Iranian Concrete Society

Effect of Concrete Temperature on its Rheological Characteristics and Pumpability

Alireza Bagheri[1*], *D. Ghasemi*[2] , *AH. Abdoli*[3]
1-Associate Professor, Faculty of Civil Eng, K. N. Toosi University of Technology
2-M.Sc. in Construction Engineering and Management, K. N. Toosi University of Technology
3- M.Sc. in Construction Engineering and Management, K. N. Toosi University of Technology
bagherikntu@gmail.com

Research paper

Abstract
Rheological parameters of concrete, including yield stress and plastic viscosity, have a major impact on its pumpability. In the present study, the effect of temperature of mixtures with and without superplasticizer on their pumpability, has been studied through laboratory examination of yield stress and plastic viscosity of mixtures at three temperatures of 10, 20 and 30 ° C. In addition to investigating the effect of mixture temperature immediately after production, changes in these parameters over time, at the three temperatures mentioned, were also investigated.
The results show that for mixtures without superplasticizer, increasing the temperature, results in increased yield stress. Additionally, the rate of yield stress increase at higher temperatures, was higher compared to that at lower temperatures. In terms of plastic viscosity, the mixture with lower temperature, had the highest amount of plastic viscosity and the rate of plastic viscosity increase over time, was greater for mixtures with higher temperatures. Calculation of the pumping pressure based on the rheological parameters, indicates that shortly after production, higher temperatures do not have a significant effect on pumpability. However, over time, the pumpability of the higher temperature mixtures will decrease, resulting in higher pumping pressure.
The results indicate that for mixtures containing superplasticizers, higher concrete temperature, results in a decrease in the pumping pressure during initial times after production. However, over time, it loses this advantage and will have poorer performance compared to the lower-temperature mixtures.
Keywords: *Fresh concrete, Concrete temperature, Rheology, Concrete pumpability, Rheometer*

***Corresponding Author:** Alireza Bagheri*
ghasemi, D., bagheri, A., abduli, A. Effect of Concrete Temperature on its Rheological Characteristics and Pumpability. Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022; 7(2): 51-69.*
http://doi.org/ 10.30478/jcsm.2022.362120.1293
2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

دریافت مقاله: ۲۳-۰۶-۱۴۰۱
پذیرش مقاله:۰۸-۰۹-۱۴۰۱

انجمن علمی بتن ایران

تأثیر دمای بتن بر خواص رئولوژی و پمپ‌پذیری

علیرضا باقری*
دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول)

دانیال قاسمی
کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

امیرحسین عبدلی
کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
bagherikntu@gmail.com

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

متغیرهای رفتارشناسی بتن شامل تنش جاری شدن و گرانروی خمیری، روی سهولت پمپ‌پذیری و جلوگیری از افزایش فشار پمپ، تأثیر عمده‌ای دارند. در تحقیق حاضر، تأثیر دمای مخلوط‌های با و بدون فوق روانساز روی پمپ‌پذیری، از طریق بررسی آزمایشگاهی تنش جاری شدن و گرانروی خمیری مخلوط‌ها در ۳ دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس، مورد مطالعه قرارگرفته است. علاوه بر بررسی اثر دمای مخلوط بلافاصله پس از ساخت، تغییرات زمانی این متغیرها نیز در سه دمای ذکرشده، مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج، نشانگر این است که برای مخلوط‌های بدون فوق روانساز، افزایش دما باعث افزایش تنش جاری شدن می‌گردد. همچنین روند افزایش تنش جاری شدن در دمای بالاتر، بیشتر از دماهای پایین‌تر بود. به لحاظ گرانروی خمیری، مخلوط با دمای کمتر، دارای بیشترین مقدار گرانروی خمیری بود. درعین‌حال، روند افزایش گرانروی خمیری در طی زمان، برای مخلوط‌های با دمای بالاتر، سریع‌تر رخ داد. محاسبه فشار پمپ بر مبنای متغیرهای رفتارشناسی، نشانگر این است که دمای بالاتر اثر محسوسی روی پمپ‌پذیری در زمان‌های اولیه پس از ساخت مخلوط نداشته است. لیکن با گذشت زمان، پمپ‌پذیری مخلوط با دمای بالاتر، کاهش یافته و مستلزم فشار پمپ بیشتری خواهد بود.

بر اساس نتایج حاصله برای مخلوط‌های حاوی فوق روانساز، دمای بالاتر مخلوط، باعث کاهش فشار پمپ در زمان‌های اولیه پس از ساخت می‌شود. لیکن با گذشت زمان، به‌تدریج این مزیّت را از دست داده و عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با مخلوط‌های با دمای پایین‌تر خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بتن تازه، دمای بتن، رفتارشناسی، پمپ‌پذیری بتن، رئومتر

۱-مقدمه

خواص بتن در حالت تازه، روی نحوه و سهولت اجرا، تأثیرگذار است و در صورت نامناسب بودن، علاوه بر مشکلات اجرایی در انتقال، جایدهی و تراکم بتن، خواص بتن سخت شده نیز دچار مشکل خواهد شد. با توجه به اینکه پمپ‌کردن از روش‌های عمده انتقال بتن می‌باشد، پمپ‌پذیری بتن جهت جلوگیری از افزایش فشار پمپ و سهولت پمپاژ آن، حائز اهمیت ویژه‌ای است. میزان فشار لازم برای پمپ‌کردن یک مخلوط، نشانگر پمپ‌پذیری آن است و نمودارهای "فشار- نرخ انتقال (پمپاژ) بتن[1] (*P-Q*)" توسط محققین جهت بررسی و مقایسه پمپ‌پذیری مخلوط‌ها، به کار می‌روند. پمپ‌پذیری یک مخلوط بتن عمدتاً به خواص رفتارشناسی (رئولوژی)[2] مخلوط، شامل تنش جاری شدن (تسلیم)[3] و گرانروی خمیری[4]، بستگی دارد و روابطی برای محاسبه فشار پمپ بر اساس متغیرهای رفتارشناسی بتن توسعه یافته‌اند [۱۴].

بررسی تأثیر دمای بتن روی خواص رفتارشناسی و پمپ‌پذیری آن، از مواردی است که در تحقیقات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. در تحقیق حاضر، تأثیر دمای مخلوط‌های با و بدون فوق روانساز بر پمپ‌پذیری، از طریق بررسی آزمایشگاهی تنش جاری شدن و گرانروی خمیری مخلوط‌ها در ۳ دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه، خواص رفتارشناسی مواد پایه سیمانی و تأثیر آن‌ها روی پمپ‌پذیری به‌اختصار مطرح و سپس، تحقیقات پیشینِ انجام‌شده در خصوص تأثیر دما روی این متغیرها ارائه می‌گردد.

۲- رفتارشناسی و پمپ‌پذیری بتن

پمپ‌پذیری بتن به‌صورت سنتی، با بهره‌گیری از مقدار روانی و کارایی مخلوط، بر اساس آزمایش‌هایی نظیر اسلامپ و یا قطر بازشدگی در آزمایش میز جریان، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لیکن با توسعه تکنولوژی بتن، مشخص گشته است که پمپ‌پذیری تنها به روانی مخلوط بر اساس آزمایش اسلامپ مربوط نمی‌شود، بلکه متغیرهای رفتارشناسی شامل تنش جاری شدن و گرانروی خمیری در این خصوص تأثیرگذارند [۱۴].

رفتارشناسی، علمی است که به جریان مواد و روابط بین تنش برشی و نرخ برشی می‌پردازد [۱۹]. هنگامی‌که تنش برشی (τ) به یک جزء سیال اعمال شود، تغییر شکلی مشابه شکل ۱، حاصل می‌شود [۲۹]. نرخ تغییر شکل حاصل را تحت عنوان نرخ برشی گویند و با نماد $\dot{\gamma}$ نشان می‌دهند [۲۹].

دسته‌ای از سیالات دارای رفتار ویسکوپلاستیک هستند، به این معنی که ابتدا باید بر یک تنش جاری شدن مشخصی (τ_0) غلبه شود تا شروع به جریان یافتن نمایند [۲۹]. سیالات بینگهام، سیالات ویسکوپلاستیکی هستند که در آن‌ها، بعد از شروع جریان یافتن، یک رابطه خطی بین تنش برشی و نرخ برشی برقرار می‌باشد که شیب این خط، معرف گرانروی خمیری می‌باشد و با نماد μ نمایش داده می‌شود [۲۹]. در مورد سیالات بینگهام روابط (۱) برقرار است. در شکل ۲، منحنی جریان برای سیالات بینگهام نمایش داده شده است [۱۱, ۲۹]. به لحاظ رفتارشناسی، مشخص شده است که مواد پایه سیمانی، ازجمله بتنِ تازه را، می‌توان با تقریب خوبی جزء سیالات بینگهام در نظر گرفت [۱۵, ۲۸]:

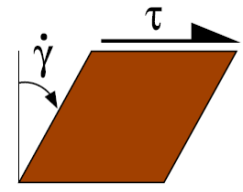
$$\eta(\dot{\gamma}) = \mu + \tau_0 / \dot{\gamma}, \tau \geq \tau_0 \qquad (۱)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}, \tau \geq \tau_0.$$

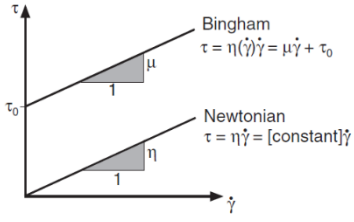
---

[1] *"Pressure- Flow rate" (or "Pressure loss-Flow Rate") graph*
[2] *Rheology*
[3] *Yield Stress*
[4] *Plastic Viscosity*

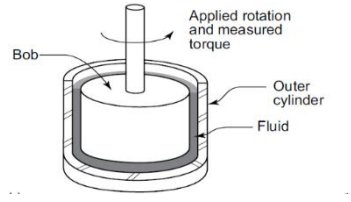
برای به دست آوردن خواص رئولوژیکی بتن از رئومترها استفاده می‌شود. به‌صورت کلی، رئومترها با اعمال نرخ‌های برشی و اندازه‌گیری تنش برشی و برازش رابطه مربوط به رفتارشناسی سیالات بینگهام (رابطه ۱) به نتایج، مقادیر تنش جاری شدن و گرانروی خمیری را مشخص می‌نمایند. از رایج‌ترین رئومترها برای مواد پایه سیمانی نظیر ملات و بتن، اُستوانه‌های هم‌محور می‌باشند. این رئومترها شامل یک استوانه درونی[1] و یک استوانه بیرونی[2] هستند که اُستوانه درونی، شکل‌ها و هندسه‌های گوناگونی مانند استوانه صلب و یا پرّه حلزونی یا مارپیچی، می‌توانند داشته باشد [۱۲, ۱۶, ۱۷, ۱۸]. شکل ۳، شکل کلی این رئومترها را نشان می‌دهد [۱۹, ۲۰].



