

# بررسی تنش جاری شدن و ویسکوزیته پلاستیک مخلوط‌های بتن خود تراکم حاوی پودر سنگ

پرویز قدوسی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر شیرزادی جاوید<sup>۲</sup>، یاسر رحمانی چراتی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

Ghoddousi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۰۱

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۳

**چکیده** - استفاده از بتن خود تراکم در پروژه‌های عمرانی به دلیل مزایای آن شامل کیفیت بالا و جاری شدن تحت وزن خود بدون نیاز به لرزش، در حال افزایش است. رئولوژی این بتن یکی از خواص بسیار مهم آن است که روی خصوصیات مکانیکی و دوام آن تاثیر چشمگیری دارد. در این پژوهش با استفاده از دستگاه رئومتر ویژه بتن که برای اولین بار در ایران ساخته شده، پارامترهای رئولوژی بتن خود تراکم تعیین شده است. برای اعتبار سنجی عملکرد دستگاه و کالیبراسیون آن از روغن با ویسکوزیته مشخص استفاده شده است. مقدار ویسکوزیته پلاستیک به دست آمده به وسیله دستگاه برابر ۲/۲۰۸ پاسکال ثانیه و مقدار ارائه شده ویسکوزیته روغن به وسیله کارخانه برابر ۲/۲۱۹ شده است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که دستگاه رئومتر ساخته شده به خوبی منطبق با طرح بوده و پارامترهای رئولوژی به وسیله دستگاه با دقت مناسبی قابل تعیین است. همچنین چند مخلوط آزمایشی بتن خود تراکم حاوی دو نوع پودر سنگ به عنوان پرکننده ساخته شده است. مقادیر محاسبه شده ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم این مخلوط‌ها نشان می‌دهد نمونه حاوی پودر سنگ آهک تا ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب بهترین عملکرد را نشان می‌دهد و با افزایش این مقدار به ۳۰۰ کیلوگرم در متر مکعب مقدار تنش جاری شدن بتن افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** رئومتر بتن، تنش جاری شدن، ویسکوزیته پلاستیک، بتن خود تراکم، مدل بینگام.

## ۱- مقدمه

خواص رئولوژی یا سیال شناسی بتن خود تراکم نه تنها در خواص بتن تازه بلکه در خواص مکانیکی و دوام بتن نقش موثری دارد. رئولوژی علمی است که با تغییر شکل و جاری شدن مواد ارتباط دارد. خواص بتن تازه شامل پایداری، قابلیت تحرک و تراکم پذیری از پارامترهای رئولوژی بتن محسوب می‌شوند.

امروزه بتن خود تراکم، به صورت گسترده در صنعت ساخت استفاده می‌شود. نرخ سریع‌تر بتن‌ریزی، بهبود تراکم بتن در اطراف آرماتور، امکان بتن‌ریزی در مقاطع پر فولاد بدون وایبره کردن، کاهش مدت ساخت، بهبود پمپاژ از جمله مزایای بتن خود تراکم است. بدون شک

رئولوژی مایع‌ها و مواد ابداع شده که برای مطالعه رفتار تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک استفاده می‌شوند. رئومترهایی که برای بررسی رفتار بتن استفاده می‌شوند به شرح زیر است؛ مزایا و محدودیت‌های هر یک از رئومترها و تاریخچه آن‌ها در گزارش ACI 238.1R [۳] ارائه شده است.

شاید بتوان گفت که Tattersal و Banfill [۱] اولین پژوهشگرانی بودند که موفق شدند تا رئومتر برای بتن تازه را در سال ۱۹۷۳ ابداع کنند. رئومتر ساخته شده MKI نام دارد. این وسیله مقادیر  $g$  و  $h$  را اندازه‌گیری می‌کند که با کالیبره خاص قابل تبدیل شدن به پارامترهای رئولوژی در مدل بینگام یعنی  $\tau_0$  و  $\mu\dot{\gamma}$  است. ارتباط بین گشتاور پیچشی با سرعت چرخش پره رئومتر در معادله (۲) به شرح زیر بیان شده است:

$$T = g + hN \quad (2)$$

که در آن  $T$  گشتاور پره (بر حسب نیوتون-متر)،  $N$  سرعت چرخش (بر حسب دور در ثانیه)،  $g$  عدد ثابت یا گشتاور جاری و محل مقطع منحنی با محور  $T$ ، و  $h$  عکس شیب منحنی یا ویسکوزیته گشتاور (بر حسب نیوتون متر در ثانیه) است که ثابت شده، با تشابه قراردادن معادله (۱) و (۲) مقدار ثابت های  $g$  و  $h$  مشابه پارامترهای  $\tau_0$  و  $\mu\dot{\gamma}$  است. بنابراین پس از آنکه در سرعت‌های مختلف چرخش رئومتر، گشتاور چرخشی اندازه‌گیری و در محور مختصات رسم و مقادیر  $g$ ،  $h$  تعیین شدند؛ از معادلات (۳) و (۴) که به معادلات Reiner [۴] موسوم است می‌توان مقادیر تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک بتن را محاسبه کرد.

