تحقیقات بتن
سال یازدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۹۷
ص ۱۵ – ۵
تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۶
تاریخ پذیرش: ۹۷/۵/۱۰

بررسی اثر تغییر نسبت های ترکیب و افزودنی ها بر خواص کارایی و رئولوژی بتن خودتراکم

پرویز قدوسی *
استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
امیرمسعود صالحی
استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی

چکیده
اگر چه بتن خودتراکم برای مدت زمانی حدود ۲ دهه است که توسعه یافته، اما همچنان استفاده وسیع و گسترده از آن محدود می‌باشد. یکی از مهمترین عوامل، عدم شناخت کامل خواص (بویژه در حالت تازه) این بتن و اثر تغییر نسبت های ترکیب مصالح و افزودنی ها بر عملکرد آن می باشد. در تحقیق حاضر با ساخت ۷ مخلوط بر اساس یک مخلوط پایه (با تغییر در نسبت های ترکیب و استفاده از افزودنی ها)، تغییر سه خاصیت اصلی کارایی (پرکنندگی، عبور و مقاومت جداشدگی)، پارامترهای رئولوژی با استفاده از رئومتر بتن خودتراکم و مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که کاهش حجم خمیر باعث ایجاد نامناسب ترین تغییرات بر بتن خودتراکم می گردد. بر اساس نتایج رئوگراف، افزایش همزمان ویسکوزیته و تنش جاری باعث کاهش مقاومت جداشدگی گردیده و برای بهبود مقاومت جداشدگی بتن، کاهش تنش جاری و کاهش ویسکوزیته می تواند مناسب باشد. از سوی دیگر بر اساس نتایج تحقیق حاضر، در بتن های خودتراکم با نسبت آب به سیمان یکسان، افزایش همزمان تنش جاری و ویسکوزیته بتن نشاندهنده مقاومت فشاری کمتر بتن ها می باشد.

واژه‌های کلیدی: **بتن خودتراکم، کارایی، خواص رئولوژی، مقاومت فشاری.**

* نویسنده مسئول: ghoddousi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

بتن خودتراکم که در سال ۱۹۸۸ توسعه یافته است، یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در صنعت ساختمان در سال‌های اخیر به شمار می‌رود. این نوع بتن، قابلیت جاری شدن داشته و حفرات مابین میلگردها و گوشه قالب‌ها را بدون نیاز به تراکم پر می‌کند. این بتن بصورت پیش ساخته و یا برای بتن‌ریزی در محل، قابل تولید و استفاده می‌باشد. از جمله مزایای بتن خودتراکم که یک بتن سازه‌ای با دوام است، به حداقل رساندن نیروی کار مورد نیاز و عدم وجود صدا، ناشی از تراکم بتن می‌باشد [۱].

برای دستیابی به بتن خودتراکم نه فقط نیازمند انعطاف پذیری خمیر یا ملات هستیم، بلکه باید مقاومت در برابر جداشدگی میان درشت‌دانه و خمیر، زمانی که بتن از مناطق محدود شده با میلگردها، عبور می‌کند، وجود داشته باشد. *Okamura* و *Ozawa* [۲] سه شاخص محدود کردن میزان سنگدانه ها، نسبت آب به سیمان پایین و استفاده از افزودنی فوق روان کننده را برای دستیابی به بتن خود تراکم مورد استفاده قرار دادند.

ملزومات کارایی برای بتن‌ریزی مناسب بتن خودتراکم شامل موارد زیر است:

۱) قابلیت پرکنندگی بالا که بتن قادر به پرکردن فضاهای محدود و گوشه‌ها با قابلیت دسترسی کم باشد.

۲) قابلیت عبور بالا که بتن قادر باشد از میان فضاهای کوچک میلگردهای مسلح کننده عبور کند.

۳) پایداری جداشدگی بالا که قادر به همگن ماندن بعد از جاری شدن، ریختن و عبور از میان موانع و ... باشد.

برای هر یک از مشخصه‌های کارایی (قابلیت پرکنندگی، قابلیت عبور و پایداری جداشدگی) روش‌های آزمایش متعددی وجود دارد. این آزمایش ها همگی پایه تجربی داشته و مشخصه های علمی ارائه نمی کنند. از این روی یک راه مناسب برای بررسی حالت تازه بتن (بویژه بتن خودتراکم) استفاده از علم رئولوژی می باشد [۶-۳].

رئولوژی بعنوان علم تغییر شکل[1] و جریان[2] تعریف می‌شود که در حال حاضر بخش مهمی از مطالعات علمی را به خود اختصاص داده است. آشنایی با این موضوع برای علوم زیادی که در خدمت صنعت می‌باشند از جمله پلاستیک‌ها، رنگ‌ها، جوهرهای پرینت، داروهای پاک‌کننده، نفت و روغن و ...، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. به دو شیوه امکان تقسیم‌بندی سیالات وجود دارد [۷] :

۱) بر اساس پاسخ به فشار اعمال شده خارجی

۲) بر اساس نحوه پاسخ به تنش برشی

بر اساس شیوه اول دسته‌بندی، مایعات به دو دسته قابل تراکم[3] و غیر قابل تراکم[4]، بسته به اینکه آیا حجم المانی از سیال متأثر از فشار وارده است یا خیر، تقسیم‌بندی می‌شوند. قابلیت تراکم بر مشخصات جریان گازها اثر گذار است، اما مایعات معمولاً جزء مواد غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده و نحوه پاسخ آنها به برش است که اهمیت بیشتری دارد. بر اساس پاسخ به برش، سیالات به دو دسته نیوتنی و غیر نیوتنی تقسیم بندی می شوند.

