



بررسی خواص رئولوژی و زمان گیرش مخلوط های بتن خودتراکم توسط روش صفحه

علی اکبر شیرزادی جاوید*، پرویز قدوسی، محمد جابری زاده، بهنام بزرگمهر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۲۰
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۲۰
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۰۲

کلمات کلیدی:

دستگاه صفحه
بتن خودتراکم
تنش جاری
زمان گیرش
تغلیظ پذیری

خلاصه: زمان گیرش و تغلیظ پذیری مخلوط های بتن خود تراکم دو پارامتر بسیار مهم می باشند که در ساعات اولیه بتن ریزی حائز اهمیت هستند. برای تعیین این دو پارامتر روش هایی وجود دارد که دارای مزایا و معایب از جمله دقت پایین و یا هزینه بالای آزمایش می باشند. هدف از این تحقیق ارائه یک روش ارزان و در عین حال با دقت مناسب برای تعیین زمان گیرش و تغلیظ پذیری مخلوط های بتنی می باشد که این روش به نام روش صفحه معرفی شده است. روش مذکور شامل اندازه گیری تغییرات وزن یک صفحه زبر، در بازه زمانی انجام آزمایش می باشد که درون مصالح برپایه سیمان قرار می گیرد. جهت اعتبارسنجی روش صفحه، چندین نوع مخلوط بتن خودتراکم حاوی افزودنی های سرباره و دوده سیلیس در آزمایشگاه ساخته شده و نتایج زمان گیرش دستگاه صفحه با نتایج بدست آمده از روش استاندارد مقاومت در برابر نفوذ مقایسه شده است. علاوه بر انجام آزمایش صفحه، در این تحقیق سعی شد با اندازه گیری تغییرات دمای مخلوط ها، تأثیر پدیده های متفاوتی که در حالت تازه رخ می دهند، تشریح گردد. با توجه به آزمایش های انجام شده، نتایج تغلیظ پذیری دستگاه صفحه با رنومتر مقایسه شد. اختلاف نتایج برای مخلوط های مورد آزمایش، از حداقل ۳/۷۱٪ تا حداکثر ۱۰/۷۴٪ نسبت به نتایج رنومتر بدست آمد. همچنین اختلاف زمان گیرش بدست آمده از روش صفحه نسبت به روش مقاومت در برابر نفوذ حداکثر برابر ۹٪ بود. این نتایج نشان از دقت قابل قبول این روش در تعیین زمان گیرش و تغلیظ پذیری دارد و جهت تعیین این پارامترها پیشنهاد می شود.

۱- مقدمه

کارگاه بیان نمود. مطالعات در زمینه رئولوژی بتن همزمان با پیدایش بتن خودتراکم [۱] آغاز شده است. به دلیل اینکه ویژگی های این بتن در حالت تازه و سنین اولیه می توانند عواملی تأثیرگذار در تعیین خواص سخت شده و دوام آن در طول عمر این ماده باشند، لازم است روش هایی اتخاذ شوند که محققین با استفاده از آنها مقادیر این ویژگی ها را با دقت مناسبی اندازه گیری نمایند.

ویژگی های رئولوژی بتن خودتراکم به دلیل پدیده های فیزیکی و شیمیایی که با گذشت زمان رخ می دهند، پیوسته در حال تغییر و تکامل است. این روند توسط دو فرآیند تشکیل ساختار بازگشت پذیر

مطالعات در حوزه رئولوژی مصالح برپایه سیمان در سراسر جهان در سطح گسترده ای در حال انجام است. با توجه به تنوع و فراوانی عوامل موثر بر ویژگی های رئولوژی، این موضوع دارای پیچیدگی های خاص خود بوده و درک آن از اهمیت زیادی برخوردار است. به دلیل تغییر رفتار مصالح سیمانی در طول زمان، هدف از تحقیقات در این زمینه را می توان در تعیین صحیح نسبت های مخلوط مصالح و پیش بینی دقیق رفتار این مصالح از زمان ساخت تا مرحله اجرا در

* نویسنده عهده دار مکاتبات: email



(تغلیظ‌پذیری) و هیدراسیون غیر قابل بازگشت دانه‌های سیمان رخ می‌دهد و منجر به کاهش کارایی بتن می‌شود [۲].

"تنش جاری" به عنوان یکی از معیارهای اصلی رئولوژی معرفی شده است [۳]. تنش جاری مصالح بر پایه سیمان با گذشت زمان افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان ناشی از تشکیل ژل C-S-H در سطح تماس ذرات سیمان با یکدیگر و در نتیجه لخته شدن آنها در طول بازه استراحت و قبل از زمان گیرش دانست [۴]. این افزایش تنش جاری معمولاً با استفاده از یک رابطه خطی تابع زمان، حدوداً در مدت یک ساعت اول استراحت مدل می‌گردد [۵ و ۶]. اخیراً یک رابطه غیرخطی معرفی شده است که رشد تنش جاری را تا زمان گیرش تشریح می‌سازد [۷]. این تابع، تغییرات آهسته و آرام از حالت خطی اولیه افزایش رشد تنش جاری به حالت غیر خطی رشد آن را نشان می‌دهد. این روند غیر خطی که در مطالعات مختلف مشاهده شده است [۱۰-۷، ۲]، با افزایش محتوای جامد ماده در خمیر سیمان، به دلیل تولید ژل C-S-H تشریح‌گریده است [۸]. تا زمانی که حالت جریان ماده پایدار و ثابت است، رفتار بتن تازه را می‌توان توسط مدل‌های تنش جاری همچون مدل بینگام و یا مدل H-B تشریح کرد [۱۱]. با این حال بین این دو حالت پایدار (سکون و جریان ثابت) یک حالت انتقالی وجود دارد که مدل‌های تنش جاری قادر به توصیف آن نمی‌باشند [۵] و به آن ماهیت تغلیظ‌پذیری ماده می‌گویند. تعاریف مختلفی برای تغلیظ‌پذیری وجود دارد اما وجه مشترک همه آنها عبارت است از: "تغییرات بازگشت پذیر و وابسته به زمان در ویسکوزیته، زمانی که سیال تحت تنش یا نرخ برشی در حال افزایش یا کاهش قرار می‌گیرد" [۱۲]. روش‌های مختلفی برای تعیین تغلیظ‌پذیری وجود دارد که اغلب آنها نیازمند استفاده از دستگاه رئومتر می‌باشد.

