۰۰

## ۳- نسبت های اختلاط

برای تعیین نسبت های اختلاط از طرح مخلوط های ارایه شده توسط ICAR استفاده شد [۱۹]. طرح مخلوط ها مبتنی بر تغییر دوز VMA (طرح V) و تغییر درصد الیاف (طرح F) انجام شد. طرح مخلوط ها با توجه به نتایج آزمایشات مقدماتی، در جدول ۵ و ۶ آورده

<sup>2</sup> Stretch ether

شده است. در طرح V در شرایط یکسان، ۲۰ طرح مخلوط (از هر طرح ۶ نمونه مکعبی، در مجموع ۱۲۰ نمونه) بتن خود تراکم ساخته شده که فقط درصد VMA در آنها تغییر می کند. دوز مصرفی VMA ۰/۰۸ ، ۰/۱۲ ، ۰/۱۶ ، ۰/۲۰ و ۰/۲۴ درصد وزن آب است. شایان ذکر است که دوز مصرفی الیاف پلی پروپیلین ۰/۱۲۵ درصد و مقدار الیاف فولادی قلاب دار ۱/۵ درصد وزنی سیمان در نظر گرفته شده است.

جدول ۵: طرح اختلاط بتن با تغییر VMA (طرح V)

جزء	مقدار Kg/m <sup>3</sup>
سیمان	۴۰۰
ماسه (۰mm-۴/۷۵mm)	۸۷۲
شن نوع اول (۴mm-۹/۵mm)	۵۰۰
شن نوع دوم (۹/۵mm-۱۹/۵mm)	۲۱۴
آب	۱۶۶
پودر سنگ	۱۷۵
روان کننده (۳/۵٪ جرم سیمان)	۱۴
الیاف پلی پروپیلین	۰/۵
الیاف فولادی قلاب دار	۶
VMA	متغیر

در طرح F، ۲۲ طرح مخلوط با نسبت های الیاف (پلیمری) صفر، ۰/۱ ، ۰/۱۲۵ ، ۰/۱۵ ، ۰/۱۷۵ و ۰/۲ درصد و نسبت الیاف فولادی ۰/۵۰ ، ۱/۰ ، ۱/۵۰ ، ۲/۰ و ۲/۵۰ درصد وزن سیمان ساخته شد. از هر طرح ۶ نمونه مکعبی و ۲ نمونه استوانه ای (در مجموع ۱۷۶ نمونه) ساخته شده است.

جدول ۶: طرح اختلاط بتن با تغییر الیاف (طرح F)

جزء	مقدار Kg/m <sup>3</sup>
سیمان	۴۰۰
ماسه (۰mm-۴/۷۵mm)	۸۷۲
شن نوع اول (۴mm-۹/۵mm)	۵۰۰
شن نوع دوم (۹/۵mm-۱۹/۵mm)	۲۱۴
آب	۱۶۶
پودر سنگ	۱۷۵
روان کننده (۳/۵٪ جرم سیمان)	۱۴
الیاف پلی پروپیلین	متغیر
الیاف فولادی قلاب دار	متغیر
VMA	۰/۲۶۶

### ۳-۱- مراحل اختلاط بتن های خود تراکم

سعی گردید تا مراحل ساخت برای کلیه بتن ها تا جای ممکن به طور یکسان انجام شود. تمهیدات در نظر گرفته شده برای این امر، شامل یکسان بودن اپراتورهای انجام آزمایش ها، ساخت بتن های هر سری در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه، انتخاب مصالح از پیمانانه های یکسان، دقت در رطوبت مصالح سنگی و نیز طی کردن مراحل ساخت و انجام آزمایش های یکسان برای هر بتن می باشند.

بدین ترتیب قبل از شروع به ساخت بتن، ابتدا رطوبت سنگدانه های ریز و درشت تعیین شد. بر اساس نتایج رطوبت سنگدانه ها، نسبت های ترکیب مخلوط که در حالت رطوبت اشباع با سطح خشک مشخص شده بودند، تصحیح گردید. در نهایت نسبت های ترکیب برای ساخت بتن با حجم ۰/۰۳ متر مکعب بر اساس طرح مخلوط تصحیح شده، محاسبه شده و برای ساخت مخلوط بتن به طور کاملاً دقیق توزین شد.

برای ساخت بتن، ابتدا سیمان و پودر سنگ به مدت ۳۰ ثانیه درون میکسر مخلوط می‌شود. سپس الیاف باز شده را همراه با سنگدانه درون همزن دیگ ثابت ریخته، بعد از گذشت ۲ دقیقه  $\frac{1}{2}$  وزنی آب به همراه روان کننده به مخلوط اضافه شد.  $\frac{1}{2}$  دیگر از آب بعد گذشت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شده و مقدار آب باقی مانده را همراه با VMA بعد از گذشت ۱ دقیقه به درون میکسر اضافه کرده و به بتن اجازه داده می‌شود که به مدت ۲ دقیقه درون میکسر مخلوط شود.

#### ۴- روش انجام آزمایش‌ها

##### ۴-۱- آزمایش‌های بتن تازه

برای بررسی کامل وضعیت بتن‌های خودتراکم در حالت تازه، آزمایش‌های گوناگون برای تعیین هر یک از خواص اصلی بتن خودتراکم انجام گرفت. برای بررسی قابلیت پرکنندگی آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50 و قیف V، و برای بررسی قابلیت عبور از آزمایش جعبه‌ی L استفاده شد.