بتن را می‌توان بعنوان یک معلق[5] با محدوده وسیع از اندازه ذرات از ابعاد میکرونی مانند سیمان و دیگر ریزذرات تا ابعاد میلیمتر مربوط به درشت دانه‌ها در نظر گرفت. بنابراین خواص رئولوژی بتن تحت تأثیر نیروهای مختلف و نه فقط نیروها بر پایه نیروهای کلوئیدی، بین اجزاء مختلف عمل می‌کند. نیروهای مختلف عمل کننده میان اجزاء بتن که بر اساس اندازه ذرات است شامل نیروهای برشی و ثقلی بین ذرات درشت شن و ماسه، نیروهای موئینه بین ذرات ماسه ریز و نیروهای کلوئیدی بین ذرات سیمان، هیدرات ها، ذرات ریز سنگدانه می باشد.

بتن تازه با تقریب بسیار خوبی بعنوان سیال غیر نیوتنی بینگهام در نظر گرفته می‌شود. همچون کلیه مصالح ویسکوپلاستیک، در بتن نیز، در آغاز حرکت مستلزم فائق آمدن بر تنش جاری می‌باشند. پس از آغاز حرکت، یک رابطه خطی میان تنش برشی τ و نرخ برشی γ با شیب معادل ویسکوزیته پلاستیک وجود دارد. ویسکوزیته پلاستیک معمولا با نماد یونانی μ نشان داده می‌شود [۸-۱۰].

برای اندازه گیری خواص رئولوژی بتن از رئومتر استفاده می گردد. در حال حاضر یکی از پرکاربردترین انواع رئومتر، رئومترهای نسبی می‌باشند. در تحقیق حاضر برای اندازه گیری

[1] deformation
[2] flow
[3] compressible
[4] incompressible
[5] Suspension

خواص رئولوژی بتن از دستگاه رئومتر نسبی توسعه یافته در دانشگاه علم و صنعت ایران بهره برده شده است. دستگاه رئومتر قادر به اجرای آزمون رشد تنش و اندازه‌گیری منحنی جریان می‌باشد. در آزمون رشد تنش، پره در یک سرعت ثابت (۰/۰۵ دور در ثانیه) چرخیده و روند رشد گشتاور برداشت می‌گردد. آزمون رشد تنش به محض تشخیص گشتاور حداکثر که نشان دهنده تنش جاری (استاتیک) است، خاتمه می‌پذیرد[۱۱].

در تحقیق حاضر، اثر تغییر در نسبت های ترکیب و نیز استفاده از افزودنی های شیمیایی، بر روی خواص کارایی، رئولوژی و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار می گیرد. بدین ترتیب، بر اساس یک مخلوط کنترل، ۷ مخلوط با تغییر در نسبت های ترکیب از جمله تغییر در حجم خمیر، نسبت ریزدانه به کل سنگدانه ها، نسبت آب به سیمان، مقدار فوق روان کننده و استفاده از هواز و اصلاح کننده لزجت ساخته شده و خواص اصلی کارایی و همچنین پارامترهای رئولوژی و مقاومت فشاری آن مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در این تحقیق شامل سیمان پرتلند نوع دو و پودر سنگ آهک بعنوان پرکننده می باشد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان و پودرسنگ آهک

مشخصات شیمیایی و فیزیکی	سیمان پرتلند	پودرسنگ
SiO_2	۲۰/۷۴	۲/۸۰
Al_2O_3	۴/۹۰	۰/۳۵
Fe_2O_3	۳/۵۰	۰/۵۰
MgO	۱/۲۰	۱/۸۰
CaO	۶۲/۹۵	۵۱/۲۲
SO3	۳/۰۰	۱/۲۴
K_2O	–	–
کسر وزن در اثر سرخ شدن	۱/۵۶	۴۲/۰۶
باقی‌مانده نامحلول	۰/۷۴	۲/۸۰
وزن مخصوص (kg/m^3)	۳۱۵۰	۲۶۶۰

سنگدانه های مصرفی از جنس آهکی و از نوع شکسته و از معادن شهریار می باشند. حداکثر اندازه سنگدانه ها ۱۹/۵ میلیمتر و حداکثر اندازه سنگدانه ریز (ماسه) ۴/۷۵ میلیمتر می باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

نوع سنگدانه	جرم حجمی دانه ای اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	جذب آب (٪)
شن	۲/۶	۱/۸
ماسه	۲/۵۷	۳/۹

افزودنی ها شامل فوق روان کننده بر پایه نسل دوم کوپلیمرهای پلی کربکسیلیک اسید با وزن مخصوص $1100 kg/m^3$، هوازا مصرفی جهت تولید حباب‌های میکرونیزه بصورت مایع زرد رنگ با PH حدود ۸/۵ می باشد. همچنین در این تحقیق از یک نوع اصلاح کننده لزجت بر پایه میروبال پلی ساکارید مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- طرح‌های مخلوط

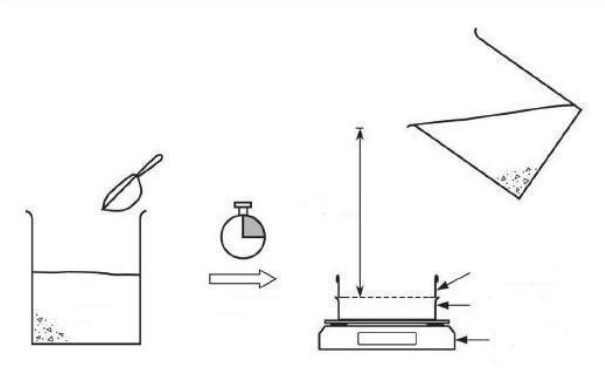
در این تحقیق بطور کلی خواص کارایی و رئولوژی ۸ طرح مخلوط با تغییر در نسبت های ترکیب و استفاده از افزودنی ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب که بر اساس یک بتن خود تراکم مرجع (C)، ۲ مخلوط با تغییر خاصیت پرکنندگی (مخلوط‌های F(SP) و F(SP+W))، ۱ مخلوط با تغییر خاصیت عبور (مخلوط P) و ۲ مخلوط با تغییر خاصیت جداشدگی (مخلوط های S(L) و S(C+L)) طراحی و ساخته شد. همچنین ۲ مخلوط با اضافه کردن حباب زا و VMA طراحی گردید.