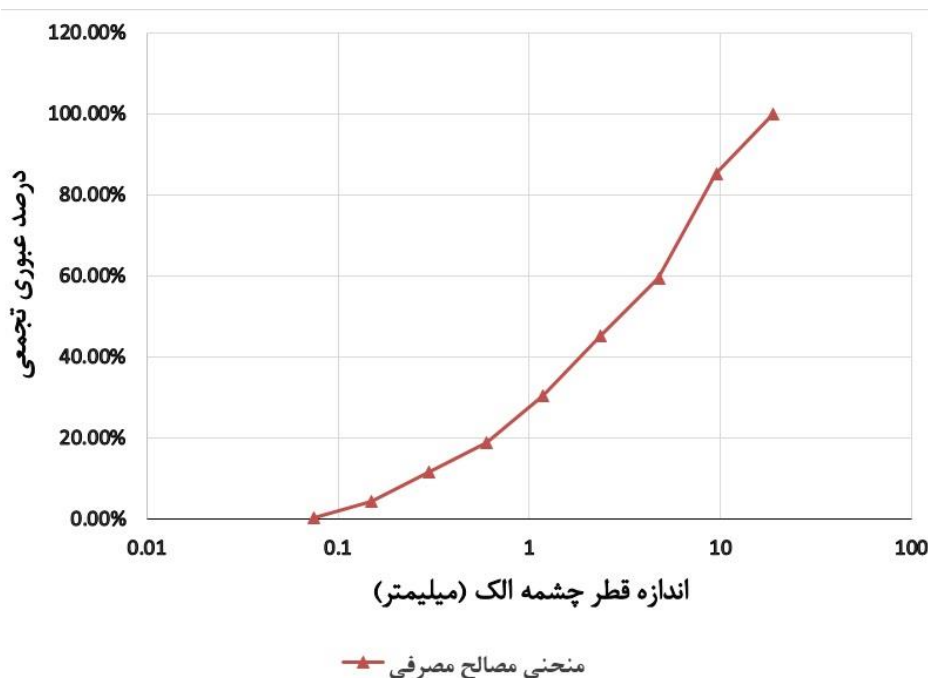
"زمان گیرش" به عنوان مرز بین حالات تازه و سخت شده بتن در نظر گرفته می‌شود. دانش رفتار گیرش بتن تعیین‌کننده برنامه زمانی روند کار بتن از مرحله ی ساخت تا ریختن در قالب و پرداخت آن می‌باشد. در زمان هیدراسیون اولیه ذرات سیمان، دانه‌های جامد تمایل به حرکت، رشد و پیوند دارند؛ این امر موجب تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی می‌گردد. مقاومت و دوام بعدی بتن می‌تواند تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی و ریزساختار تشکیل شده در زمان گیرش باشند. بنابراین رفتار گیرش بتن و مصالح

سیمانی در عملکرد بتن در حالت تازه و سخت شده (بلند مدت) بسیار مهم است [۱۳]. زمان گیرش عبارتست از زمانی که از لحظه اضافه کردن آب به مواد سیمانی آغاز شده و تا رسیدن مخلوط به درجه‌ای از سختی که توسط رویه مشخصی اندازه‌گیری می‌شود، ادامه می‌یابد [۱۴]. علیرغم نقش زمان‌های گیرش بر عملکرد بتن، نمی‌توان تمایز زیادی بین آن و فرآیند هیدراسیون قائل شد؛ علت این امر آن است که حالات تازه و سخت شده‌ی بتن در مدت زمان مشخصی یکدیگر را همپوشانی می‌کنند [۱۷-۱۵]. با افزایش استفاده از مصالح پوزولانی و تأثیر زیاد آنها بر خواص تازه و سخت شده‌ی بتن، فهم رفتار و ویژگی‌های زمان گیرش مهم‌تر می‌گردد [۱۸]. مصالح سیمانی حاوی ترکیبات معدنی و شیمیایی، دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که می‌توانند اثرات گوناگونی بر ویژگی‌های بتن از جمله زمان گیرش بگذارند [۱۶]. لیو^۱ [۱۳] از روش RS^۲ برای بررسی رفتار هیدراسیون خمیر سیمان با نسبت‌های مختلف آب به سیمان بعد از پایان مخلوط کردن تا زمان گیرش نهایی استفاده کرد و این نتایج را بدست آورد:

۱- با افزایش نسبت آب به سیمان زمان بیشتری طول می‌کشد تا ژل C-S-H تشکیل شود. ۲- برای همه نمونه‌ها تشکیل ژل C-S-H بعد از پایان دوره استراحت و پیش از زمان گیرش اولیه (که سنجش آن توسط دستگاه ویکات انجام شده است) آغاز شد. این امر منطقی است چون در مدت بازه استراحت، پدیده ی اصلی که رخ می‌دهد واکنش های سریع کلسیم آلومینات (C3A) است که در مقایسه با C3S و C2S نقش کمتری در تولید ژل C-S-H ایفا می‌کنند [۱۹]. این بدان معنی است که برای رسیدن به زمان گیرش اولیه، مقدار مناسب و مشخصی از C-S-H مورد نیاز است تا اجزای مختلف بتن را به هم متصل نماید و ریزساختاری مقاوم در برابر نفوذ دستگاه‌های سنجش زمان گیرش تشکیل شود. با افزایش مدت زمان هیدراسیون و بعد از گیرش اولیه، هیدراسیون بیشتر سیلیکات کلسیم (خصوصاً C3S)، ژل C-S-H بیشتری تولید می‌کند که به دلیل ماهیت آمورف خود، موجب سختی بیشتر مخلوط و در نهایت رسیدن به گیرش نهایی می‌گردد. در عین حال افزایش نرخ تولید حرارت به دلیل هیدراسیون C3S اتفاق می‌افتد [۱۳]. بدیهی است که پارامترهای دیگری مثل نسبت آب به سیمان، دمای محیط، درصد افزودنی های گوناگون، ترکیبات سیمان و... در زمان گیرش موثر هستند.

1 Fengjuan Liu

2 Raman Spectroscopy



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی
Fig. 1. Diagram for grading of aggregate materials

از آن رو که صفحه ثابت است، اجرای موفقیت آمیز آزمایش برای اندازه‌گیری تنش جاری، به جابجایی مصالح در سطح تماس با صفحه بستگی دارد. جابجایی نسبی ماده در سطح تماس باید به اندازه کافی باشد تا بر کرنش برشی بحرانی غلبه کند [۹ و ۲۳]. در حالت تازه بتن و مصالح بر پایه سیمان و بعد از آن، پدیده‌های زیادی رخ می‌دهد که منجر به تغییر حجم و رفتار ماده می‌گردد. آزمایش نحوه عملکرد هر یک از این پدیده‌ها و اثر دقیق آنها را تشریح کرده است [۲۳].

روش صفحه برای سنجش زمان گیرش خمیر سیمان توسط سلیمان^۱ [۹] به کار گرفته شده است. وی با کنترل تغییرات وزن ظاهری سوزن دستگاه ویکات به بررسی زمان گیرش پرداخته و نتایج بدست آمده را با آزمایش نفوذ سوزن ویکات بر اساس استاندارد ASTM-C1۹۱ [۲۹] مقایسه کرده است. سلیمان در نتایج خود تغییرات مربوط به رفتار تغلیظ‌پذیر و سخت شدگی خمیر سیمان را مشخص می‌سازد. وی همچنین ناحیه سخت‌شدگی خمیر سیمان را نشان می‌دهد. مشاهدات مشابهی توسط آزمایش^۲ [۲۳] بر روی خمیر سیمان و ملات به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر وزن صفحه انجام شده است.

استفاده از دستگاه صفحه به عنوان یک روش جدید برای اندازه‌گیری خواص تازه و زمان گیرش مخلوط‌ها اخیراً توسط محققین مطرح شده است [۹ و ۲۴-۲۰]. این روش برخلاف روش‌های متداول مکانیکی، که به هندسه دستگاه و نیروهای وارد شده به نمونه بستگی دارند، خواص رئولوژی و زمان گیرش بتن تازه را بر اساس تغییرات وزن ظاهری صفحه محاسبه می‌کند. این دستگاه شامل یک صفحه سخت و زبر است که درون مخلوط فرو برده می‌شود و به منظور اندازه‌گیری رشد تنش وارد بر صفحه مخلوط‌های غیرنیوتنی مانند بتن خودتراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل تغییر شکل مصالح در راستای محور عمودی، در سطح تماس صفحه با مصالح، برش ایجاد شده که موجب تغییر وزن ظاهری صفحه می‌شود. اساس طراحی این وسیله از دستگاه معرفی شده در [۲۵ و ۲۶] الهام گرفته شده است. این وسیله اولین بار در سال ۲۰۰۸ برای بتن استفاده شد [۲۷ و ۲۸]. به دلیل تغییر شکل عمودی خمیر سیمان در حالت تازه (نشست، انبساط و جمع‌شدگی) بر سطح تماس صفحه و نمونه تنش وارد شده که موجب تغییر در وزن ظاهری صفحه می‌شود [۹]. اندازه‌گیری‌هایی که توسط این روش انجام شده نشان می‌دهد که این روش دقت قابل ملاحظه‌ای در اندازه‌گیری زمان گیرش خمیر سیمان دارد [۹].

