

## بررسی تاثیر مواد افزودنی معدنی و شیمیائی در لزجت و روانی خمیر با استفاده از آزمایش قیف جریان استوانه ای (مدل اصلاح شده قیف مارش) و جریان مینی اسلامپ

مهدی خداداد سریزدی

عضو هیات علمی دانشگاه یزد

[mkhodadad@vazduni.ac.ir](mailto:mkhodadad@vazduni.ac.ir)

هرمز فامیلی

عضو هیات علمی دانشگاه علم و صنعت ایران

طیبه پرهیزکار

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

امیر مازیار رئیس قاسمی

پژوهشگر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

### چکیده

تولید بتن پرمقاومت، توانمند، و خودتراکم در اواخر قرن بیستم انقلابی در تکنولوژی بتن ایجاد کرد، و ورود به عرصه های جدیدی از ساخت و ساز را میسر ساخت. نقش خمیر (ماتریس) در این نوع بتن ها از اهمیت به سزائی برخوردار است. علاوه بر سیمان، استفاده از انواع افزودنی های پوزولانی مثل دوده سیلیس و خاکستر بادی و انواع فیلرها مثل پودر سنگ آهک، ماسه سیلیسی ریز و کوارتز میکرونیزه در خمیر این نوع بتن ها رایج می باشد. جهت کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، انواع مواد افزودنی شیمیائی و فوق روان کننده با خصوصیات و عملکرد متفاوت به بازار عرضه شده است. بررسی سازگاری این مواد با یکدیگر و عملکرد ترکیب آنها به لحاظ روانی مخلوط حاصل، جهت دستیابی به طرح اختلاط بهینه این نوع بتن ها اجتناب ناپذیر و لازم می باشد. نتایج حاصل از آزمایش خمیر، در عین سادگی و کم هزینه بودن، اطلاعات بسیاری ارزش جهت پیش بینی رفتار بتن در اختیار طراح مخلوط قرار میدهد. در این تحقیق با استفاده از یک روش جدید، که در حقیقت نمونه اصلاح شده آزمایش قیف مارش می باشد، تاثیر مقدار فوق روان کننده و فیلرونوع آنها در لزجت خمیر حاصل مورد بررسی قرار گرفت و به کمک آن نقطه اشباع فوق روان کننده که مصرف بیشتر آن تاثیر قابل ملاحظه ای روی روانی خمیر ندارد تعیین گردید. همچنین با استفاده از یک مخروط کوچک شده اسلامپ (مینی اسلامپ) پخش جریان خمیر های مختلف اندازه گیری شد و میزان کاهش روانی خمیر تا یک ساعت پس از ترکیب آب و پودر مورد بررسی قرار گرفت.

واژه های کلیدی: خمیر سیمان، لزجت، روانی، قیف جریان استوانه ای، مینی اسلامپ، افزودنی های معدنی و شیمیائی

## مقدمه

با توجه به اینکه در بتنهای توانمند از ترکیب چندین ماده پودری شامل سیمان، دوده سیلیس، خاکستر بادی و فیلر استفاده می‌شود و همچنین به علت تعدد رو به رشد مواد افزودنی فوق روان‌کننده‌ها و لزوم بررسی سازگاری آنها با مواد پودری و بطور خاص سیمان مورد استفاده در طرح، آزمایش فاز ماتریس (خمیر) جهت دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن بیش از پیش احساس می‌شود و در سالهای اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. برخی از محققین بتن را به صورت یک ماده دو فازی شامل خمیر (ماتریس) و سنگدانه مدل کرده، با اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی فاز ماتریس و استفاده از آن روابطی را برای پیش بینی کارایی بتن پیشنهاد نموده اند [1,2]. بدیهی است که آزمایش خمیر بسیار ساده تر و کم هزینه تر از آزمایش بتن میباشد و تنها با دو الی سه لیتر خمیر میتوان به اطلاعات بسیار سودمند جهت پیش بینی رفتار بتن در حالت تازه و سخت شده دست یافت. در حقیقت برای دستیابی به یک مخلوط بتن با عملکرد عالی ابتدا باید خمیر مناسب و مهندسی شده طراحی شود و مورد آزمایش قرار گیرد و در صورت نیاز جهت رسیدن به مشخصات رئولوژیکی، مقاومتی و دوام مورد نظر، نسبتهای اختلاط خمیر را تغییر داده تا طرح اختلاط بهینه حاصل شود. از اهداف بسیار مهم در این راستا تعیین نقطه اشباع و مقدار بهینه افزودنی فوق روان‌کننده، که مصرف بیشتر آن نه تنها تاثیر قابل ملاحظه در روانی خمیر نخواهد داشت بلکه ممکن است تاثیر منفی نیز داشته باشد، میباشد.

