

# بررسی ارتباط بین خواص رئولوژی مخلوط های بتن خودتراکم با زمان گیرش به روش مقاومت الکتریکی

پرویز قدوسی<sup>۱</sup>، علی اکبر شیرزادی جاوید<sup>۲\*</sup>، بهنام بزرگمهر<sup>۳</sup>

- ۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

\*shirzad@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۲

## چکیده

تاکنون مطالعات متعددی روی خواص رئولوژی و زمان گیرش در مخلوط های با پایه سیمانی انجام پذیرفته است، لیکن ارتباط بین این دو مشخصه مهم تاکنون بررسی نشده است. پس هدف از انجام این پژوهش بررسی ارتباط بین خواص رئولوژی و زمان گیرش در مخلوط های بتن خودتراکم است. در این پژوهش شش طرح مخلوط بتن خودتراکم در نظر گرفته شد که در آنها اثر تغییر نسبت آب به سیمان، افزودنی دوده سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی در نظر گرفته شد. در تعیین زمان گیرش از روش مقاومت الکتریکی استفاده شده و همچنین عملکرد این روش در تعیین ویژگی های رئولوژی ارزیابی شده است. از آنجایی که روش مقاومت الکتریکی در تعیین زمان گیرش فاقد استاندارد مدون است، بنابراین به منظور راستی آزمایی نتایج از روش استاندارد مقاومت در برابر نفوذ بر اساس استاندارد ASTM C403 نیز استفاده شده است. در بخش بررسی خواص رئولوژی نیز بررسی ها در دو بخش کارایی و بررسی رئومتریک انجام گرفته است. از نتایج بدست آمده مشخص شد که مخلوط هایی که دارای جریان پذیری بالاتری هستند، زمان گیرش کمتری را ثبت کرده اند. همچنین مشخص شد که مخلوط های بتنی که تنش جاری (استاتیکی و دینامیکی) بالاتری دارند، زمان گیرش کوتاه تری را ثبت نموده اند. بدین ترتیب با روابط بدست آمده ارتباط این دو متغیر مهم (خواص رئولوژی و زمان گیرش) ارزیابی شد.

**واژگان کلیدی:** زمان گیرش، رئولوژی، کارایی، مقاومت الکتریکی

## ۱- مقدمه

می شود، خاتمه دهنده آن است. در همین راستا برخی از پژوهشگران به بررسی ویژگی های رئولوژی مخلوط های بتنی پرداخته اند. رئولوژی علم مطالعه تغییر شکل و جریان مواد است و شناخت خواص رئولوژی بتن خودتراکم در صنعت ساخت اهمیت فراوان دارد زیرا بتن در حالت خمیری

خواص حالت تازه بتن خودتراکم از اهمیت به مراتب بالاتری نسبت به خواص حالت سخت شده برخوردار است. در حالت تازه متغیرهایی مانند کارایی، رئولوژی و ... مطرح می شود و گیرش بتن نیز که از آغاز عملیات اختلاط شروع

ویکات<sup>۷</sup>، مقاومت در برابر نفوذ<sup>۸</sup>، مقاومت الکتریکی<sup>۹</sup> و ... روش هایی هستند که در تعیین زمان گیرش خمیر سیمان، ملات و بتن قابل استفاده اند. بر اساس روش ویکات که یک روش استاندارد است، زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان با میزان عمق نفوذ سوزن دستگاه در آن تعریف می شود که یک ویژگی فیزیکی محسوب می شود. بر اساس این روش زمان گیرش اولیه زمانی است که عمق نفوذ بیشینه ۲۵ میلی متر باشد و گیرش نهایی زمانی است که میزان عمق

نفوذ به صفر برسد تعریف می شود. [8و7]

روش استاندارد دیگری که اصلی ترین روش در تعیین زمان گیرش بتن است روش مقاومت نفوذ است که روشی استاندارد و پرکاربرد بوده و اساس کار آن بر مقاومت ملات جدا شده از بتن در برابر نفوذ نفوذگر استوار است. زمان گیرش اولیه و نهایی، زمانی است که مقاومت در برابر نفوذ به ترتیب به ۳/۵ و ۲۷/۶ مگاپاسکال رسیده باشد. [6]

در اوایل دهه ۳۰ میلادی، تکنیک مقاومت الکتریکی برای تعیین زمان گیرش، در خمیر سیمان معرفی شد [9-11]. مک کارتر<sup>۱۰</sup> و همکارانش [12] نیز تکنیک اندازه گیری مقاومت الکتریکی را برای پایش زمان های گیرش و سخت شدگی بکار گرفتند. توپکو<sup>۱۱</sup> و همکارانش [13] آزمایش سوزن ویکات را برای تعیین زمان های گیرش اولیه و نهایی خمیرهای با و بدون مصالح سیمانی مکمل مثل خاکستر بادی، دوده سیلیس و سرباره انجام دادند. این پژوهش گران از این موضوع خبر دادند که در حالت کلی، زمان گیرش خمیرهای حاوی مصالح سیمانی مکمل نسبت به خمیرهای ساده افزایش پیدا می کند و عنوان کردند که این افزایش بیشتر به دلیل کاهش جزء  $C_3A$  در جزء چسبنده موجود در سیمان است و نقش مهمی در هیدراتاسیون اولیه ایفا می کند است. از سوی دیگر، گرچه زمان گیرش اولیه در خمیرهای حاوی خاکستر بادی و سرباره افزایش ناچیزی داشت، در خمیرهای حاوی دوده سیلیس این افزایش قابل توجه بود. وی<sup>۱۲</sup> و

جاگذاری می شود. کوهلر<sup>۱</sup> [1] در بررسی های خود روی بتن خودتراکم، پارامتر تنش جاری<sup>۲</sup> را به عنوان مهمترین پارامتر رئولوژی قابل اندازه گیری در بتن خودتراکم معرفی کرد و آن را به دو بخش استاتیکی و دینامیکی تقسیم نمود. او تفاوت این دو تنش را این گونه عنوان نمود، تنش جاری استاتیکی، مقدار تنش برشی است که لازم است تا بتن را از حال سکون به حرکت وارد و تنش جاری دینامیکی نیز مقدار تنش برشی لازم برای حفظ جریان است.

راسل<sup>۳</sup> [2] توانست با استفاده از یک مدل خطی با شیب مثبت و صعودی روند افزایش تنش جاری را در مدت یک ساعت بیان نماید. این در حالی است که اسلیمن<sup>۴</sup> [3] در بررسی های خود عنوان کرد که این روند تغییرات صعودی و غیرخطی است. پروت<sup>۵</sup> [4] نیز در بررسی تغییرات تنش جاری تا زمان گیرش عنوان کرد که نتایج بدست آمده حاکی از غیر خطی بودن روند افزایش تنش جاری است و علت این مسئله را تولید محصولات جامد در خمیر سیمان عنوان نمود (که تعبیری از روند گیرش در بتن است).