1 H. Sleiman
 2 S. Amziane

جدول ۱. نسبت های مخلوط مصالح
Table 1. Mix Proportions

$\frac{VMA}{P}$ (%)	نسبت ماسه ریز به ماسه درشت (%)	نسبت کل ماسه به کل مصالح سنگی	افزودنی جایگزین سیمان (%)		$\frac{W}{P}$	مقدار پودر ($\frac{Kg}{m^3}$)	نشانه اختصاری	شماره
			سرباره	دوده سیلیس				
0/5	0/5	0/6	-	-	0/44		C-44-N-0	
0/5	0/5	0/6	-	10	0/44	420	C-44-SF-10	1
0/5	0/5	0/6	50	-	0/44	420	C-44-GF-50	2
0/5	0/5	0/6	-	-	0/42	420	C-42-N-0	3
0/5	0/5	0/6	-	10	0/42	420	C-42-SF-10	4
0/5	0/5	0/6	50	-	0/42	420	C-42-GF-50	5
								6

۲-۲- نسبت های مخلوط بتن

در این پژوهش دو دسته بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۴۴ ساخته شد. همچنین به دلیل ایجاد تفاوت در دمای مخلوط و زمان گیرش مخلوط، از دو افزودنی سرباره و دوده سیلیس استفاده گردید که درصد جایگزینی آنها در جدول ۱ قابل ملاحظه است.

۳-۲- آزمایش های انجام شده

در بخش رئولوژی برای بررسی قابلیت پرمیختگی و عبور، آزمایش های جریان اسلامپ، T₅₀ و حلقه J انجام شد. همچنین برای تعیین پارامترهای اصلی رئولوژی نظیر تنش جاری استاتیک نمونه ها از دستگاه رئومتر [۳ و ۳۰] استفاده گردید. به منظور اندازه گیری زمان گیرش مخلوط ها از آزمایش مقاومت در برابر نفوذ بر اساس استاندارد ASTM-C۴۰۳ [۳۱] استفاده شد. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط ها نیز بر اساس استاندارد ۱۱۶ PART ۱۸۸۱: BS [۳۲] محاسبه شده است.

۴-۲- دستگاه صفحه

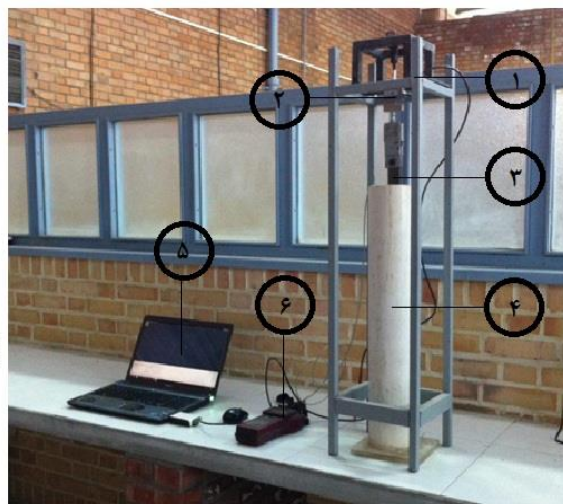
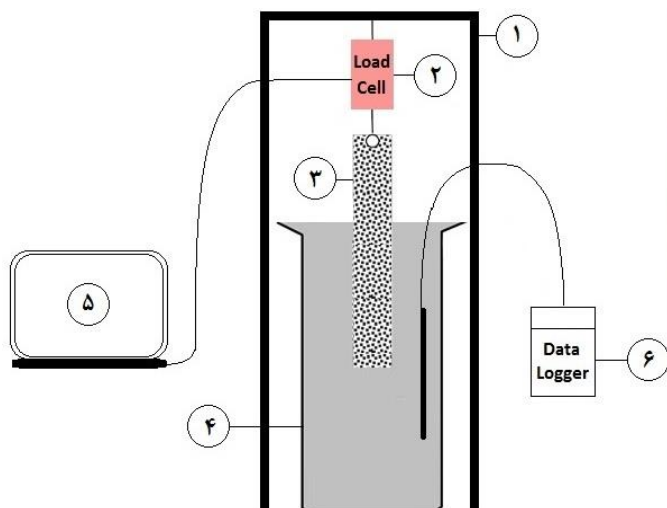
دستگاه صفحه مورد استفاده و وسایل مورد نیاز برای ساخت آن مطابق شکل ۲ می باشد:

به دلیل اینکه هدف کلی این پژوهش، سنجش اعتبار دستگاه صفحه در مقایسه با استانداردهای موجود اندازه گیری خواص بتن خودتراکم در حالت تازه می باشد، نتایج حاصل از پارامترهای رئولوژی و زمان گیرش بدست آمده از دستگاه صفحه به ترتیب با نتایج حاصل از رئومتر و زمان گیرش حاصل آزمایش مقاومت نفوذ مقایسه و تعیین اعتبار می گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مواد و مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تپ دو با وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و نرمی بلین ۳۰۸۱ سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. مصالح سنگی در سه سایز دانه بندی شده و جهت دستیابی به دانه بندی پیوسته و مناسب، مکمل یکدیگر تهیه شده است. این مصالح شامل شن با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلیمتر و دو سایز ماسه درشت و ریز به ترتیب با حداکثر اندازه ۸ و ۳ میلیمتر می باشد. دانه بندی مصالح سنگی در شکل ۱ ملاحظه می شود. همچنین از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شد. در تمام مخلوط ها از ماده اصلاح کننده روانگری (VMA) استفاده شده است که دارای وزن مخصوص ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد.



شکل ۲. تصویر دستگاه صفحه در حال انجام آزمایش ۱ - مجموعه پایه نگهدارنده ترازو و صفحه ۲- سلول وزنی با ظرفیت ۵۰ کیلوگرم و دقت ۱/۰ گرم
 ۳- صفحه فلزی زبر به عرض ۳۳، ارتفاع ۳۲۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر که تا ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر درون مخلوط فرو برده شده است. ۴- ظرف مخلوط به ارتفاع ۶۵ سانتیمتر که تا ارتفاع ۶۰ سانتیمتر از نمونه پر شده است. ۵- نرم‌افزار و رایانه به منظور ثبت تغییرات وزن صفحه ۶- ثبت کننده دیجیتالی تغییرات دمای درون مخلوط

Fig. 2. Plate device in use - 1. Holder, 2. Load Cell, 3. Rough plate, 33 mm*320 mm*3 mm, that is immersed up to 150 mm in the mixture, 4. Container, filled up to 60 cm, 5. Computer, 6. Temperature data logger

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های حالت تازه بتن و مقاومت فشاری
 Table 2. Fresh State data and Compressive Strength values

شماره	شناسه مخلوط	وزن مخصوص ($\frac{Kg}{m^3}$)	مقاومت فشاری ($\frac{Kg}{cm^2}$)	جریان اسلامپ (Cm)	T50 (S)	J-Ring (mm)
1	C-44-N-0 C-44-SF-10	2348/8	455	73	2/63	6
2	C-44-GF-50	2264	503	68	3/15	8/5
3	C-42-N-0	2238	480	65	3/8	9
4	C-42-SF-10	2314/6	500	71	2/8	7
5	C-42-GF-50	2300	602	66	3/26	8
6	C-42-GF-50	2296	552	63	4	10

۳- نتایج و تفسیر
 ۳-۱- نتایج کارایی مخلوط‌ها و مقاومت فشاری

بدست آمده است. مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت آب به پودر در مخلوط‌ها، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته است.