جهت اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی خمیر، بر اساس مدل بینگهام و آزمایش دو نقطه‌ای پیشنهادی تاتارسل (تعیین ویسکوزیته و تنش جاری شدن)، ابزار نسبتاً پیچیده و گرانقیمت (رئومتر) به بازار عرضه شده است و لیکن امکان دسترسی به این ابزار محدود می‌باشد [3]. لذا آزمایش‌های یک نقطه‌ای تعیین برخی از خصوصیات رئولوژیکی خمیر، به علت سادگی و کم هزینه بودن آنها بسیار رایج می‌باشد [4,5]. خوشبختانه نوعی روابط همبستگی بین نتایج این آزمایش‌ها و پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های دو نقطه‌ای وجود

دارد. از جمله این وسایل ساده می‌توان به قیف مارش (Marsh Cone) و نمونه اصلاح شده آن با نام قیف جریان استوانه ای (FlowCyl) جهت تعیین ویسکوزیته خمیر اشاره نمود. همچنین آزمایش پخش جریان اسلامپ با استفاده از یک مخروط ناقص بسیار کوچک (مینی اسلامپ)، که با تنش جاری شدن خمیر ارتباط دارد، به طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است [6]. در این تحقیق تاثیر نوع و مقدار فوق روان‌کننده و فیلرهای مختلف، با استفاده از آزمایش قیف جریان استوانه ای (FlowCyl) و پخش جریان مینی اسلامپ، در روانی خمیر بررسی شد و نقطه اشباع فوق روان‌کننده تعیین گردید. همچنین میزان کاهش در روانی خمیر یک ساعت پس از ترکیب آب و پودر بررسی شد.

## اهمیت تحقیق

یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی نسبتهای اختلاط بتن، کارایی آن میباشد که به طور عمده متاثر از خصوصیات رئولوژیکی (و حجم) خمیر میباشد. معمولاً خمیر بتن‌های توانمند از جمله بتن خودتراکم متشکل از ترکیب چندین پودر و افزودنی فوق روان‌کننده میباشد و نسبتهای اختلاط آنها به جهت بهینه کردن خصوصیت کارایی بتن باید بررسی شود به طوری که تاثیر هر یک از اجزاء در عملکرد مخلوط مشخص باشد. آزمایشهای ساده یک نقطه‌ای مورد استفاده در این تحقیق با هزینه ای اندک در دسترس قرار دارد و اطلاعات ارزشمندی را با شاخص بالای تکرارپذیری بدون خطای ناشی از نیروی انسانی در اختیار طراح می‌گذارد.

## خصوصیت مواد و پارامترهای متغیر

از سیمان (C) نوع ۴۲۵-۱ و دوده سیلیس (Sf) به عنوان مواد سیمانی واز کوارتز میکرونیزه (ک.م.) و ماسه سیلیسی (م.س.) به عنوان فیلر (Fi) در ساخت خمیر استفاده گردید. خصوصیت شیمیائی و فیزیکی سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. دو نمونه فوق روان‌کننده متداول یکی با پایه کربوکسیلیک و چگالی ۱/۰۸ و دیگری با پایه لیگنوسولفونات و چگالی ۱/۲ که به ترتیب با علائم اختصاری G و R نشان داده

شدند. سپس با همان سرعت کم آب و به دنبال آن فوق روان کننده اضافه شد و به مدت ۱۲۰ ثانیه اختلاط ادامه یافت. در مرحله بعد به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط کن متوقف شد تا خمیر چسبیده شده به کف یا جداره ظرف رهاسازی شود. پس از آن به مدت ۲ دقیقه خمیر با سرعت متوسط مخلوط شد. در مرحله آخر و پس از ۵ دقیقه توقف، مخلوط کن ۱ دقیقه دیگر با سرعت متوسط خمیر را همگن نمود. خمیر تهیه شده به یک ظرف پلاستیکی درب دار منتقل شد تا در زمانهای مشخص جهت آزمایش مورد نظر استفاده شود.

جدول ۲ - نسبت اختلاط اجزاء خمیرها

شناسه خمیر	W/C نسبت وزنی	Sf/C در صد وزنی	نوع فیلر Fi	Fi/C درصد وزنی	فوق روان کننده	A/C درصد وزنی
P1	۰/۳	۱۲/۵	ک.م	۱۲/۵	G	۱/۰
P2	۰/۳	۱۲/۵	ک.م	۱۲/۵	G	۱/۵
P3	۰/۳	۱۲/۵	ک.م	۱۲/۵	G	۲/۰
P4	۰/۳	۱۲/۵	ک.م	۱۲/۵	G	۲/۵
P5	۰/۳۸	۰	م.س	۲۰	G	۰/۷
P6	۰/۳۸	۰	م.س	۲۰	R	۱/۲
P7	۰/۳۸	۰	ک.م	۲۰	G	۰/۷
P8	۰/۳۸	۰	ک.م	۲۰	G	۰/۷

### آزمایش جریان مینی اسلامپ

در این آزمایش از یک مخروط ناقص، که نمونه کوچک شده مخروط آبرام مورد استفاده در آزمایش

شده است، مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای آزمایش شامل نسبت آب به سیمان، نوع و مقدار فوق روان کننده، نوع و مقدار فیلر می باشد.