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} (g, Nm) \quad (3)$$

مخلوط بتن تازه را می‌توان ذرات معلق سنگدانه‌ها در خمیر سیمان در نظر گرفت. به عبارت دیگر بتن تازه مانند مایع عمل می‌کند. معمولاً رفتار جریان بتن را با مدل بینگام نشان می‌دهند [۱]. این مدل به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

در این معادله پارامتر  $\tau_0$  تنش جاری شدن و نشانه تنش برشی مورد نیاز برای شروع جاری شدن است.  $\tau$  تنش برشی،  $\dot{\gamma}$  نرخ برشی و  $\mu$  ویسکوزیته پلاستیک است. همان گونه که مشخص است در نمودار ترسیمی تنش برشی در مقابل نرخ برشی، شیب خط همان ویسکوزیته پلاستیک خواهد بود که بر مقاومت به جاری شدن اثر می‌گذارد.

برای مواردی که قرار است رفتار جاری شدن آن‌ها تعیین شوند و این مواد از مدل بینگام تبعیت می‌کنند، نیاز به اندازه‌گیری تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک است. بنابراین کمینه ۲ نقطه از منحنی جریان باید در آزمایشگاه اندازه‌گیری شود. اگر فقط یک نقطه اندازه‌گیری شود، تعداد بی‌نهایت خط می‌توان ترسیم کرد که از آن نقطه عبور می‌کنند. به عبارت دیگر اندازه‌گیری دو پارامتر رئولوژی اجازه می‌دهد که رفتار دو نوع بتن متفاوت کاملاً قابل تشخیص باشد. Castro و همکاران [۲] در پژوهش خود نشان دادند که هر نوع بتن پارامترهای رئولوژی خاص خود را دارد؛ و معمولاً، بتن پر مقاومت از تنش جاری شدن در حدود کم برخوردار است، اما ویسکوزیته پلاستیک آن بیشتر از بتن معمولی است. تنش جاری شدن کمتر به مفهوم این است که بتن تحت وزن خود قابلیت جاری شدن دارد. در حالی که ویسکوزیته پلاستیک بیشتر نیاز است تا از جدا شدن سنگدانه‌ها جلوگیری شود.

رئومترها، دستگاه‌هایی است که برای بررسی خواص

ویسکوزیته پلاستیک بر حسب پاسکال ثانیه،  $D$  قطر پره دستگاه بر حسب متر،  $Z$  ارتفاع کف پره تا کف ظرف بر حسب میلی‌متر،  $g$  فاصله بین شعاع پره تا شعاع ظرف اندازه‌گیری بر حسب میلی‌متر،  $H$  ارتفاع پره بر حسب میلی‌متر و  $N$  سرعت چرخش بر حسب رادیان بر دقیقه است.

یکی از تفاوت‌های بتن خود تراکم و معمولی از حیث اجزاء تولید آن‌ها، استفاده از فیلرهای پودر سنگ در بتن خود تراکم برای افزایش ویسکوزیته پلاستیک است. در حالی که در بتن معمولی فیلر استفاده نمی‌شود. پژوهشگران در رابطه با اثر مقدار و نوع پودر سنگ در خواص رئولوژی بتن خود تراکم پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. Yahia و همکاران [ ۸ ] اثر پودر سنگ آهک را در رئولوژی ملات بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزودن پرکننده سنگ آهک در محدوده‌ای مشخص از مقدار پودر، روان‌گرایی مخلوط تغییر نمی‌کند، اما با افزایش مقدار پودر بیش از حد بحرانی، ویسکوزیته مخلوط به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای نمونه مخلوط‌هایی که با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شده بودند، با افزایش مقدار پودر از ۱۰ درصد وزنی سیمان به ۵۰ درصد، ویسکوزیته از ۲/۳ به ۶/۵ پاسکال ثانیه افزوده شد. در پژوهش Billberg [ ۹ ] اثر نرمی پودر سنگ بر رئولوژی بتن خود تراکم بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد تنش جاری برای بتن خود تراکم با پودر سنگ درشت دانه بیشینه است و برای بتن خود تراکم با پودر سنگ نرم‌تر کمینه است. در نتیجه تغییر نرمی پودر، عکس روند برای ویسکوزیته پلاستیک درست است، به عبارت دیگر با افزایش نرمی پودر به ویسکوزیته پلاستیک افزوده می‌شود.