شکل ۱- تغییر شکل جزء سیال [۲۹]

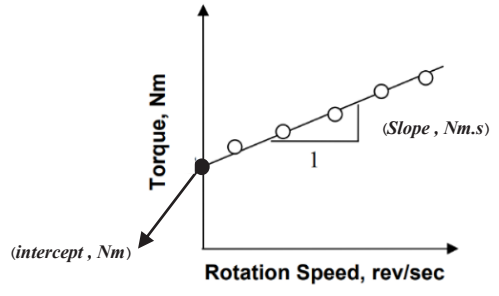


شکل ۲- منحنی جریان برای سیالات نیوتنی و بینگهام [۲۹]



شکل ۳- شکل کلی رئومتر با استوانه‌های هم‌محور [۲۰]

هیچ‌کدام از رئومترها به‌طور مستقیم تنش برشی و نرخ برشی را اندازه‌گیری نمی‌کنند [۳۰]. در عوض، مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای ثبت می‌شوند [۳۰]. با رسم نمودار "گشتاور- سرعت زاویه‌ای" مطابق شکل ۴ و برازش خط مستقیم به نتایج حاصل از رئومتر، شیب‌خط[3] و عرض از مبدأ[4]، تعیین می‌گردند [۲۲]. با تعیین این دو متغیر و با داشتن شکل و مشخصات هندسیِ رئومتر با استوانه‌های هم‌محور، اثبات گشته است که می‌توان متغیرهای رفتارشناسی تنش جاری شدن τ_0 و گرانروی خمیری μ را با استفاده از روابط (۲)، محاسبه نمود [۲۲].



شکل ۴- نمودار" گشتاور- سرعت زاویه‌ای" و برازش خط بین نقاط اندازه‌گیری شده توسط رئومتر با استوانه‌های هم‌محور [۲۲]

[1] *Inner cylinder*
[2] *Outer cylinder*
[3] *Slope*
[4] *intercept*

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)4\pi h}(\text{intercept, Nm}) \qquad (۲)$$

(محل قطع محورقائم/ نیوتن متر)

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{4\pi h}(\text{Slope, Nm.s})$$

(شیب‌خط/ نیوتن متر.ثانیه)

در رابطه (۲)، h ارتفاع استوانه (متر)، R_1 شعاع استوانه‌ی داخلی (متر) و R_2 شعاع استوانه‌ی خارجی (متر) می‌باشند[۲۲].

رئومتر *ICAR* که توسط کوهلر[1] و فاولر[2] [۲۲] در مرکز بین‌المللی تحقیقات سنگدانه در دانشگاه تگزاس توسعه یافته است، از نوع رئومترهای با استوانه هم‌محور است که در آن از پرّه‌ی چهارپَر به‌عنوان استوانه داخلی استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر نیز از رئومتر تجاری مشابه با رئومتر *ICAR* استفاده شده است.

بر اساس تحقیقات پیشینِ انجام‌شده، محققین مختلفی امکان تعمیم نتایج بررسی‌های انجام‌شده روی اثر متغیرهای مختلف بر خواص رفتارشناسی ملات را، به کارایی و رفتارشناسی بتن، مطرح نموده‌اند. بررسی و مطالعه اثر متغیرهای موردنظر روی خواص رفتارشناسی مخلوط ملات و تعمیم نتایج حاصله به بتن، امکان استفاده از رئومترهای با ابعاد کوچک‌تر را فراهم می‌آورد[۱۰،۲۹]. همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، قابلیت پمپ‌شدن یا پمپ‌پذیری بتن با متغیرهای رفتارشناسی مخلوط بتنی، مرتبط می‌باشد [۱۴]. با در نظر گرفتن معادلاتِ منحنی‌های تنش برشی، پروفیل سرعت و منحنی نرخ برشی در مقطع لوله پمپ و همچنین، در نظر گرفتن بتن به‌عنوان سیال بینگهام، می‌توان مقدار فشار پمپ را با داشتن متغیرهای رفتارشناسی، ابعاد لوله پمپ و نرخ پمپاژ بتن، محاسبه نمود [۱۴].

رابطه "باکینگهام- راینِر[3]" ارتباط بین فشار و نرخ پمپاژ را بر اساس خواص رفتارشناسی بتن تازه و ابعاد لوله پمپ، تبیین می‌کند [۱۴]. این رابطه معمولاً به شکل زیر (رابطه ۳) ارائه می‌گردد [۱۴]:

$$Q = \pi \frac{3\Delta p_{tot}^{\ 4} R^4 + 16\tau_0^{\ 4} L^4 - 8\tau_0 L R^3 \Delta p_{tot}^{\ 3}}{24\Delta p_{tot}^{\ 3} \mu L} \qquad (۳)$$

در این رابطه، Q نرخ پمپاژ (مترمکعب بر ثانیه)، Δp_{tot} (پاسکال) اُفت فشار پمپ در فاصله L از پمپ، R شعاع لوله پمپ (متر)، L طول لوله (متر)، τ_0 متغیر رفتارشناسی تنش جاری شدن (پاسکال) و μ متغیر رفتارشناسی گرانروی خمیری (پاسکال- ثانیه)، می‌باشند.

با توجه به رابطه (۳)، مشخص است که فشار پمپ به هر دو متغیر تنش جاری شدن و گرانروی خمیری مخلوط بستگی دارد.

۳-تحقیقات قبلی انجام‌شده در خصوص تأثیر دما بر روانی و خواص رفتارشناسی مواد پایه سیمانی

به‌طورکلی می‌توان گفت پمپ‌کردن بتن خصوصاً در هوای گرم مثلاً در فصل تابستان، همواره با چالش‌ها و دشواری‌های خاصی روبه‌رو بوده است که در اثر دمای بالاتر بتن به وجود می‌آید. یکی از مشکلات بتن‌ریزی در

[1] *Koehler*
[2] *Fowler*
[3] *Buckingham-Reiner equation*

هوای گرم، کاهش سریع‌تر کارایی در مقایسه با آنچه در طرح مخلوط انتظار می‌رفته، می‌باشد که عمدتاً ناشی از افزایش نرخ هیدراته شدن سیمان در دماهای بالاتر و همچنین افزایش نرخ تبخیر آبِ بتنِ تازه می‌باشد [۱]. با بالا رفتن دمای بتن، نرخ اُفت اسلامپ و نرخ گیرش، افزایش یافته و باعث ایجاد دشواریِ بیشتر در پمپ‌کردن، تراکم و پرداخت بتن می‌گردد [۱]. هرچند روند سریعِ اُفت کاراییِ بتن در طی زمان با توجه به سرعت بیشترِ واکنش‌های سیمان با آب در دمای بالاتر طبق انتظار می‌باشد، لیکن به لحاظ اثر دمای بتنِ تازه روی کارایی آن بلافاصله پس از پایان ساخت، وضعیت کاملاً مشخص نیست.

بتنِ تازه از سیمان، سنگدانه‌ها و آب ساخته شده و با توجه به اینکه آب، بخشِ سیال در این مجموعه می‌باشد، انتظار بر این است که تغییرات در گرانروی آب، روی روانی بتنِ تازه بلافاصله پس از ساخت، مؤثر باشد. جالب اینکه گرانروی آب، با افزایش دما، کاهش می‌یابد. گرانروی آب در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، حدوداً برابر ۰/۰۰۱۳۱ نیوتن-ثانیه بر مترمربع ($N.s/m^2$) است که با افزایش دما به ۳۰ درجه سلسیوس، این متغیر حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. لذا انتظار بر این است که در دمای اولیه بالاتر، بتن قدری روانی بالاتر داشته باشد؛ البته، بایستی توجه شود که واکنش‌های اولیه سیمان با آب، روی این مسئله تأثیرگذار خواهد بود و آنچه دیده می‌شود، برآیند اثر گرانروی آب و واکنش‌های اولیه است.

در تحقیق انجام‌شده توسط بورگ[1] [۱۳]، مخلوط‌های بتنی با دو نوع سیمان مختلفِ A و B در دماهای ۱۰، ۲۳ و ۳۲ درجه سلسیوس در آزمایشگاه ساخته شد و مقدار اسلامپ اولیه آن‌ها تعیین گردید. طرح مخلوط بتن برای هر دو نوع سیمانِ استفاده‌شده، ثابت نگه داشته شد [۱۳]. نتایج این تحقیق، نشانگر آن است که؛ برای هر دو مخلوط، کاهش دمای اولیه بتن از ۲۳ درجه به ۱۰ درجه، باعث افزایش اسلامپ و افزایش دمای اولیه از ۲۳ درجه به ۳۲ درجه، باعث کاهش اسلامپ شده است. شایان توجه است که در این تحقیق از مواد افزودنی شیمیایی استفاده نشده بود.