برخی دیگر از پژوهشگران مطالعات خود را معطوف به بررسی زمان گیرش در مخلوط های بتنی کرده اند و به همین دلیل تعاریف و استانداردهای گوناگونی برای بررسی این متغیر مهم معرفی شده است. زمان گیرش<sup>۶</sup> یکی از مهم ترین شاخص های قابل اندازه گیری در مواد با پایه سیمانی است و شناخت آن می تواند از نظر اقتصادی، زمانی و همچنین ایمنی آثار قابل ملاحظه ای بر پروژه های ساختمانی بگذارد همچنین بیشتر خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم به روند هیدراتاسیون خمیر سیمان مربوط هستند. [5] گیرش اولیه بتن نشان دهنده بیشینه زمانی است که بتن تازه می تواند مخلوط شود و در قالب جای گیرد و متراکم شود و گیرش نهایی بتن نیز نشان دهنده زمانی است که بعد از آن، کسب مقاومت بتن به میزان چشمگیری توسعه می یابد. [6] روش های سوزن

7 Vicat

8 Penetration Resistance

9 Electrical Resistance (E.R.)

10 McCarter

11 Topcu

12 Wei

1 Koehler

2 Yield stress

3 Roussel

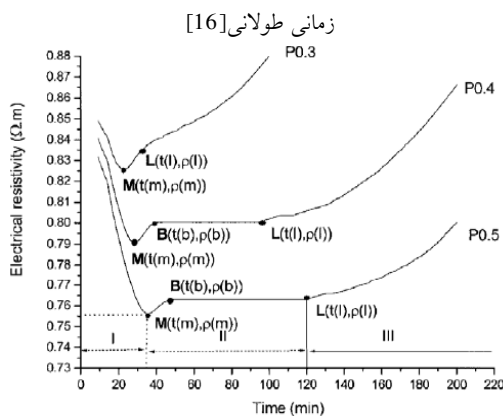
4 Sleiman

5 Perrot

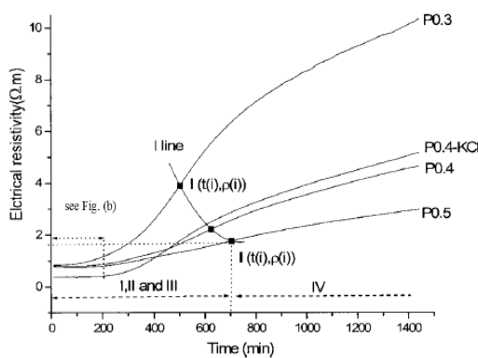
6 Setting time

با توجه به مطالب عنوان شده ملاحظه می‌شود که اکثر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه گیرش بتن، روی بتن معمولی انجام گرفته است و به نظر می‌رسد مطالعه این متغیر در بتن خودتراکم موضوع با اهمیتی محسوب شود. همچنین بررسی‌های انجام گرفته روی خواص رئولوژی نیز بیشتر در خصوص افزودنی و اثر مواد مختلف روی آن انجام شده است. پس یک حلقه گم شده در این پژوهش‌ها کاملاً خودنمایی می‌کند و آن نیز بررسی ارتباط بین این دو متغیر است، یعنی ارتباط زمان گیرش با خواص رئولوژی که بررسی آن می‌تواند بسیار با اهمیت باشد. در این پژوهش سعی می‌شود وجود یا عدم وجود ارتباطات از نظر رفتاری و عددی مورد بررسی قرار گیرد.

شکل ۱. تغییرات مقاومت الکتریکی در زمان برای مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ (الف) در بازه زمانی کوتاه، (ب) در بازه



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 1. Electrical resistivity changes in time for mixtures with w/c of 0.3, 0.4 and 0.5 (a) in short period of time, (b) in long period of time [16]

همکارانش [14] از این موضوع خبر دادند که نسبت افزایش نسبت w/c می‌تواند مدت گیرش را طولانی کرده و زمان گیرش را به تأخیر بیاندازد. ویتینگتون<sup>۱۳</sup> و همکارانش [15] نیز گزارشی دادند حاکی از آن که افزایش میزان آب در بتن و خمیر سیمان منجر به کاهش مقاومت الکتریکی و متعاقباً مقاومت بتن می‌شود. لی و همکارانش [16] نتیجه گرفتند که میزان مقاومت الکتریکی خمیرها به نسبت w/c وابسته است و خمیرهایی که نسبت پائین‌تری دارند همواره نسبت به نقطه نظیرشان با نسبت بالاتر، مقاومت بیشتری دارند. این نتیجه‌گیری در هر سنی در فرآیند هیدراسیون قابل قبول است (در شکل ۱ نتایج این پژوهشگران آمده است). در سال ۲۰۰۷، پژوهشگران شاهد بودند که افزایش نسبت w/c سبب افزایش هر دو زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط‌های بتنی می‌شود [17 و 18].

توپکو و همکارانش [13] دریافتند که برای مخلوط‌های خمیر سیمان از جمله خمیر بدون مصالح سیمانی مکمل و خمیرهای حاوی مصالح سیمانی مکمل مثل خاکستر بادی، فوم سیلیکا و سرباره، فزونی یافتن نسبت آب به جزء چسبنده رسانایی الکتریکی را می‌افزاید (مقاومت الکتریکی را می‌کاهد). همچنین، نرخ تغییرات رسانایی الکتریکی برای نسبت‌های کمتر آب به جزء چسبنده در قیاس با نسبت‌های بالاتر بیشتر است. مانسیو<sup>۱۴</sup> و همکارانش [19] آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی روی نمونه‌های بتنی با نسبت‌های w/c مختلف ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ و حاوی صفر و ۲۵ درصد خاکستر بادی انجام دادند. آنها مقاومت الکتریکی بتن تازه را با بهره‌گیری از روش ۴ الکترودی اندازه‌گیری کردند. براساس نتایج آزمایش‌های آنها، مقاومت الکتریکی بتن تازه با بیشتر شدن نسبت w/c افزایش یافت. آنها اظهار داشتند که در نسبت‌های کمتر، غلظت یون‌ها در محلول حفره بیشتر بوده و در نتیجه رسانایی نیز بیشتر شده است که همبسته با مقاومت الکتریکی کمتر است. هرچند، این نتیجه‌گیری با داده‌هایی که در منابع علمی گزارش شده‌اند کاملاً متناقض است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۱-۲- مواد و مصالح مصرفی

سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل شن، ماسه درشت و ماسه ریز است که به ترتیب دارای بیشینه اندازه ۱۲/۵، ۸ و ۳ میلی‌متر هستند. برای ساخت تمامی مخلوط‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب می‌استفاده شده است. افزودنی‌های معدنی استفاده شده، دوده سیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی هستند که به ترتیب دارای وزن مخصوص ۲/۱۷ و ۲/۹۰ گرم بر سانتی متر مکعب است. افزودنی‌های شیمیایی نیز شامل فوق روان‌کننده و ماده اصلاح کننده روان‌گروی هستند. فوق روان‌کننده مصرفی بر پایه پلی کربوکسیلات بوده و به گونه‌ای است که سبب تاخیر در روند گیرش نمی‌شود، وزن مخصوص این ماده برابر با ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. همچنین در ساخت تمام مخلوط‌ها از ماده اصلاح کننده روان‌گروی با وزن مخصوص ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بهره برده شده است.

جدول ۱. مشخصات مخلوط‌ها

شماره	Mixture	Total Powder Kg/m <sup>3</sup>	W/P	VMA/P (%)	Cement substitute materials (%)		Percentage of gravel to the total aggregates
					Slag	Silica Fume	
1	SCC42-0	420	0.42	0.5	-	-	40
2	SCC42-SF10	420	0.42	0.5	-	10	40
3	SCC42-SL50	420	0.42	0.5	50	-	40
4	SCC44-0	420	0.44	0.5	-	-	40
5	SCC44-SF10	420	0.44	0.5	-	10	40
6	SCC44-SL50	420	0.44	0.5	50	-	40

Table 1. Mixture proportions

## ۲-۲- نسبت‌های مخلوط

به منظور بررسی ارتباط بین خواص رئولوژی و زمان گیرش، ۶ نسبت مخلوط بتن خودتراکم به گونه‌ای در نظر گرفته و ساخته شد که اثر تغییر نسبت آب به پودر، افزودنی دوده

سیلیس و افزودنی سرباره لحاظ شود. مشخصات این مخلوط‌ها در جدول (۱) درج شده است.