۳-۲- نتایج دستگاه صفحه

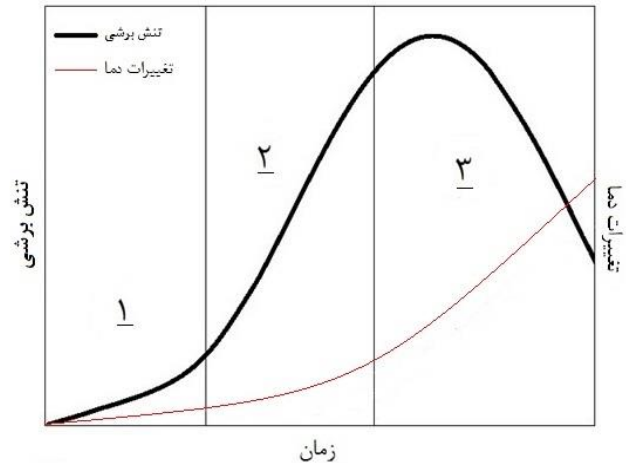
با در نظر گرفتن تأثیر همه پدیده‌های موثر بر وزن ظاهری صفحه، رابطه تبدیل تغییرات وزن ظاهری ثبت شده توسط دستگاه صفحه به تنش برشی به شکل رابطه ۱ می‌باشد [۲۳]. در این رابطه g شتاب گرانشی زمین، S مساحت صفحه در تماس با مخلوط، ρ چگالی

همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش‌های کارایی برای کلیه مخلوط‌ها، حدود جریان اسلامپ، T_{50} و حلقه J، مطابق حدود تعیین شده در راهنمای EFNARC [۳۳] بوده است. همچنین در نتایج آزمایش مقاومت فشاری نیز ملاحظه می‌شود که مطابق انتظار با افزودن دوده سیلیس بیشترین افزایش در مقاومت فشاری نمونه نسبت به مخلوط حاوی سرباره و مخلوط بدون افزودنی

می‌شود. بنابراین از آنجا که در این قسمت تغییرات حرارت ناشی از فرآیند هیدراسیون مصالح سیمانی بسیار ناچیز است، در نتیجه در این بازه نمی‌توان فعالیت شیمیایی حائز اهمیتی را مورد توجه قرار داد؛ لذا پدیده غالب در این بازه زمانی، فرآیند فیزیکی تشکیل ساختار سه بعدی درونی نمونه می‌باشد. البته به دلیل اینکه بتن در طول این بازه حالت تازه خود را حفظ می‌کند، می‌توان خواص کارپذیری را از آن انتظار داشت و تنها با اعمال تنش برشی می‌توان از خواص ذاتی بتن خود تراکم بهره برد. در انتهای قسمت اول روند رشد غیرخطی شروع می‌گردد. این قسمت را می‌توان به شروع بخش عمده فرآیند هیدراسیون دانه‌های سیمان مرتبط دانست و تغییر فاز از حالت مایع به جامد را انتظار داشت. این روند غیر خطی مشاهده شده، همسو با نتایج مطالعات پروت^۱ [۲] و مشاهدات مشابه [۷-۱۰] می‌باشد.

بخش شماره ۲: این بخش از نمودار را می‌توان مهمترین قسمت در کسب مقاومت نمونه بتنی نامید. از آنجایی که مقاومت مصالح برپایه سیمان به علت تولید محصولات هیدراسیون می‌باشد، در این قسمت ذرات سیمان واکنش‌های اصلی خود را آغاز نموده و شروع به تولید محصولات هیدراسیون بخصوص ژل C-S-H می‌کنند، که عامل اصلی در کسب مقاومت است. بنابراین علت این افزایش چشمگیر در تغییرات وزن نمونه و در نهایت تنش برشی وارد بر صفحه را می‌توان ناشی از روند سخت شدگی ماده دانست. در پایان این قسمت به دلیل تولید محصولات هیدراسیون و بلوغ ژل C-S-H، احتمالاً سخت شدگی نمونه به حدی خواهد رسید که در مقابل نیروی وارد شده از جانب وسایل سنجش زمان گیرش مقاومت کند و بنابراین زمان گیرش اولیه نمونه فرا می‌رسد. این پدیده پایانی بر کارپذیری بتن بوده و عملاً حالت تازه خود را از دست می‌دهد. لذا با توجه به توضیحات فوق در قسمت دوم نمودار، نمونه بتنی از حالت تازه خارج شده و در نهایت تغییر فاز به حالت جامد رخ می‌دهد.

بخش شماره ۳: همانطور که در نمودار ملاحظه می‌شود در پایان بخش دوم و با شروع قسمت سوم نمودار، تغییرات حرارتی ناشی از فرآیند هیدراسیون به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. علت این افزایش ناگهانی را باید در ریز ساختار تشکیل دهنده ذرات سیمان از جمله C2S و C3S جستجو کرد که مهمترین عوامل در تولید گرمای هیدراسیون بوده و اهم مقاومت کسب شده و حرارت تولید شده در



شکل ۳. نمودار تنش برشی و تغییرات دمای نمونه در طول بازه انجام آزمایش

Fig. 3. Variation of mixture temperature and applied shear stress on the plate versus time during the test