آزمایش جریان اسلامپ و T50 از پرکاربردترین آزمایشات بتن خودتراکم بوده و روشی برای سنجش قابلیت جریان بتن خود تراکم می‌باشد. روش آزمایش به این ترتیب است که مخروط اسلامپ را در مرکز صفحه‌ای مسطح قرار داده و آنرا بدون هیچ‌گونه ضربه یا تراکم داخلی و خارجی از بتن پر می‌شود. پس از پر شدن مخروط سطح آن را صاف کرده و سپس مخروط را به آرامی و با سرعتی ثابت بالا کشیده و به بتن اجازه داده می‌شود که تحت اثر وزن خود حرکت کند و پخش شود. زمانی که قطر بتن به ۵۰۰ میلی‌متر رسید، زمان را ثبت کرده و به عنوان زمان آزمایش T50 ثبت می‌شود. بعد از اینکه بتن از حرکت ایستاد، دو قطر عمود بر هم را اندازه‌گیری کرده و میانگین آن به عنوان عدد آزمایش جریان اسلامپ گزارش می‌شود. لازم به ذکر است که در حین انجام آزمایش هرگونه جداشدگی و آب- انداختگی باید بررسی شود. آزمایش قیف V روشی برای سنجش توانایی پرکنندگی بتن خود تراکم است. در این آزمایش زمان از عوامل مهمی است که می‌بایست به دقت به آن توجه داشت. پخش‌شدگی در این آزمایش درجه چسبندگی مخلوط بتن را نشان می‌دهد. روش آزمایش به این صورت است که ابتدا قیف در جای تمیز و صاف به صورت عمودی و حدوداً ۵۰۰ میلی‌متر بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرد. سطح داخلی قیف را مرطوب کرده و دریچه‌ی انتهایی قیف بسته می‌شود. سپس ۱۲ لیتر بتن بدون اعمال هیچ‌گونه ضربه درون قیف ریخته شده و قیف کاملاً پر می‌شود. سطح قیف را صاف کرده، دریچه‌ی زیرین قیف را باز کرده و زمان تخلیه‌ی کامل بتن ثبت می‌شود. در این آزمایش، دقت در نحوه تخلیه‌ی بتن بسیار حائز اهمیت است. آزمایش جعبه‌ی L، برای سنجش توانایی عبور بتن خود تراکم انجام می‌شود. در این آزمایش جداشدگی یا عدم جداشدگی به وضوح دیده می‌شود. برای انجام این آزمایش ابتدا جعبه تراز شده و دریچه جعبه بسته می‌شود. سپس قسمت عمودی جعبه با ۱۲ لیتر بتن بدون هیچ‌گونه تراکمی پر می‌شود. بعد از پر شدن جعبه سطح آن را صاف کرده، دریچه را بالا کشیده و به بتن اجازه داده می‌شود که تحت اثر وزن خود حرکت کند. بعد از توقف بتن، ارتفاع بتن را در قسمت افقی در سه نقطه اندازه‌گیری کرده و متوسط آن را  $\Delta H$  می‌نامیم. سپس ارتفاع بتن مانده در قسمت عمودی (H1) را اندازه‌گیری کرده و از رابطه‌ی (H1)  $\Delta H$  عدد آزمایش جعبه L به دست می‌آید. شکل ۲ الف، ب و پ به ترتیب وسایل آزمایش جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۲: الف- آزمایش جریان اسلامپ؛ ب- آزمایش قیف V؛ پ- آزمایش جعبه‌ای L

#### ۴-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

مقاومت فشاری بتن‌ها بر اساس استاندارد BS 1881:PART 116 [۲۰] در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه با استفاده از نمونه‌های مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متری اندازه‌گیری شد. نمونه‌گیری بدون اعمال هرگونه انرژی خارجی انجام گرفت. نمونه‌ها پس از ۴۸ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش مطابق استاندارد تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. شکل ۳ عمل‌آوری نمونه‌ها و آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۳: عمل‌آوری نمونه‌ها و آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت کششی با اعمال نیروی فشار قطری روی طول نمونه استوانه‌ای به ابعاد  $300 \times 150$  میلی‌متر در سن ۲۸ روزه با سرعت استاندارد، تا گسیختگی نمونه انجام می‌شود. بارگذاری قطری، نیروی کششی را روی سطح عمود بر جهت اعمال بار وارد می‌کند. مقاومت کششی از رابطه  $\frac{2p}{\pi LD}$  محاسبه می‌شود. شکل ۴ نحوه‌ی انجام آزمایش کششی را نشان می‌دهد. در این رابطه P نیروی وارده به نمونه و L و D به ترتیب طول و قطر نمونه است.





شکل ۴: آزمایش مقاومت کششی

چنانچه بتن تازه بتواند آزادانه حرکت کند هیچگونه تنشی به علت تغییرات حجمی ناشی از هیدراتاسیون و خشک شدن در آن ایجاد نمی‌شود. با این وجود، در عمل، بدنه بتن یا توسط قید خارجی (نظیر پی سنگی) و یا توسط قید داخلی (نظیر تغییر شکل های تفاضلی) در نواحی مختلف، مقید می‌گردد. به عنوان مثال در یک پی صلب، قید کاملی در فصل مشترک بتن و سنگ بستر وجود دارد و با افزایش فاصله از ناحیه فصل مشترک، میزان قید کاهش می‌یابد [۱۱].

در این پژوهش برای بررسی ترک خوردگی، قالب مناسبی که بتواند قیود اجرایی را شبیه سازی نماید طرح شده است. با توجه به روابط حاکم بر هندسه قالب و میزان تقید و ترک خوردگی، قالب هایی با ابعاد  $5 \times 60 \times 90$  سانتی متر طرح شد. در این قالب در دو جهت عمود بر هم قیدهایی تعبیه شده است. این قیدها با ارتفاع  $2/5$  سانتی متر حرکت بتن خود تراکم را محدود کرده و پتانسیل ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. در طراحی هر قالب دال ۸ قید در نظر گرفته شد. در طول این آزمایش شرایط محیطی مانند دما و رطوبت ثابت نگه-داشته شد و بعد از بتن ریزی در دال، بتن به مدت ۶ ساعت در معرض باد قرار گرفت. مساحت ترک‌ها با ضرب طول در عرض ترک بعد از گذشت هفت روز اندازه‌گیری شد. طول ترک به وسیله‌ی نوار اندازه‌گیری با دقت ۱ میلی‌متر و عرض ترک با ذره‌بین مدرج با دقت ۰,۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل ۵ قالب دال و نحوه‌ی اندازه‌گیری عرض ترک را نشان می‌دهد. شکل ۶ ذره بین مدرج را نشان می‌دهد.