جدول ۱ - خواص شیمیائی، فیزیکی و مکانیکی سیمان نوع ۱ مصرفی بر اساس استاندارد ایران

خواص شیمیائی	نتایج آزمون
% SiO <sub>2</sub>	۱۹/۹۴
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۱۲
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۰۸
% MgO	۴/۲۵
% CaO	۶۰/۱۵
% SO <sub>3</sub>	۲/۰۳
% L.O.I.	۴/۱۰
باقی مانده نامحلول	۰/۷۰
% C <sub>3</sub> S	۵۴/۰۲
% C <sub>2</sub> S	۱۶/۴۱
% C <sub>3</sub> A	۴/۰۱
% Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	۰/۹۶
خواص فیزیکی سیمان (ادامه جدول ۱)	
سطح مخصوص Cm <sup>2</sup> /g	۳۱۰۴
انبساط در اتوکلاو %	۰/۲۸
زمان گیرش ابتدائی (دقیقه)	۸۵
انتتهائی (ساعت)	۳:۳۹

### برنامه آزمایشگاهی

#### نسبتهای اختلاط و روش مخلوط کردن

نسبت اختلاط اجزاء خمیرها، در جدول (۲) ارائه شده است.

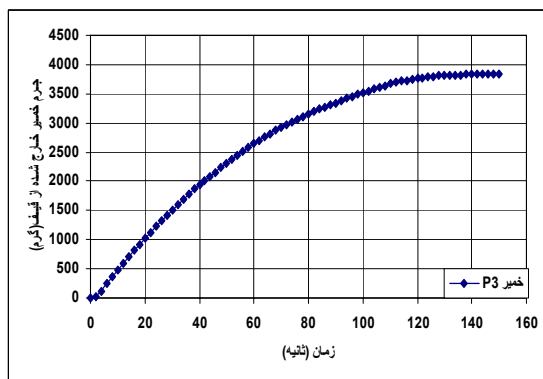
با توجه به اینکه روش مخلوط کردن میتواند در نتایج حاصل مؤثر واقع شود، کلیه مخلوط ها توسط مخلوط کن ۵ لیتری Hobart با همزن استاندارد به روش ذیل آماده شدند: ابتدا کلیه مواد پودری به مدت ۳۰ ثانیه در سرعت کم ترکیب

۳۰۰ میلیمتر استفاده می‌شود. در انتهای استوانه یک کیف کوچک مخروطی شکل که نوک آن دارای خروجی باریکی به قطر ۸ میلیمتر و ارتفاع کل آن ۱۰۰ میلیمتر است نصب میگردد. استفاده از این دستگاه به جای کیف مارش، رابطه زمان- شدت جریان را ساده‌تر می‌کند استوانه به صورت قائم روی یک پایه نصب می‌شود و یک ظرف از جنس فولاد ضد زنگ که روی ترازوی الکترونیک قرار گرفته می‌تواند در موقع باز شدن خروجی، خمیر روان خارج شده از استوانه را در خود جمع کند و همزمان وزن آن به کامپیوتر متصل به ترازو منتقل شده در فواصل زمانی مشخص (معمولاً هر دو ثانیه) در یک فایل ثبت شود. تصویر دستگاه کیف جریان در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲- تصویر دستگاه کیف جریان استوانه ای



شکل ۳- جریان خروج خمیر P3 بر حسب زمان



وزن ثبت شده بیانگر جریان خروج (دبی) خمیر روان از استوانه پر تا خالی می‌باشد. در شکل ۳ نمودار جریان خروج یکی از خمیرها (P3) نشان داده شده است.

با استفاده از نرم افزار صفحه گسترده Excel و بخش مشخصی از این داده‌های ثبت شده، محاسبات مربوط به تعیین نسبت مقاومت جریان  $\lambda_Q$  (مشخص کننده ویسکوزیته خمیر) انجام

استاندارد اسلامپ جهت تعیین کارائی بتن است، استفاده شد. قطر بالا، قطر پائین، و ارتفاع آن به ترتیب برابر ۱۹، ۳۸/۱، و ۵۷/۲ میلیمتر میباشد. شکل ۱ تصویری از آن را در کنار خمیرپخش شده نشان میدهد.