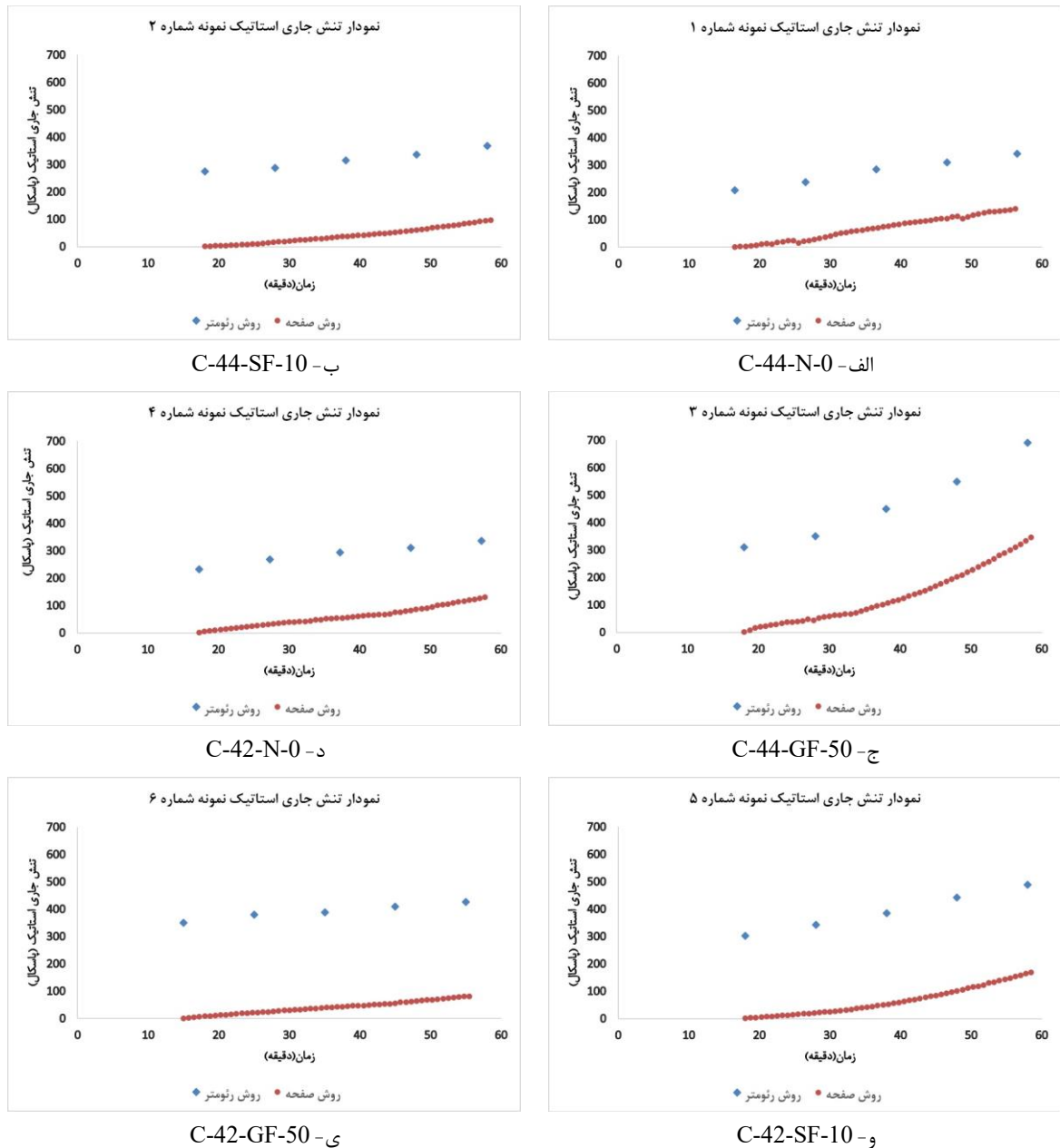
مخلوط و V حجم صفحه درون مخلوط است.

$$\tau_0(t) = \frac{g(\Delta m(t) + \rho V)}{S} \quad (1)$$

با الهام گرفتن از نتایج مطالعات آمیزان [۲۳]، آزمایش صفحه بر روی مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه، تا زمان سخت شدن کامل مخلوط و مدتی پس از آن انجام گردید؛ سپس با استفاده از رابطه ۱ تغییرات وزن ظاهری صفحه به تنش برشی تبدیل شد. در نهایت شکل کلی نمودار حاصل از تغییرات تنش برشی در سطح صفحه و تغییرات دمای مخلوط ناشی از فرآیند هیدراسیون را می‌توان به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داد.

در شکل ۳ سه قسمت مختلف با شماره مشخص شده‌اند که توضیحات مربوط به هر قسمت به تفصیل در زیر ارائه می‌شود.

بخش شماره ۱: در این قسمت رشد خطی تنش برشی مشاهده می‌شود. براساس نتایج سلیمان [۹] و آمیزان [۲۳]، این روند رشد خطی را می‌توان ناشی از تشکیل شبکه‌های کلوییدی و ساختار درونی ذرات سیمان و ماهیت بازگشت‌پذیر خاصیت تغلیظ‌پذیری مصالح بر پایه سیمان در حال استراحت دانست. این پدیده همسو با نتایج ارائه شده در مطالعات راسل [۵] و حاکی بر رشد خطی تنش جاری در بازه استراحت مخلوط می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج آزمایش‌های لیو [۱۳] در پایان زمان استراحت ژل C-S-H تولید



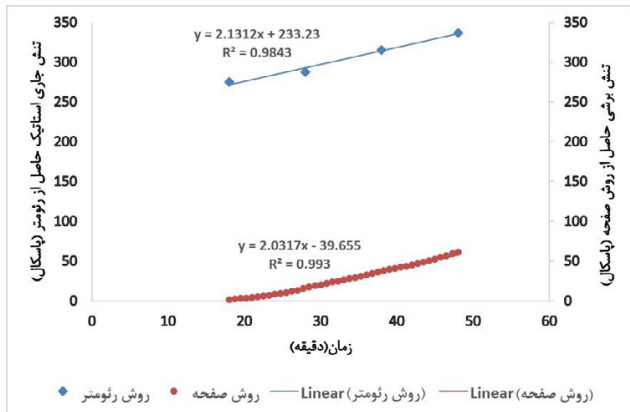
شکل ۴. نمودارهای تنش جاری استاتیک مخلوطها توسط دو روش صفحه و رئومتر
 Fig. 4. Diagrams for Static yield stress for mixtures measured by two methods, plate device and rheometer

با ارائه توضیحات فوق، اکنون خواص اندازه‌گیری شده در این پژوهش و مقایسه مقادیر این پارامترها با روند مورد انتظار ارائه می‌شود.

۳-۳- تنش جاری استاتیک

مکانیزم عملکرد دستگاه صفحه به صورت صفحه ثابت می‌باشد

نمونه بعد از زمان گیرش اولیه به دلیل واکنش این ذرات می‌باشد. لازم به ذکر است از آن رو که افزایش حرارت موجب افزایش حجم دانه‌های سیمانی می‌شود، این افزایش حرارت ناگهانی منجر به انبساط حرارتی نمونه شده و سبب کاهش تغییرات وزن ثبت شده توسط صفحه می‌شود و در نهایت باعث تغییر روند شیب رشد نمودار می‌گردد. این نتایج، مشاهدات انجام شده توسط آرمیان [۲۳] را تأیید می‌نماید.



شکل ۵. محاسبه تغلیظ پذیری توسط دو روش صفحه و رئومتر برای مخلوط

C-۴۴-SF-۱۰ توسط رابطه شماره ۱

Fig. 5. Calculations of Thixotropy using two methods of Plate device and rheometer for the mixture C-44-SF-10, based on the equation 1

تنش جاری استاتیک در بازه‌های زمانی مختلف به عنوان شاخص تغلیظ‌پذیری استفاده می‌شود، می‌توان این پارامتر را توسط دستگاه صفحه نیز مورد ارزیابی قرار داده و با بدست آوردن شیب خط برازش داده شده بر مقادیر تنش برشی، مقداری را به عنوان شاخص تغلیظ‌پذیری معرفی نمود. این پارامتر توسط هر دو روش تا زمان ۳۰ دقیقه پس از پایان مخلوط کردن محاسبه شده است. مطابق آنچه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، در قسمت اول نمودار، تشکیل ساختار درونی به دلیل ماهیت تغلیظ‌پذیری ماده رخ می‌دهد و پدیده غالب می‌باشد؛ بنابراین محاسبات این پارامتر باید در این قسمت از نمودار صفحه به انجام برسد تا اطمینان حاصل شود که این افزایش تنش جاری تنها به علت رفتار تغلیظ‌پذیر ماده بوده و روند تغییر فاز ماده از حالت سیال به جامد که ناشی از بلوغ محصولات هیدراسیون خمیر سیمان است، در محاسبات نقشی ندارد. به عنوان نمونه و برای بهتر نشان دادن روش محاسبه، مقدار تغلیظ‌پذیری برای مخلوط C-۴۴-SF-۱۰ در شکل ۵ نشان داده شده است.