شکل ۵: قالب دال و چگونگی اندازه‌گیری عرض ترک



شکل ۶: ذره بین مدرج

شکل ۷ ترک خوردگی دال را نشان می‌دهد.



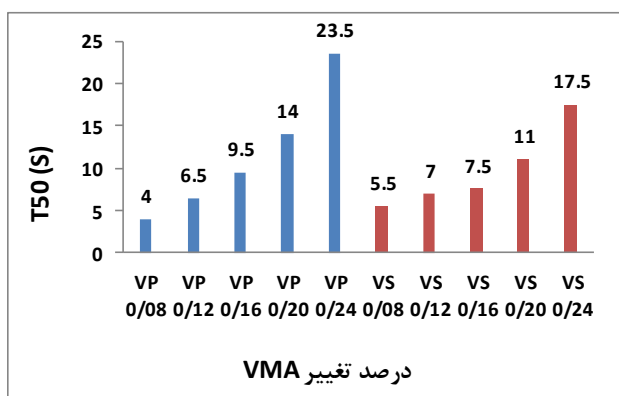
شکل ۷: ترک خوردگی دال

## ۵- نتایج

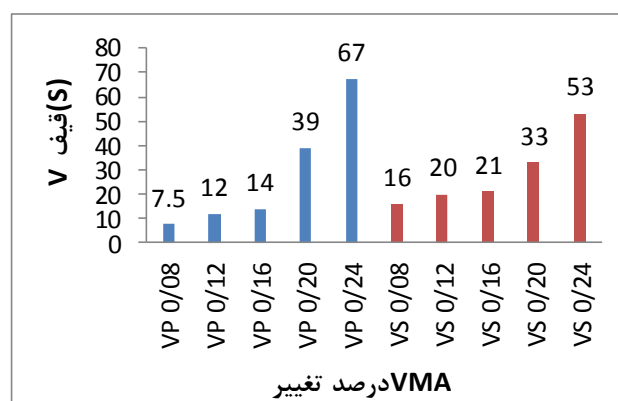
### ۵-۱ تاثیر VMA بر خواص بتن تازه خودتراکم الیافی

برای بررسی خواص تازه بتن با اضافه کردن VMA، ۲۰ مخلوط بر اساس یک طرح پایه طراحی گردید. به این منظور دو دسته بتن خودتراکم الیافی با دوز ۰/۱۲۵ درصد (وزنی سیمان) برای الیاف پلیمری (VP) و ۱/۵ درصد (وزنی سیمان) برای الیاف فولادی قلابدار (VS) ساخته شد، که در هر کدام از آنها از درصدهای مختلف VMA (۰/۰۸، ۰/۱۲، ۰/۱۶، ۰/۲ و ۰/۲۴ درصد وزنی آب) استفاده شد. شکل ۸ میانگین آزمایش جریان اسلامپ و شکل ۹ میانگین آزمایش T50 را نشان می‌دهد.

با اضافه کردن VMA قطر پهن‌شدگی بتن کاهش می‌آید. با توجه به استاندارد افنارک حداقل جریان اسلامپ قابل قبول ۶۰۰ میلی‌متر است [۲۱]. پس دوز VMA ۰/۲ و ۰/۲۴ در بتن مسلح به الیاف پلیمری دوز ۰/۲۴ در بتن مسلح به الیاف فولادی شرایط خودتراکمی را برآورده نمی‌سازد. همچنین دوز ۰/۰۸ و ۰/۱۲ درصد وجود آب‌انداختگی و جداسازی رد می‌شوند. شکل ۱۰ بتن آب‌انداخته را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که افزایش مقدار VMA باعث افزایش مدت زمان T50 می‌شود. شکل ۱۱ بتن با ویسکوزیته زیاد را نشان می‌دهد.



شکل ۹: نتایج آزمایش T50 با تغییرات دوز VMA



شکل ۸: نتایج آزمایش جریان اسلامپ با تغییرات دوز VMA

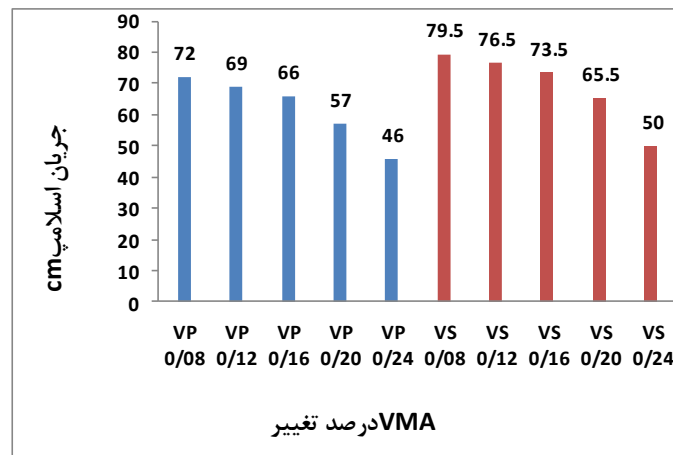


شکل ۱۰: بتن در معرض آب انداختگی حاوی ۰/۰۸ درصد وزن آب VMA



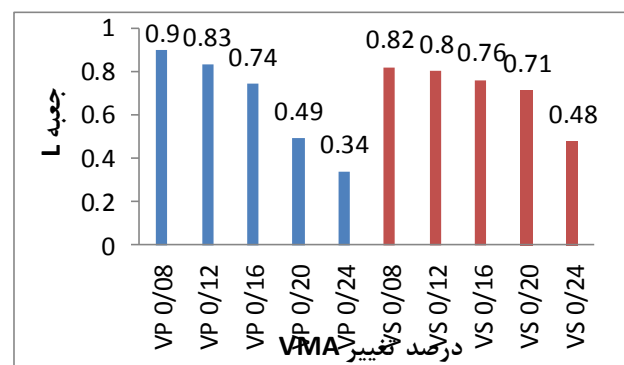
شکل ۱۱: بتن با ویسکوزیته بالا حاوی ۰/۲۴ درصد وزن آب VMA