## ۲-۳- آزمایش‌ها

## ۱-۳-۲- کارایی

در این بخش آزمایش‌های جریان اسلامپ و T<sub>50</sub> به منظور بررسی قابلیت جریان و پرکنندگی بتن در نظر گرفته شده است که بر اساس استاندارد ASTM C1611 [20] انجام شده است. آزمایش حلقه جی نیز برای بررسی قابلیت عبور مخلوط‌ها طبق استاندارد ASTM C1621 [21] انجام پذیرفته است. همچنین بررسی شاخص پایداری بصری (vsi) نیز به منظور کنترل ظاهری صورت گرفته است.

## ۲-۳-۲- آزمایش رئولوژی

در این بخش نیز از دستگاه رئومتر موجود در دانشگاه علم و صنعت برای تعیین خواص رئولوژی استفاده شده است. این رئومتر از نوع رئومترهای هم محور است و با استفاده از این دستگاه می‌توان با توجه به روابط ارائه شده در استاندارد ICAR [22] پارامترهای مهم رئولوژی (تنش‌های جاری) را تعیین نمود.

## ۲-۳-۳- زمان گیرش

به منظور تعیین زمان گیرش بتن از استاندارد ASTM C403 استفاده شده است. همچنین از آزمایش مقاومت الکتریکی در تعیین زمان گیرش بتن و ملات بهره برده شده است. روشی که در تعیین مقاومت الکتریکی از آن استفاده شده است، روش دو الکترودی بوده و به علت آنکه روش استاندارد مقاومت در برابر نفوذ تنها بر روی ملات قابل استفاده است، سنجش مقاومت الکتریکی علاوه بر مخلوط بتن خودتراکم بر روی ملات جدا شده از آن (توسط الک شماره ۴) نیز انجام گرفته است. این کار سبب می‌شود دقت اندازه‌گیری‌ها بیشتر باشد. روش دو الکترودی در حالت عادی دارای معایبی نظیر پلاریزاسیون و ... است پس در این پژوهش با اعمال تغییراتی سعی شد تا معایب موجود به حداقل برسد. در این آزمایش

الکترودی بودن روش به حداقل رسید. برقراری ارتباط جریان و نمونه از طریق الکترودهای فلزی به صورت صفحات از جنس برنج که دارای حداکثر رسانایی است و بهترین برقرار کننده جریان الکتریکی محسوب می‌شود، انجام پذیرفت و ضخامت صفحات برنجی ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بتن تازه بلافاصله بعد عملیات ساخت درون ظرف‌هایی از جنس پلکسی گلاس ریخته شد که ابعاد ظرف ۱۰۰\*۱۰۰\*۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل (۲) آزمایش‌های انجام گرفته نمایش داده شده است.

### ۳- نتیجه و تفسیر

#### ۳-۱- نتایج کارایی

زمانی که در بتن گیرش اولیه رخ می‌دهد، کارایی مخلوط به پایان می‌رسد پس به نظر می‌رسد ارتباطاتی میان این دو ویژگی وجود دارد. نتایج آزمایش‌های کارایی در جدول (۲) ارائه شده است و نشان می‌دهد که افزایش نسبت آب به سیمان، در صورتی که موجب جدا شدگی نشود، سبب بهبود کارایی می‌شود. این امر در افزایش جریان اسلامپ، کاهش زمان  $T_{50}$  و کاهش نتایج آزمایش حلقه جی نمود کرده است. استفاده از افزودنی‌های دوده سیلیس و سرباره سبب کاهش مطلوبیت کارایی شده است. این اثر گذاری در کاهش جریان اسلامپ، افزایش زمان  $T_{50}$  و همچنین افزایش نتایج آزمایش حلقه جی به خوبی مشهود است. البته این نکته شایان ذکر است که این افزودنی‌ها سبب کاهش جدا شدگی شده‌اند که اثری مثبت تلقی می‌شود. باید اشاره کرد همانگونه که ملاحظه می‌شود، نتایج بدست آمده تحت تاثیر متغیرها، با نشریه‌های EFNARC [23] و ACI-238 [24] هماهنگی دارد.

#### ۳-۲- نتایج رئولوژی

##### ۳-۲-۱- تنش جاری استاتیکی

تنش جاری استاتیکی یکی از مهم‌ترین پارامترهای قابل اندازه‌گیری در بتن خود تراکم است. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد نشان می‌دهد که بتن برای حرکت کردن از حال

برای جریان الکتریکی از جریان متناوب (AC) به جای جریان مستقیم (DC) استفاده شده است.

شکل ۲. آزمایش‌های رئولوژی و گیرش، الف) دستگاه رئومتر،

ب) گیرش بتن بر اساس استاندارد ASTM C403

، پ) آزمایش مقاومت الکتریکی



(الف) (a)



(ب) (b)



(پ) (c)

**Fig. 2.** Setting time and rheology experiments, (a)The rheometer device, (b)Setting time device according to ASTM C403, (c)Electrical resistance meter device

همچنین برقراری جریان نیز به صورت غیر مداوم اعمال شده است به عبارت دیگر جریان تنها در لحظه مورد نظر در سنجش مقاومت الکتریکی برقرار شده است و در بقیه زمان جریان الکتریکی به بتن متصل نبوده است. همچنین جهت جریان نیز به صورت دوگانه یکی از چپ به راست و دیگری از راست به چپ (دو جریان خلاف جهت با اختلاف ۵ ثانیه) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب خطاهای ناشی از دو

شکل ۳. تغییرات تنش استاتیکی در ۴۰ دقیقه، الف) نسبت آب به پودر ۰/۴۲ (ب) نسبت آب به پودر ۰/۴۴

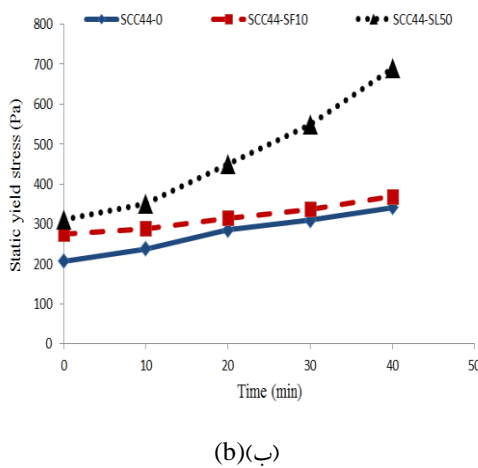
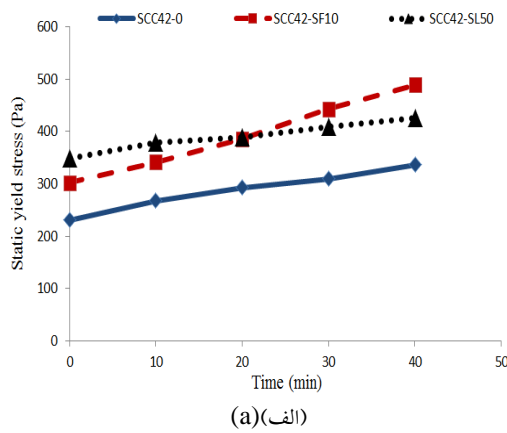


Fig. 3. Static yield stress changes for mixtures in 40 minutes with, (a) w/p of 0.42, (b) w/p of 0.44