## ۲- نوع اهمیت پژوهش

در کشور ما تا پیش از این رئومترهای ویژه روغن و ملات

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{4\pi H} (h, Nm.S) \quad (۴)$$

که در این معادلات  $T$  و  $\mu$  به ترتیب تنش تسلیم بر حسب پاسکال و ویسکوزیته پلاستیک بر حسب پاسکال-ثانیه و  $h$  همان پارامتر ویسکوزیته گشتاور بر حسب نیوتون متر در ثانیه و  $g$  پارامتر گشتاور جاری بر حسب نیوتون-متر است که قبلاً تشریح شدند. همچنین  $H$  برابر ارتفاع پره رئومتر،  $R_2$  برابر شعاع پره و  $R_1$  برابر شعاع ظرف استوانه ای حاوی بتن است.

در اواخر دهه ۱۹۸۰، ویسکومتر BML [ ۴ ] ابداع شد. در سال ۱۹۹۶ در فرانسه به نام Btrheom [ ۵ ] به صورت تجاری ساخته شد. اما پژوهش‌هایی که به وسیله‌ی Tattersal و همکاران [ ۱ ] در مقایسه با نتایج انواع رئومترها انجام شد، نشان می‌دهد که نتایج این دستگاه‌ها (تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک) متفاوت است. در سال ۲۰۰۴ رئومتر ICAR به وسیله‌ی Koehler [ ۵ و ۶ ] ابداع شد. این آخرین نسل رئومترهای بتن است که تاکنون ساخته شده است. مزایای این دستگاه نسبت به رئومترهای پیشین، قابلیت جابه‌جایی دستگاه و حمل و نقل ساده و همینطور قابلیت ارزیابی رئولوژی انواع بتن‌ها به ویژه بتن خود تراکم است.

Lascar و همکاران [ ۷ ] در پژوهش خود نشان داده‌اند که رابطه‌ای بین ابعاد هندسی و گشتاور پیچشی دستگاه رئومتر و ویسکوزیته پلاستیک و تنش جاری شدن بتن وجود دارد.

این معادله (معادله (۵)) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \pi D^2 \left( \frac{H}{2} + Z + \frac{D}{6} \right) \tau_0 + \frac{\pi^2 D^3}{120} N \left( \frac{D}{4Z} + \frac{H+Z}{g} \right) \mu$$

که  $T$  برابر گشتاور پیچشی ثبت شده بر حسب نیوتون متر،  $\tau_0$  و  $\mu$  به ترتیب تنش تسلیم بر حسب پاسکال و

ابعاد ظرف و پره بر اساس اندازه‌گیری بیشینه اندازه سنگدانه انتخاب می‌شود. بنابراین دستگاه ساخته شده دارای ارتفاع پره ۱۲۷ میلی‌متر و قطر ظرف ۳۴۰ میلی‌متر است که برای بتن‌های خود تراکم دارای بیشینه اندازه حدود ۱۹ میلی‌متر مناسب است. با استفاده از این دستگاه، دو نوع آزمایش را می‌توان انجام داد. آزمایش رشد تنش که پره با سرعت کم و ثابت می‌چرخد. افزایش گشتاور تابع زمان اندازه‌گیری می‌شود. دلیل اندازه‌گیری‌ها برای این است که با خط برازش شده به نقاط به دست آمده، گشتاور در سرعت‌های مختلف بتوان مقدار پارامتر گشتاور جاری و ویسکوزیته گشتاور را به دست آورد و سپس از معادلات (۳) و (۴) مقدار ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم بتن خود تراکم محاسبه می‌شود. بیشینه گشتاور اندازه‌گیری شده برای محاسبه تنش جاری استاتیک استفاده می‌شود. آزمایش دیگر منحنی جریان برای تعیین کردن تنش جاری شدن دینامیک و ویسکوزیته پلاستیک است. در آزمایش منحنی جریان که به منحنی جریان دینامیک نیز موسوم است، سرعت پره به صورت تدریجی از ۰ با فاصله ۰/۱ افزایش پیدا می‌کند تا ساختار تغلیظ پذیری شکسته شود، که به آن مدت شکستن گفته می‌شود، سپس سرعت پره به صفر کاهش داده می‌شود [۵ و ۶]. همچنین می‌توان تغلیظ پذیری را در منحنی جریان اندازه‌گیری کرد. برای اندازه‌گیری آن، باید ابتدا بتن برای مدت معینی در حالت استراحت قرار داده شود. سپس سرعت رئومتر از صفر به بیشینه افزایش داده شود و سپس به سرعت صفر برگشت داده می‌شود.