در تحقیق انجام‌شده توسط جانستون[2] [۲۱]، ۴ مخلوط بتنی حاوی مواد فوق روانساز مختلف، در سه دمای ۱۳، ۲۳ و ۲۸ درجه سلسیوس ساخته شدند تا اثر دمای مخلوط بتنی بر روی تغییرات اسلامپ اندازه‌گیری شود. مقدار اجزایِ مخلوط برای همه یکسان بوده و متغیر درنظرگرفته‌شده، صرفاً نوع فوق روانساز بوده است [۲۱]. لازم به ذکر است که در این بررسی، اسلامپ اولیه مخلوط‌ها یکسان و حدود ۱۵ سانتی‌متر بوده است. تأثیر دمای اولیه بتن روی کارایی، بر اساس مقدار اسلامپِ اندازه‌گیری شده بتن و همچنین مقدار فوق روانساز به‌کاررفته، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۱]. طبق نتایج این تحقیق، برای سه نوع فوق روانساز استفاده‌شده، دمای پایین‌تر یعنی ۱۳ درجه، بدترین حالت را داشته و منجر به کمترین کارایی و یا بیشترین نیاز به فوق روانساز شده است. مخلوط‌ها در دماهای اولیه ۲۳ و ۲۸ درجه، عملکردی نسبتاً مشابه داشته‌اند و کارایی اولیه بتن در این دو دما، به‌وضوح بهتر از دمای ۱۳ درجه بوده است. در مورد مخلوط بتنی با فوق روانساز دوم، نتایج، روند مشخصی را در خصوص تأثیر دما روی کارایی بتن نداشته‌اند. نتایج حاصله بسیار قابل‌توجه می‌باشند و در تناقض با تحقیق گزارش‌شده توسط بورگ [۱۳] روی بتن بدون فوق روانساز بوده است. شایان توجه است که در تحقیق جانستون [۲۱]، توجیهی در خصوص تأثیر نسبتاً عجیب دمای اولیه روی کارایی بتن‌های حاوی مواد فوق روانساز ارائه نشده است.

پتی[3] و همکاران [۲۳, ۲۴] اثر فوق روانسازهای پُلی‌نَفتالین سولفوناتی[4] و پُلی‌کَربوکسیلاتی[1] را روی خواص رفتارشناسی ملات‌های روان، مورد بررسی قرار دادند. این محققین، تأثیر دمای مخلوط را روی تنش جاری شدن

---

[1] *Burg*
[2] *Johnston*
[3] *Petit*
[4] *Polynaphthalene sulphonate (PNS)*

(τ_0) و همچنین گرانروی خمیری (μ) ملات‌های روان در بازه دمایی ۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس، مطالعه کردند. در تحقیق پتی و همکاران [۲۳]، در مخلوط حاوی فوق روانساز پلی‌نفتالین سولفوناتی با نسبت آب به سیمان ۰/۵۳، مقایسه تنش‌های جاری شدن بلافاصله پس از ساخت در دماهای ۱۰، ۱۵ و ۲۷، نشانگر قدری افزایش در این متغیر با افزایش دمای مخلوط می‌باشد. مخلوط حاوی فوق روانساز پلیمرِ پلی‌کربوکسیلاتی نیز در نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۳، رفتاری مشابه داشت و با افزایش دما از ۱۰ تا ۲۷ درجه، مقدار تنش جاری شدن آن، قدری افزایش نشان داد. به لحاظ تغییرات تنش جاری شدن با گذشت زمان، نتایج بررسی نشان داد که برای هر دو نوع فوق روانساز، تنش جاری شدن در طی زمان افزایش می‌یابد. لیکن در دمای ۱۰ درجه، در ابتدا شاهد افزایش تنش جاری شدن و سپس اُفت آن در طی زمان هستیم که پس از مدتی، تنش جاری شدن مجدداً افزایش می‌یابد. به لحاظ گرانروی خمیری نتایج پتی و همکاران [۲۴] نشانگر تغییرات اندک در این متغیر روی مخلوط حاوی فوق روانساز پلی‌نفتالین سولفوناتی با تغییرات در دمای اولیه مخلوط می‌باشد. برای مخلوط حاوی فوق روانساز پلی‌کربوکسیلاتی، نتایج، نشانگر اُفت نسبتاً کمی در گرانروی خمیری در دمای ۲۷ درجه در مقایسه با دماهای ۱۰ و ۲۰ درجه می باشد. از منظر تغییرات گرانروی خمیری در طی زمان نیز، نتایج، نشانگر این است که برای مخلوط‌های حاوی هر دو نوع فوق روانساز، این متغیر در طی زمان با نرخ نسبتاً کمی افزایش می‌یابد.

اشمیت[۲] و همکاران [۲۶] تأثیر دمای بتن روی خواص رفتارشناسی بتن خودتراکم حاوی فوق روانساز پُلی‌کربوکسیلاتی را توسط دستگاه رئومتر بررسی نمودند. دماهای موردبررسی ۵، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس بوده است. علی‌رغم برخی پراکندگی‌ها، نتایج بررسی این تحقیق، به‌صورت کلی نشانگر این است که تنش جاری شدن بتن در دمای ۲۰ درجه در مقایسه با دمای ۵ درجه، کمتر است. همچنین گرانروی بتن در دمای ۲۰ درجه کمتر از گرانروی آن در دمای ۵ درجه می‌باشد. در دمای ۳۰ درجه نیز در برخی موارد، متغیرهای رفتارشناسی، کمتر و در برخی موارد، بیشتر از مقدار مربوط به دمای ۲۰ درجه است. نتایج گزارش‌شده توسط اشمیت و همکاران [۲۶]، متفاوت از نتایج گزارش‌شده توسط پتی و همکاران [۲۳, ۲۴] است، ولی به صورت کلی، مؤید نتایج گزارش‌شده توسط جانستون [۲۱] می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد، نتایج جانستون [۲۱] نیز به صورت کلی نشانگر بهبود کارایی بتن بر اساس آزمایش اسلامپ در دمای ۲۳ درجه در مقایسه با دمای پایین (۱۳ درجه) بود. اشمیت و همکاران مطرح می‌کنند که برخلاف بتن‌های متعارف که در اثر افزایش دما، شاهد اُفت خواص کارایی ناشی از هیدراته‌شدن سریع‌تر ذرات سیمان هستیم، برای بتن‌های حاوی فوق روانساز، خصوصاً فوق روانسازهای نسل جدید، وضعیت پیچیده‌تر می‌باشد و بسته به متغیرها، می توان شاهد اثر معکوس افزایش دما روی متغیرهای رفتارشناسی و کارایی بود. طبق نظریه این محققین، برای پخش ذرات سیمان و آزادسازی آب به تله افتاده بین آن‌ها، نیاز است که فوق روانسازها جذب سطوح سیمان و فرآورده‌های واکنش اولیه آن‌ها گردند. لازم به توجه است که سطح فرآورده‌های ناشی از هیدراته شدن سیمان به میزان قابل‌توجهی بیشتر از سطح سیمانِ واکنش نکرده، می‌باشد. با توجه به اینکه در دماهای کم، نظیر ۵ و ۱۰ درجه، سرعت واکنش‌های اولیه در مقایسه با دماهای بالاتر، کمتر است، لذا سطوح و فرآورده‌های کمتری برای جذب ذرات فوق روانساز در دسترس است و لذا، بخش قابل‌توجهی از فوق روانسازها در آبِ اختلاط می‌مانند تا زمانی که سطوح بیشتری توسط واکنشِ هیدراته‌شدن سیمان ایجاد شود تا جذب آن گردند. لذا خواص کارایی بتن در دمای ۲۰ درجه، می‌تواند بیشتر از مقدار مربوط در دمای ۱۰ درجه شود. با افزایش بیشتر دما، در ۳۰ درجه شاهد دو اثر متناقض هستیم که یکی ایجاد سطوح بیشتر برای جذب فوق روانساز و دیگری کاهش کارایی در اثر ایجاد این سطوح، می‌باشد و لذا خواص کارایی در دمای ۳۰ درجه، می‌تواند کمتر یا بیشتر از

---

[1] *Polycarboxylate polymers (PCP)*
[2] *Schmidt*

مقدار مربوط در دمای ۲۰ درجه باشد [۲۶]. ضمناً طبق نظریه فوق، برای بتن‌های با دمای پایین، با گذشت زمان و ایجاد سطوح واکنش بیشتر، جذب بیشتر ذرات فوق روانساز روی سطوح صورت می‌گیرد و لذا باعث حفظ کارایی در طی زمان شده و در مواردی منجر به بهبود کارایی با گذشت زمان می‌گردد.

در تحقیق انجام‌شده توسط سکریرو[1] و همکاران [۲۷]، اثر تغییرات دما بر رفتارشناسی کامپوزیت‌های سیمانی با سخت‌شوندگیِ کرنشی (*SHCC*)[2] ، اندازه‌گیری شد. *SHCC* جزء مواد نسبتاً جدید است که دارای پایه سیمانی حاوی الیاف پلی‌اتیلن و پلی وینیل الکل می‌باشد. پمپ‌پذیری این ماده تحت شرایط دمایی مختلف، به لحاظ کاربردی حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، مخلوط‌های موردمطالعه در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه ساخته شدند. همچنین، اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی در چهار زمان مختلف شامل ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از اختلاط، انجام شد. مجموعه نتایج حاصله از تحقیق سکیوریو همکاران [۲۷]، نشانگر این است که؛ برای مخلوط‌های *SHCC* که دارای مقدار قابل‌توجهی فوق روانساز و مواد پودری هستند، کارایی مخلوط در دمای پایین‌تر (۱۰ درجه سلسیوس) در مقایسه با دو دمای بالاتر ۲۰ و ۳۰ درجه، کمتر است. آزمایش‌های رفتارشناسی نیز مؤید یافته فوق هستند.

پدیده فوق، مغایر با یافته‌های مربوط به بتن‌های متعارفِ بدونِ فوق روانساز است. درعین‌حال، این یافته‌ها مؤید نتایج گزارش‌شده توسط اشمیت و همکاران [۲۶] روی بتن‌های خود تراکم حاوی فوق روانساز است. سکیوری و همکاران [۲۷] در تفسیر نتایج خود، کُندشدن واکنش‌های هیدراته‌شدن و درنتیجه کاهش سطوح برای جذب فوق روانساز را که باعث کاهش پخش ذرات سیمان می‌گردد، عامل اصلی روند مشاهده‌شده در آزمایش‌ها می‌دانند. جالب اینکه آزمایش‌های گزارش‌شده توسط جانستون [۲۱] که بر مبنای تعیین کاراییِ بتن‌های متعارفِ با فوق روانساز به روش آزمایش اسلامپ بوده است نیز، نشانگر تأثیر منفی دمای پایین روی کارایی بتن‌های حاوی فوق روانساز بوده است. درعین‌حال، نتایج متفاوتی با آنچه ذکر شد، توسط پتی و همکاران [۲۳, ۲۴] در خصوص تأثیر دما روی خواص کارایی و رفتارشناسی بتن، گزارش شده است.