شکل ۱- تصویر پخش جریان مینی اسلامپ



مخروط روی یک سطح صاف و کاملاً تراز توسط دست نگه داشته شد و از خمیر پر گردید. سپس با برداشتن مخروط اجازه داده شد تا خمیر کاملاً تخلیه و تحت اثر نیروی وزنش روی سطح جاری شود. پس از توقف پخش خمیر، قطر آن در دو جهت عمود بر هم اندازه گیری و میانگین آنها ثبت گردید. این آزمایش پس از یک ساعت از لحظه تماس آب و پودر مجدداً تکرار شد. قبل از تکرار آزمایش، ظرف پلاستیکی در بسته حاوی خمیر به مدت ۳۰ ثانیه با شدت تکان داده شد [6].

### آزمایش کیف جریان استوانه ای

ویسکوزیته خمیر روان توسط یک وسیله ساده به نام "کیف جریان استوانه ای" تعیین شد. دستگاه "کیف جریان استوانه ای" الهام گرفته از دستگاه آزمایش "کیف مارش" که در ابتدا برای آزمایش سیمان‌های چاه نفت توسعه یافته بود، می‌باشد. برخلاف آزمایش کیف مارش که زمان خروج حجم مشخصی از خمیر توسط شخص مشخص کننده اندازه گیری میشود، در آزمایش کیف جریان استوانه ای دبی خمیر خارج شده از کیف به طور اتوماتیک ثبت میشود و خطای اندازه گیری ناشی از برداشت آپراتور در آن وجود ندارد. در این دستگاه به جای کیف مارش (که گونه‌ها و اندازه‌های متعدد آن موجود است) از یک استوانه به قطر داخلی ۸۰ میلی‌متر و ارتفاع

$$g = \text{شتاب ثقل زمین [m/s}^2]$$

$$h = \text{فاصله بین تراز سطح مایع درون استوانه و خروجی [m]}$$

$$d = \text{قطر خروجی [m]}$$

$$D = \text{قطر استوانه [m]}$$

شدت جریان یک مایع ایده آل از حاصلضرب سرعت خروج مایع در سطح مقطع خروجی به دست می آید.

$$Q_i = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4 + 1}} \quad (3)$$

شدت جریان مایع تحت آزمایش، رابطه (۴)، با جای گذاری رابطه (۳) در رابطه (۱) به دست می آید:

$$Q_h = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4 + 1}} - Q_i \quad (4)$$

برای اهداف عملی  $Q_i$  با یک تابع شکل  $Q_{if}$  (shape function) مطابق رابطه ذیل بیان می شود:

$$Q_{if} = ah^2 + bh + C \quad (5)$$

این رابطه معادله نموداری است که تشریح کننده داده های به دست آمده از آزمایش قیف جریان می باشد. فقط داده های بین سطح تراز  $h_1$  و  $h_2$  (معمولاً ۱۵۰ تا ۳۵۰ میلی متر) مورد استفاده قرار می گیرد. چون خمیر ممکن است لزوماً از خاصیت ویسکوز خطی تبعیت نکند، از شدت جریان متوسط بین سطح تراز  $h_1$  و  $h_2$  جهت محاسبه نسبت مقاومت جریان  $\lambda_Q$  استفاده می شود.

$$\lambda_Q = \frac{\bar{Q}_t}{\bar{Q}_i} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_t = \left( \int_{h_1}^{h_2} Q_{if} dh \right) / (h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$\bar{Q}_i = \left( \int_{h_1}^{h_2} Q_i dh \right) / (h_2 - h_1) \quad (8)$$

اگر انتگرال های روابط (۷) و (۸) را به ترتیب با  $F_t$  و  $F_i$  نشان دهیم، خواهیم داشت:

می شود. چون جریان ماده به فشار موجود در خروجی، که تابعی از ارتفاع ماده موجود در استوانه است، بستگی دارد سطح معینی از ماده موجود در استوانه که بیانگر میانگین جریان باشد در محاسبات در نظر گرفته می شود. تراز بالایی این سطح نسبت به خروجی مخروط ( $h_2$ ) ۳۸۰-۴۰۰ میلی متر و تراز پایینی آن ( $h_1$ ) ۱۲۵-۱۵۰ میلی متر پیشنهاد شده است. اگر خمیر خیلی لزج باشد، تراز  $h_1$  را می توان تا ۲۵۰-۲۰۰ میلی متر افزایش داد و بدین ترتیب داده متأثر از مشکل خروج ماده لزج را به نحوی متعادل کرد. در این تحقیق سطح تراز خمیر بین ۳۵۰ میلی متر  $h_2$  تا ۱۵۰ میلی متر  $h_1$  مورد استفاده قرار گرفت.