#### ۴- برنامه آزمایشگاهی

##### ۴-۱- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی برای ساخت بتن خود تراکم از نوع سیمان پرتلند تیپ ۳۲۵-۱ کارخانه سیمان تهران بوده، همچنین از پودر سنگ

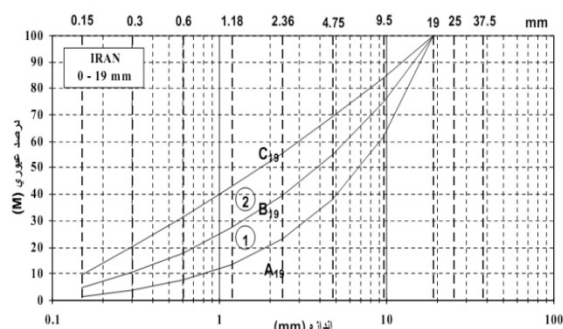
وجود داشته و استفاده شده است؛ اما از این رئومترها نمی‌توان برای بتن استفاده کرد، زیرا وجود سنگدانه‌های درشت در بتن باعث ایجاد خطای بسیار زیاد در آن‌ها می‌شود. از طرف دیگر رئولوژی بتن خود تراکم پارامتر بسیار مهمی است که نیاز به اندازه‌گیری دقیق به وسیله رئومتر ویژه بتن دارد؛ بنابراین طرح ساخت دستگاه رئومتر بتن خود تراکم برای اولین بار در کشور در قالب یک پروژه پژوهشی در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام و در پژوهش حاضر مورد ارزیابی و استفاده قرار گرفته است.

#### ۳- ساخت و چگونگی کار دستگاه رئومتر

دستگاه ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت ایران با مشخصات دستگاه رئومتر ICAR مشابهت دارد که به وسیله Koehler در سال ۲۰۰۴ ابداع شد [۵ و ۶]. به عبارت دیگر این دستگاه از نوع رئومترهای هم محور است، که بیشترین دقت را در تعیین ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم بتن دارند. این دستگاه شامل موتور مولد گشتاور، پره چهار تیغه، دستگاه نرم‌افزار و ظرف است (شکل ۱).



شکل (۱) دستگاه رئومتر ساخته شده



شکل (۲) منحنی‌های دانه‌بندی طرح ملی مخلوط ایران با بیشینه اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر

جدول (۱) ترکیب شیمیایی سیمان و پودر سنگ مورد استفاده در پژوهش

ترکیب شیمیایی	سیمان	پودر سنگ آهک
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۷۴	۲/۸۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۹۰	۰/۳۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۵۰	۰/۵۰
MgO	۱/۲۰	۱/۸۰
CaO	۶۲/۹۵	۵۱/۲۲
SO <sub>3</sub>	۳/۰۰	۱/۲۴
کسر وزن در اثر سرخ شدن	۱/۵۶	۴۲/۰۶
باقی مانده نامحلول	۰/۷۴	۲/۸۰

جدول (۲) خصوصیات روغن مورد استفاده برای اعتبار سنجی عملکرد دستگاه

نام آزمون	واحد اندازه گیری	مقدار محاسبه شده	دمای اندازه گیری
چگالی	kg/m <sup>3</sup>	۸۹۸	۱۵ درجه سانتی‌گراد
ویسکوزیته پلاستیک	est	۲۴۷۱	۱۰ درجه سانتی‌گراد

جدول (۳) ترکیب مخلوط انواع بتن خود تراکم ساخته شده

شناسه مخلوط	سیمان kg/m <sup>3</sup>	پودر سنگ آهک kg/m <sup>3</sup>	پودر سنگ گرانیت kg/m <sup>3</sup>	آب kg/m <sup>3</sup>	نسبت آب به سیمان	مصالح سنگی kg/m <sup>3</sup>	فوق روان کننده (درصد حجمی سیمان)	حجم خمیر سیمان (لیتر در متر مکعب)
LP300-G19	۳۸۰	۳۰۰	-	۱۷۱	۰/۴۵	۱۴۲۲/۴	۱/۲	۴۱۰
LP200-G19	۳۸۰	۲۰۰	-	۱۷۱	۰/۴۵	۱۵۲۴	۱/۳	۳۷۰
LP100-G19	۳۸۰	۱۰۰	-	۱۷۱	۰/۴۵	۱۶۲۵/۵۹	۱/۰۵	۳۳۰
GP300-G19	۳۸۰	-	۳۰۰	۱۷۱	۰/۴۵	۱۴۲۲/۴	۱/۱۷	۴۱۰
GP200-G19	۳۸۰	-	۲۰۰	۱۷۱	۰/۴۵	۱۵۲۴	۱/۲۵	۳۷۰
GP100-G19	۳۸۰	-	۱۰۰	۱۷۱	۰/۴۵	۱۶۲۵/۵۹	۱	۳۳۰

آهک و پودر سنگ گرانیت الک شده از الک شماره ۱۰۰ به عنوان پرکننده و افزاینده ویسکوزیته استفاده شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک را نشان می‌دهد.