نتایج نشان می‌دهد که وجود الیاف باعث کاهش قطر پهن شدگی بتن در آزمایش جریان اسلامپ می‌شود. همچنین وجود الیاف مدت زمان آزمایش T50 را افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش قیف V هر دودسته بتن الیافی در شکل ۱۲ آمده است



شکل ۱۲: نتایج آزمایش قیف V با تغییرات VMA (ثانیه)

بر اساس مشاهدات افزایش دوز مصرفی VMA، مدت زمان تخلیه بتن از قیف V افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش دوز VMA قابلیت پرکنندگی را در بتن کاهش می‌دهد. استاندارد افنارک حداکثر مدت زمان تخلیه کامل (قیف V) بتن را ۳۰ ثانیه عنوان می‌کند. می‌توان دریافت که مدت زمان قیف V در دوز مصرفی ۰/۲ و ۰/۲۴ درصد در بتن الیافی پلی پروپیلین و مدت زمان در دوز مصرفی ۰/۲۴ درصد در بتن مسلح به الیاف فولادی از نظر استاندارد افنارک مورد تایید نمی‌باشند. اما سایر بتن‌ها در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه هستند. شکل ۱۳، متوسط اطلاعات آزمایش جعبه L را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: نتایج آزمایش جعبه L با تغییرات دوز VMA

این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش دوز VMA عدد آزمایش جعبه L در هر دو دسته بتن خودتراکم کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که این اتفاق در بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلیمری نسبت به الیاف فولادی چشم‌گیرتر است. استاندارد افنارک حداقل مقدار قابل قبول قابلیت عبور (جعبه L) را ۰/۷۰ عنوان می‌کند، بنابراین در بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلیمری دوزهای ۰/۲ و ۰/۲۴ درصد طبق استاندارد غیرقابل پذیرش است. دوز مناسب VMA در بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلین بین ۰/۱۴ تا ۰/۱۸ درصد وزن

آب است. در بتن خودتراکم مسلح با الیاف فولادی مقدار دوز ۰/۲۴ درصد VMA غیرقابل قبول است و شرایط استاندارد را برآورده نمی‌کند. دوز مناسب VMA در این بتن بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۰ درصد وزن آب در نظر گرفته می‌شود.

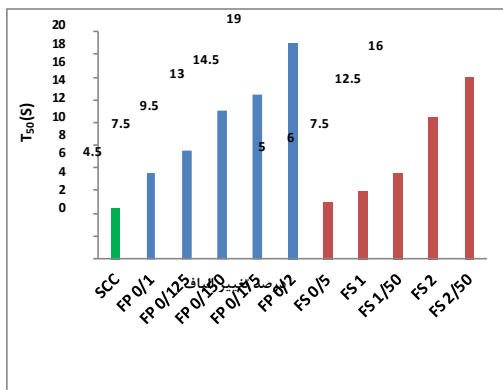
در دوزهای مصرفی ۰/۰۸ و ۰/۱۲ درصد VMA، بتن به علت وجود آب انداختگی رد می‌شود. در دوزهای ۰/۲ و ۰/۲۴ درصد به علت بالا رفتن VMA ویسکوزیته بتن بالا می‌رود، چرا که VMA آب را در خود جذب می‌کند. عملکرد VMA به این صورت است که مقداری از آب را در خود جذب کرده و گرانیروی بتن را افزایش می‌دهد.

## ۵-۲- تأثیر الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب‌دار بر خواص تازه و سخت‌شده بتن خودتراکم

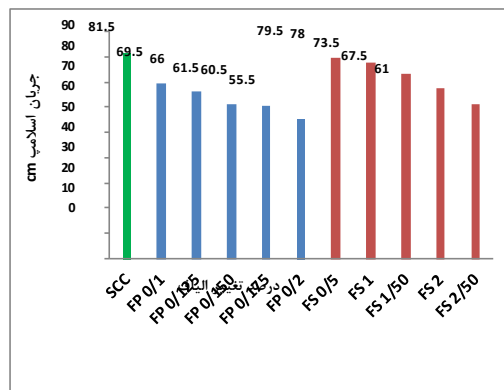
برای بررسی تأثیر الیاف بر خواص تازه بتن خودتراکم ۱۲ نمونه بتن خودتراکم با الیاف پروپیلین با دوز مصرفی (۰/۱) درصد، ۰/۱۲۵ درصد، ۰/۱۵۰ درصد، ۰/۱۷۵ درصد و ۰/۲۰ درصد) وزن سیمان (FP) و ۱۲ نمونه بتن خودتراکم مسلح به الیاف فولادی قلاب‌دار با دوز مصرفی (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵۰، ۲/۰، ۲/۵۰ درصد وزن سیمان) (FS) ساخته شد که فقط درصد الیاف مصرفی در آنها تغییر می‌کند و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند. سپس آزمایش‌های مختلف بتن تازه و مقاومت فشاری و کششی و میزان ترک انقباضی بر روی آن انجام می‌شود.