با توجه به تناقض‌های موجود در گزارش‌های محدود قبلی در خصوص اثر دمای بتن و مواد پایه سیمانی، روی روانی و خواص رفتارشناسی بتن‌های حاوی مواد فوق روانساز از یک‌سو و اهمیت این خواص روی پمپ‌پذیری بتن از سوی دیگر، در تحقیق حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما روی روانی و خواص رفتارشناسی مخلوط‌های با و بدون فوق روانساز پرداخته شده است.

۴-برنامه آزمایشگاهی

با توجه به اینکه برخی مطالعات پیشین نشانگر اثر متفاوت دما روی خواص رفتارشناسی مواد پایه سیمانی و بتن‌های حاوی فوق روانساز، خصوصاً فوق روانسازهای پُلی‌کربوکسیلاتی، در مقایسه با مخلوط‌های بدون این مواد بوده‌اند، در تحقیق حاضر، علاوه بر مخلوط‌های بدون فوق روان‌کننده، مخلوط‌های حاوی فوق روانساز نیز مورد بررسی قرار گرفتند. سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس برای بررسی تأثیر دمای کم، متوسط و زیاد روی خواص روانی و رفتارشناسی، مدنظر قرار گرفتند. علاوه بر بررسی اثر دمای مخلوط‌ها روی خواص روانی و رفتارشناسی آن‌ها، تغییرات این خواص در طی زمان‌های مختلف پس از ساخت نیز، مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که دمای مخلوط‌ها طی این بازه زمانی نیز با تمهیداتی، در محدوده‌ی دمای اولیه‌ی آن‌ها نگه داشته شد. با گذشت زمان، تنش جاری شدن مخلوط‌ها افزایش قابل‌توجهی می‌یابد که باعث بالارفتن شدید گشتاور لازم برای

---

[1] *Secrieru*
[2] *Strain-hardening cement-based composites*

انجـام آزمـایش توسـط رئـومتر مـی‌گـردد. بـا توجـه بـه محـدودیت‌هـای رئـومتر و بـرای اینکـه امکـان ارزیـابی خـواص رفتارشناسی در بـازه زمـانی مـوردنظر فـراهم آیـد، بررسـی آزمایشـگاهی روی مخلـوط‌هـای مـلات متمرکـز گردیـد. محققـین مختلفی امکان تعمـیم نتـایج بررسـی اثـر متغیرهـای ارزیـابی‌شـده روی مخلـوط‌هـای مـلات را بـه مخلـوط‌هـای بـتن مطـرح نمـوده‌انـد [۱۰, ۲۹]. در ادامـه، پـس از ارائـه‌ی خـواصِ مـواد و مصـالح مصـرفی شـامل سـیمان، ماسـه، پـودرِ سـنگ و افزودنیِ فوق روانساز، مخلوط‌های موردبررسی و آزمایش‌های انجام‌شده روی آن‌ها، تشریح می‌گردند.

۴-۱-مواد و مصالح مصرفی

آب اسـتفاده‌شـده بـرای سـاخت نمونـه‌هـا، آب شُـرب شـهر تهـران مـی‌باشـد. سـیمان مورداسـتفاده، سـیمان پُرتلنـد نـوع دو کارخانه سیمان تهران مـی‌باشـد. بـه لحـاظ شـیمیایی، ترکیبـات اصـلی سـیمان مورداسـتفاده، در جـدول ۱ نشـان داده شـده است. مشخصـات فیزیکـی و مکـانیکی سـیمان کـه مطـابق الزامـات اسـتانداردایران بـه شـماره ۳۸۹ [۳] مـی‌باشـد در جـدول ۲ ارائـه شـده اسـت. ماسـه مورداسـتفاده از نـوع نیمـه شکسـته بـا جـرم حجمـی ۲۵۰۰ کیلـوگرم بـر مترمکعـب و جـذب آب ۳/۶ درصد بوده است. منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده‌شده مطابق شکل ۵ می‌باشد.

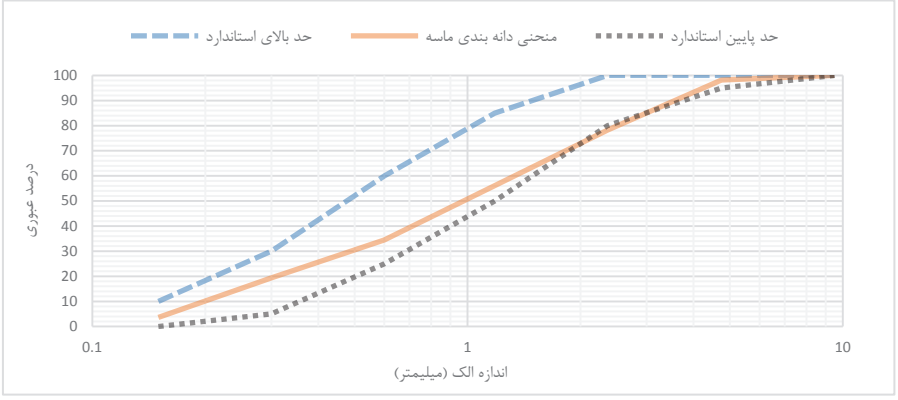
مخلـوط‌هـای مـلات موردبررسـی، مـی‌بایـد دارای روانـی مناسـب بـرای دسـتیابی بـه مقـدار بازشـدگی در محـدوده قابل‌سنجش در آزمایش میز جریـان در هـر سـه دمـای درنظرگرفتـه‌شـده مـی‌بودنـد. درعـین‌حـال، ایـن مخلـوط‌هـا مـی‌بایـد انسجام و پایداری کـافی بـرای جلـوگیری از آب‌انـداختگی و جداشـدگی مـی‌داشـتند. لـذا جهـت تسـهیلِ ایـن امـر، در مـوارد لازم، از پـودرِ سـنگ در مخلـوط‌هـای مـلات اسـتفاده گردیـد. پـودر سـنگ مورداسـتفاده از نـوع پـودر سـنگ‌آهـک بـود و عبـوری از الـک شـماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتـر) برابـر بـا ۹۲٪ بـوده اسـت. چگـالی پـودر سـنگِ اسـتفاده‌شـده برابـر بـا ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید.

جدول۱- ویژگی‌های شیمیایی سیمان

ترکیبات اصلی سیمان	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
مقدار(درصد وزنی سیمان)	۴۹	۲۷	۷	۱۰

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شده

ویژگی فیزیکی یا مکانیکی	مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها	مقادیر مجاز طبق استاندارد ایران به شماره ۳۸۹
غلظت نرمال خمیر سیمان مطابق استاندارد ASTM C187-11 [۴]	٪۲۶	-
زمان‌گیرش اولیه سیمان با سوزن ویکات مطابق استاندارد ASTM C191-13 (دقیقه) [۶]	۲۱۵	۴۵<
زمان‌گیرش نهایی سیمان با سوزن ویکات مطابق استاندارد ASTM C191-13 (دقیقه) [۶]	۳۰۰	۳۶۰>
جرم حجمی سیمان با بالن لوشاتلیه مطابق استاندارد ASTM C188-14 (g/cm3) [۵]	۳/۰۸	-
نرمی ذرات سیمان (سطح ویژه سیمان از آزمایش بلین) مطابق استاندارد ASTM C204-11 (cm2/gr) [۷]	۳۳۴۵	۲۸۰۰<



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی ماسه و محدوده مجاز طبق استاندارد ایران به شماره ۳۰۲ /۲]

فوق روان‌کننده‌ی مورداستفاده، فوق روانساز پایه پلی‌کربوکسیلاتی با خاصیت کاهندگی آب بالا و قابلیت حفظ اسلامپ می‌باشد. بر اساس استاندارد ایران به شماره ۲۹۳۰ [۹]، این فوق روان‌کننده، در گروه ۳-۲-۱۱ قرار می‌گیرد. چگالی این فوق روانساز برابر ۱/۰۸ کیلوگرم بر لیتر می‌باشد و درصد ماده جامد آن حدود ۴۰ درصد می‌باشد.

۴-۲-مخلوط‌های موردبررسی

با توجه به اینکه علاوه بر آزمایش تعیین خواص رفتارشناسی، اندازه‌گیری میزان روانی مخلوط‌ها بر اساس آزمایش میز جریان، مدنظر بوده است، مقادیر اجزای ملات به نحوی در نظر گرفته شد که پس از ساخت، دارای مقدار جریان زیاد باشد به‌نحوی‌که اُفت جریان در طی زمان روی میز جریان قابل‌اندازه‌گیری باشد. بعد از ساختِ مخلوط‌های مقدماتی، نهایتاً مخلوط ملات بدون فوق روانساز با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و نسبت ماسه به سیمان ۱، در این خصوص انتخاب گردید. برای مخلوط حاوی فوق روانساز، با توجه به تأثیر بسیار قابل‌توجه در افزایش روانی، جهت حفظ میزان روانی در محدوده قابل‌اندازه‌گیری توسط میز جریان، از پودر سنگ نیز استفاده شد. نسبت آب به سیمان این مخلوط ۰/۴۳، نسبت ماسه به سیمان ۱ و نسبت پودر سنگ به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شد. مقدار فوق روانساز مصرفی برابر ۰/۵ درصد وزنی سیمان بوده است. جهت امکان مقایسه مستقیم مخلوط‌های با و بدون فوق روانساز به لحاظ تأثیر دمای مخلوط روی خواص رفتارشناسی، مخلوط بدون فوق روانساز دیگری حاوی پودر سنگ نیز، ساخته شد.

۴-۳-آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش تعیین روانی مخلوط‌ها روی میز جریان با استفاده از وسایل آزمایش استاندارد *ASTM C230/C230M* [۸] در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس صورت گرفت؛ به نحوی که ملات در مخروط ناقص ریخته شد و سطح آن با استفاده از کاردک، مسطح گردید. پس از برداشتن مخروط ناقص، قطر بازشدگی ملات روی میز جریان در چهار جهت توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد. در شکل ۶، میز جریان و بازشدگی مخلوط ملات روی آن نشان داده شده است. خواص رفتارشناسی این مخلوط‌ها نیز توسط دستگاه رئومتر در سه دمای مذکور، مورد سنجش قرار گرفت. در شکل ۷، دستگاه رئومتر مورداستفاده به همراه پره و سطل فلزی آن در حین آزمایش، نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در هر دما، این آزمایش‌ها در فواصل زمانی مشخص پس از ساخت نیز انجام می‌گیرد تا تغییرات خواص روانی و رفتارشناسی مخلوط‌ها علاوه بر زمان بلافاصله پس از ساخت، در طی گذشت

زمان نیـز مـورد بررسـی قـرار بگیـرد و در طـی ایـن مـدت زمـان نیـز دمـای مخلـوط‌هـا بـا نگهـداری در کابینـت بـا قابلیـت کنترل دما، در محدوده دمای اولیه آن‌ها نگه داشته می‌شود.