Mortsell با استفاده از دستگاه قیف جریان و انجام آزمایش های مکرر روی خمیر سیمان، آب خالص، گلیسرین، روغن های معدنی و مصنوعی نشان داد که نتایج به دست آمده ( $\lambda_Q$ ) در تکرار یک آزمایش کاملاً مشابه و قابل اعتماد هستند و این پارامتر تشابه نزدیکی با ویسکوزیته مایع نیوتونی دارد.

### محاسبه نسبت مقاومت جریان $\lambda_Q$

جریان یک مایع ایده آل فقط تحت اثر نیروی جاذبه قرار می گیرد به این معنی که مقاومت داخلی و چسبندگی یا اصطکاک خارجی روی جریان مایع ایده آل اثر نمی گذارند. بنابراین می توان شدت جریان یک مایع واقعی را توسط اختلاف بین شدت جریان تئوریک مایع ایده آل ( $Q_i$ ) و شدت جریان مایع تحت آزمایش ( $Q_h$ )، مشخص نمود. این اختلاف ( $Q_t$ ) بیانگر جمع خصوصیات رئولوژیکی مایع آزمایش شده می باشد.

$$Q_t = Q_i - Q_h \quad (1)$$

سرعت جریان یک مایع ایده آل فقط به شتاب ثقل زمین و مشخصات هندسی ظرفی که مایع از آن خارج می شود، بستگی دارد.

$$V = \sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4 + 1}} \quad (2)$$

که در آن:

$$V = \text{سرعت متوسط در خروجی [m/s]}$$

جدول ۴ - خلاصه ای از محاسبات مربوط به تعیین  $\lambda_Q$

زمان	حجم خمیر	تراز خمیر	جریان خمیر	جریان ایده آل	تفاضل جریان
t (s)	V (m <sup>3</sup> 10 <sup>-3</sup> )	h (m)	(m <sup>3</sup> /s 10 <sup>-3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s 10 <sup>-3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s 10 <sup>-3</sup> )
0	0.000	0.398	-	-	-
2	0.011	0.396	-	-	-
4	0.059	0.387	-	-	-
6	0.118	0.375	-	-	-
8	0.172	0.365	-	-	-
10	0.223	0.355	-	-	-
12	0.282	0.343	0.027	0.130	0.103
14	0.337	0.333	0.026	0.128	0.102
16	0.389	0.323	0.025	0.126	0.102
18	0.439	0.313	0.023	0.125	0.101
20	0.485	0.304	0.023	0.123	0.100
22	0.531	0.295	0.026	0.121	0.095
24	0.583	0.285	0.024	0.119	0.095
26	0.630	0.276	0.023	0.117	0.094
28	0.677	0.267	0.022	0.115	0.092
30	0.722	0.258	0.022	0.113	0.091
32	0.765	0.250	0.021	0.111	0.090
34	0.807	0.241	0.022	0.109	0.088
36	0.850	0.233	0.019	0.107	0.089
38	0.888	0.226	0.018	0.106	0.088
40	0.924	0.219	0.019	0.104	0.085
42	0.962	0.211	0.015	0.102	0.087
44	0.993	0.205	0.017	0.101	0.084
46	1.027	0.199	0.019	0.099	0.080
48	1.065	0.191	0.017	0.097	0.080
50	1.099	0.185	0.017	0.095	0.079
52	1.132	0.178	0.016	0.094	0.078
54	1.165	0.172	0.016	0.092	0.077
56	1.197	0.166	0.015	0.091	0.075
58	1.227	0.160	0.016	0.089	0.073
60	1.260	0.154	0.014	0.087	0.073
62	1.288	0.148	-	-	-

$$\lambda_Q = \frac{F_t}{F_i} \quad (9)$$

نسبت مقاومت جریان  $\lambda_Q$  " که توسط رابطه (۹) تعریف می شود بدون واحد است و بین صفر برای مایع ایده آل و یک برای مایع با ویسکوزیته خیلی بالا تغییر می کند. برای محاسبه  $\lambda_Q$  از نرم افزار صفحه گسترده Excel استفاده می شود. داده های ورودی این برنامه عبارتند از: فاصله زمانی بین ثبت پی در پی وزن خمیر خارج شده از قیف جریان (معمولاً ۲ ثانیه)؛ لیست وزن خمیر توزین شده که توسط کامپیوتر ثبت شده است؛ مشخصات پارامترهای مربوط به دستگاه قیف جریان استوانه ای و چگالی خمیر تحت آزمایش.