### ۵-۲-۱- خواص بتن تازه

شکل ۱۴ نتایج آزمایش جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم معمولی و الیافی (پلیمری و فولادی قلاب‌دار) را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۵ نتایج آزمایش T50 را به تصویر می‌کشد.

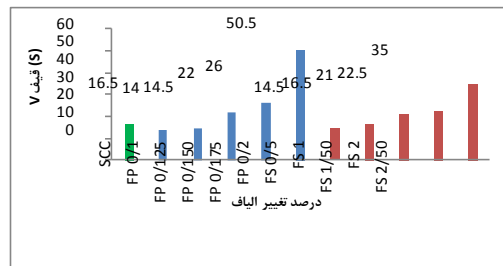


شکل ۱۵: نتایج آزمایش T50 با تغییرات دوز الیاف



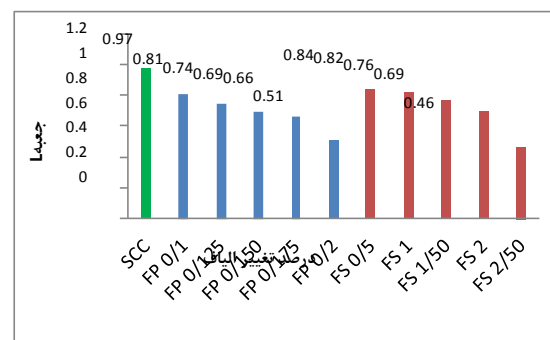
شکل ۱۴: نتایج آزمایش جریان اسلامپ با تغییرات دوز الیاف

نتایج نشان می‌دهد که وجود الیاف باعث کاهش قطر پهن‌شدگی در آزمایش جریان اسلامپ می‌شود. همچنین نتایج بیانگر این خواهد بود که با افزایش دوز مصرفی الیاف مدت زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. با رجوع به استاندارد افنارک [۲۱] می‌توان گفت که بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلین شرایط خود تراکمی را ندارد؛ چرا که حداقل جریان اسلامپ طبق این استاندارد ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱۶ مقدار متوسط آزمایش قیف V را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: نتایج آزمایش قیف V با تغییرات دوز الیاف

در دوز ۰/۱ و ۰/۱۲۵ الیاف پلیمری مدت زمان قیف V کاهش یافته سپس افزایش می‌یابد. در این دوزها اصطکاک بتن با جداری قیف کاهش یافته و تخلیه را راحت‌تر می‌کند. اما در دوزهای ۰/۱۵، ۰/۱۷۵ و ۰/۲ چسبندگی بین خود بتن بیشتر شده و مدت زمان تخلیه را افزایش می‌دهد. با افزایش دوز الیاف فولادی مدت زمان خروج بتن کاسته می‌شود، که در دوز ۲/۵۰ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. علت، مسدود شدن مجرای خروجی قیف با افزایش دوز الیاف فولادی قلاب‌دار است. طبق استاندارد دوز ۰/۲ از الیاف پلیمری و ۲/۵ از الیاف فولادی قلاب‌دار قابل قبول نخواهد بود. مقدار متوسط آزمایش جعبه L در شکل ۱۷ بیان شده است. در این آزمایش جداسازی یا عدم جداسازی به وضوح دیده می‌شود.



شکل ۱۷: نتایج آزمایش جعبه L با تغییرات دوز الیاف

با توجه به شکل ۱۷ می‌توان دریافت که افزایش دوز مصرفی الیاف پلی پروپیلین و فولادی قلاب‌دار باعث کاهش مقدار جعبه L و کارایی بتن می‌شود. توانایی عبور، یکی از خصوصیت مهم برای بتن‌های خود تراکم به شمار می‌رود. با آزمایش جعبه L می‌توان مقدار آب‌انداختگی را نیز کنترل کرد؛ چرا که اگر بتن آب‌انداختگی داشته باشد در قسمت قائم بلوکه شده و آب به قسمت افقی حرکت می‌کند. بنابراین دوز الیاف ۰/۱۷۵ و ۰/۲ برای بتن حاوی الیاف پلیمری و دوز ۲/۵۰ برای الیاف فولادی شرایط بتن خودتراکم را ارضا نمی‌کند.

### ۵-۲-۲- صحت سنجی نتایج بتن تازه

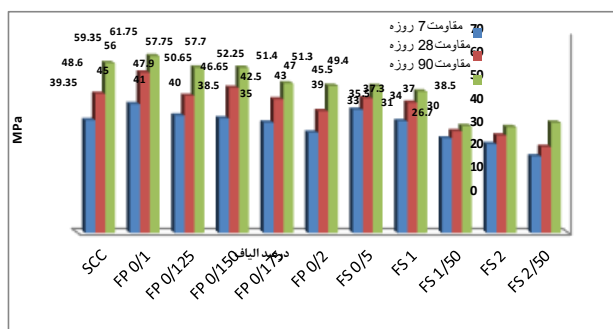
پس از انجام آزمایشات بتن تازه، به منظور صحت سنجی مقایسه نتایج آزمایشات بتن تازه با نتایج خالو و همکاران انجام شد. خلاصه نتایج مقایسه در جدول ۷ داده شده است [۱۵]. مقایسه نتایج همخوانی خوبی را با نتایج قبلی نشان می دهد.