شکل ۶- میز جریان و مخروط ناقص کوچک در شکل سمت چپ و بازشدگی ملات روی میز جریان با برداشتن مخروط ناقص کوچک در شکل سمت راست

شکل ۷- دستگاه رئومتر به کار برده شده جهت تعیین خواص رفتارشناسی ملات (قطر و ارتفاع پره (بدون میله متصل به آن)، هر دو، برابر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند و قطر سطل فلزی نیز برابر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.)

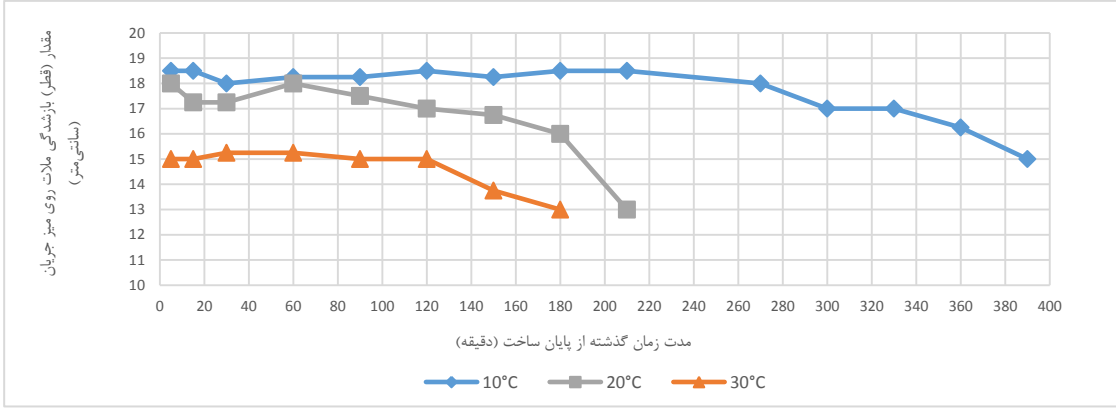
۵-نتایج به‌دست‌آمده و تفسیر آن‌ها

در این بخش به ارائه و بررسی نتـایج آزمـایش‌هـای توضـیح داده‌شـده در بخـش قبلـی پرداختـه خواهـد شـد. ایـن بررسـی‌هـا از چند منظر صورت می‌گیرد:

* مقایسـه خـواص روانـی و رفتارشناسـی در ۳ دمـای اولیـه مخلـوط‌هـا (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجـه سلسـیوس) بلافاصـله پـس از ساخت، با یکدیگر و بررسی و تحلیل اثر دما روی این خواص
* روند تغییرات خواص روانی و رفتارشناسی مخلوط‌های ساخته‌شده در هر دما، در طی گذشت زمان
* بـرای مخلـوط‌هـای حـاوی فـوق روانسـاز، تـأثیر ایـن مـاده روی خـواص روانـی و رفتارشناسـی و تغییـرات ایـن خـواص در طی زمان، در مقایسه با مخلوط‌های بدون فوق روانساز، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.
* در انتهـا، پمـپ‌پـذیری مخلـوط‌هـای بـدون فـوق روانسـاز و حـاوی فـوق روانسـاز در سـه دمـای مـوردنظر، در زمـان‌هـای بلافاصله پس از ساخت و نیز با گذشت زمان، در قالب نمودارهای " اُفت فشار پمپ-نرخ پمپاژ" بررسی می‌شوند.

۵-۱-نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی مخلوط‌های بدون فوق روانساز

در شکل ۸، نتایج آزمایش میز جریان در قالب نمودار " قطر بازشدگی ملات- مدت زمان گذشته از پایان ساخت" آورده شده است.

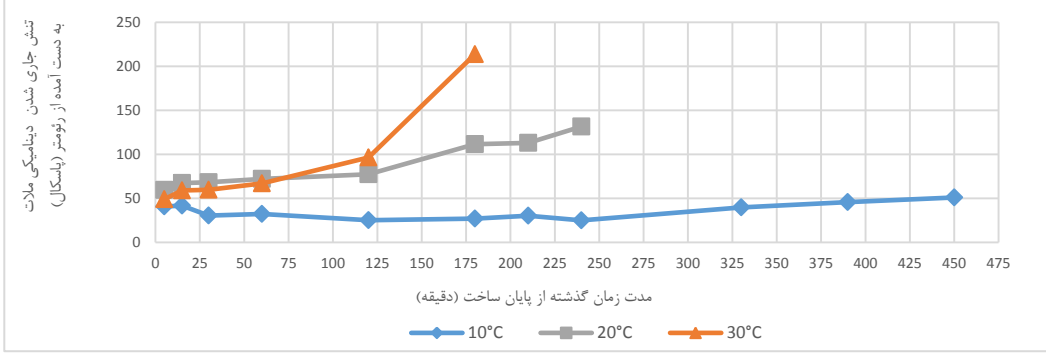


شکل ۸- نمودارهای مقادیر قطر بازشدگی ملات ماسه سیمان با $W/C=0.5$ و $S/C=1$، روی میز جریان در سه دما و در طی گذشت زمان

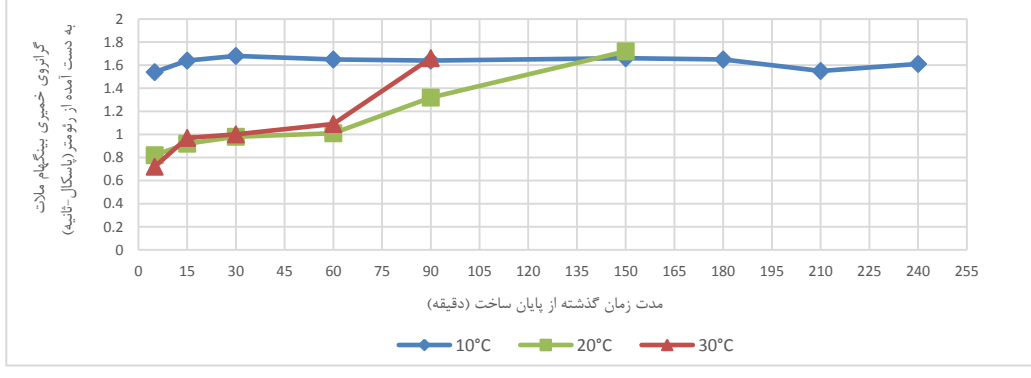
مقایسه نتایج بازشدگی مخلوط‌های ملات ماسه سیمان در زمان‌های اولیه پس از ساخت در ۳ دما، نشانگر این است که مقادیر جریان مربوط به دماهای ۱۰ و ۲۰ درجه تقریباً مشابه بوده‌اند، هرچند مقادیر بازشدگی در ۱۰ درجه اندکی بیشتر بوده است. در دمای ۳۰ درجه مقادیر بازشدگی کمتر بوده‌اند که این می‌تواند ناشی از واکنش‌های هیدراته‌شدن اولیه‌ی سریع‌تر در دمای بالا یعنی ۳۰ درجه، در مقایسه با دماهای کمتر یعنی ۱۰ و ۲۰ درجه باشد. به لحاظ تغییرات در مقدار جریان در طی گذشت زمان، مشاهده می‌شود که تا زمان حدوداً ۱۲۰ دقیقه‌ای پس از پایان ساخت، مخلوط‌های با دمای ۲۰ و ۳۰ درجه، دارای مقدار بازشدگی نسبتاً ثابتی بوده‌اند که ناشی از کندشدن واکنش‌ها طی دوره اِلقا است. مخلوط با دمای ۳۰ درجه پس از ۱۲۰ دقیقه، اُفت قابل‌توجهی را در قطر بازشدگی نشان داده است، درحالی‌که در دمای ۲۰ درجه، این اُفتِ محسوس پس از ۱۵۰ دقیقه مشاهده گشت و دمای ۱۰ درجه نیز روند کاهشیِ تدریجی‌تری را در طول مدت‌زمان بیشتری نشان داده است. به نظر می‌رسد روند سریع‌ترِ واکنش‌های هیدراته‌شدن سیمان با افزایش دما، دلیل اُفت سریع‌تر در مقدارِ روانیِ مخلوط‌های با دمای بالاتر باشد. نتایج محققین دیگری که روی تأثیر دما روی کارایی مخلوط‌های مواد پایه سیمانیِ بدون فوق روانساز کارکرده‌اند، روند مشابهی را با نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد [۱۳].

نتایج آزمایش تعیین خواص رفتارشناسی در سه دمای حدود ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، شامل تغییرات زمانی تنش جاری شدن و گرانروی خمیری، در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند. نتایج شکل ۹، نشانگر این است که تنش جاری شدن دینامیکی مخلوط ملات ماسه سیمان با دمای ۱۰ درجه از دو دمای دیگر کمتر می‌باشد و این موضوع با میزان قطر بازشدگی ملات ماسه سیمان که در مخلوط با دمای ۱۰ درجه بیشترین بود، همخوانی دارد. ارتباط نتایج آزمایش میزان جریان و قطر بازشدگی با تنش جاری شدن مخلوط، توسط محققین مختلف گزارش شده است [۲۵]. به لحاظ تغییرات تنش جاری شدن با گذشت زمان، نتایج نمودار شکل ۹، نشانگر افزایش سریع‌ترِ تنش جاری شدن مخلوط با دمای ۳۰ درجه در مقایسه با مخلوط با دمای ۲۰ درجه است. مخلوط با دمای ۱۰ درجه، دارای کُندترین روندِ افزایش در تنش جاری شدن می‌باشد. به نظر می‌رسد نرخ بیشتر تولید فرآورده‌های واکنش در دمای بالاتر، باعث افزایش سریع‌تر در مقادیر تنش جاری شدن مخلوط‌های با دمای بالاتر در طی زمان شده است.