پس از وارد کردن این داده ها برای هر یک از خمیرها، نمودار شدت جریان خمیر بر حسب ارتفاع آن در استوانه رسم شد و با گنجانیدن تابع درجه ۲ (رابطه ۵) در آن مقادیر پارامترهای  $c, b, a$  به دست آمد و جهت محاسبه  $\lambda_Q$  طبق روابط فوق الذکر مورد استفاده نرم افزار قرار گرفت. در شکل ۴ نمودار شدت جریان خمیر P3، مایع ایده آل و تفاضل آن دو بر حسب ترزاز ارتفاع خمیر در استوانه به همراه مقادیر  $c, b, a$  نشان داده شده است. پارامترهای ورودی برنامه جهت محاسبه  $\lambda_Q$  در جدول ۳ و خلاصه ای از محاسبات مربوط به تعیین  $\lambda_Q$  برای خمیر P3 در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای ورودی برنامه جهت محاسبه  $\lambda_Q$

واحد	مقادیر	پارامتر
		سطح مقطع خروجی قیف
m <sup>2</sup>	0.000050	
		سطح مقطع استوانه
m <sup>2</sup>	0.005153	
Sec	2	زمان تناوب
m	0.008	قطر خروجی قیف
m	0.081	قطر داخلی استوانه
m	0.35	ارتفاع پرشدن
m	0.15	ارتفاع خالی شدن
m	0.398	تراز پرشدن
m	0.125	تراز خالی شدن
kg/m <sup>3</sup>	2101	جرم حجمی خمیر

استاندارد تولید شوند،  $\lambda_Q$  به دست آمده مربوط به مخلوط خمیر با مقدار سیمان و فوق روان کننده مشخص و شرایط یکسان آزمایش (دما و نحوه اختلاط) نباید تغییر کند.

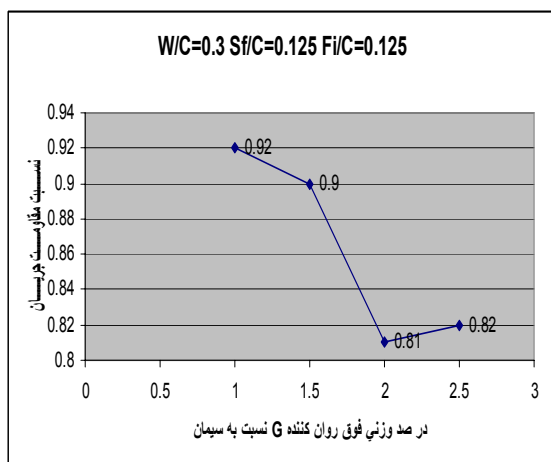
با توجه به اینکه روش مخلوط کردن در تعیین نقطه اشباع فوق روان کننده مؤثر است، ممکن است درصد بهینه مقدار فوق روان کننده برای ساخت خمیر و بتن کاملاً یکسان نباشد. معمولاً میزان نقطه اشباع فوق روان کننده حاصل از آزمایش خمیر، حد بالایی مقدار مربوطه در بتن می باشد لذا در اولین پیمانانه آزمایش ساخت بتن از ۸۰ درصد مقدار نقطه اشباع بدست آمده از آزمایش خمیر استفاده می شود و در صورت نیاز مابقی را بعداً اضافه می کنند.

در تحقیق حاضر خمیرهای P1-P4 جهت تعیین نقطه اشباع فوق روان کننده G در نظر گرفته شد. برای این منظور کلیه پارامترها ثابت و فقط مقدار فوق روان کننده متغیر بود. نتایج حاصل از آزمایش قیف جریان استوانه ای مربوطه در جدول ۵ نشان داده شده است.

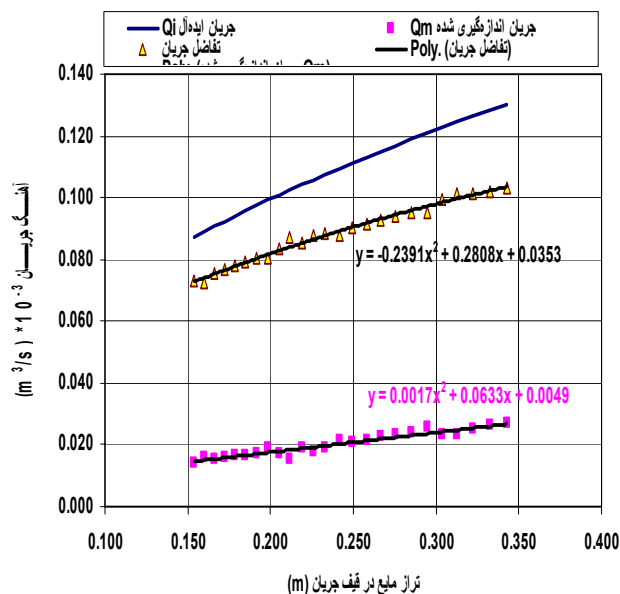
جدول ۵- نسبت مقاومت جریان خمیر P1-P4

خمیر	P1	P2	P3	P4
$\lambda_Q$	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۸۱

نمودار نسبت مقاومت جریان بر حسب مقدار فوق روان کننده در شکل ۵ رسم شده است. با توجه به این نمودار نقطه اشباع فوق روان کننده G برای خمیر با پودر و W/C مشخص برابر ۲٪ به دست آمد.