سکون، نیاز به نیروی بیشتری دارد. اندازه گیری تنش استاتیکی در مدت زمان ۴۰ دقیقه که بازه تغلیظ پذیری است و در بازه های ۱۰ دقیقه ای انجام گرفته است. در شکل (۳) نتایج تغییرات تنش جاری استاتیکی مخلوط با گذشت زمان ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، تمام نمونه های دسته اول با نسبت آب به پودر ۰/۴۲ تنش استاتیکی بزرگتری را نسبت به مخلوط های مشابه در دسته دوم (نسبت آب به پودر ۰/۴۴) ثبت نموده اند. این بدان معناست که افزوده شدن بر مقدار آب سبب کاهش تنش استاتیکی می شود. این اتفاق تنها در لحظه صفر حادث نشده است بلکه در تمام طول زمان انجام آزمایش نیز رخ داده است. افزوده شدن افزودنی های سرباره و دوده سیلیس سبب افزایش تنش استاتیکی شده است. به عبارت دیگر از روانی بتن کاسته شده است و بتن برای جریان یافتن نیاز به نیروی بیشتری دارد و این مسئله نیز در هر دو دسته تکرار شده است.

۳-۲-۲- تنش جاری دینامیکی

نتایج تنش جاری دینامیکی بدست آمده از دستگاه رئومتر در جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، اتفاقات مشابه با نتایج تنش جاری استاتیکی در خصوص تنش جاری دینامیکی نیز رخ داده است.

جدول ۳. نتایج تنش جاری دینامیکی و استاتیکی در آغاز آزمایش

No.	Mixtures	Dynamic yield stress (Pa)	Static yield stress (Pa)
1	SCC42-0	38.5	231.2
2	SCC42-SF10	58.5	302.4
3	SCC42-SL50	68.2	349.5
4	SCC44-0	37.9	207.0
5	SCC44-SF10	54.0	274.7
6	SCC44-SL50	64.0	310.2
Effect of variables	Water content increase	- 5.00 %	-10.27 %
	Silica fume	+ 31.90 %	+ 24.00 %
	Slag	+ 42.18 %	+ 33.50 %

Table 3. Static and dynamic yield stress results in initiate of the experiment

جدول ۲. نتایج آزمایش های کارایی

No.	Mixtures	Slump Flow (mm)	T <sub>50</sub> (sec)	J-Ring (mm)	VSI
1	SCC42-0	710	2.80	7.00	1
2	SCC42-SF10	660	3.26	8.00	0
3	SCC42-SL50	630	4.00	10.00	0
4	SCC44-0	730	2.63	6.00	1
5	SCC44-SF10	680	3.15	8.50	1
6	SCC44-SL50	650	3.80	9.00	0
Effect of variables	Water content increase	+2.87%	-4.80%	-9.97%	No changes
	Silica fume	-6.90%	+15.30%	+21/30%	improve
	Slag	-11.00%	+30.00%	+30.00%	improve

Table 2. Workability results



## ۳-۳- تعیین زمان گیرش

نتایج زمان گیرش بتن بر اساس استاندارد ASTM C403 در جدول ۴ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج ملاحظه شد که زمان های گیرش اولیه و نهایی ملات الک شده از بتن مخلوط های ساده و دارای دوده سیلیس دسته اول (۰/۴۲) نسبت به مخلوط های مشابه در دسته دوم (۰/۴۴)، کوتاه تر است. با توجه به اینکه در نمونه های مشابه تنها میزان آب متغیر است، این مسئله تایید می گردد که حضور آب بیشتر سبب بروز تاخیر در زمان گیرش بتن می گردد این نتیجه با پژوهش های [14، 17 و 18] تطابق دارد. اما در خصوص نمونه حاوی سرباره ۵۰ درصد نتیجه کمی متفاوت است به طوری که حضور آب بیشتر سبب کاهش اندک زمان گیرش در این مخلوط گردیده است، هر چند این تفاوت بسیار کم است و تقریباً زمان گیرش دو مخلوط با هم برابر است. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده دیده شد که افزودن افزودنی های دوده سیلیس و سرباره سبب کاهش زمان گیرش نسبت به حالت ساده گردیده اند. این مسئله در هر دو دسته و در هر دو زمان گیرش اولیه و گیرش نهایی نمود کرده است.

جدول ۴. تعیین زمان گیرش بر اساس استاندارد ASTM C403

No.	Mixtures	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)
1	SCC42-0	177	264
2	SCC42-SF10	168	244
3	SCC42-SL50	159	250
4	SCC44-0	194	296
5	SCC44-SF10	181	278
6	SCC44-SL50	151	239
Effect of variables	Water content increase	+7.9%	+11.5%
	Silica Fume	-5.8%	-6.7%
	Slag	-16.0%	-12.2%

Table 4. Setting time determination according to ASTM C403

## ۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

در این آزمایش، روند تغییرات مقاومت الکتریکی در تمام نمونه ها از یک الگوی رفتاری مشابه و جالب توجه پیروی کرد. این الگوی رفتاری هم در بتن و هم در ملات به

روشنی قابل مشاهده بود. در شکل (۴) این الگوی رفتاری به صورت شماتیک نشان داده شده است و نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی ملات و بتن به ترتیب در جدول های (۵ و ۶) ارائه شده است.

اولین نکته ای که از نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی به خوبی مشاهده می شود، این است که مقدار مقاومت الکتریکی بتن از ملات بالاتر است و این مسئله نیز تنها به خاطر حضور سنگدانه ها در بتن است. سنگدانه ها به عنوان عایق عمل کرده و سبب بالاتر رفتن مقدار مقاومت الکتریکی شده اند. مورد دیگری که از نتایج بررسی مقاومت الکتریکی مشهود است، این است که افزایش مقدار آب در مخلوط بتن سبب طولانی تر شدن زمان رسیدن به  $S_1$  و  $S_2$  در نمونه های ساده و حاوی دوده سیلیس شده است. به عبارت دیگر مقدار آب بیشتر در نمونه ها سبب شده است که زمان رسیدن به نقطه  $S_1$  و  $S_2$  در این مخلوط ها طولانی تر شود. این مسئله در آزمایش مقاومت در برابر نفوذ سبب تاخیر در رسیدن به گیرش اولیه و نهایی شده بود. اما در مورد مخلوط حاوی ۵۰ درصد سرباره افزایش مقدار آب سبب کاهش زمان گیرش شده است، این مورد نیز در آزمایش استاندارد مقاومت نفوذ اتفاق افتاده بود.

موردی دیگری که از نتایج مقاومت الکتریکی قابل مشاهده است، اثر افزودنی بر رفتار و ویژگی های مخلوط است. افزودن دوده سیلیس و سرباره سبب کاهش زمان گیرش در آزمایش مقاومت نفوذ شده بود. این مسئله در اینجا نیز با کاهش زمان رخ دادن نقاط  $S_1$  و  $S_2$  جلوه نموده است. پس بین زمان گیرش اولیه و نهایی از آزمایش مقاومت نفوذ و زمان رخ دادن نقاط  $S_1$  و  $S_2$  می تواند ارتباط محکمی برقرار باشد.