مقادیر تغلیظ‌پذیری توسط هر دو روش برای کلیه مخلوط‌ها محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است:

مطابق جدول ۳، با مقایسه نتایج شاخص تغلیظ‌پذیری محاسبه شده توسط دو روش صفحه و رئومتر، مشاهده می‌شود که اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دو روش، از حداقل برابر ۳/۷۱٪ تا

و صفحه و مخلوط بتن مورد آزمایش، هیچ گونه حرکت دینامیکی ندارند. طبق تعریف، تنش جاری استاتیک به حداقل تنش برشی لازم برای جریان یافتن نمونه اطلاق می‌شود، حال آنکه در روش صفحه فرض شده است که مقدار تنش برشی وارد بر صفحه، برابر با حداقل مقدار تنشی است که به منظور ایجاد کرنش برشی بحرانی در خمیر سیمان لازم است. بنابراین فرض می‌شود که بتوان مقادیر حاصل از دستگاه صفحه را با تنش جاری استاتیک مرتبط دانست. باید در نظر داشت، مقدار تنشی که توسط دستگاه رئومتر اندازه‌گیری می‌شود معادل مقداری است که برای شکستن ساختار شبکه‌های کلوییدی و سه بعدی درونی نمونه لازم است تا مخلوط جریان یابد؛ همچنین رئومترهای مختلف با ابعاد پره‌های متفاوت مقادیر متفاوتی نشان می‌دهند که ناشی از مکانیزم آنهاست ولی در دستگاه صفحه، تنش برشی صرفاً به دلیل حرکت دانه‌ها به سمت پایین در نتیجه عمل ته نشین شدن، ایجاد می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که در روش صفحه حتی با فرض ایجاد کرنش بحرانی برای شکستن ساختار درونی نمونه، تنش برشی ایجاد شده در دستگاه صفحه به اندازه کافی بزرگ نیست که بتواند جریان مورد انتظار را ایجاد نماید. لذا اختلاف کمی قابل توجهی را میان نتایج هر دو دستگاه باید انتظار داشت. مقادیر تنش جاری استاتیک بدست آمده توسط هر دو روش در نمودارهای شکل ۴ قابل ملاحظه است.

همانطور که در شکل ۴ قابل ملاحظه است، با مقایسه نتایج بدست آمده از دستگاه صفحه و رئومتر، مطابق با انتظار اختلاف کمی زیادی میان مقادیر دو روش وجود دارد که این امر را می‌توان به تفاوت در مکانیزم عملکردی دو دستگاه مرتبط دانست. بنابراین روش صفحه با مکانیزم تشریح شده، برای محاسبه مقادیر تنش جاری استاتیک مناسب نیست.

۴-۳- تغلیظ‌پذیری

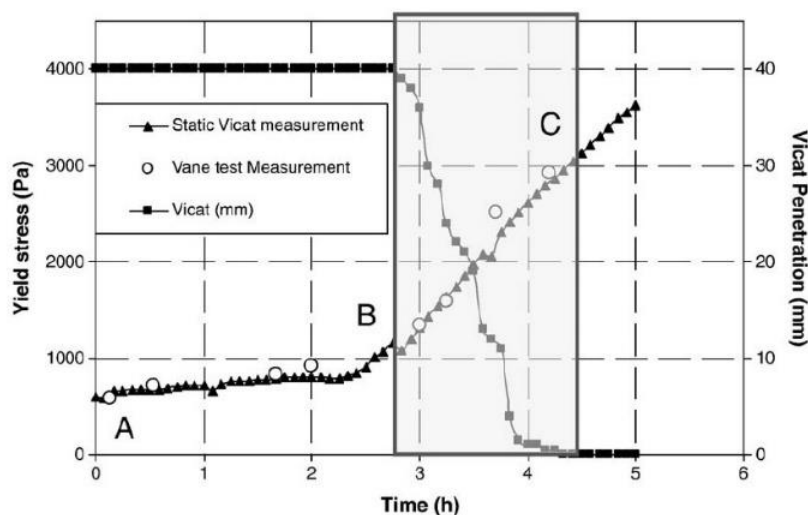
در این تحقیق برای اندازه‌گیری مقادیر کمی پارامتر تغلیظ‌پذیری از روش راسل [۵] استفاده می‌شود. رابطه این روش به صورت زیر است:

$$\tau_0(t) = \tau_0 + A_{thix} \cdot t \quad (2)$$

در این روش از مقدار شیب خط برازش داده شده بر مقادیر

جدول ۳. مقایسه مقادیر شاخص تغلیظ پذیری و اختلاف مقادیر محاسبه شده توسط دو دستگاه
Table 3. Comparison between thixotropy values measured by the two methods

اختلاف نتایج دو دستگاه (%)	تغلیظ پذیری ($\frac{Pa}{min}$)		شناسه مخلوط	شماره
	دستگاه رئومتر	دستگاه صفحه		
7/26	3/5267	3/7828	C-44-N-0	1
4/67	2/1312	2/0317	C-44-SF-10	2
10/43	8/1521	7/3012	C-44-GF-50	3
3/71	2/6021	2/5056	C-42-N-0	4
10/74	4/6499	4/1501	C-42-SF-10	5
4/29	1/8713	1/791	C-42-GF-50	6



شکل ۶. بررسی زمان گیرش خمیر با استفاده از مقایسه نتایج دو دستگاه صفحه و سوزن ویکات [۹]
Fig. 6. Evaluation of setting time for cement paste using the comparison between plate device and Vicat needle

به جامد معرفی کرده است و این موضوع درستی تفسیر قسمت دوم شکل ۳ را آشکار می‌سازد.