شکل ۵- نسبت مقاومت جریان بر حسب مقدار فوق روان کننده



شکل ۴- نمودار جریان خمیر P3، مایع ایده آل و تفاضل آنها

## نتایج آزمایش و تجزیه و تحلیل

### تعیین نقطه اشباع فوق روان کننده

برای یک نسبت آب به سیمان مشخص، مقدار درصد فوق روان کننده بر حسب وزن سیمان که استفاده بیشتر از آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای در رئولوژی خمیر ندارد، نقطه اشباع فوق روان کننده نام دارد. وقتی که نمودار نسبت مقاومت جریان  $\lambda_Q$  برای خمیر روان بر حسب درصد فوق روان کننده رسم شود، یک منحنی با شیبهای متمایز به دست می آید. محل تلاقی دو خط با شیبهای کاملاً متمایز نقطه اشباع فوق روان کننده نام دارد (شکل ۵). و مقدار فوق روان کننده در این نقطه به عنوان میزان درصد اشباع فوق روان کننده مربوط به سیمان خاص و نسبت آب به سیمان مشخص جهت حداکثر بهره‌وری از فوق روان کننده مورد آزمایش قابل استفاده خواهد بود. ضمن اینکه از این نمودار می توان به سازگاری سیمان و فوق روان کننده نیز پی برد. در صورت عدم وجود یک نقطه اشباع، سازگاری وجود ندارد و بهتر است که سیمان یا فوق روان کننده را عوض کرد.

میزان درصد اشباع فوق روان کننده جهت کنترل یکنواختی تولید تجاری فوق روان کننده با استفاده از یک سیمان مرجع مشخص قابل استفاده می باشد. در هر دو حالت اگر سیمان و فوق روان کننده کاملاً تحت یک سیستم کنترل کیفیت و

### میزان افت روانی خمیر با گذشت زمان

حفظ کارایی بتن در حد مطلوب برای مدت زمان حمل و ریختن آن در قالب بسیار حائز اهمیت می باشد. جهت کنترل این خصوصیت افت اسلامپ بتن پس از زمان معین ملاک عمل واقع می شود. هر چند که نقش سنگدانه ها و خصوصیت جذب آب آنها می تواند تاثیر گذار باشد، ولی نظر به اینکه در طرح اختلاط با توجه به رطوبت سنگدانه ها اصلاحیه لازم اعمال می شود نقش خمیر در میزان افت کارایی عمده است. در این تحقیق آزمایش جریان مینی اسلامپ خمیر های P1-P4 ده دقیقه و یک ساعت پس از ترکیب آب و پودر جهت بررسی میزان افت روانی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۶ مشخص است میزان افت روانی در این خمیر ها بسیار ناچیز است و به مقدار فوق روان کننده وابسته نیست.

### بررسی تأثیر عوامل مختلف در لزجت خمیر

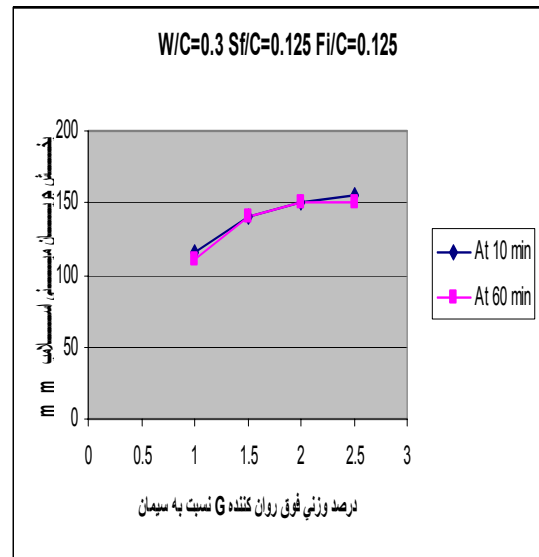
جهت بررسی اجمالی تاثیر نوع فوق روان کننده، نوع فیلر و نسبت آب به سیمان خمیرهای P5-P8 مورد آزمایش (قیف جریان استوانه ای) قرار گرفت. مقادیر  $\lambda_Q$  محاسبه شده در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نسبت مقاومت جریان خمیرهای P5-P8

خمیر	P5	P6	P7	P8
$\lambda_Q$	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۶۱

### تأثیر نوع فوق روان کننده

امروزه انواع فوق روان کننده ها با عملکرد و قیمت های متفاوت در بازار موجود می باشد. بدیهی است که شناخت کافی نسبت به رفتار هر کدام برای بهینه کردن یک طرح اختلاط به لحاظ اقتصادی و کارایی مورد نیاز، ضروری است. در این رابطه خمیر P5 و P6 با خصوصیت مشابه لزجت (نسبت مقاومت جریان به ترتیب برابر ۰/۵۶ و ۰/۵۵) در نظر گرفته شد. ملاحظه گردید برای دارا بودن خصوصیت مشابه، مصرف فوق روان کننده  $R = 1/7$  برابر مقدار مصرفی نوع G است. البته این نسبت به نوع و مقدار دیگر مواد تشکیل دهنده خمیر نیز بستگی دارد و باید به طور خاص برای خمیر مورد نظر بررسی گردد.