افزایش مقدار آب در نمونه های خمیر سیمان افزودنی دار بر اساس نتایج بدست آمده از پژوهش توپکو و همکاران [13] سبب کاهش مقاومت الکتریکی در نمونه ها می شود. همچنین ویتینگتون و همکاران [15] در گزارشی، افزایش نسبت آب به سیمان را سبب کاهش مقاومت الکتریکی بتن دانسته بودند. از طرفی اما مانسیو و همکاران [19] افزایش مقدار آب را سبب افزایش مقاومت الکتریکی دانسته اند و علت آن را

گیرش اولیه و زمان نقطه  $S_2$ ، زمان گیرش نهایی برای مخلوط های بتن خودتراکم در نظر گرفته می شود و در ادامه مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجایی که روش مقاومت نفوذ (ASTM C403) برای تعیین زمان گیرش بتن به کار می رود مقایسه ای عددی بین نتایج این آزمایش و مقاومت الکتریکی بتن برای تعیین خطای آزمایش انجام گرفته است که در جدول (۷) نمایش داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، میزان خطاهای موجود بین زمان گیرش بدست آمده از روش C403 و مقاومت الکتریکی بسیار کم است. بنابراین می توان با اعمال درصدهای خطای بدست آمده از جدول (۷) یعنی ۵/۳۰ درصد برای گیرش اولیه و ۳/۵۹ درصد برای گیرش نهایی زمان گیرش بدست آمده از روش مقاومت الکتریکی را اصلاح کرد. اما با توجه به میزان بسیار کم خطا می توان از اعمال آن نیز صرف نظر نمود و زمان نقطه  $S_1$  را زمان گیرش اولیه و زمان نقطه  $S_2$  را زمان گیرش نهایی در نظر گرفت.

شکل ۴. تصویر شماتیک از روند تغییرات مقاومت الکتریکی ملات و

بتن در طول زمان

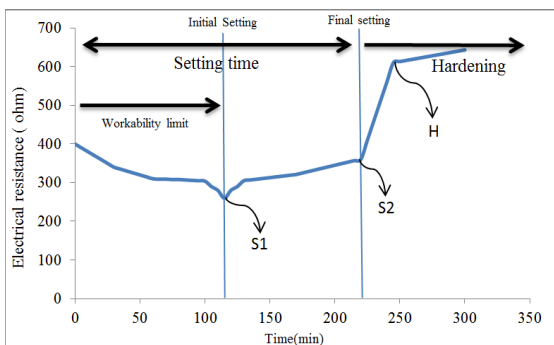


Fig. 4. Schematic behavior of concrete and mortar during time in E.R. test

نیز کاهش غلظت یون ها در آب درون حفره های بتن اعلام کردند. نتایج بدست آمده از این پژوهش اما با نتایج حاصل از پژوهش های [13, 15] هماهنگی دارد، و مشاهده شد که افزایش مقدار آب در مخلوط های بتن خودتراکم سبب کاهش مقدار مقاومت الکتریکی شده است. علت این پدیده نیز این است که آب خود ماده ای رسانا است و مقدار بیشتر آن در نمونه جریان و حرکت یون ها را در ریز ساختار بتن تسهیل می کند، پس یون ها با سرعت بالاتر و آسان تر جابه جا می گردند و این امر سبب کاهش مقدار مقاومت الکتریکی شده است. مورد دیگری که از نتایج ارائه شده در جدول های (۵ و ۶) برداشت می شود اثر افزودنی ها بر مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط ها است. بر اساس پژوهش سالم و همکاران [25]، افزودن دوده سیلیس سبب افزایش مقاومت الکتریکی می شود، نتایج پژوهش حاضر نیز این ادعا را تایید می کند و با آن هماهنگی دارد. در پژوهش [13] نیز اعلام شد که با یک نسبت آب به سیمان ثابت، به طور کلی وجود هر گونه افزودنی سبب افزایش مقاومت الکتریکی خمیر سیمان می شود، این مسئله نیز در نتایج ملات پژوهش حاضر دیده می شود. از نتایج بدست آمده مشخص می شود که زمان رخ دادن نقطه  $S_1$  به زمان گیرش اولیه بدست آمده از روش های استاندارد بسیار نزدیک است به طوری که در خصوص بتن پیشینه این اختلاف ۱۷ دقیقه است که معادل ۱۱ درصد اختلاف است. همچنین زمان رخ دادن نقطه  $S_2$  نیز به زمان گیرش نهایی بسیار نزدیک است به طوری که اختلاف بین آنها حداکثر ۱۷ دقیقه معادل ۶/۶ درصد خطا است. با توجه به این که اختلاف بین زمان ها بسیار کم است ( این اختلاف به علت دقت بالاتر روش مقاومت الکتریکی ناشی از رسد مداوم مخلوط از لحاظ شیمیایی است)، زمان نقطه  $S_1$ ، زمان

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی ملات الک شده از مخلوط های بتن خودتراکم

No.	Mixtures	$S_1$ Time (min)	$S_2$ Time (min)	E.R at T=0	Minimum E.R.	E.R. at $S_2$
1	SCC42-0	170	258	233	184	227
2	SCC42-SF10	162	258	279	215	252
3	SCC42-SL50	162	252	432	341	402
4	SCC44-0	180	285	184	138	149
5	SCC44-SF10	175	270	240	154	190
6	SCC44-SL50	140	236	334	225	282

Table .5. Electrical Resistance results for Mortar sieved from Self-Consolidating concrete mixtures



جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی روی مخلوط‌های بتن خودتراکم

No.	Mixtures	S <sub>1</sub> Time (min)	S <sub>2</sub> Time (min)	E.R at T=0	Minimum E.R.	E.R. at S <sub>2</sub>
1	SCC42-0	186	268	323	271	316
2	SCC42-SF10	174	240	492	349	553
3	SCC42-SL50	171	264	530	466	505
4	SCC44-0	200	285	280	232	280
5	SCC44-SF10	185	285	460	371	439
6	SCC44-SL50	168	256	484	357	393

Table 6. Electrical Resistance results for Self-Consolidating concrete mixtures

جدول ۷. مقایسه روش مقاومت الکتریکی و روش استاندارد ASTM C403 در تعیین زمان گیرش مخلوط‌های بتن خودتراکم

No.	Mixtures	Initial Setting Time				Final Setting Time			
		C403 (min)	E.R (min)	Difference (min)	Difference (%)	C403 (min)	E.R. (min)	Difference (min)	Difference (%)
1	SCC42-0	177	186	9	4.8	264	268	4	1.5
2	SCC42-SF10	168	174	6	3.4	244	240	4	1.7
3	SCC42-SL50	159	171	12	7.5	250	264	14	5.3
4	SCC44-0	194	200	6	3.0	296	285	11	4.0
5	SCC44-SF10	181	185	4	2.2	278	285	7	2.4
6	SCC44-SL50	151	168	17	11.0	239	256	17	6.6

Average Error = 5.30%

Average Error = 3.59%

Table 7. Comparison between the ASTM C403 and E.R. test in determining the setting time of SCC mixtures

آزمایش نهاده است، به عنوان نمونه دوده سیلیس به علت ماهیت فیزیکی بسیار ریز سبب جذب بیشتر آب بتن می‌شود و از جریان پذیری آن می‌کاهد و از طرف دیگر ماهیت شیمیایی فعال این افزودنی سبب تسریع فرایند هیدراتاسیون می‌شود و این امر سبب بروز گیرش کوتاه‌تر می‌شود. پس در نتایج فوق دیده می‌شود که با ثابت ماندن نسبت آب به سیمان، کاهش جریان اسلامپ بتن با کاهش زمان گیرش همراه بوده است.