سنگدانه‌های درشت مصرفی استفاده شده در این پژوهش از نوع شکسته و از معادن شهریار با بیشینه اندازه ۱۹ میلی‌متر روی منحنی C<sub>19</sub> و بر مبنای روش ملی طرح مخلوط بتن ایران انتخاب شد. سنگدانه‌های ریز مصرفی از نوع طبیعی شکسته و از معادن شهریار تامین شده است. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی طرح ملی مخلوط ایران با بیشینه اندازه سنگدانه‌های ۱۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد. به منظور ثابت نگه داشتن دانه‌بندی سنگدانه‌ها در طول آزمایش و همچنین مطابقت با منحنی‌های یاد شده طرح ملی مخلوط بتن ایران، سنگدانه‌ها در ۸ اندازه (۱۹، ۱۲/۵، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۳ میلی‌متر) الک شده و در ظروف مجزا تفکیک شد و مطابق با مقادیر منحنی C<sub>19</sub> و استفاده شد.

افزودنی شیمیایی از نوع فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلاتی در این پژوهش استفاده شده است. همچنین در مرحله اول برای آزمایش عملکرد صحیح و اعتبار نتایج به دست آمده به وسیله‌ی دستگاه، از یک روغن استاندارد با ویسکوزیته مشخص که به وسیله‌ی کارخانه سازنده ارائه می‌شود استفاده شده است.

جدول (۴) نتایج آزمایش‌های رئولوژی مخلوط‌های بتن خود تراکم

شاخص پایداری چشمی (VSI)	جریان اسلامپ		قیف V		جعبه U	جعبه L	حلقه J	شناسه مخلوط
	۵۰ T	جریان اسلامپ	۵ دقیقه	اولیه	(h1-h2)	(h2/h1)	(mm)	
	(S)	(mm)	(S)	(mm)	(mm)	(mm)		
۱	۲/۳	۷۱۰	۶/۱۳	۵/۲۸	۱۱	۰/۷۷	۶	LP300-G19
۱	۱/۷۷	۷۲۵	۹/۴۳	۸/۲۳	۱۰	۰/۸۲	۸	LP200-G19
۱	۱/۵۸	۶۹۰	۹/۶۳	۷/۵۸	۶	۰/۸۳	۱۱	LP100-G19
۰	۱/۲	۷۵۰	۵/۲۱	۴/۳۵	۲	۰/۸۹	۳	GP300-G19
۰	۱/۵۴	۷۶۰	۷/۳۸	۶/۵۷	۰	۰/۹۴	۲	GP200-G19
۰	۲/۴	۷۴۰	۷/۵	۸	۱	۰/۸۵	۷	GP100-G19

می‌شود، که درصد تخلخل بین سنگدانه‌های متراکم شده در این تحقیق برابر با ۲۲ درصد می‌باشد. برای محاسبه حجم خمیر فاصله دهنده ( $V_{\text{فضای سنگدانه}}$ )، از معادله (۷) استفاده می‌شود.

$$V_{\text{فضای سنگدانه}} = 8 + \left( \frac{16-8}{4} \right) (R_{S-A} - 1) \quad (7)$$

در معادله فوق،  $R_{S-A}$  نرخ شکل و زاویه دار بودن ظاهری سنگدانه‌ها است که در گزارش مرجع [۱۱] جدولی با شکل‌های متفاوت سنگدانه و مقادیر  $R_{S-A}$  نشان داده شده است.

در این تحقیق سنگدانه‌ها با  $R_{S-A}$  برابر با ۳ استفاده شده است. بنابراین:

$$V_{\text{فضای سنگدانه}} = 8 + \left( \frac{16-8}{4} \right) (3-1) = 12$$

و حجم کل خمیر برابر است با:

$$V_{\text{خمیر}} = 100 - \frac{(100-12)(100-22)}{100} = 31/36$$

بدیهی است عدد محاسبه شده ویسکوزیته که به وسیله‌ی دستگاه رئومتر به دست می‌آید باید با عدد ارائه شده به وسیله‌ی کارخانه سازنده مطابقت داشته باشد. خصوصیات روغن مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ۴-۲- ترکیب مخلوط‌های بتن خود تراکم

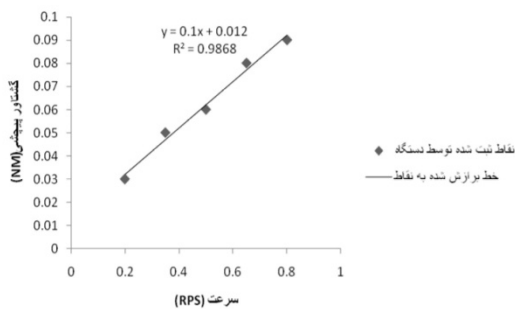
ترکیب نسبت‌های مخلوط انواع بتن‌های ساخته شده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول نیز مشخص است با تغییر مقدار پودر سنگ حجم خمیر سیمان تغییر می‌کند. در گزارش مرجع [۱۱] برای محاسبه حجم خمیر مورد نیاز از فرمول به شرح زیر استفاده شده است:

$$V_{\text{خمیر}} = 100 - \frac{\left( 100 - V_{\text{فضای سنگدانه}} \right) \left( 100 - \% \text{تخلخل} \right)}{100}$$