۲-۳- نحوه مخلوط کردن و آزمایش‌ها

هر پیمانه در حجم ۳۵ لیتر در یک مخلوط کن ثقلی با ظرفیت ۶۰ لیتر ساخته شده است. هر طرح مخلوط، به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده و پس از آن به مدت ۲ دقیقه استراحت می‌کند. تعیین مشخصات کارایی مخلوط‌های مورد تحقیق پس از گذشت ۶ دقیقه از لحظه تماس آب با سیمان آغاز می‌گردد. برای تعیین هر یک از خواص اصلی بتن خودتراکم، آزمایش هایی در نظر گرفته شده است. برای تعیین خاصیت پرکنندگی آزمایش جریان اسلامپ،

خاصیت عبور آزمایش حلقه جی بر اساس دستورالعمل PCI [۱۲] و برای تعیین خاصیت جداشدگی آزمایش پایداری الک بر اساس راهنمای اروپایی بتن خودتراکم [۱۳]، بر روی بتن‌های مختلف انجام شده است. روش انجام آزمایش پایداری الک بدین صورت است که حجم ۱۰ لیتر از بتن تازه در داخل سطل ریخته شده و به مدت ۱۵ دقیقه به بتن اجازه هرگونه جداشدگی و نشست داخلی داده می‌شود (شکل ۱). بعد از ۱۵ دقیقه، حدود ۲ لیتر، از بخش بالایی بتن، از ارتفاع حدود ۵۰۰ میلیمتری، بر روی الک نمره ۴ ریخته می‌شود. پس از ۲ دقیقه که اجازه عبور بخش ملات از الک نمره ۴ داده شد، جرم بتن ریخته شده بر روی الک، M_a و جرم ملات موجود در سینی M_b اندازه‌گیری شده و در نهایت نسبت جداشدگی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{Segregation Ratio (\%)} = \frac{M_a}{M_b} \times 100 \qquad (۱)$$



شکل ۱- آزمایش پایداری الک (GTM)

جدول ۳- طرح مخلوط بتن ها

کد مخلوط	W/C	آب	سیمان	پودر سنگ آهک	ریزدانه	درشت دانه	F/T	SP
		Kg/m³						%*
C	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۷۵	۹۱۶	۶۱۱	۰/۶	۰/۹۲
F(SP)	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۷۵	۹۱۶	۶۱۱	۰/۶	۱/۱۱
F(SP+W)	۰/۴۶	۱۸۵	۴۰۰	۱۷۵	۹۲۷	۶۱۸	۰/۶	۱/۳۰
P	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۷۵	۷۶۳	۷۶۳	۰/۵	۱/۰۴
S(L)	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۰۰	۹۶۰	۶۴۰	۰/۶	۰/۷۸
S(C+L)	۰/۴۹	۱۸۵	۳۷۵	۱۶۰	۹۸۷	۶۵۸	۰/۶	۱/۰۷
Air+	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۷۵	۹۱۶	۶۱۱	۰/۶	۰/۷۴
VMA×	۰/۵۰	۲۰۰	۴۰۰	۱۰۰	۹۶۰	۶۴۰	۰/۶	۰/۸۸

* درصدی از مقدار سیمان

+حاوی ۲۲ kg/m^3 افزودنی هوازا

× حاوی ۰/۳۳ kg/m^3 افزودنی اصلاح کننده لزجت

همچنین برای بررسی رفتار رئولوژی بتن‌های خودتراکم، دستگاه رئومتر بتن خود تراکم دانشگاه علم و صنعت ایران که برای اولین بار در کشور توسط محققین این دانشگاه ساخته شده است، مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲).

برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن‌ها بر اساس استاندارد از هر طرح مخلوط بتن ۳ نمونه مکعبی ۱۰۰ میلیمتری قالب‌گیری شد. با توجه به خودمتراکم بودن بتن‌ها، نمونه گیری بدون اعمال هرگونه انرژی انجام شد. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش ۲۸ روزه، مطابق استاندارد تحت عمل آوری قرار گرفتند.

۳- نتایج آزمایشگاهی و شرح آنها

با توجه به روند تحقیق اشاره شده در بخش های ۲-۲ و ۲-۳، نتایج آزمایش های کارایی و پارامترهای رئولوژی بتن های مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

شکل ۲- دستگاه رئومتر بتن

۳-۱- خواص کارایی

۳-۱-۱- قابلیت پرکنندگی (جریان اسلامپ)

آزمایش جریان اسلامپ بعنوان شاخصی برای خاصیت پرکنندگی، یکی از آزمایش‌های کنترل کیفیت اصلی در بتن‌های خودتراکم تازه می‌باشد. چنانچه اشاره گردید، در این تحقیق بتن‌های خودتراکم در دو سطح جریان اسلامپ ۶۰۰ و ۷۰۰ میلیمتر طراحی گردید. بدین ترتیب، جریان اسلامپ مخلوط‌های F(SP) و F(SP+W) حدود ۷۰۰ میلیمتر و دیگر مخلوط‌ها حدود ۶۰۰ میلیمتر می‌باشد (شکل ۳-الف). مقدار جریان اسلامپ تنها شاخصی از بتن های این تحقیق است که با هدف گذاری اولیه انجام شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش های کارایی و پارامترهای رئولوژی بتن‌های خودتراکم