با مقایسه عددی نتایج مربوط به آزمایش حلقه جی با زمان گیرش یک ارتباط منطقی و قابل توضیح دیده نمی‌شود. پس می‌توان گفت که بین این دو آزمایش ارتباطی وجود ندارد و نمی‌شود از نتایج یکی در مورد نتایج دیگری اظهار نظر نمود. در مورد مقایسه نتایج آزمایش T<sub>50</sub> با نتایج مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود که در این جا نیز یک ارتباط پیچیده ولی قابل فهم برقرار است. بر خلاف نتایج جریان اسلامپ و مقاومت الکتریکی که با هم ارتباطی هم سو داشتند، در اینجا با یک ارتباط بر عکس روبرو هستیم. اگر به نتایج نمونه‌ها

با توجه به نتایج فوق به دو رابطه ی عددی (۱) و (۲) میرسیم که با استفاده از آنها و با دانستن زمان رخ دادن نقاط S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> زمان دقیق تر گیرش اولیه (T<sub>int</sub>) و زمان گیرش نهایی (T<sub>fin</sub>) را تخمین زد.

$$S_1 = 0.75T_{int} + 52.2 \quad \text{رابطه ۱.}$$

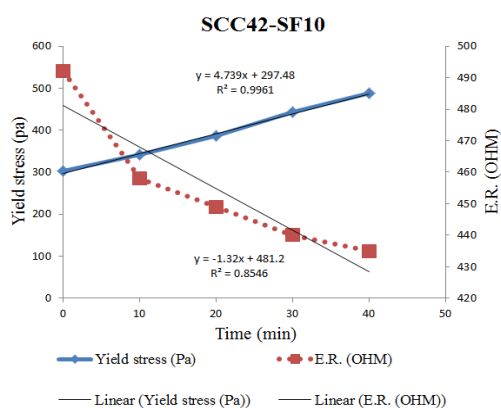
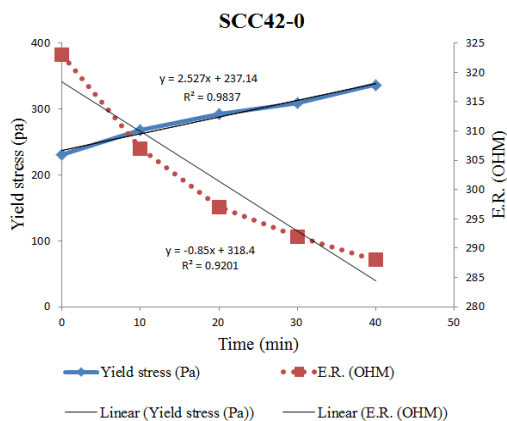
$$S_2 = 0.7T_{fin} + 84.4 \quad \text{رابطه ۲.}$$

### ۳-۴- ارتباط بین زمان گیرش با کارایی

نتایج آزمایش‌های کارایی و زمان گیرش مخلوط‌های بتن خودتراکم به روش مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که با ثابت بودن نسبت آب به سیمان، کاهش جریان اسلامپ با کاهش زمان‌های گیرش اولیه و نهایی همراه شده است. ارتباط بین این دو پارامتر بسیار پیچیده است و برقراری ارتباط عددی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد چرا که دو پارامتر هم جنس نیستند. همچنین ماهیت افزودنی‌های استفاده شده نیز اثری منطقی و قابل فهم بر نتایج هر دو

در طول زمان با روند تغییرات مقاومت الکتریکی متفاوت است و با گذشت زمان این تنش‌ها در تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد در حالی که مقاومت الکتریکی در طول زمان یک روند نزولی دارد. هر دو پدیده منطقی و تایید کننده یکدیگر هستند. به عنوان نمونه گذشت زمان در خصوص تنش استاتیکی که یک خصوصیت فیزیکی محسوب می‌شود، سبب می‌شود که بتن از حالت سیال روان به سیال سفت‌تر تبدیل شود. این مسئله سبب افزایش مقاومت در برابر حرکت و افزایش تنش استاتیکی می‌شود. در حالی که در خصوص مقاومت الکتریکی گذشت زمان در بازه تغلیظ پذیری شدت گرفتن فرایند هیدراتاسیون می‌شود و سبب می‌شود مقاومت الکتریکی نمونه کاهش یابد. شیب تغییرات دو مولفه اندازه‌گیری شده در برخی نمونه‌ها به هم نزدیک است اما در برخی نیز اختلاف زیادی مشاهده می‌شود (شکل ۶).

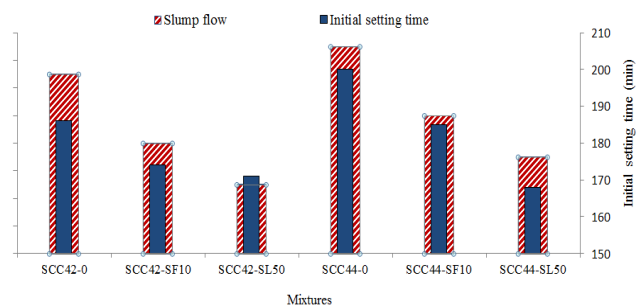
شکل ۶. مقایسه روند تغییرات مقاومت الکتریکی و تغییرات تنش جاری استاتیکی مخلوط‌ها در زمان ۴۰ دقیقه



بررسی ارتباط بین خواص رئولوژی مخلوط‌های بتن خودتراکم ...

توجه شود متوجه می‌شویم که با ثابت بودن نسبت آب به سیمان افزایش زمان ثبت شده در آزمایش T<sub>50</sub> با کاهش زمان گیرش اولیه همراه بوده است. این ارتباط پیچیده نیز بر اصل ریز ساختاری مذکور در بند اول استوار است. بنابراین ارتباطی که بین نتایج این دو آزمایش مشاهده می‌شود نیز منطقی است. به این ترتیب که افزایش زمان T<sub>50</sub> با کاهش زمان گیرش اولیه همراه بوده است. در شکل (۵) این ارتباط رفتاری ملاحظه می‌شود.

شکل ۵. (الف) ارتباط رفتاری جریان اسلامپ و زمان گیرش اولیه در مخلوط‌ها، (ب) ارتباط رفتاری جریان اسلامپ و T<sub>50</sub> با زمان گیرش اولیه



(الف) (ب)



(ب) (ب)

Fig. 5. (a) The relationship between slump flow and initial setting time, (b) The behavioral relationship between slump flow, T<sub>50</sub> and initial setting time

۳-۵- ارتباط بین زمان گیرش از روش مقاومت الکتریکی با

رئولوژی

با بررسی مقدار مقاومت الکتریکی و تنش جاری (استاتیکی و دینامیکی) در زمان‌های اندازه‌گیری شده و در مخلوط‌های متفاوت این مسئله ملاحظه می‌شود که مقدار مقاومت الکتریکی با مقدار تنش جاری رابطه مستقیم دارد. به این معنی که هر چه مقدار تنش جاری بالاتر باشد، مقدار مقاومت الکتریکی نمونه نیز بالاتر است. اما روند تغییرات تنش جاری