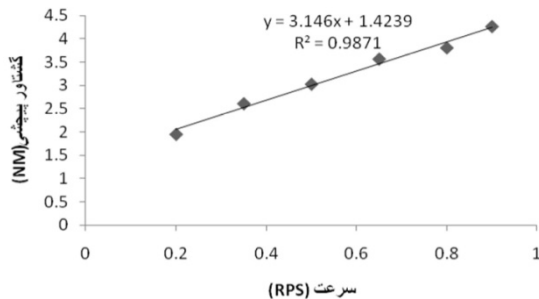
در فرمول فوق حجم خمیر مورد نیاز ( $V_{\text{خمیر}}$ ) حجمی است که تخلخل بین سنگدانه‌ها را پر کند و حجم خمیری که برای ایجاد فاصله بین سنگدانه‌ها ضروری است. درصد تخلخل سنگدانه‌ها از روش آزمایش در مرجع [۱۱] تعیین

جدول (۵) مقادیر محاسبه شده پارامترهای رئولوژی انواع مخلوط بتن خود تراکم با دستگاه رئومتر

شناسه مخلوط	گشتاور جاری Nm	ویسکوزیته گشتاور Nm.S	تنش جاری شدن Pa	ویسکوزیته پلاستیک Pa.S
LP300-G19	۱/۴۲۳	۳/۱۴۶	۱۹۷/۳	۶۹/۵
LP200-G19	۱/۰۱۱	۳/۲۱۳	۱۴۰/۱	۷۰/۹
LP100-G19	۱/۴۲۹	۲/۶۰۶	۱۹۸/۱	۵۷/۵
GP300-G19	۰/۰۷۸	۲/۳۳۳	۱۰/۸۱۳	۵۱/۵۱
GP200-G19	۰/۱۴۳	۴/۶۴۶	۱۹/۸۲	۱۰۲/۵۸
GP100-G19	-۰/۰۵۸	۳/۳۹۷	-۸/۰۴	۷۵



شکل (۳) نتایج ثبت شده به وسیله دستگاه برای روغن استاندارد و خط برازش شده به نقاط



شکل (۴) نتایج ثبت شده به وسیله دستگاه و خط برازش شده به نقاط برای مخلوط بتن LP300-G19

با قرار دادن این مقادیر در معادلات (۳) و (۴) مقدار ویسکوزیته محاسباتی برابر ۲/۲۰۸ پاسکال ثانیه به دست می آید. با توجه به اینکه دمای روغن در زمان انجام آزمایش ۱۰ درجه بوده است. مقدار ویسکوزیته ارائه شده در این دما به وسیله کارخانه سازنده دستگاه از جدول ۲

بنابراین کمینه خمیر در طرح‌های مخلوط حدود ۳۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.

### ۴-۳- روش‌های آزمایش

آزمایش‌های ارزیابی کارایی بتن خود تراکم شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L، آزمایش جعبه U، آزمایش حلقه J و آزمایش قیف V مطابق دستورالعمل مرجع [۱۲] انجام شده است. همچنین رئولوژی مخلوط‌ها به وسیله رئومتر بتن ساخته شده در این پژوهش انجام شده است.

### ۵- نتایج و تفسیر

#### ۵-۱- کارایی مخلوط‌ها

نتایج آزمایش‌های کارایی مخلوط‌های بتن خود تراکم ساخته شده در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است مخلوط‌های حاوی پودر سنگ گرانبه نسبت به مخلوط‌های دارای پودر سنگ آهک شاخص پایداری چشمی مطلوبتری را دارا است.

#### ۵-۲- کالیبره دستگاه ارزیابی صحت عملکرد

همان گونه که مطرح شد در مرحله اول برای ارزیابی اعتبار نتایج به دست آمده از دستگاه رئومتر، روغن با ویسکوزیته مشخص به وسیله دستگاه آزمایش شده است. نتایج گشتاور پیچشی به دست آمده از دستگاه در سرعت‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است مقدار پارامترهای ویسکوزیته گشتاور و گشتاور جاری به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۰۱۲ است.

پلاستیک کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است. در مخلوط‌های حاوی پودر سنگ گرانیته نیز مشاهده می‌شود که در یک مقدار بهینه از این پودر سنگ (۲۰۰ کیلو گرم در متر مکعب) مقدار تنش جاری شدن و ویسکوزیته پلاستیک بتن خود تراکم مناسب است.