به لحاظ گرانروی خمیری، در زمان‌های اولیه پس از ساخت، نتایج، نشانگر روند معکوس دما روی این متغیر در مقایسه با تنش جاری شدن می‌باشد. همان‌طور که از نمودار شکل ۱۰ مشخص است، بیشترین مقدار گرانروی خمیری مربوط به دمای ۱۰ درجه است و کمترین مقدار، مربوط به دمای ۳۰ درجه می‌باشد. مقدار مربوط به دمای ۲۰ درجه نیز به میزان نسبتاً جزئی بیشتر از دمای ۳۰ درجه است. به نظر می‌رسد گرانروی کمتر آب در دماهای بالاتر، باعث شده تا گرانروی مخلوط در دمای بالاتر، کمتر از مقدار متناظر در دمای پایین‌تر باشد. همچنین به نظر می‌رسد افزایش نرخ واکنش‌های اولیه در دماهای بالاتر برای جبران اثرات مربوط به کاهش گرانروی آب با افزایش دما، کافی نبوده است. به لحاظ تغییرات زمانی گرانروی خمیری، همان‌طور که از نمودار شکل ۱۰ مشخص است، مخلوط با دمای ۳۰ درجه دارای روند افزایشی قابل‌توجهی در طی زمان است. روند افزایشی در گرانروی خمیری مخلوط با دمای ۲۰ درجه قدری کُندتر از مخلوط با دمای ۳۰ درجه می‌باشد. کمترین روند افزایش در گرانروی خمیری در طی زمان مربوط به مخلوط با دمای ۱۰ درجه بوده است.



شکل ۹- نمودارهای مقادیر تنش جاری شدن دینامیکی ملات ماسه سیمان با $W/C=0.5$ و $S/C=1$، در سه دما و در طی گذشت زمان



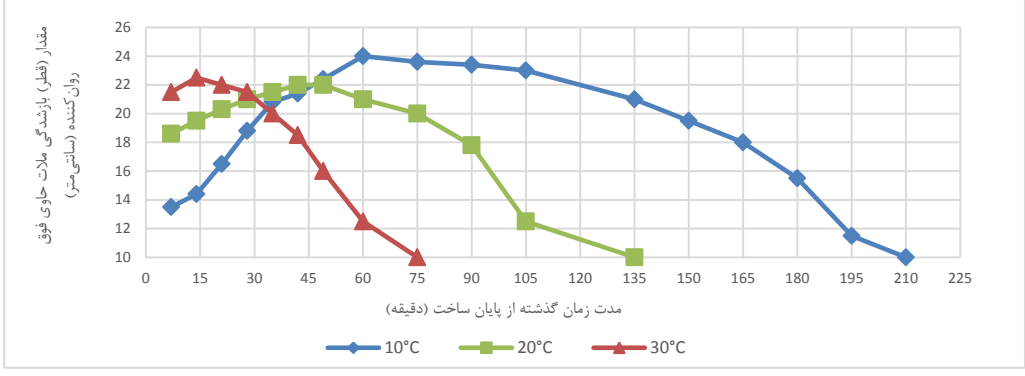
شکل ۱۰- نمودارهای مقادیر گرانروی خمیری ملات ماسه سیمان با $W/C=0.5$ و $S/C=1$، در سه دما و در طی گذشت زمان

با توجه به اینکه آزمایش رفتارشناسی انجام‌شده روی مخلوط بدون فوق روانساز، نشانگر تأثیر معکوس دما روی گرانروی خمیری در زمان‌های اولیه، در مقایسه با متغیر تنش جاری شدن می‌باشد و این نکته که نتایج تحقیق قبلی در خصوص اثر دما روی خواص رفتارشناسی مخلوط‌های بدون فوق روانساز یافت نشده بود، تصمیم گرفته شد بررسی بیشتری در این خصوص صورت گیرد. لذا مخلوط بدون فوق روانساز دیگری مشابه با مخلوط بررسی‌شده ولی با افزودن پودر سنگ به میزان ۲۵ درصد وزنی سیمان، ساخته شد تا مخلوطی با خواص رفتارشناسی متفاوت

حاصل گردد و سپس، تأثیر دماهای متفاوت مخلوط روی خواص رفتارشناسی بررسی گردید. نتایج آزمایش‌های رفتارشناسی انجام‌شده روی مخلوط اخیرالذکر، مؤید نتایج حاصله برای مخلوط بدون پودر سنگ به لحاظ تأثیر دما روی خواص رفتارشناسی بوده است.

۵-۲-نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی مخلوط‌های حاوی فوق روانساز

نتایج آزمایش میز جریان مخلوط ملات حاوی فوق روانساز در سه دمای حدود ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، در شکل ۱۱ در قالب نمودار "قطر بازشدگی ملات- مدت‌زمان گذشته از پایان ساخت" آورده شده است.



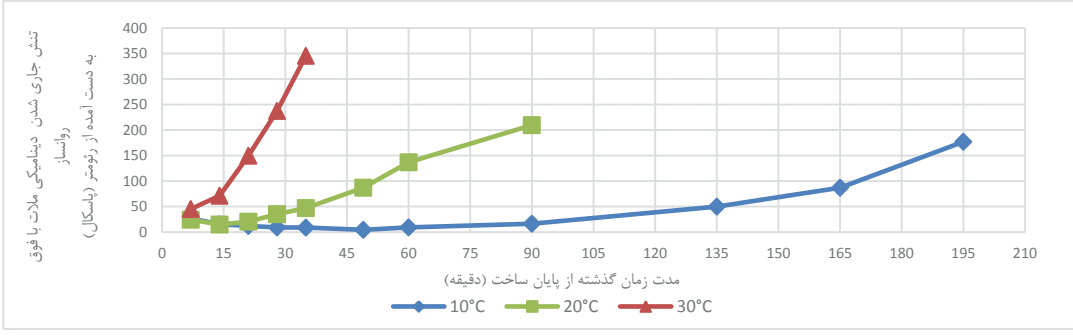
شکل ۱۱- نمودارهای مقادیر قطر بازشدگی ملات حاوی فوق روانساز، روی میز جریان در سه دما و در طی گذشت زمان

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، برای زمان‌های اولیه پس از ساخت، مخلوط با دمای ۳۰ درجه دارای بیشترین و مخلوط با دمای ۱۰ درجه دارای کمترین مقدار بازشدگی می‌باشند. این نتایج، برخلاف نتایج حاصله برای مخلوط بدون فوق روانساز می‌باشند. به نظر می‌رسد با توجه به سطوح بیشتر ناشی از واکنش‌های سریع‌تر هیدراته‌شدن سیمان در دمای بالاتر، امکان جذب ذرات فوق روانساز بیشتری روی این سطوح می‌باشد که این باعث افزایش عملکرد فوق روانساز در ایجاد نیروهای دافعه بین ذرات سیمان و همچنین عملکرد استریک[1] (ممانعت فضایی) آن می‌باشد. جالب اینکه برای مخلوط با دمای ۱۰ درجه، با گذشت زمان و توسعه واکنش هیدراته‌شدن و افزایش سطوح و جذب ذرات فوق روانساز، شاهد افزایش کارایی هستیم. برای مخلوط با دمای ۳۰ درجه با توسعه سریع واکنش‌ها و اِزدیاد فرآورده‌های واکنش، شاهد اُفت تدریجی کارایی هستیم به‌نحوی‌که پس از حدود ۳۰ دقیقه پس از ساخت، میزان بازشدگی آن از مخلوط با دمای ۱۰ درجه کمتر می‌گردد.

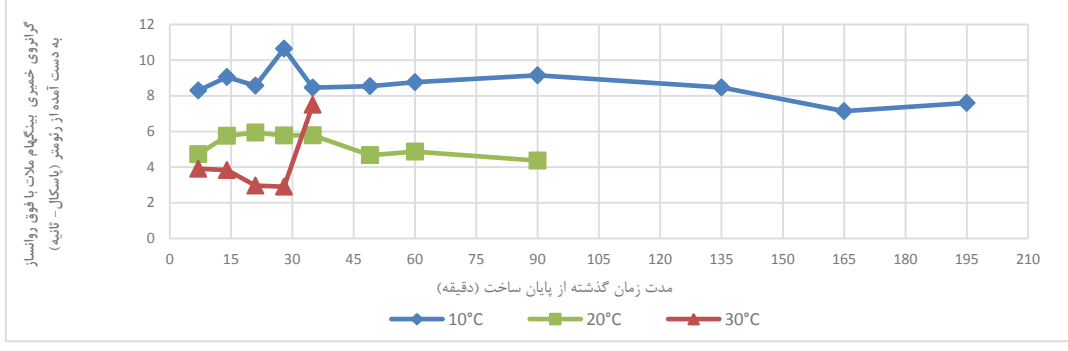
نتایج آزمایش تعیین خواص رفتارشناسی ملاتِ حاوی فوق روانساز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از نمودار شکل ۱۲، این را نشان می‌دهد که در زمان‌های اولیه پس از ساخت، تنش جاری شدن دینامیکی مخلوط با دمای ۳۰ درجه به میزان نسبتاً جزئی، بیشتر از مخلوط‌های با دمای ۲۰ و ۱۰ درجه می‌باشد. با گذشت زمان، با توسعه سریع‌تر واکنش‌های هیدراته‌شدن در دمای بالاتر از یک سو و اُفت تدریجی تأثیر فوق روانساز، شاهد افزایش قابل‌توجه در تنش جاری شدن مخلوط با دمای ۳۰ درجه هستیم. جالب‌توجه اینکه برای مخلوط با دمای ۱۰ درجه با توسعه‌ی کُند واکنش‌های هیدراته‌شدن، در ابتدا شاهد قدری کاهش در تنش جاری شدن تا حدود ۵۰ دقیقه پس از ساخت هستیم که ناشی از جذب تدریجی فوق روانساز روی سطوح فرآورده‌های هیدراته شدن که به شکل تدریجی در حال ایجاد هستند، می‌باشد. شایان توجه است که نتایج حاصله در خصوص

[1] *Steric hindrance*

تـأثیر دمـا روی روانـی و همچنـین تـنش جـاری شـدن مخلـوط‌هـای حـاوی فـوق روانسـاز، مؤیـد یافتـه‌هـای اشـمیت و همکاران [۲۶] و سکیوری و همکاران [۲۷] روی مخلوط‌های حاوی فوق روانساز است.