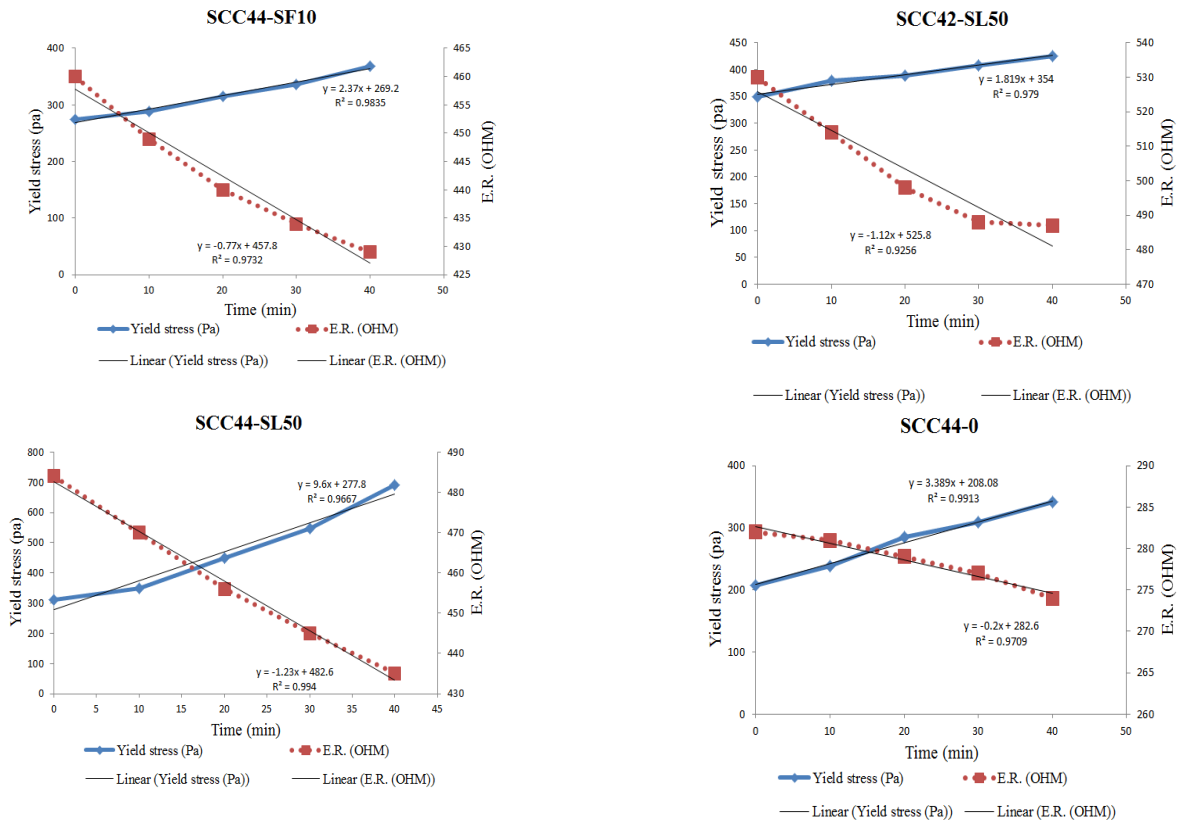


Fig .6. Comparison between Electrical Resistivity changes and Yield stress changes in 40 minutes

جدول ۸. مقایسه تنش جاری استاتیکی و زمان گیرش

No.	Mixtures	Average Yield stress in 40 minutes (pa)	Yield stress at T= 0 (pa)	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)
1	SCC42-0	287.68	231.20	186	268
2	SCC42-SF10	392.26	302.40	174	240
3	SCC42-SL50	390.38	349.50	171	264
4	SCC44-0	275.86	207.00	200	285
5	SCC44-SF10	316.60	274.70	185	285
6	SCC44-SL50	469.80	310.20	168	256

Table .8. The comparison between Yield stress and the Setting Time

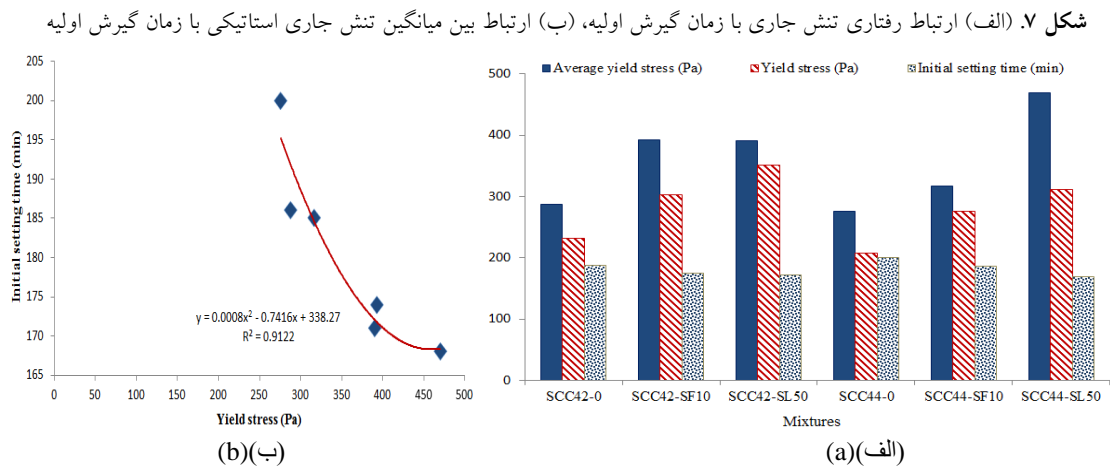


Fig .7. (a) Behavioral relationship between yield stress and initial setting time, (b) Relationship between average yield stress and initial setting time

• نتایج حاصل از بررسی تنش جاری و زمان گیرش مخلوط بتن خودتراکم به روش مقاومت الکتریکی نشان داد که افزایش مقدار تنش جاری با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط همراه بود. در خصوص تنش جاری استاتیکی (همچون تنش جاری دینامیکی) در بازه ۴۰ دقیقه و هر ۱۰ دقیقه یکبار اندازه گیری شد و سپس بین نتایج بدست آمده میانگین گرفته شد. این کار سبب شد دید بهتری نسبت به تنش جاری استاتیکی نمونه در بازه زمانی تغلیظ پذیری آن بدست آید. بررسی نتایج مخلوطها نشان داد که هر چه میانگین تنش استاتیکی مخلوط در بازه زمانی تغلیظ پذیری بیشتر باشد، زمان گیرش اولیه کوتاه تر است. پس افزایش تنش استاتیکی با کاهش زمان گیرش همراه است. در خصوص تنش جاری دینامیکی نیز اتفاقات مشابهی با تنش جاری استاتیکی رخ داده است و افزایش این تنش و افزایش نرخ رشد آن با کاهش زمان گیرش اولیه همراه بوده است.

## References

## مراجع

- 1- Koehler. E.P, Fowler D.W, (2007) ICAR Project 108: Aggregates in Self-Consolidating Concrete.
- 2- Nguyen, T.L.H., Roussel, N., Coussot, P. (2006). "Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogenous yield stress fluid," *Cement and Concrete Research*, 36,1789-1796.
- 3- Sleiman H, Perrot A, Amziane S (2010) A new look at the measurement of cementitious paste setting by Vicat test. *Cem Concr Res* 40:681-686.
- 4- Perrot A, Pierre A, Picandet V, Guevel Y, (2015) "Cellulose ethers and cement paste permeability" *Cement and Concrete Research Volume 72*, Pages 117-127.
- 5- Hamed Layssi, Pouria Ghods, Aali R. Alizadeh, and Mustafa Salehi . (2015) "Electrical Resistivity of Concrete Concepts, applications, and measurement techniques". Article in *Concrete International* .
- 6- ASTM, "Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance, in C". (2008), American Society of Testing and Materials ,ASTM C403.
- 7- Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle ,(2008) ASTM Designation: C191.