مشخصه بتن	جریان اسلامپ		حلقه جی	پایداری الک	پارامترهای رئولوژی	
	پهن شدگی (mm)	T_{50} (sec)	(mm)	(%)	تنش جاری (pa)	ویسکوزیته پلاستیک (pa.s)
C	۶۲۵	۱/۴۳	۱/۳	۱۰/۷۶	۳۷/۵۴	۱۷/۰۹
F(SP)	۷۰۰	۱/۳۵	۳/۸	۱۴/۳۲	۲۶/۱۴	۱۷/۶۵
F(SP+W)	۷۰۵	۱/۵۹	۲	۱۰/۲۸	۳۱/۲۷	۲۰/۳۴
P	۶۲۵	۱/۰۹	۷/۵	۱۳/۵۷	۴۰/۱۸	۱۸/۳۱
S(L)	۶۰۰	۱/۱۵	۵	۱۵/۴۵	۴۹/۳۲	۲۱/۵۶
S(L+C)	۵۹۵	۱/۴۹	۴/۵	۱۴/۲۳	۴۳/۵۵	۱۹/۴۵
Air	۶۱۵	۱/۱۱	۱	۷/۱	۳۵/۴۵	۱۴/۵۶
VMA	۶۰۵	۱/۳۶	۳/۵	۱۰/۱۴	۳۱/۲۱	۱۵/۲۴

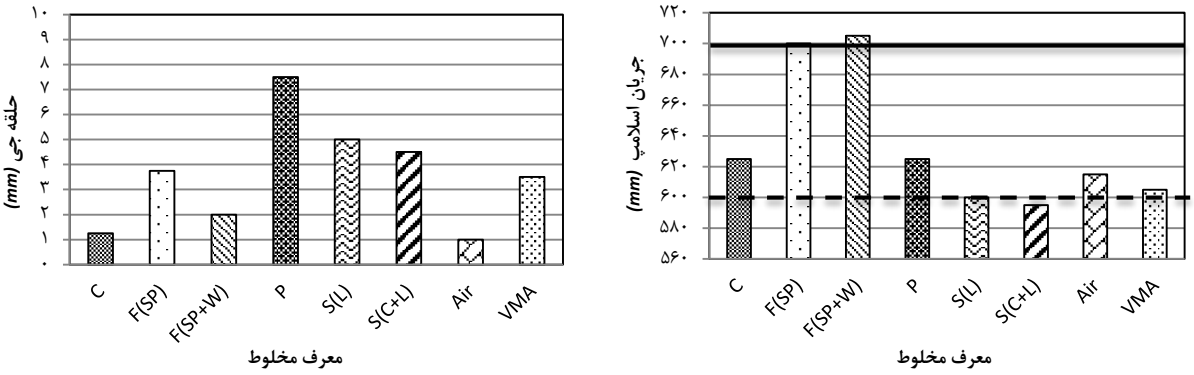
۳-۱-۲- قابلیت عبور (حلقه جی)

قابلیت عبور بتن‌های خودتراکم در این تحقیق با استفاده از آزمایش حلقه جی تخمین زده شده است (شکل ۳-ب). با توجه به نتایج بدست آمده، کاهش نسبت ریزدانه به کل سنگدانه ها از ۰/۶۵ به ۰/۵۵ موجب بیشترین تغییر در مقدار حلقه جی شده است که مقدار اختلاف از ۱/۲ به ۷/۵ میلیمتر افزایش یافته است. این تغییر نشان دهنده تأثیر قابل توجه تغییرات حجم درشت دانه بر قابلیت عبور می باشد [۱۴].

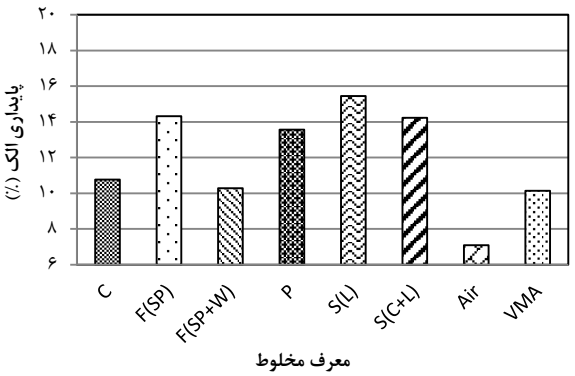
پس از اثر درشت دانه ها، تغییر در حجم خمیر باعث بیشترین افزایش در مقدار آزمایش حلقه جی شده است. تغییر در حجم خمیر باعث گردیده که مقدار حلقه جی از ۱/۲ میلیمتر به ۵ و ۴/۵ میلیمتر بترتیب در مخلوط‌های S(L) و S(C+L) افزایش یابد.پ جایگزینی بخش از پودر سنگ با اصلاح کننده لزجت (V) باعث کاهش قابلیت عبور شده است. در این حالت مقدار حلقه جی به میزان حدود ۲ میلیمتر افزایش یافته است. اما افزودن هوازا به مخلوط باعث بهبود کم قابلیت عبور شده و توانسته است مقدار حلقه جی را به میزان کمی کاهش دهد.

۳-۱-۳- مقاومت جداشدگی (پایداری الک)

آزمایش تعیین کننده مقاومت جداشدگی در این تحقیق، آزمایش پایداری الک است که مقادیر بدست آمده از آن در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محدوده مطلوب آزمایش پایداری الک بین ۵ تا ۲۰ درصد می باشد و همانگونه مشاهده می گردد، کلیه بتن ها در این محدوده تغییرات می باشند.



شکل ۳- نتایج آزمایش‌های الف) جریان اسلامپ؛ ب) حلقه جی در بتن‌های مرجع



شکل ۴- نتایج آزمایش‌های الف) پایداری الک

با بررسی تغییرات پایداری الک مخلوط ها ملاحظه می گردد که کاهش حجم خمیر باعث افزایش حدود ۴ تا ۵ درصدی شده است. در بین دو مخلوطی که حجم خمیرشان کاهش یافته است، مقاومت جداشدگی مخلوط S(L) که کاهش حجم خمیر آن تنها با کاهش مقدار پودر سنگ ایجاد شده است، تأثیر بیشتری پذیرفته است.

پس از کاهش حجم خمیر، افزایش قابلیت پرکنندگی تنها با استفاده از فوق روان کننده ((F(SP)) باعث بیشترین افزایش پایداری الک شده که این افزایش حدود ۳/۵ درصد می باشد. در مقابل افزایش پرکنندگی مخلوط با کاهش مقدار آب و افزایش فوق روان کننده ((F(SP+W)) موجب گردیده که مقاومت جداشدگی بتن بهبود یابد. کاهش حجم ریزدانه مخلوط نیز باعث کاهش مقاومت جداشدگی گردیده است. پایداری الک مخلوط P نسبت به مخلوط کنترل، حدود ۳ درصد افزایش یافته است.