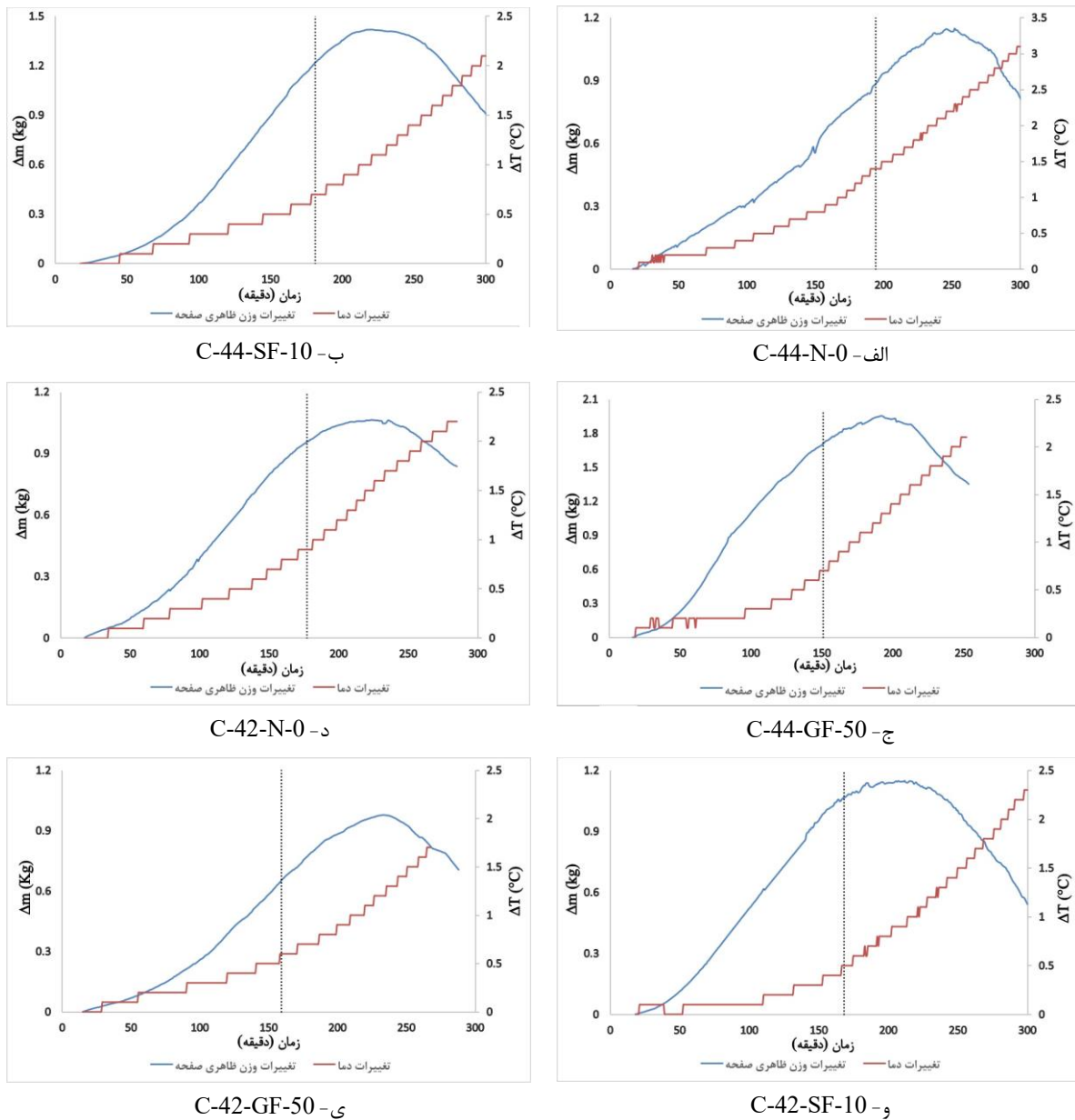
در هیچ یک از مطالعات پیشین، در بازه زمانی محاسبه تغییرات وزن صفحه، زمان دقیقی که تعیین کننده زمان گیرش باشد، بخصوص برای بتن خودتراکم معرفی نشده است. بنابراین زمان گیرش اولیه مخلوط‌های مورد آزمایش در این تحقیق، توسط روش دستگاه مقاومت در برابر نفوذ طبق استاندارد ASTM-C۴۰۳ [۳۱] برای بتن مورد سنجش قرار گرفت و با نتایج حاصل از روش صفحه مقایسه گردید.

مفهوم تنش جاری به خواص نمونه در حالت تازه و قبل از زمان

بیشترین مقدار معادل ۱۰/۷۴٪ متغیر است. بنابراین نتایج اندازه‌گیری شده توسط دستگاه صفحه، دارای اختلاف قابل اغماض و در نتیجه دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج دستگاه رئومتر می‌باشد.

۵-۳- زمان گیرش

براساس آنچه که آرمیان [۲۳] در نتیجه مطالعات خود مطابق شکل ۶ بیان می‌کند، با کنترل تغییرات تنش جاری بدست آمده از تغییرات وزن ظاهری صفحه می‌توان زمان گیرش اولیه را تعیین نمود؛ همچنین سلیمان [۹] در نمودار نتایج خود قسمت BC را به عنوان ناحیه افزایش شدید تنش جاری ناشی از تغییر فاز ماده از مایع



شکل ۷. نمودار بررسی تغییرات وزن ظاهری صفحه درون مخلوط توأم با دمای مخلوط برای نشان دادن زمان گیرش بدست آمده از روش مقاومت در برابر نفوذ از خطچین استفاده شده است

Fig. 7. Diagrams for variation of the apparent mass of the plate, immersed in the mixture and changes in temperature versus time; Dashed lines show setting time based on standard penetration resistance method.

صفحه توأم با تغییرات دما برای کلیه مخلوطها ملاحظه می‌شود. همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، با توجه به نوع افزودنی جایگزین سیمان مورد استفاده، تغییرات دمای مخلوطها متفاوت است و مخلوطهای حاوی سرباره با شناسه‌های C-44-GF-50 و C-42-GF-50، در مدت زمان انجام آزمایش، تغییرات دمای تولید شده کمتری را در مقایسه با مخلوطهای بدون افزودنی و مخلوطهای

گیرش اطلاق می‌شود، لذا از آنجا که در بررسی زمان گیرش، هدف کنترل میزان سخت شدگی نمونه در حین تغییر فاز می‌باشد، چنین به نظر می‌رسد که کنترل زمان‌های گیرش از تغییرات تنش جاری مطابق آنچه در نتایج آزمایشان [۲۳] و سلیمان [۹] آمده مفهوم درستی نیست؛ بنابراین از کنترل تغییرات وزن ظاهری صفحه برای این منظور استفاده گردیده است. در شکل ۷ نمودارهای تغییرات وزن ظاهری

جدول ۴. مقادیر زمان گیرش اولیه محاسبه شده توسط دو روش صفحه و مقاومت در برابر نفوذ
Table 4. Values for initial setting time measured by plate method and penetration resistance

اختلاف (%)	زمان گیرش (دقیقه)		شناسه مخلوط	شماره
	روش مقاومت در برابر نفوذ	روش صفحه		
6	194	183	C-44-N-0	1
6	181	170	C-44-SF-10	2
9	151	137	C-44-GF-50	3
6	177	167	C-42-N-0	4
5	168	159	C-42-SF-10	5
9	159	174	C-42-GF-50	6

گیرش بدست آمده توسط دو روش صفحه و استاندارد مقاومت در برابر نفوذ، از کمترین مقدار برابر ۵٪ تا حداکثر برابر ۹٪ متغیر است. این اختلاف بسیار اندک می باشد؛ بنابراین می توان چنین نتیجه گرفت که دستگاه صفحه در اندازه گیری زمان گیرش، دقت بالا و قابل ملاحظه ای دارد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی خواص رئولوژی و زمان گیرش مخلوط های بتن خودتراکم توسط دستگاه صفحه پرداخته شد. کنترل تغییرات وزن ظاهری صفحه و تبدیل آن به تنش جاری، مقادیر تنش جاری استاتیک و شاخص تغلیظ پذیری محاسبه و با نتایج حاصل از دستگاه رئومتر مقایسه گردید. همچنین برای کنترل زمان گیرش اولیه تغییرات دما توأم با کنترل وزن ظاهری صفحه انجام شد که نتایج آن با نتایج بدست آمده از دستگاه مقاومت در برابر نفوذ مورد مقایسه قرار گرفت. براساس آزمایش های انجام شده نتایج زیر بدست آمد:

- مقادیر تنش جاری استاتیک اندازه گیری شده توسط رئومتر بسیار بزرگتر از مقادیر حاصل از دستگاه صفحه بود. این موضوع نشان دهنده این است که روش صفحه قادر به اندازه گیری تنش جاری استاتیک نیست.

- مقادیر محاسبه شده برای شاخص تغلیظ پذیری توسط هر دو دستگاه صفحه و رئومتر بسیار به یکدیگر نزدیک بود که این امر نشان

حاوی دوده سیلیس تجربه می کنند. این پدیده مطابق با انتظار بوده و منطبق با نتایج [۳۴ و ۳۵] می باشد.