از جدول ۸ ملاحظه می شود که میانگین مقدار تنش استاتیکی در نمونه ها در بازه زمانی ۴۰ دقیقه (بازه تغلیظ پذیری) با زمان گیرش نمونه ارتباط دارد. هرچه بر مقدار میانگین تنش استاتیکی افزوده شده است، زمان گیرش اولیه کوتاه تر شده است. به عنوان مثال مشاهده می شود که افزایش نسبت آب به سیمان در نمونه ها سبب افزایش زمان گیرش اولیه و همچنین کاهش تنش استاتیکی میانگین شده است. این تغییرات در نمونه های حاوی افزودنی نیز به وضوح دیده می شود. پس افزایش تنش استاتیکی میانگین در بازه تغلیظ پذیری سبب کاهش زمان گیرش اولیه شده است در شکل (۷ الف) نیز این مسئله قابل مشاهده است. این مسئله در خصوص زمان گیرش نهایی نیز صادق است اما در زمان گیرش اولیه ملموس تر است. در شکل (۷ ب) رابطه بدست آمده بین این دو مولفه ارائه شده است.

## نتیجه گیری

• روش مقاومت الکتریکی روشی دقیق و کارآمد در تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط های بتن خودتراکم است. مشخص شد، زمانی که در آن مقاومت الکتریکی به حداقل خود می رسد (نقطه  $S_1$ )، با حدود خطای ۵/۳ درصد، زمان گیرش اولیه است و زمانی که روند تغییرات مقاومت الکتریکی رو به رشد جهشی می نهد (نقطه  $S_2$ )، با حدود خطای ۳/۵۹ درصد زمان گیرش نهایی مخلوط بتن خودتراکم است. از آنجایی که میزان خطا بسیار ناچیز است می توان از اعمال درصد خطا چشم پوشی کرده و نقاط  $S_1$  و  $S_2$  را به ترتیب زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط های بتن خودتراکم با شرایط ساخت مشابه این پژوهش در نظر گرفت.

• با توجه به هدف این پژوهش بررسی ارتباط نتایج کارایی مخلوط های بتن خودتراکم با زمان گیرش در آنها مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که هر چه جریان اسلامپ نمونه ها بیشتر و زمان  $T_{50}$  کوتاه تر باشد، زمان گیرش اولیه نیز طولانی تر خواهد بود همچنین بین نتایج حاصل از حلقه جی و زمان گیرش نیز ارتباطی دیده نشد.

- 17- Xiao, L.-z., Z.-j. Li, and X.-s. Wei, (2007) "Selection of superplasticizer in concrete mix design by measuring the early electrical resistivities of pastes." *Cement and Concrete Composites*,. 29(5): p. 350-356.
- 18- Li, Z., L. Xiao, and X. Wei, (2007) "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement". *Journal of materials in civil engineering*, 19(5): p. 423-427.
- 19- Mancio, M., et al.(2010) "Instantaneous Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete". *ACI Materials Journal*, 107(6).
- 20- Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, ASTM C1611.
- 21- Standard Test Method For Passing Ability Of Self Consolidating Concrete by J-RING , ASTM C1621 .
- 22- Eric P. Koehler , David W. Fowler , (2004) " DEVELOPMENT OF A PORTABLE RHEOMETER FOR FRESH PORTLAND CEMENT CONCRETE " , ICAR Report 105-3F, ICAR 105: Measuring the Workability of High Fines Concrete, August.
- 23- Self Compacting Concrete European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO, 2005, p. 63.
- 24- ACI 238.R-8 , Report on measurements of workability and rheology of fresh concrete.
- 25- Salem, T.M., (2002) "Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes". *Cement and concrete research*,. 32(9): p. 1473-1481.
- 8- Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle ,(2013) ASTM Designation: C807.
- 9- Michelsen, S., Beitrag zur bindezeit bbestimmung. *Zement*, 1933. 22(3): p. 457-461.
- 10- Gu, P., et al.(1994). " Investigation of the retarding effect of superplasticizers on cement hydration by impedance spectroscopy and other methods". *Cement and concrete research*. 24(3): p. 433-442.
- 11- Torrents, J., J. Roncero, and R. Gettu, (1998) "Utilization of impedance spectroscopy for studying the retarding effect of a superplasticizer on the setting of cement". *Cement and Concrete Research*,. 28(9): p. 1325-1333.
- 12- McCarter, W., et al. (2003) "Characterization and monitoring of cement-based systems using intrinsic electrical property measurements". *Cement and Concrete Research*,. 33(2): p. 197-206.
- 13- Topçu, İ.B., T. Uygunoğlu, and İ. Hocaoglu, (2012) "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures". *Construction and Building Materials*,. 28(1): p. 414-420.
- 14- Wei, X. and Z. Li, (2006) "Early hydration process of Portland cement paste by electrical measurement". *Journal of materials in civil engineering*,. 18(1): p. 99-105.
- 15- Whittington, H., J. McCarter, and M. Forde, (1981). " The conduction of electricity through concrete". *Magazine of concrete research*,. 33(114): p. 48-60.
- 16- Li, Z., X. Wei, and W. Li. (2003) "Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurements". *ACI Materials Journal*. 100(3).

# Investigation of the Relationship between Rheological Properties and the Setting Time of Self-consolidating Concrete Mixtures by utilizing the Electrical Resistance Method

Parviz Ghoddousi<sup>1</sup>, Ali Akbar Shirzadi Javid<sup>2\*</sup>, Behnam Bozorgmehr<sup>3</sup>

1. Professor, School of Civil Engineering Iran University of Science & Technology
2. Assistant Professor, School of Civil Engineering Iran University of Science & Technology
3. M.Sc., School of Civil Engineering Iran University of Science & Technology

\*shirzad@iust.ac.ir

## Abstract

Several studies have been done on the rheological properties and setting time of cementitious materials and mixtures, but the relationship between these two important features has not been studied so far. In this research, the main purpose of the done experiments, is to evaluate the relationships between the rheological properties and setting time in self-consolidating concrete (SCC) mixtures. Rheology is the science of studying the materials deformation and flow and in general, in SCC mixtures, the most important variables are the rheological variables. The setting time is also one of the most important parameters existing in all kinds of concrete mixtures. It should be noted that from the past up to now different definitions have been presented for the time of setting in various sources. As a short definition, it can be said that the setting time is a period of time in which concrete changes from fluid phase to solid phase.

In aspect of rheology evaluations, workability tests and rheometric experiments have been performed. Also in aspect of determining the setting time, the main method used to determine the time of setting is the electrical resistance measurement method (E.R.). Despite there is a long time of using this method in determination the time of setting of concrete mixtures, there is no standard written for it. Therefore in this research said method and its results have also been brought under more precise verification and study (which can be referred to as a side purpose). For this purpose, the standard penetration resistance (P.R.) method is used according to the ASTM C403. Based on the obtained results, it was found that the fault percentage of E.R. method in comparison with the standard P.R. method is about 5.3% and 3.59% in determining the initial and final setting time respectively which was minor and negligible differences. Therefore, it was found that the results obtained by electrical resistance method are reliable. Thus, by using the results obtained from the E.R. method, the existence or non-existence of relationships between the rheological properties and the setting time was studied. According to the obtained results, it was found that there are behavioral and numerical relationships between these two issues. Based on the results it was found that in the SCC mixtures with lower slump flow and longer  $T_{50}$ , the setting time becomes shorter. This fact means that the lower willingness of flowability causes a decrease in setting time of self-consolidating concrete mixtures. In the section of rheometric studies of the SCC mixtures performed by the rheometer, it was found that there are also important relationships between the yield stress and the setting time. According to the achieved results, it was found that the higher yield stress led to occurrence of shorter setting time and in connection to this issue, some numerical relations were also introduced. Thus, in this research it has been endeavored to study the relationship between the setting time and rheology properties in SCC mixtures as much as possible and obviate the existing gaps.

**Key words:** Setting time, Rheology, Workability, Electrical resistance.