شکل ۱۲- نمودارهای مقادیر تنش جاری شدن دینامیکی ملات حاوی فوق روانساز، در سه دما و در طی گذشت زمان



شکل ۱۳- نمودارهای مقادیر گرانروی خمیری ملات حاوی فوق روانساز، در سه دما و در طی گذشت زمان

در خصـوص گرانـروی خمیـری، بـا توجـه بـه نمـودار شـکل ۱۳، مخلـوط بـا دمـای ۳۰ درجـه کمتـرین گرانـروی خمیـری و ملات با دمـای ۱۰ درجـه بیشـترین گرانـروی خمیـری را دارد و ایـن نتیجـه، تـا حـدودی مشـابه نتـایج گرانـروی خمیـری در ملات بدون فـوق روانسـاز مـی‌باشـد؛ در آنجـا نیـز مـلات بـا دمـای ۱۰ درجـه، بیشـترین گرانـروی خمیـری را از خـود نشـان داد. بـه نظـر مـی‌رسـد گرانـروی کمتـر آب در دماهـای بـالاتر، باعـث شـده تـا گرانـروی مخلـوط در دمـای بـالاتر، کمتـر از مقدار متناظر در دمای پایین‌تر باشـد. همچنـین بـه نظـر مـی‌رسـد افـزایش نـرخ واکـنش‌هـای اولیـه در دماهـای بـالاتر بـرای جبران اثرات مربوط به کاهش گرانروی آب با افزایش دما، کافی نبوده است.

۵-۳-برآورد تأثیر دمای مخلوط روی پمپ‌پذیری آن

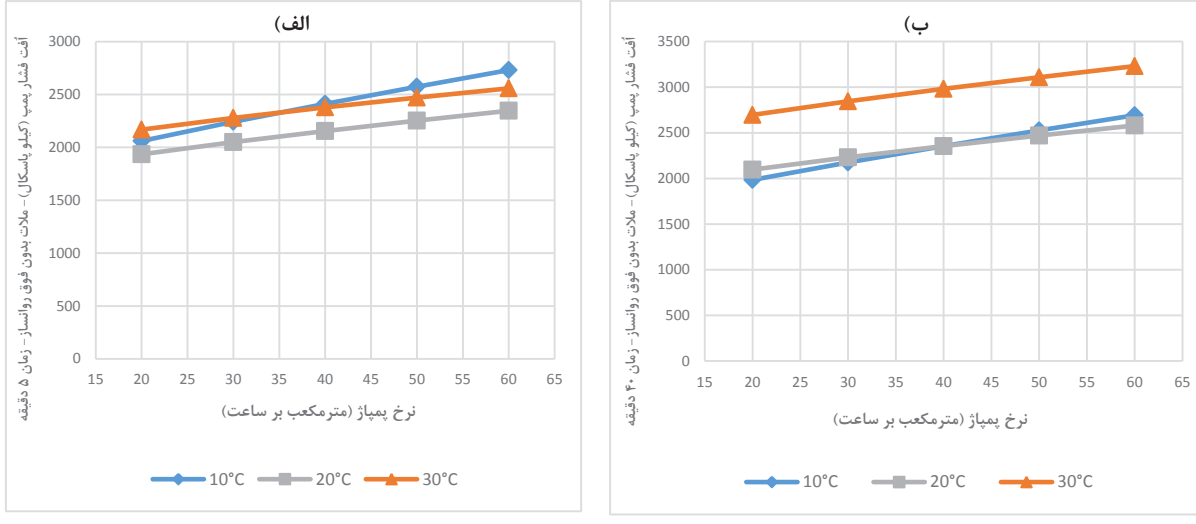
بـرای مشـخص‌کـردنِ تـأثیر دمـای مخلـوط روی پمـپ‌پـذیری، در ادامـه، بـا بهـره‌گیـری از رابطـه (۳) کـه بـه رابطـه "باکینگهـام- راینـر" معـروف اسـت [۱۴]، نمودارهـای " اُفـت فشـار پمـپ- نـرخ پمپـاژ (P-Q)" بـرای مخلـوط‌هـای مـلات حاوی فوق روانساز و بدون فوق روانسـاز ارائـه مـی‌گردنـد. بـا سـاده‌کـردن رابطـه "باکینگهـام- راینـر" و تشـکیل یـک معادلـه درجه ۴ برحسب Δp، رابطه (۴) حاصل می‌گردد:

$$\frac{R^4}{8L}\Delta p^4 - \left(\frac{\mu Q}{\pi} + \frac{\tau_0 \times R^3}{3}\right)\Delta p^3 + \frac{2\times {\tau_0}^4 \times L^3}{3} = 0 \qquad (۴)$$

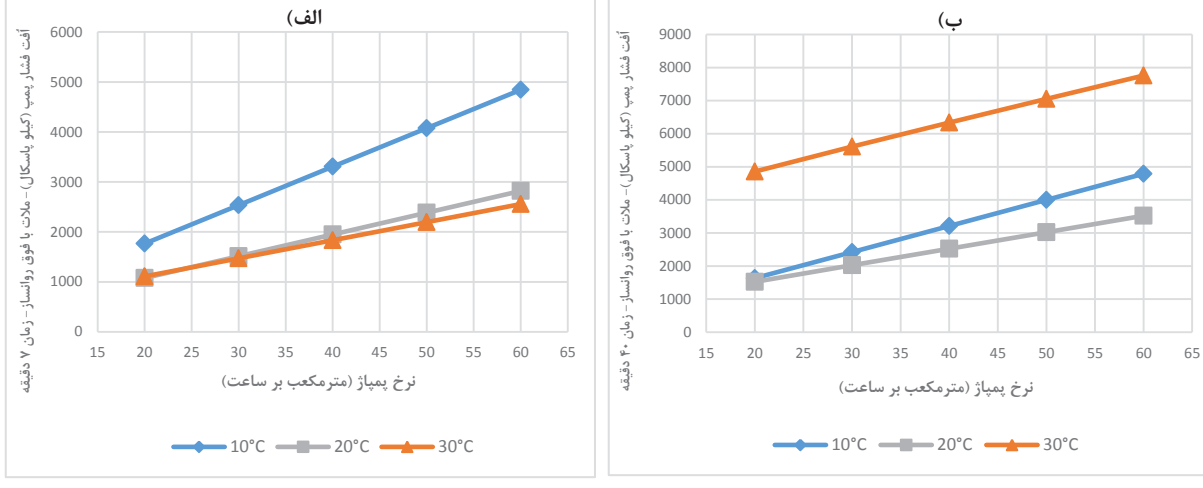
با قـراردادن مقـادیر فرضـی شـعاع لولـه پمـپ برابـر $R= 0.0625\ m$ (بـرای قطـر لولـه ۱۲۵ میلـی‌متـر)، مقـدار طـول پمپـاژ $L=200\ m$ و بـا در نظـر گـرفتن مقـادیر نـرخ پمپـاژ (Q) برابـر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ مترمکعـب بـر سـاعت، معادلـه درجـه ۴ فوق برای هر نـرخ پمپـاژ، حـل‌شـده و مقـدار Δp (اُفـت فشـار پمـپ) بـه دسـت مـی‌آیـد. در شـکل ۱۴ بـرای طـول پمپـاژ

۲۰۰ متر، نمودارهای اُفت فشار پمپ- نرخ پمپاژ برای مخلوط‌های بدون فوق روانساز ارائه‌شده است. علاوه بر این، در شکل ۱۵، نمودارهای مشابه برای مخلوط‌های حاوی فوق روانساز، ارائه‌شده‌اند.

همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، در فاصله زمانی کوتاهی پس از ساخت، برای مخلوط بدون فوق روانساز، تأثیر دمای مخلوط روی فشار پمپ، جزئی است. با گذشت زمان ۴۰ دقیقه پس از ساخت، مخلوط با بیشترین دما (۳۰ درجه)، باعث افزایش قابل‌توجهی در فشار پمپ شده است. همان‌طور که در بخش ۲ مطرح شد، پمپ‌پذیری بتن به خواص رفتارشناسی آن شامل تنش جاری شدن و گرانروی خمیری مرتبط می‌باشد. برای مخلوط‌های بدون فوق روانساز، به نظر می‌رسد در زمان‌های اولیه پس از ساخت، اثر منفیِ تنش جاری شدن بالاترِ مخلوط با دمای بیشتر، با اثر مثبتِ گرانروی خمیری پایین‌ترِ آن، خنثی شده و دمای مخلوط روی پمپ‌پذیری آن در زمان‌های اولیه پس از ساخت، تأثیر خاصی نداشته باشد. لیکن با گذشت زمان و افزایش بیشتر و سریع‌ترِ تنش جاری شدن مخلوط با دمای بالاتر، با گذشت زمان، پمپ‌پذیری آن کمتر از مخلوط‌های با دمای پایین‌تر شده است.



شکل ۱۴- نمودارهای اُفت فشار- نرخ پمپاژ، برای مخلوط‌های بدون فوق روانساز در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، در زمان الف) ۵ دقیقه و ب) ۴۰ دقیقه پس از پایان ساخت



شکل ۱۵- نمودارهای اُفت فشار- نرخ پمپاژ، برای مخلوط‌های حاوی فوق روانساز در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، در زمان الف) ۷ دقیقه و ب) ۴۰ دقیقه پس از پایان ساخت

همان‌طور کـه از شـکل ۱۵ مشـخص اسـت، در فاصـله زمـانی کوتـاهی پـس از سـاخت، بـرای مخلـوط حـاوی فـوق روانسـاز، فشار پمپ برای مخلـوط بـا کمتـرین دمـا (۱۰ درجـه)، بـه میـزان قابـل‌تـوجهی بیشـتر از دو دمـای دیگـر اسـت. بـا گذشـت زمـان ۴۰ دقیقـه پـس از سـاخت، مخلـوط بـا بیشـترین دمـا (۳۰ درجـه)، باعـث افـزایش قابـل‌تـوجهی در فشـار پمـپ شـده است. برای مخلوط‌های حاوی فوق روانساز، در زمان‌هـای اولیـه پـس از سـاخت، بـه نظـر مـی‌رسـد بـا توجـه بـه روانـی بـالاتر و تنش جاری شدن تقریباً مشابه مخلوط بـا دمـای بـالاتر (۳۰ درجـه) در مقایسـه بـا مخلـوط‌هـای بـا دمـای پـایین‌تـر از یـک سو و همچنین گرانـروی خمیـری کمتـر مخلـوط بـا دمـای بـالاتر، پمـپ‌پـذیری آن بهتـر از مخلـوط بـا دمـای پـایین‌تـر (۱۰ درجه) باشد. لیکن با گذشت زمـان و افـزایش سـریع‌تـرِ تـنش جـاری شـدن و همچنـین گرانـروی خمیـری مخلـوط بـا دمـای بالاتر، پمپ‌پذیری آن کاهش یافته و از مخلوط‌های با دمای پایین‌تر، کمتر می‌گردد.