جایگزینی بخشی از پودر سنگ آهک با افزودنی اصلاح کننده لزجت (مخلوط V) باعث بهبود مختصر مقاومت جداشدگی شده است. اما افزودن هوازا توانسته است بهترین وضعیت جداشدگی را ارائه دهد و باعث گردیده که مخلوط A به مقدار مطلوب پایداری الک حدود ۵٪ برسد.

۳-۲- خواص رئولوژی

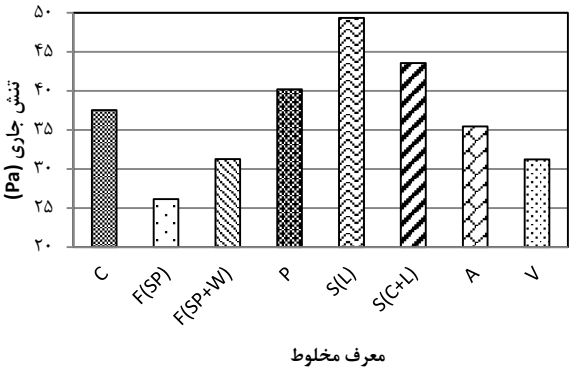
۳-۲-۱- تنش جاری

نتایج مقادیر تنش جاری مخلوط ها در شکل ۵-الف نشان داده شده است. بر این اساس، افزایش جریان اسلامپ بتن (از ۶۰۰ به ۷۰۰ میلیمتر)، باعث کاهش قابل توجه تنش جاری بتن شده است. افزایش جریان اسلامپ با استفاده از فوق روان کننده باعث کاهش حدود ۳۰٪ تنش جاری شده است. همچنین افزایش جریان اسلامپ بوسیله کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش فوق روان کننده باعث کاهش حدود ۲۶٪ تنش جاری شده است. استفاده از افزودنی ها نیز باعث کاهش تنش جاری می گردد. جایگزینی بخشی از پودر سنگ آهک با *VMA* باعث کاهش ۲۶٪ و استفاده از هوازا باعث کاهش حدود ۵٪ شده است. اما کاهش حجم خمیر و افزایش میزان درشت دانه مخلوط باعث افزایش تنش جاری گردیده است. بیشترین افزایش تنش جاری مربوط به مخلوط *S(L)* می باشد که کل حجم خمیر کاهش یافته آن ناشی از کاهش پودر سنگ می باشد (حدود ۱۵٪). از سوی دیگر افزایش مقدار درشت دانه باعث افزایش ۷٪ تنش جاری گردیده است.

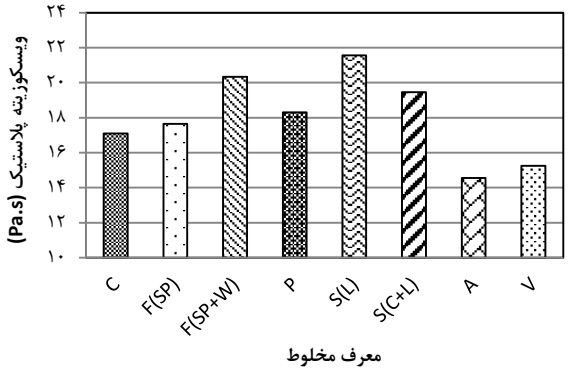
۳-۲-۲- ویسکوزیته پلاستیک

تغییرات ویسکوزیته پلاستیک در شکل ۵-ب نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود تغییرات ویسکوزیته پلاستیک در بتن ها نسبت به تنش جاری محدودتر و کمتر است. بیشترین تغییرات

مربوط به مخلوط های حاوی افزودنی های هوازا و اصلاح کننده لزجت می باشد. بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به استفاده هوازاست که باعث کاهش ۱۵٪ شده است. تغییر در نسبت های ترکیب بتن همگی باعث افزایش ویسکوزیته شده است. بیشترین افزایش مربوط به کاهش حجم خمیر از طریق کاهش پودر سنگ آهک می باشد که باعث افزایش ۲۶٪ ویسکوزیته شده است.



(الف)



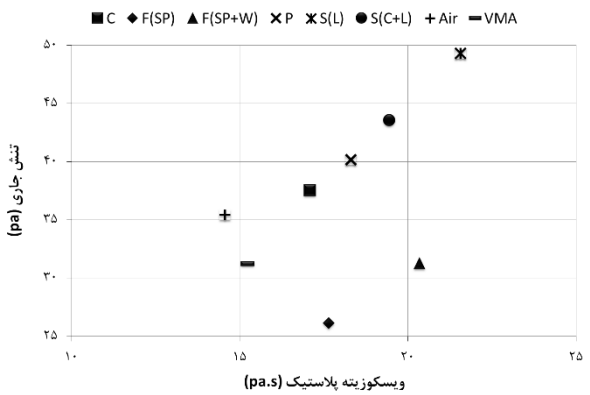
(ب)

شکل ۵- نتایج پارامترهای رئولوژی الف) تنش جاری و ب) ویسکوزیته پلاستیک در بتن‌های مرجع

۳-۳- رئوگراف

کمیت‌های رئولوژیِ پایه‌ای برای مصالح با اساس سیمان، بوسیله مقادیر تنش جاری شدن τ و ویستکوزیته پلاستیک μ تخمین زده می‌شود. از آنجایی که برای تعریف کامل رفتار یک بتن در حالت تازه به هر دو این پارامترها نیاز است، بنابراین یک راه حل مناسب استفاده از رئوگراف است [۱۵].