جدول ۷: مقایسه نتایج آزمایشات بتن تازه با نتایج خالو و همکاران

نسبت حجمی الیاف فولادی (%)	جریان اسلامپ mm		T50(s)		قیف V (s)		جعبه L
	مقاله همکاران حاضر [۱۵]	خالو و همکاران حاضر [۱۵]	مقاله همکاران حاضر [۱۵]	خالو و همکاران حاضر [۱۵]	خالو و همکاران حاضر [۱۵]	مقاله همکاران حاضر [۱۵]	
۰	۸۱۵	۷۸۰	۴،۵	۲	۱۶،۵	۴،۵	۰،۸۳
۰،۵	۶۹۵	۷۶۰	۵	۲،۶۵	۱۴،۵	۶،۵	۰،۸
۱،۰	۶۶۹	۷۰۰	۶	۲،۶۸	۱۶،۵	۱۰،۵	۰،۷۴
۱،۵	۶۱۵	۶۷۰	۷،۵	۲،۹	۲۱	۱۶،۳	۰،۷۱
۲	۶۰۵	۶۳۰	۱۲،۵	۳،۳۵	۲۲،۵	۱۹	۰،۶۴

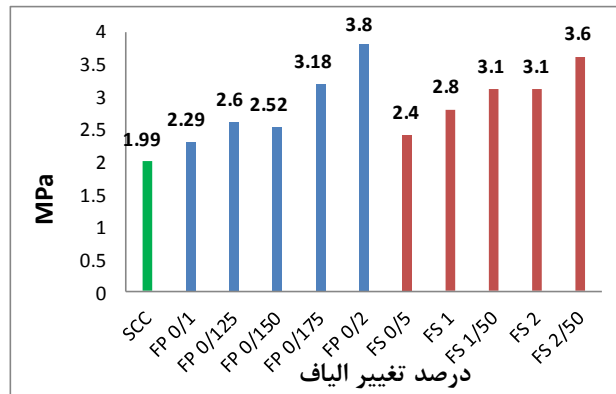
### ۵-۲-۳- خواص بتن سخت شده

نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. شکل ۱۸ مقدار متوسط مقاومت فشاری در سنین مختلف را نشان می دهد.



شکل ۱۸: نتایج آزمایش های مقاومت فشاری با تغییرات دوز الیاف (مگاپاسکال)

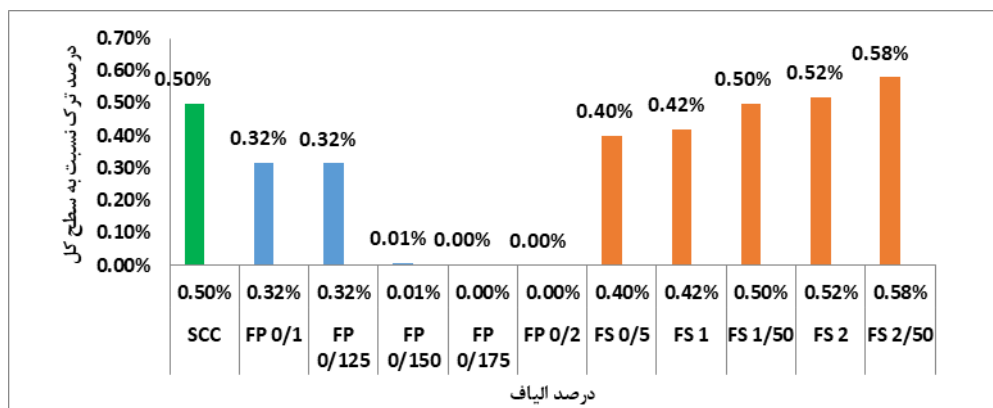
همچنین شکل ۱۹ میانگین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه را نشان می دهد.



شکل ۱۹: میانگین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه (مگاپاسکال)

با افزایش دوز مصرفی الیاف پلیمری تا ۰/۱۵۰ درصد، مقاومت در سن ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته و بعد از این دوز، کاهش می‌یابد. در سن ۹۰ روزه این قضیه در دوز ۰/۱ اتفاق می‌افتد. افزایش دوز مصرفی الیاف فولادی قلاب‌دار باعث کم شدن مقاومت فشاری در همه سنین می‌شود. علت این پدیده، ایجاد ناحیه انتقال ناشی از حضور الیاف فولادی در بتن می‌باشد. همچنین افزودن الیاف پلیمری و فولادی باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. این افزایش در بتن حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار بیشتر است.

برای تمامی بتن‌های ساخته شده با دوزهای مختلف الیاف، آزمایش ترک خوردگی دال صورت گرفت. شکل ۲۰ درصد ترک خوردگی سطحی نسبت به سطح کل را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰: درصد ترک خوردگی سطحی نسبت به سطح کل (بتن شاهد (SCC) ۰/۵۰٪)

شکل ۲۰ به وضوح کاهش ترک خوردگی ناشی از افزایش دوز الیاف پلی پروپیلین را نشان می‌دهد. به طور مثال با افزودن ۰/۱ درصد وزنی سیمان الیاف، ترک‌ها به میزان ۱۴ درصد کاهش می‌یابند. جالب توجه است که افزودن الیاف پلیمری به بتن خودتراکم معمولی



با دوز ۰/۱۷۵ درصد ترک‌ها را تا ۹۶/۴۰ درصد کاهش می‌دهد. نتایج آزمایشات حاکی از آن است که عرض ترک نیز با افزایش دوز الیاف مصرفی به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. اطلاعات به دست آمده نشانگر این است که با افزایش میزان دوز مصرفی الیاف پلی‌پروپیلین ترک‌خوردگی ناشی از انقباض خمیری کاهش می‌یابد. در بتن با میزان دوز مصرفی ۰/۲ درصد هیچ‌گونه ترک‌خوردگی یافت نشد. همچنین نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش میزان دوز الیاف فولادی قلاب‌دار ترک‌خوردگی سطحی در بتن افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که الیاف فولادی باعث آشفته‌گی ماتریس سیمان می‌شود. لزوم عدم ویبره به تشدید مساله کمک می‌کند.