### ۵-۳-۲- اثر نوع پودر سنگ

مقایسه نتایج بتن‌های حاوی پودر سنگ آهک به عنوان پرکننده در بتن خود تراکم با بتن‌های حاوی پودر سنگ گرانیته در جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که تنش جاری شدن بتن‌های حاوی پودر سنگ گرانیته به مقدار چشم‌گیری کاهش یافته است. همچنین این بتن‌ها دارای بیشترین جریان اسلامپ و کمترین مقدار آزمایش حلقه J است. بنابراین پارامترهای رئولوژی بتن‌های خودتراکم حاوی پودر سنگ گرانیته از حیث قابلیت پرکردن و عبور بسیار بهتر از بتن خود تراکم حاوی پودر سنگ آهک است. این مطلب احتمالاً به دلیل شکل و نرمی ذرات پودر سنگ گرانیته است، که در این قسمت نیاز به پژوهش بیشتری در آینده است.

### ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش انجام گرفته روی دستگاه رئومتر که برای اولین بار در ایران ساخته شده است، می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- برای اعتبار سنجی عملکرد صحیح دستگاه، نتایج ویسکوزیته ارائه شده از طرف کارخانه سازنده روغن بسیار نزدیک به مقدار ویسکوزیته به دست آمده از دستگاه است که این امر نشان دهنده اعتبار عملکرد دستگاه است.

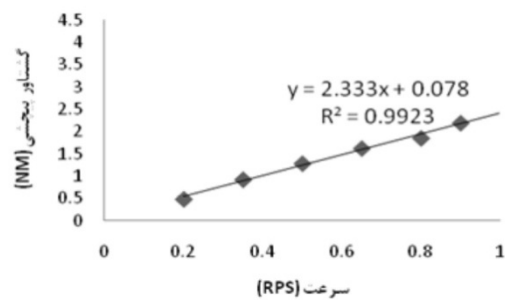
- نتایج به دست آمده از انواع مخلوط‌های بتن خود تراکم کاملاً در محدوده گزارش شده به وسیله پژوهشگران

برابر ۲۴۷۱ CST می‌باشد که با تبدیل آن به واحد پاسکال ثانیه، برابر ۲/۲۱۹ پاسکال ثانیه به دست می‌آید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار به دست آمده به وسیله دستگاه بسیار نزدیک به عدد ارائه شده به وسیله کارخانه سازنده است. این نتیجه بیانگر صحت ودقت مناسب در عملکرد دستگاه ساخته شده است.

### ۵-۳-۳- ارزیابی رئولوژی با رئومتر

#### ۵-۳-۱- اثر مقدار پودر سنگ

در مرحله دوم، نمونه‌های بتن خود تراکم به وسیله دستگاه مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نتایج به دست آمده گشتاور به وسیله دستگاه و خط برازش شده برای مخلوط‌های LP300-G19 و GP300-G19 و جدول ۵ مقادیر محاسبه شده ویسکوزیته پلاستیک و تنش جاری شدن انواع بتن‌های خود تراکم را نشان می‌دهند. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند با افزایش مقدار پودر سنگ آهک از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب، مقدار ویسکوزیته افزایش و تنش جاری شدن کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۵) نتایج ثبت شده به وسیله دستگاه و خط برازش شده به نقاط برای مخلوط بتن GP300-G19

اما زمانی که مقدار پودر از ۲۰۰ به ۳۰۰ افزایش پیدا می‌کند خواص رئولوژی مخلوط بتن خود تراکم افت کرده است. به این معنی که تنش جاری شدن افزایش و ویسکوزیته