در شکل ۶ تغییرات تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک بتن های مختلف بر روی رئوگراف مشخص شده است. بر این اساس، افزایش میزان درشت دانه در مخلوط باعث افزایش تنش جاری و ویسکوزیته می گردد. کاهش حجم خمیر نیز باعث افزایش تنش جاری و ویسکوزیته می گردد. در مقابل استفاده از افزودنی هوازا و نیز جایگزینی بخشی از پودر سنگ با VMA باعث کاهش تنش جاری و ویسکوزیته می گردد. در نهایت مخلوط هایی که قابلیت پرکنندگی (اسلامپ جریان) آنها افزایش یافته است، ضمن کاهش تنش جاری، ویسکوزیته آنها افزایش یافته است.



شکل ۶- تغییرات تنش جاری و ویسکوزیته بتن های خودتراکم بر روی رئوگراف

جدول ۵- همگامی آزمایش کارایی و پارامترهای رئولوژی

آزمایش ها	کواریانس	ضریب همبستگی
جریان اسلامپ – تنش جاری	-۲۰۴/۳	-۰/۷۱۲
جریان اسلامپ – ویسکوزیته	۱۴/۵	۰/۱۵۷
T_{50} - تنش جاری	-۰/۴	-۰/۳۵۲
T_{50} - ویسکوزیته	۰/۱	۰/۲۲۴
حلقه جی - تنش جاری	۵/۸	۰/۴۱۰
حلقه جی - ویسکوزیته	۱/۹	۰/۴۱۲
پایداری الک – تنش جاری	۸/۰	۰/۴۳۲
پایداری الک – ویسکوزیته	۴/۳	۰/۷۱۳

۴-۳- بررسی همگامی آزمایش‌های کارایی و خواص رئولوژی

برای بررسی وضعیت تغییرات آزمایش‌های کارایی با پارامترهای رئولوژی از پارامترهای آماری کواریانس و ضریب همبستگی استفاده می‌گردد. در جدول ۵ مقادیر این دو پارامتر برای بررسی تغییرات آزمایش‌های مختلف کارایی با پارامترهای رئولوژی محاسبه و آورده شده است.

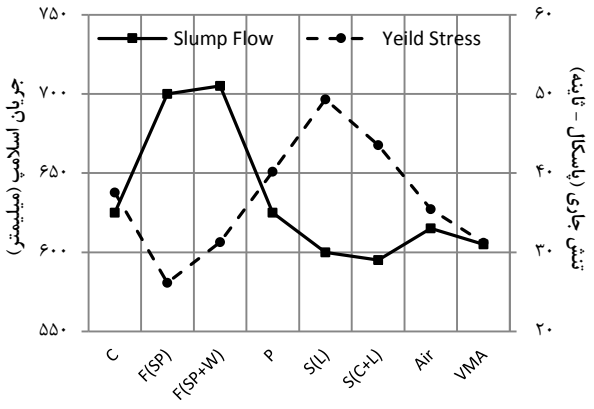
با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۴، خاصیت پرکنندگی بتن خودتراکم (تغییرات جریان اسلامپ) وابستگی قابل توجهی (معکوس) با تغییرات تنش جاری بتن دارد. به همین ترتیب تغییرات مقاومت جداشدگی (آزمایش پایداری الک) با مقدار تنش جاری بتن متناسب می باشد.

۳-٤-۱- تغییرات جریان اسلامپ و تنش جاری

با توجه به نتایج بدست آمده ضریب همبستگی بین تغییرات جریان اسلامپ و تنش جاری ۰/۷۱- می‌باشد که نشاندهنده همگامی معکوس این دو شاخص است. بعبارت دیگر با کاهش تنش جاری، شاهد افزایش جریان اسلامپ خواهیم بود.

با در نظر گرفتن جریان اسلامپ و تنش جاری بتن کنترل (C) بعنوان مرجع، با افزایش کارایی بتن خودتراکم به مقدار حدود ۱۰۰ میلیمتر، مقدار تنش جاری نیز کاهش یافته است. در بتنی که جریان اسلامپ تنها با استفاده از فوق روان کننده افزایش یافته است (F(SP))، مقدار تنش جاری کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. مقدار کاهش تنش جاری با افزایش جریان اسلامپ در بتنی که جریان اسلامپ آن از ترکیب کاهش مقدار آب و افزایش مقدار فوق روان کننده (F(SP+W)) ایجاد شده، کمتر می باشد.

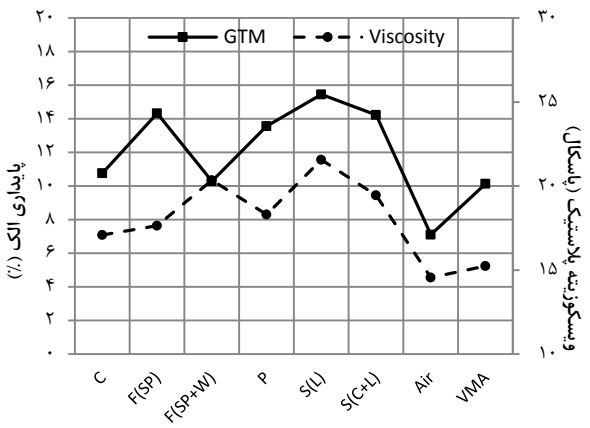
کاهش نسبت ریزدانه به کل سنگدانه ها در بتن با جریان اسلامپ نسبتاً مساوی، باعث تغییر قابل توجه در مقدار تنش جاری نمی گردد. با این وجود کاهش حجم خمیر به طور کلی باعث افزایش تنش جاری شده است. افزودنی هوازا به مقدار قابل توجه بر تغییرات تنش جاری (در اسلامپ یکسان) اثر گذار نمی‌باشد. این شرایط برای بتن حاوی اصلاح کننده لزجت نیز صادق می باشد.