از مهمترین نکاتی که از تحلیل این نمودارهای شکل ۷ قابل اشاره است اینکه در زمان هایی نزدیک به زمان گیرش اولیه، شیب نمودار تغییرات وزن صفحه، شروع به کاهش می کند که این پدیده همزمان با کاهش مدت بازه های زمانی تغییرات دمای نمونه می باشد. همانطور که در اکثر نمودارهای فوق مشاهده می شود، سرعت رشد نمودار تغییرات دما در زمان های نزدیک به زمان گیرش اولیه بدست آمده از دستگاه مقاومت در برابر نفوذ، افزایش چشمگیری را تجربه می کند. این امر را می توان ناشی از آغاز فرآیند هیدراسیون مواد تشکیل دهنده ذرات سیمان از جمله C2S و C3S دانست که نقش بسزایی در تولید گرما در روند هیدراسیون خمیر سیمان، پس از چند ساعت از آغاز اختلاط آب و سیمان ایفا می کنند. طبق نظر مدن دوست [۳۶] در زمان افزایش سریع حرارت هیدراسیون، زمان گیرش اولیه فرا می رسد و این موضوع با نتایج بدست آمده در این مطالعه مطابقت دارد. بنابراین با توجه به اندازه گیری های انجام شده در این پژوهش، می توان چنین بیان کرد که در نمودار تغییرات وزن ظاهری صفحه، لحظه ای که شیب نمودار کاهش می یابد، می تواند به عنوان زمان گیرش اولیه در نظر گرفته شود. بنابراین اختلاف زمان گیرش اولیه توسط دو روش صفحه و مقاومت در برابر نفوذ اندازه گیری شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می گردد، اختلاف مقادیر زمان

of microstructure evolution in cement paste through setting using ultrasonic and rheological measurements. *Cement and Concrete Research*, 2010. 40(1): p. 33-44.

[9] Sleiman, H., A. Perrot, and S. Amziane, A new look at the measurement of cementitious paste setting by Vicat test. *Cement and Concrete Research*, 2010. 40(5): p. 681-686.

[10] Lootens, D., et al., Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and concrete Research*, 2009. 39(5): p. 401-408.

[11] De Larrard, F., C. Ferraris, and T. Sedran, Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. *Materials and structures*, 1998. 31(7): p. 494-498.

[12] Mewis, J. and N.J. Wagner, Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009. 147: p. 214-227.

[13] Liu, F., Z. Sun, and C. Qi, Raman spectroscopy study on the hydration behaviors of Portland cement pastes during setting. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. 27(8): p. 04014223.

[14] Astm, C., 125 Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 2003. 4.

[15] Brooks, J., M.M. Johari, and M. Mazloom, Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cement and concrete Composites*, 2000. 22(4): p. 293-301.

[16] Mazloom, M., A. Ramezani-pour, and J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2004. 26(4): p. 347-357.

[17] Mehta, P.K., *The Structure of Concrete*. CONCRETE: Structure, Properties, and Materials, 1986: p. 17-41.

[18] Aydin, A. and R. Gül, Influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete. *Construction and building materials*, 2007. 21(6): p. 1277-1281.

[19] Bullard, J.W., et al., Mechanisms of cement hydration. *Cement and concrete research*, 2011. 41(12): p. 1208-1223.

[20] Billberg, P.H., et al., Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC. *Cement*

دهنده دقت بالای دستگاه صفحه در اندازه‌گیری این پارامتر است. نتایج تغلیظ‌پذیری دستگاه صفحه برای مخلوط‌های مورد آزمایش، از حداقل ۳/۷۱٪ تا حداکثر ۱۰/۷۴٪ نسبت به نتایج رئومتر اختلاف داشتند.

• در زمانی نزدیک به لحظه گیرش اولیه که توسط دستگاه مقاومت در برابر نفوذ اندازه‌گیری شد، شیب نمودار تغییرات وزن ظاهری صفحه کاهش یافته است که این پدیده همزمان با افزایش دمای مخلوط رخ داده است. بنابراین لحظه کاهش شیب رشد وزن ظاهری صفحه به عنوان زمان گیرش اولیه معرفی می‌شود. اختلاف زمان گیرش بدست آمده از روش صفحه برای مخلوط‌ها نسبت به روش مقاومت در برابر نفوذ، حداکثر برابر ۹٪ بود.

مراجع

[1] Okamura, H. and M. Ouchi, Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1998. 1(4): p. 378-383.

[2] Lecompte, T. and A. Perrot, Non-linear modeling of yield stress increase due to SCC structural build-up at rest. *Cement and Concrete Research*, 2017. 92: p. 92-97.

[3] Koehler, E.P. and D.W. Fowler. A portable rheometer for self-consolidating concrete. in *Second North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and fourth international RILEM symposium on self-compacting concrete*. Hanley Wood Publications, Addison, IL, USA. 2005.

[4] Roussel, N., et al., The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(1): p. 148-157.

[5] Roussel, N., A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and concrete research*, 2006. 36(10): p. 1797-1806.

[6] Roussel, N., Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. *Cement and concrete research*, 2005. 35(9): p. 1656-1664.

[7] Perrot, A., et al., Prediction of lateral form pressure exerted by concrete at low casting rates. *Materials and Structures*, 2015. 48(7): p. 2315-2322.

[8] Subramaniam, K.V. and X. Wang, An investigation

- Evaluation, 2020. 48(1): p. 656-670.
- [29] ASTM, C., 191-08. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM Internationals, United States, 2008.
- [30] Koehler, E.P. and D.W. Fowler. Development and Use of a Portable Rheometer for Concrete. in Supplementary Proceedings of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Montreal, Canada. 2006.
- [31] ASTM, C., 403. 2005. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. Annual Book of ASTM Standards, 2005.
- [32] British Standard, B., part 116, 1983," Method for determination of compressive strength of concrete cubes. British Standards Institution, 1881.
- [33] Concrete, S.-C., The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. BIBM, et al, 2005. 22.
- [34] Khan, S.U., et al., Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete. The Scientific World Journal, 2014. 2014.
- [35] Gesoğlu, M. and E. Özbay, Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems. Materials and Structures, 2007. 40(9): p. 923-937.
- [36] Madandoust, R., M. Ranjbar, and A. Moshiri, The effects of steel and pet fibers on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), 2014. 15(5): p. 671-682.
- and Concrete composites, 2014. 54: p. 70-79.
- [21] Ghoddousi, P., et al., Predicting the formwork lateral pressure of self-consolidating concrete based on experimental thixotropy values. International Journal of Civil Engineering, 2019. 17(7): p. 1131-1144.
- [22] Ghoddousi, P., et al., A new method to determine initial setting time of cement and concrete using plate test. Materials and Structures, 2016. 49(8): p. 3135-3142.
- [23] Amziane, S. and A. Perrot, The plate test carried out on fresh cement-based materials: How and why? Cement and Concrete Research, 2017. 93: p. 1-7.
- [24] Tchamba, J., et al., Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: laboratory experiments. Cement and Concrete Research, 2008. 38(4): p. 459-466.
- [25] Zhu, L., et al., A slotted plate device for measuring static yield stress. Journal of Rheology, 2001. 45(5): p. 1105-1122.
- [26] Zhang, M.-H., et al., Measurement of yield stress for concentrated suspensions using a plate device. Materials and Structures, 2010. 43(1-2): p. 47-62.
- [27] Amziane, S., A. Perrot, and T. Lecompte, A novel settling and structural build-up measurement method. Measurement Science and Technology, 2008. 19(10): p. 105702.
- [28] Javid, A.A.S., et al., The Comparison and Introduction of Plate Test and Electrical Resistance Methods of Determining the Setting Time and Thixotropy of Self-Consolidating Concrete. Journal of Testing and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.A. Shirzadi Javid, P. Ghoddousi, M. Jaberizadeh, B. Bozorgmehr, Evaluating the Rheology Properties of Self-Consolidating Concrete Using the Plate Test Method, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1163-1176.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14305.5619](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14305.5619)