- است.
- با افزایش مقدار پودر سنگ آهک و گرانیت از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب عملکرد بتن از نقطه نظر رئولوژی بهبود پیدا می‌کند، در حالی که هرچقدر مقدار پرکننده پودر سنگ آهک از ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب بیشتر می‌شود تنش جاری شدن بتن خود تراکم افزایش پیدا می‌کند.
- استفاده از پودر سنگ گرانیت در مقایسه با پودر سنگ آهک در بتن خود تراکم به میزان بهتری ویژگی‌های رئولوژی این بتن را از حیث قابلیت عبور و پر کردن قالب بهبود می‌بخشد.
- ۷- تقدیر و تشکر**
- مولفین مقاله وظیفه خود می‌دانند که از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران بدلیل حمایت‌های مالی این پروژه پژوهشی تشکر و قدردانی کنند.
- ۶- مراجع**
- [1] Tattersall, G.H., and Banfill, P.F.G., The Rheology of Fresh Concrete, Pitmanbooks Limited, 1983.
- [2] Castro, A.L., Liborio, J.B.L. and Pondolfelli, V.C., Evaluation of Fresh High Performance Concrete Behavior by Rheometer Assistance, Ibracon Structures And Materials Journal, Vol. 2, No. 4, 2009, pp. 282-305.
- [3] ACI 238.1r-08, Report on Measurements of Workability And Rheology Of Fresh Concrete, ACI, 2008.
- [4] 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.
- [5] Koehler, E.P., and Fowler, W., A Portable Rheometer for Self-Consolidating Concrete, Scc 2005 Conference, Chicago.
- [6] Koehler, E.P., and Fowler, D.W., Development and Use of a Portable Rheometer for Concrete, Eighth Canmet/ Aci Inter. Conf. Canada, 2006.
- [7] Lascar, A.I., and Bhattacharjee, Torque-Speed Relationship in a Concrete Rheometer with Vane Geometry, Construction and Building Materials, 25, 2011, pp. 3443-3449.
- [8] Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y., Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler-Effect of Powder Content and W/C Ratio, Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 532-539.
- [9] Billberg, P., The use of Powders to Control SCC Properties, International Conference on Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, Montreal, Canada, 2010, pp. 93-107.
- [10] Jau, W.C. And Yang, C.T., Development of A Modified Concrete Rheometer To Measure The Rheological Behavior Of Conventional And Self-Consolidating Concretes, Cement And Concrete Composites, 32, 2010, pp. 450-460
- [11] ICAR Institute; Aggregates In Self-Consolidating Concrete , Research Report, 108-2f, 2007.
- [12] PCI & Interm Guidelines for The Use of Self-Consolidating Concrete Institute Member Plants , PCI , 2003.

# **Evaluation of yield stress and plastic viscosity of self-consolidating concrete mixtures containing stone powder using new concrete rheometer made for the first time in Iran**

**P. Ghoddousi<sup>1\*</sup>, A. A. Shirzadi Javid<sup>2</sup>, Y. Rahmani Cherati<sup>3</sup>**

1- Associate Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., Iran University of Science&Technology

2- Ph.D. Candidate in Construction and Engineering Management, Iran University of science and Technology

3- M.Sc. Student in Construction and Engineering Management, Iran University of science and Technology

Ghoddousi@iust.ac.ir

## **Abstract:**

Self-consolidating concrete(SCC) application is using in construction projects more and more because of its advantages including high quality and flowing under its own weight without any vibration. Rheology of self-compacting concrete is effective not only on the properties of fresh concrete, but also on the mechanical properties and durability of concrete. Fresh concrete can be considered suspended particles aggregate in the cement paste. Usually, the concrete flow behavior is expressed by the Bingham model. The rheological properties of the fluids and concrete can be measured by the rheometers that have been developed to study the behavior of yield stress and plastic viscosity. It can be stated that the first rheometre was invented in 1973 by Tattersal and Banfill and it was called MKI rheometer. MKI could be measured  $g$  and  $h$  parameters that they were converted to the rheology parameters by specific calibrations and factors. The rheometer vane starts to rotate in the concrete at first with the constant speed. Then the rotation speed is increased step by step (each 5 seconds). This is necessary for the measuring of thixotropy properties. In the late 1980s, the BML viscometer was developed and later, In 1996 in France BT-Rheom was developed. But research by Tattersal and co-authors compared the results of various rheometrs and shows that these devices measurements (yield stress and plastic viscosity) are different. ICAR is the latest generation of rheometers that was developed by Koehler in 2004. The advantages of ICAR device is being portable, low-cost and suitable for the self-consolidating concrete especially. The advantages and limitations of each of the rheometer and their history report is described in ACI 238.1R. Lascar and colleagues have shown in their study that there is the relationship between geometry and torque rheometer and yield stress and plastic viscosity of concrete. In this study, using a special concrete rheometer that has made for the first time in Iran, rheological parameters of SCC are determined. Devices made in Iran is similar to the ICAR rheometer that was developed by Koehler in 2004. In other words, this device is from coaxial rheometer type that is the most accurate in determining the plastic viscosity and yield stress of concrete. The device consists of a generator engine torque, four-blade vane. For performance evaluation and calibration of device, standard oil with determined viscosity by factory is used. Plastic viscosity value obtained by rheometer was equal 2.208 Pa.S and the oil viscosity provided by the factory was 2.219. Therefore results show that Rheometer performance is according with design plan and rheological parameters can be determined well by this device. Also some experimental SCC mixture contains two kinds of powder as filler is made. The calculated values of plastic viscosity and yield stress of these mixtures show that SCC containing limestone powder to  $200 \text{ kg/m}^3$  indicating the best performance and with increasing the amount of filler to  $300 \text{ kg/m}^3$  cause to increase yield stress.

**Keywords:** Rheometer, Yield stress, Plastic viscosity, Self-consolidating concrete, Bingham model