الیاف پلی‌پروپیلین در دوزهای پایین ترک را کم کرده، ولی نتوانسته این ترک‌ها را کاملاً حذف کند. علت این امر می‌تواند پخش تصادفی الیاف باشد. در دوزهای بالا ترک‌ها در بتن به شدت کاهش داشته یا حذف شده‌اند؛ اما این بتن‌ها کارایی کمی دارند و در جاهایی که تراکم آرماتور زیاد است، به صورت خودتراکم قابل استفاده نیستند.

الیاف پلیمری جذب آب ندارند؛ اما زمانی که در معرض آب قرار می‌گیرند، چسبندگی سطحی با اجزای بتن ایجاد کرده و حرکت بتن را کاهش می‌دهند. در خصوص مقاومت فشاری و کششی بتن خودتراکم مسلح به الیاف پلی‌پروپیلین می‌توان گفت که افزودن این الیاف به بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت کششی می‌شود. دلیل کاهش کارایی در بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار توده شدن الیاف و جلوگیری از حرکت بتن می‌باشد. همچنین افزودن الیاف فولادی قلاب‌دار باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت کششی و افزایش درصد ترک‌خوردگی بتن می‌شود.

نتایج آزمایش‌های بتن خود تراکم با تغییرات دوز الیاف نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلین و فولادی قلاب‌دار در بتن خود تراکم معمولی باعث کاهش قطر جریان اسلامپ و افزایش مدت زمان آزمایش T50 می‌شود. این مساله در الیاف پلیمری به علت چسبندگی زیادی که بین خود الیاف (در تماس با آب) وجود دارد شدیدتر از الیاف فولادی است. در آزمایش قیف V، افزودن الیاف پلیمری با دوز کم به بتن خود تراکم مدت زمان تخلیه ی بتن را کاهش داده اما از دوز ۰/۱۲۵ درصد به بعد این مدت زمان افزایش یافته است. علت این امر اینست که با زیاد شدن الیاف پلیمری در بتن اصطکاک بتن با جداره را کاهش داده و باعث افزایش مدت زمان خروج بتن می‌شود. با اضافه کردن دوز الیاف فولادی قلاب‌دار مدت زمان تخلیه بتن افزایش می‌یابد. علت این موضوع انباشته شدن الیاف فولادی در قسمت خروج بتن است. چنین رفتاری درون قالب و بین آرماتورها نیز قابل انتظار است. با بررسی نتایج آزمایش جعبه L می‌توان دریافت که افزودن هر دو نمونه الیاف به بتن باعث کاهش مقادیر این آزمایش می‌شود.

آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلیمری (تا دوز ۰/۱۵۰ درصد) مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. افزودن میزان بیشتر الیاف منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود. افزودن الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. افزودن هر دو نمونه الیاف باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. در نهایت با افزودن الیاف پلیمری به بتن خود تراکم ترک خوردگی به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد این در حالی است که با افزودن الیاف فولادی ترک خوردگی افزایش یافته است. دلیل افزایش ترک خوردگی می‌تواند آشفته شدن ماتریس سیمان باشد. نتایج این تحقیق در بخش الیاف فولادی همخوانی خوبی با سایر تحقیقات در بتن خود تراکم دارد. نتایج رنجبر و همکاران نشان داد که نسبت به طرح شاهد، با افزایش حجم الیاف، جریان اسلامپ و مقدار جعبه L کاهش یافته و مقادیر T50، زمان خروج کامل بتن از قیف V کاهش، افزایش یافته است. آنها افزایش مقاومت کششی و خمشی را با افزودن مقادیر الیاف، گزارش داده اند اما افزایش محسوسی در مقاومت فشاری گزارش نشده است [۲۲]. همچنین خالو و همکاران نشان داده اند که افزایش الیاف فولادی باعث کاهش کارایی و سایر مشخصه‌های رئولوژی بتن خود تراکم می‌شود. آنها افزایش مقاومت کششی و فشاری و کاهش مقاومت فشاری را با افزایش الیاف فولادی گزارش کرده اند [۱۵]. به این ترتیب صحت نتایج در بتن‌های خود تراکم قابل اثبات است.

لازم به ذکر است که در نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه در بتن‌های معمولی اختلافاتی مشاهده می‌شود که ناشی از لزوم حفظ شرایط خود تراکمی و عدم ویبره در بتن SCC می‌باشد. به عنوان مثال نتایج کار واقعی و فولادی در بتن معمولی، بیانگر این است که بیشترین مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب، در ۱ و ۲ درصد الیاف پلی‌پروپیلین اتفاق افتاده است. درحالی‌که الیاف فولادی باعث افزایش

مقاومت فشاری و خمشی نمونه های بتنی گردیده و بیشترین مقاومت فشاری و خمشی برای نمونه های بتنی مسلح به الیاف فولادی به ترتیب در ۲ و ۳ درصد الیاف مشاهده شده است [۲۳].

## ۶- نتیجه گیری

نتایج آزمایش های بتن تازه با تغییر دوز VMA با هر دو نوع الیاف پلیمری و فولادی قلاب دار نشان داد که با اضافه شدن دوز VMA در هر دو دسته مخلوط جریان پذیری بتن کاهش یافته و مدت زمان آزمایش T50 افزایش می یابد. نتایج آزمایش قیف V نشان داد که مدت زمان تخلیه بتن با افزایش دوز VMA در هر دو دسته افزایش می یابد. نتایج آزمایش جعبه L نیز نشان داد که با افزایش دوز VMA قابلیت عبور بتن در هر دو دسته کاهش می یابد. افزودن VMA آب انداختگی بتن را کنترل می کند.

دوز مناسب VMA برای بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلین بین ۰/۱۴ تا ۰/۱۸ درصد وزن آب بوده و دوز مناسب VMA در بتن خود تراکم با الیاف فولادی قلاب دار بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۰ درصد وزن آب است.