شکل ۷- تغییرات جریان اسلامپ و تنش جاری بتن های خودتراکم

۳-٤-۲- تغییرات پایداری الک و ویسکوزیته

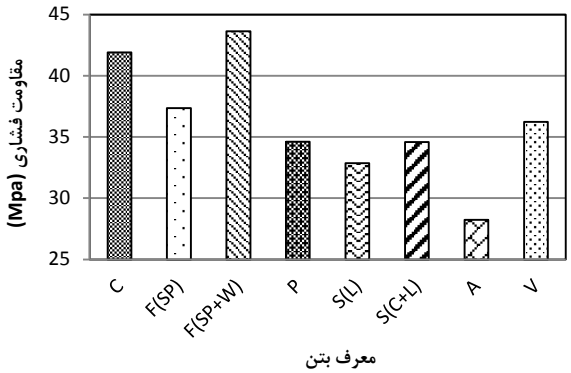
همگامی معنی‌دار دیگر، بین آزمایش جداشدگی الک (مقاومت جداشدگی) و ویسکوزیته است. بر اساس نتایج جدول ۴، ضریب همبستگی این دو آزمایش ۰/۷۱۳ می‌باشد و نشاندهنده رابطه معنادارای بین پایداری الک و ویسکوزیته بتن است. همچنین از آنجا که ضریب همبستگی مثبت می باشد، رابطه مستقیم بوده و تغییرات متناسب می باشند. بر این اساس نمودار تغییرات آزمایش پایداری الک و ویسکوزیته در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می گردد که بجز تغییرات مخلوط *F(SP)*، برای بقیه مخلوط هایی که نسبت ترکیب آنها تغییر یافته است، تغییرات پایداری الک و ویسکوزیته بتن‌ها همگام می باشد.



شکل ۸- تغییرات پایداری الک و ویسکوزیته بتن‌های خودتراکم

۳-۵- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بتن‌های مرجع در شکل ۹ نشان داده شده است. بتن کنترل دارای مقاومتی حدود ۴۲ مگاپاسکال است و تغییر در نسبت‌های ترکیب و استفاده از افزودنی باعث تغییر در مقدار مقاومت شده است. بتن F(SP+W) تنها بتنی است که مقاومت بیشتری از بتن کنترل (C) دارد که علت آن کاهش نسبت آب به سیمان بتن (از ۰/۵ به ۰/۴۶) می باشد که اثرگذارترین عامل در مقدار مقاومت فشاری می‌باشد. از سوی دیگر استفاده از هواز (A) باعث بیشترین کاهش در مقاومت فشاری بتن شده است. بعد از این بتن، بتن‌هایی که حجم خمیر آنها کاهش یافته است (S(L), S(C+L)) متحمل کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری شده‌اند.

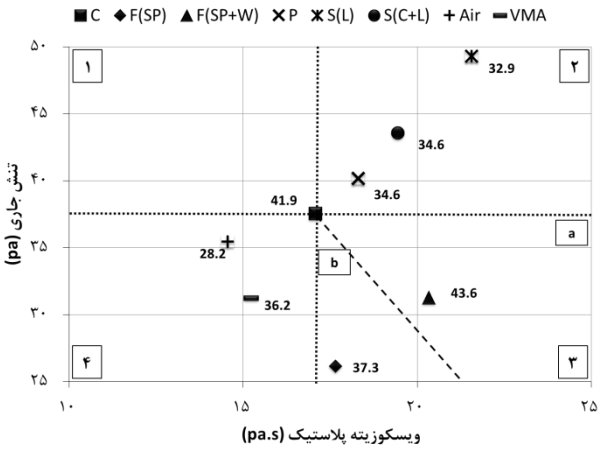


شکل ۹- نتایج مقاومت فشاری بتن‌های مرجع

۳-٦- تغییرات مقاومت فشاری با خواص رئولوژی

همانگونه که از طرح مخلوط های بتن ها (جدول ۳) مشخص است، کلیه مخلوط ها بجز مخلوط F(SP+W) دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ می باشند. همچنین مخلوط A، دارای هوازا می باشد. بنابراین انتظار می رود مخلوطهای دیگر (بجز F(SP+W) و A) مقاومت های فشاری تقریباً نزدیک به هم داشته باشند.

با این وجود با توجه به نتایج بخش ۳-۵، بتن‌ها با نسبت آب به سیمان یکسان نیز دارای تغییراتی در مقاومت فشاری بوده اند. از این روی در این بخش وجود رابطه بین خواص رئولوژی و مقاومت فشاری بتن ها با نسبت آب به سیمان یکسان مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۱۰، مقاومت فشاری بتن های مختلف بر روی رئوگراف ترسیم شده است.



شکل ۱۰. مقاومت فشاری بتن ها بر روی رئوگراف

همانگونه که مشاهده می گردد، بتن مرجع دارای بیشترین مقاومت فشاری در بین بتن ها با نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌باشد. بتن ها در راستای ناحیه ۲ که تنش جاری و ویسکوزیته بطور همزمان افزایش می یابد، دارای مقاومت کمتری نسبت به بتن مرجع بوده اند که افزایش با افزایش بیشتر این دو پارامتر رئولوژی بطور همزمان، مقاومت فشاری به مقدار بیشتری کاهش می یابد.

از سوی دیگر بتن هایی که از نظر خواص رئولوژی در راستای کاهش همزمان تنش جاری و ویسکوزیته (ناحیه ۴) و نیز کاهش همزمان تنش جاری و افزایش ویسکوزیته (ناحیه ۳) بوده اند، مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن مرجع داشته اند.

بنابراین با توجه به اینکه نتایج در برخی نواحی محدود می باشد، بر اساس مخلوط‌های این تحقیق می توان گفت، افزایش همزمان تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک در بتن ها با نسبت آب به سیمان یکسان می توان نشاندهنده کاهش مقاومت فشاری بتن گردد.

٤- نتیجه‌گیری

۱) کاهش حجم خمیر بتن خودتراکم می تواند بطور قابل توجه بر مقاومت جداشدگی اثر گذار بوده و آنرا کاهش دهد. در این تحقیق کاهش حجم خمیر ناشی از کاهش پودر سنگ آهک اثر بیشتری نسبت به کاهش ترکیب پودر سنگ و سیمان داشته است. همچنین افزایش قابلیت عبور (جریان اسلامپ) بتن تنها با استفاده از فوق روان کننده می‌تواند باعث کاهش قابل توجه مقاومت جداشدگی بتن گردد.