شکل ۶- جریان اسلامپ در ۱۰ و ۶۰ دقیقه

جدول ۶- جریان مینی اسلامپ (mm) در ۱۰ و ۶۰ دقیقه

خمیر	P1	P2	P3	P4
جریان اسلامپ (میلیمتر) در ۱۰ دقیقه	۱۱۵	۱۴۰	۱۵۰	۱۵۵
جریان اسلامپ (میلیمتر) در ۶۰ دقیقه	۱۱۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۵۰

### تأثیر نوع فیلر

با توجه به لزوم مصرف نسبتاً زیاد پودر در بتن توانمند و بویژه بتن خودتراکم و جهت رعایت مسائل اقتصادی، زیست محیطی و دوام بتن باید از مصرف بیش از حد سیمان پرهیز کرد و بجای آن از مواد افزودنی معدنی فعال (پوزولان) و غیر فعال (فیلر) استفاده نمود. بدیهی است که نوع فیلر در لزجت و روانی خمیر مؤثر است. برای مثال با مقایسه خمیر P5 و P7 که تنها تفاوت بین آنها نوع فیلر است، ملاحظه می شود لزجت خمیر P7 ( $\lambda_Q = 0/81$ ) با کوارتز میکرونیزه  $1/44$  برابر لزجت خمیر



## مراجع

1. Mortsell E., Smeplass S., Hammer T.A., Maage M.; "FLOWCYL – How to Determine the Flow Properties of the Matrix Phase of High Performance Concrete", 4<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, Paris 1996.
2. Lachemi M., Hossain K.M.A., Patel R., Shehata M., Bouzoubaa N.; "Influence of paste/mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self consolidating concrete"; Magazine of Concrete Research, vol 59, No. 7, Sep. 2007, PP 517-528.
3. Chao-Wei Tang, Tsong Yen, Chao-Shun Chang, Kuan-Hung Chen "Optimizing Mixture Proportions for Flowable High Performance Concrete via Rheology Tests " ACI Materials Journal, v. 98, No. 6, Nov-Dec 2001.
4. Roussel N., Le Roy R., "Marsh Cone: a test or a rheological apparatus?" Cement and Concrete Research, vol. 35, 2005, PP 823-830.
5. Agullo L., Toralles-Carbonari B., Gettu R., Aguado A., "Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – A study based on the Marsh Cone test", Materials and Structures, vol. 32, Aug.-Sep. 1999, PP 479-485.
6. Aitcin P.-C., "High-Performance Concrete", E & FN SPON, London, 1998, P176.

P5 ( $\lambda_Q = 0.56$ ) با ماسه سیلیسی است. علت این امر تیز گوشه بودن ذرات کوارتز میکرونیزه در مقایسه با گرد گوشه بودن ذرات ماسه سیلیسی میباشد.

## تاثیر نسبت آب به سیمان

همانطور که انتظار می رفت با افزایش نسبت آب به سیمان از لزجت خمیر کاسته شد. مقایسه خمیر P8 ( $\lambda_Q = 0.61$ ) با خمیر P7 ( $W/C = 0.42$ ,  $\lambda_Q = 0.81$ )،  $W/C = 0.38$ ، صحت این موضوع را نشان میدهد.

## نتیجه گیری

نظر به اینکه نقش خمیر در بتن توانمند و خودتراکم قابل ملاحظه است، جهت طراحی بهینه این نوع بتن ها آزمایش فاز خمیر ضروری میباشد. با کمتر از ۳ لیتر خمیر و آزمایشهای ساده قیف جریان استوانه ای و جریان مینی اسلامپ پارامترهای مرتبط با لزجت و تنش جاری شدن خمیر به دست آمد. کسب اطلاعات با ارزش و ضروری جهت طراحی بتن خودتراکم شامل: نقطه اشباع فوق روان کننده؛ میزان کاهش روانی خمیر با گذشت زمان؛ تاثیر نسبت آب به سیمان، نوع فوق روان کننده و فیلدر در لزجت خمیر؛ به سادگی امکان پذیر شد.

## تقدیر و تشکر

از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و پرسنل محترم بخش بتن که در فراهم نمودن امکانات مورد نیاز برای انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدر دانی می گردد.