در این مقاله سه موضوع مورد بررسی قرار گرفت: تاثیر مواد اصلاح کننده لزجت خواص بتن خود تراکم الیافی؛ تاثیر الیاف بر خواص تازه بتن خود تراکم و تاثیر الیاف بر خواص سخت شده بتن خود تراکم. نتیجه این پژوهش می تواند زمینه ساز تولید بتن خود تراکم الیافی با خواص تازه و سخت شده مناسب باشد. این پژوهش نشان داد که ساخت بتن خود تراکم الیافی با خواص مناسب امکان پذیر است. به طور جزئی تر می توان نتیجه را به صورت زیر بیان کرد:

۱- در بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلین، دوز مناسب VMA برای بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلین بین ۰/۱۴ تا ۰/۱۸ درصد وزن آب است. میزان مناسب الیاف پلی پروپیلین در بتن ۰/۱ تا ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان توصیه می شود. این مقدار الیاف ضمن حفظ خواص خود تراکمی، به بهبود مقاومت و کاهش ترک خوردگی کمک می کند.

۲- استفاده از الیاف فولادی در بتن خود تراکم چندان قابل توصیه نیست. در صورت لزوم در بتن خود تراکم حاوی الیاف فولادی قلاب دار، دوز مناسب VMA در بتن خود تراکم با الیاف فولادی قلاب دار بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۰ درصد وزن آب است. الیاف فولادی در بتن به میزان ۱ تا ۲ درصد وزنی سیمان قابل استفاده است. این مقدار الیاف می تواند ضمن حفظ نسبی خواص خود تراکمی، به بهبود مقاومت و کاهش ترک خوردگی کمک می کند.

## سپاسگزاری

این پژوهش در آزمایشگاه بتن گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده است. نویسندگان از همکاری آقایان مهندس علیرضا دادپور و دکتر محمد صالحی ویسی کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

[1] Ponikiewski, T., & Gołaszewski, J. (2012). *The self-compacting properties of concrete mixture of cement with calcareous fly ash addition*. Cement Wapno Beton, 4, 233-242.

[2] Gholhaki, M., Kheyroddin, A., Hajforoosh, M. (2017). *The Effect of Magnetic Water and Different Pozzolanic Materials on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete*. Journal of Structural and Construction Engineering, (), -. doi: 10.22065/jsce.2017.77396.1073

- [3] Rahat Dahmardeh, S., Mirabimoghaddam, M., Sargazi Moghaddam, M. (2017). *Experimental evaluation on the performance of self-compacting concrete containing glass particles under sulfuric acid attack*. Journal of Structural and Construction Engineering, ( ), -. doi: 10.22065/jsce.2017.78162.1087
- [4] Nagataki, S., & Fujiwara, H. (1995). *Self-compacting property of highly flowable concrete*. Special Publication, 154, 301-314.
- [5] Leemann, A., & Winnefeld, F. (2007). *The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete*. Cement and Concrete Composites, 29(5), 341-349.
- [6] Xuli, F., & Chung, D. D. L. (1996). *Effect of methylcellulose admixture on the mechanical properties of cement*. Cement and Concrete Research, 26(4), 535-538.
- [7] Saric-Coric, M., Khayat, K. H., & Tagnit-Hamou, A. (2003). *Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range water reducer and cellulose-based viscosity modifier*. Cement and Concrete Research, 33(12), 1999-2008
- [8] Ponikiewski, T., & Katzer, J. (2014). *Properties of fresh SCC mix reinforced by different types of steel and polymer fibre*. Construction and Building Materials, 62, 96-101.
- [9] Nawy, E. G. (2001). *Fundamentals of high-performance concrete*. John Wiley & Sons.
- [10] Sademontazi, A., Tahmouresi, B., Saradar, A. (2017). *Effect of various fiber on early- age shrinkage cracks and mechanical strength of high strength concrete*. Journal of Structural and Construction Engineering, , -. doi: 10.22065/jsce.2017.88262.1223
- [11] Mehta, P. K. (1986). *Concrete. Structure, properties and materials*.
- [12] Soroushian, P. (1997). *Secondary Reinforcement--Adding Cellulose Fibers*. Concrete International, 19(6), 28-34.
- [13] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2012). *Tensile behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites, 34(2), 172-184.
- [14] Gencel, O., Brostow, W., Datashvili, T., & Thedford, M. (2011). *Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash*. Composite interfaces, 18(2), 169-184.
- [15] Khaloo, A., Raisi, E. M., Hosseini, P., & Tahsiri, H. (2014). *Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers*. Construction and Building Materials, 51, 179-186.
- [16] Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2015). *Use of synthetic fibers in self-compacting lightweight aggregate concretes*. Journal of Building Engineering, 4, 247-254.
- [17] Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E., & Shekarchi, M. (2017). *Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete*. Construction and Building Materials, 148, 833-845.
- [18] Tioua, T., Kriker, A., Barluenga, G., & Palomar, I. (2017). *Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment*. Construction and Building Materials, 154, 721-733
- [19] Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2007). *ICAR mixture proportioning procedure for self-consolidating concrete*.
- [20] BS 1881: Part 116, *Tasting concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes*
- [21] EFNARC, S. (2002). *Guidelines for self-compacting concrete*. London, UK: Association House, 32, 34.
- [22] Ranjbar, M., Ghasemzadeh Mosavinejad, S., Chatkhtab, S., Zakeri, M., Arayeshgar, M., Easapour, S. (2015). *Investigation of effect of steel fibers on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete with Scoria*. Concrete Research, 8(1), 41-54.
- [23] Vaghefi, M., Pouladi, A. (2015). *The Effects of Polypropylene, Steel and Glass Fibers on Compressive and Flexural Strength of Concrete Samples Using the Aggregates in Bushehr*. Concrete Research, 8(1), 129-142.