۶-نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر، نتیجه‌گیری‌های زیر قابل‌ارائه می‌باشد:

برای مخلوط‌های بدون فوق روانساز:

* با افزایش دما، مقدار روانی در زمان‌های اولیه پس از ساخت، کاهش می‌یابد که نشانگر کاهش کارایی مخلوط‌های با دمای بالاتر در مقایسه با دمای پایین‌تر است. همچنین روند کاهش کارایی برای مخلوط‌های با دمای بالاتر، سریع‌تر بوده است.

* با افزایش دما، تنش جاری شدن افزایش می‌یابد. همچنین روند افزایش تنش جاری شدن در طی زمان، برای مخلوط‌های با دمای بالاتر، سریع‌تر است. به‌صورت کلی، نتایج حاصله برای تنش جاری شدن، مؤید نتایج حاصل از آزمایش تعیین روانی می‌باشند.

* به لحاظ تأثیر دما روی گرانروی خمیری، نتایج، نشانگر تأثیر معکوس دما روی این متغیر در زمان‌های اولیه، در مقایسه با متغیر تنش جاری شدن می‌باشد. مخلوط با دمای پایین‌تر (۱۰ درجه)، بیشترین مقدار گرانروی خمیری را پس از ساخت داشته است. همچنین گرانروی خمیری مخلوط‌های با دمای بالاتر تا مدت قابل‌توجهی بعد از ساخت، کمتر از مخلوط با دمای پایین بوده است.

*دمای مخلوط روی پمپ‌پذیری آن در زمان‌های اولیه پس از ساخت، تأثیر خاصی نداشته است. به نظر می‌رسد اثر منفیِ تنش جاری شدن بیشتر مخلوط با دمای بالاتر (۳۰ درجه) روی فشار پمپ، با اثر مثبت گرانروی خمیری کمترِ آن، خنثی می‌گردد. لیکن با گذشت زمان و افزایش بیشتر و سریع‌ترِ تنش جاری شدن مخلوط با دمای بالاتر، پمپ‌پذیری آن کمتر از مخلوط‌های با دمای پایین‌تر می‌باشد.

برای مخلوط‌های حاوی فوق روانساز پُلی‌کربوکسیلاتی:

*برای مخلوط‌های حـاوی فـوق روانسـاز، روانـی مخلـوط‌هـای بـا دمـای بـالاتر در زمـان‌هـای اولیـه پـس از سـاخت، قـدری بیشتر از مخلوطِ با دمای پایین‌تر بوده است.

*تنش جـاری شـدن مخلـوط‌هـای بـا دمـای بـالاتر در زمـان‌هـای ابتـدایی پـس از سـاخت، حـدوداً مشـابه مخلـوط‌هـای بـا دمای پایین‌تر بوده است، ولی روند افزایش تنش جاری شدن آن‌ها در طی زمان سریع‌تر بوده است.

*گرانروی خمیری مخلوط‌هـای بـا دمـای بـالاتر در زمـان‌هـای اولیـه پـس از سـاخت، از مخلـوط بـا دمـای پـایین‌تـر، کمتـر بـوده اسـت. درعـین‌حـال، مخلـوط بـا بیشـترین دمـا (۳۰ درجـه) دارای رونـد افزایشـی سـریع‌تـری در گرانـروی خمیـری، در مقایسه با مخلوط‌های با دمای ۱۰ و ۲۰ درجه بوده است.

* در زمان‌های اولیه پس از ساخت، پمپ‌پذیری مخلوط حاوی فوق روانساز در دمای بالاتر، بهتر از مخلوطِ با دمای پایین‌تر (۱۰ درجه) می‌باشد. لیکن با گذشت زمان و افزایش سریع‌ترِ تنش جاری شدن و همچنین گرانروی خمیری مخلوط با دمای بالاتر، پمپ‌پذیری آن کاهش یافته و از مخلوط‌های با دمای پایین‌تر، کمتر می‌گردد.

بر اساس نتایج فوق‌الذکر، به نظر می‌رسد بتن‌های تولیدشده تا حداکثر دمای بررسی‌شده (۳۰ درجه)، به‌خصوص اگر حاوی فوق روانساز پُلی‌کربوکسیلاتی باشند، درصورتی‌که به فاصله زمانی کوتاهی پس از ساخت، پمپ شوند، دمای بالا تأثیر منفی بر پمپ‌پذیری نخواهد داشت. این مورد می‌تواند مربوط به بتن‌های تولیدشده در کارگاه بافاصله زمانی کم بین تولید و پمپاژ باشد. اما با گذشت زمان، پمپ‌پذیری بتنِ با دمای بالاتر، سریعاً کاهش می‌یابد و لذا ضروری است برای مواردی نظیر بتن آماده که فاصله تولید تا پمپاژ بتن قابل‌توجه است، دمای بتن، پایین نگه داشته شود.

۷-تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت و پشتیبانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و به خصوص جناب آقای مهندس زنگانه، کارشناس و مسئول محترم آزمایشگاه بتن، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

۸-مراجع

[1] ACI Committee 305R, (2010). "Guide to Hot Weather Concreting". American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[۲] سازمان ملی استاندارد ایران،"سنگدانه های بتن-ویژگی ها،" ،شماره.۳۰۲.

[۳] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران،"ویژگی های سیمان پرتلند،" ،شماره. ۳۸۹.

[4] ASTM C187, (2011). "Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste". In: ASTM International.

[5] ASTM C188, (2014). "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement". In: ASTM International.

[6] ASTM C191, (2013). "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle". In: ASTM International.

[7] ASTM C204, (2011). "Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus". In: ASTM International.

[8] ASTM C230/C230M, (2014). "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement". In: ASTM International.

[۹] سازمان ملی استاندارد ایران،"افزودنی های بتن، ملات و دوغاب،" ،شماره.۲۹۳۰.

[10] Banfill, P.F.G., (2003). "The Rheology of Fresh Cement and Concrete-A Review". in Proceedings of the 11th International Cement Chemistry Congress, Durban.

[11] Barnes, H.A., Hutton, J.F., and Walters, K., (1989). "An Introduction to Rheology". First Edition, Vol. 3, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science BV [Google Scholar].

[12] Barnes, H.A., and Nguyen, Q.D., (2001). "Rotating Vane Rheometry—A Review". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 98(1): 1-14.

[13] Burg, R.G., (1996). "The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete". Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD113.01T: 1-13.

[14] De Schutter, G., and Feys, D., (2016). "Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges". RILEM Technical Letters, 1: 76-80.

[15] Domone, P.L.J., Yongmo, X., and Banfill, P.F.G., (1999). "Developments of the two-point workability test for high-performance concrete". Magazine of Concrete Research, 51(3): 171-179.

[16] Dontula, P., Macosko, C.W., and Scriven, L.E., (2005). "Origins of Concentric Cylinders Viscometry". Journal of Rheology, 49(4): 807-818.

[17] Dzuy, N.Q., and Boger, D.V., (1985). "Direct Yield Stress Measurement with the Vane Method". Journal of Rheology, 29(3): 335-347.

[18] Ferraris, C.F., Martys, N., George, W.L., Garboczi, E.J., and Olivas, A., (2016). "Calibration of Rheometers for Cementitious Materials". Sixth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Washington, DC.

[19] Ferraris, C.F., Billberg, P., Ferron, R., Feys, D., Hu, J., Kawashima, S., Koehler, E., Sonebi, M., Tanesi, J., and Tregger, N., (2017). "Role of Rheology in Achieving Successful Concrete Performance". A contribution from ACI Committee 238, Workability of Fresh Concrete, www.concreteinternational.com: 43-51.

[20] Hackley, V.A., and Ferraris, C.F., (2001). "The Use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology". Special Publication (SP 960-3), Gaithersburg, Maryland, The United States of America, National Institute of Standards and Technology (NIST).

[21] Johnston, C.D., (1993). "Effect of Concrete Mixing Temperatures on Performance of Superplasticizers". Johnston Engineering Ltd. and Alberta Transportation and Utilities.

[22] Koehler, E.P. and Fowler, D.W., (2004). "Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete". International Center for Aggregates Research (ICAR Report 105-3F), The University of Texas at Austin, Aggregates Foundation for Technology, Research and Education (AFTRE).

[23] Petit, J.-Y., Khayat, K.H., and Wirquin, E., (2006). "Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar". Cement and Concrete Research, 36(5): 832-841.

[24] Petit, J.-Y., Khayat, K.H., and Wirquin, E., (2009). "Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar". Cement and Concrete Research, 39(3): 165-170.

[25] Roussel, N., (2006). "Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results". Materials and Structures, 39(4): 501-509.

[26] Schmidt, W., Brouwers, H.J.H., Kühne, H.-C., Meng, B., (2014). "Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures". Cement and Concrete Composites, 49: 111-126.

[27] Secrieru, E., Mechtcherine, V., Schröfl, C., Borin, D., (2016). "Rheological characterisation and prediction of pumpability of strain-hardening cement-based-composites (SHCC) with and without addition of superabsorbent polymers (SAP) at various temperatures". Construction and Building Materials, 112: 581-594.

[28] Tattersall, G.H., and Banfill, P.F.G., (1983). "The Rheology of Fresh Concrete". London, The United Kingdom, Pitman Books Ltd.

[29] Wallevik, O.H., and Wallevik, J.E., (2011). "Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes". Cement and Concrete Research, 41(12): 1279-1288.

[30] Wallevik, O.H., Feys, D., Wallevik, J.E., and Khayat, K.H., (2015). "Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials". Cement and Concrete Research, 78: 100-109.