۲) افزایش قابلیت پرکنندگی (جریان اسلامپ) می تواند باعث کاهش تنش جاری گردد. همچنین استفاده از افزودنی های هوازا و اصلاح کننده لزجت نیز می تواند باعث کاهش تنش جاری گردد. در مقابل، کاهش حجم خمیر و افزایش میزان درشت دانه می تواند باعث افزایش تنش جاری گردد.

۳) تغییرات ویسکوزیته پلاستیک مخلوط‌های بتن نسبت به تنش جاری از نظر کمی محدودتر می‌باشد. ویسکوزیته پلاستیک با استفاده از افزودنی‌های هوازا و جایگزینی بخش از پودر سنگ با ماده اصلاح کننده لزجت کاهش یافته اما کاهش حجم خمیر و افزایش حجم درشت دانه در بتن باعث افزایش ویسکوزیته می گردد.

۴) با توجه به اینکه تعیین خواص رئولوژی بتن ها با استفاده از دستگاه رئومتر انجام می شود و این دستگاه ها علاوه بر هزینه زیاد، سادگی، سرعت عمل و مزایای آزمایش های تعیین خواص کارایی بتن را در حال حاضر ندارند، از این روی تخمین

هر یک از پارامترهای رئولوژی با استفاده از خواص کارایی می تواند مفید باشد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، آزمایش جریان اسلامپ بیشترین همگامی را با تنش جاری بتن خودتراکم داشته است. همچنین آزمایش پایداری الک بیشترین همگامی را با پارامتر ویسکوزیته پلاستیک داشته است.

۵) بتن های خودتراکم با نسبت آب به سیمان یکسان می توانند مقاومت فشاری های متفاوتی از خود نشان دهند. در تحقیق حاضر بررسی برای امکان سنجی رابطه بین خواص رئولوژی و تغییرات مقاومت فشاری بتن ها انجام شده است. بر اساس مخلوط های محدود، در صورتی که خواص رئولوژی بتن های خودتراکم بصورت افزایش همزمان تنش جاری و ویسکوزیته تغییر کند، می توان انتظار داشت بتن ها مقاومت فشاری کمتری را کسب کنند.

۵- مراجع

[1]. Sharendahl, A. and Billberg, P., "Casting of Self Compacting Concrete," Final Report of RILEM Technical Committee 188-CSC, 2006.

[2]. Okamura, H. and Ouchi, M., "Self-compacting concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, Vol.1, No.1, pp. 5-15.

[3]. Xie, Youjun, et al. "Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash." Cement and Concrete Research 32.3 (2002): 477-480.

[4]. Shi, Caijun, et al. "A review on mixture design methods for self-compacting concrete." Construction and Building Materials 84 (2015): 387-398.

[5]. Neville, A. M., "Properties of Concrete," Fourth Edition, Prentice Hall, Harlow, UK, 1995.

[6]. Domone, P. L., "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies," Cement and Concrete Composites, 2006, Vol. 28, Issue 2, pp. 197-208.

[7]. Chhabra, R. P. and Richardson, J. F., "Non-Newtonian Flow and Applied Rheology," second edition, Butterwirth-Heunmann, Oxford, 2008.

[8]. Tadors, T. F., "Rheology of Dispersions: Principles and Applications," Wiely-VCH Verlag & Co., 2010.

[9]. Rhodes, M., "Introduction to Particle Technology," second edition, John Wiley & Sons Ltd., 2008.

[10]. Newman, J., "Advanced Concrete Technology: Constituent Material," Elsevier Ltd., 2003.

[11]. Koehler, E. and Fowler, D., 2004. Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete–Research report Icar 105-3F. International center for Aggregates Research, Washington.

[12]. Team, P.S.C.C.F., 2003. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in PCI Member Plants. PCI Journal, 48(3), pp.14-18.

[13]. Self-Compacting Concrete European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO, 2005, p. 63.

[14]. Hwang, S. D., Khayat, K. H. and Bonneau, O., "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications," ACI Materials Journal, 2006, Vol. 103, pp. 121-129.

[15]. Wallevik, O. H. and Wallevik, J. E., "Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes," Cement and Concrete Research, 2011, Vol. 41, pp. 1279-1288.

[16]. Koehler, E., et al. Selecting Admixtures to Achieve Application-Required Rheology. Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, Springer (2010): 79-88

The Effect of Change in Composition Ratios and Additives on the Workability and Rheology of Self-Consolidating Concrete

Parviz Ghoddousi *
Professor, Civil Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran
Amir Masoud Salehi
Assistant Professor, Engineering Department, Civil Engineering Group, Kharazmi University

Abstract

Although self-consolidating concrete (SCC) has been developed for about 2 decades, but its widespread use is still limited. One of the most important factors is the lack of complete recognition of the properties (especially in fresh state) of this concrete and the effect of changing the composition ratios and additives on its performance. In the present study, 7 mixtures has been designed based on a mixture (by changing the composition ratios and the use of additives),and the three main fresh properties (filling and passing ability and segregation resistance) and rheological parameters (by rheometer) have been measured. The results of this study show that reducing the amount of paste volume causes the most improper changes to SCC fresh properties. According to the results of rheograph, the simultaneous increase in plastic viscosity and yield stress has reduced the segregation resistance and reducing yield stress and plastic viscosity could be suitable for improving the concrete stability. On the other hand, based on the results of this study, in self-consolidating concrete with the same water-to-cement ratio, the simultaneous increase in yield stress and the plastic viscosity indicates the lower compressive strength of the concrete.

Keywords: Self Consolidating Concrete, Workability, Rheology parameters, Compressive strength.

* Corresponding Author: ghoddousi@iust.ac.ir