

# ارزیابی زمان گیرش و روند کسب مقاومت فشاری بتن‌های دارای مواد پوزولانی

محمود نیلی<sup>۱\*</sup>، محسن تدین<sup>۲</sup>، مجتبی نیلی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا
- ۳- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی - گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا-

nili@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۰/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۱/۲۴]

**چکیده** - گیرش بتن به عنوان مرز شناسایی بتن تازه و سخت شده تلقی می‌شود دانستن زمان‌های گیرش بتن در برنامه ریزی عملیات اجرایی آن بسیار مهم است. زمان گیرش اولیه تعیین کننده محدوده زمانی جابه‌جا کردن بتن و زمان گیرش نهایی تعیین کننده شروع توسعه مقاومت مکانیکی است. با پیشرفت صنعت فناوری بتن و لزوم به کارگیری انواع پوزولان‌ها در بتن، تشخیص زمان گیرش بتن از اولویت خاصی برخوردار است. زیرا تغییرات زمان گیرش بتن به دلیل استفاده از پوزولان‌ها می‌تواند در ارزیابی اثر پوزولان‌ها نقش مهمی داشته باشد. در این مقاله با استفاده از روش مقاومت در برابر نفوذ (ASTM C403) برای تعیین زمان‌های گیرش بتن، سعی شده است مقایسه‌ای روی زمان‌های گیرش و روند کسب مقاومت بتن با سه نسبت آب به سیمان که حاوی انواع پوزولان‌ها است صورت پذیرد. نمونه‌های بتنی با سه نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ ساخته شدند. میکروسیلیس به مقدار ۷٪، خاکستر بادی با مقادیر ۱۵٪ و ۲۵٪ و سرباره با مقادیر ۲۵٪ و ۳۵٪ به عنوان مواد سیمانی جایگزین وزنی سیمان شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پوزولان‌ها باعث تاخیر در زمان‌های گیرش (اولیه و نهایی) می‌شود. نتایج این پژوهش همچنین حاکی از آن است که میزان مقاومت فشاری کوتاه مدت متاثر از زمان گیرش نهایی بتن بوده و روابط تجربی به دست آمده در این پژوهش می‌تواند در پیش بینی مقاومت فشاری بر حسب زمان گیرش نهایی بتن کاربرد داشته باشد.

**واژگان کلیدی:** زمان گیرش بتن، مقاومت فشاری، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره

## ۱ - مقدمه

دیگر خواص بتن تازه از جمله گیرش بتن مستقیماً تحت تاثیر مواد افزودنی است. گیرش واژه‌ای است که برای توصیف سفت شدن خمیر سیمان به کار برده می‌شود. به طور کلی گیرش به تغییر وضعیت از حالت مایع (سیال) به حالت جامد گفته می‌شود. اگرچه به هنگام گیرش خمیر سیمان، مقاومت کمی نیز حاصل می‌نماید، اما

در سال‌های اخیر، استفاده از انواع مختلف مواد افزودنی، مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره در بتن برای بالا بردن خواص مهندسی آن به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. اضافه کردن این مواد افزودنی معدنی به مخلوط باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام بتن می‌شود [۱]. از سوی

داده است. از این رو، جای دادن، متراکم کردن و پرداختن بتن بعد از این مرحله بسیار سخت خواهد بود. خمیر به طور ناگهانی جامد نمی‌شود، بلکه به زمان قابل توجهی نیاز دارد تا کاملاً صلب شود. زمانی که طول می‌کشد تا خمیر کاملاً جامد شود گیرش نهایی را مشخص می‌سازد که این کار نباید خیلی طول بکشد تا ادامه فعالیت ساختمان‌سازی بتواند در زمان قابل-قبولی پس از جای‌دادن بتن از سر گرفته شود [۳].

نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که زمان‌های گیرش بتن به نسبت آب به مواد سیمانی، دمای اولیه بتن و دمای عمل‌آوری آن، مقدار، منبع و نوع افزودنی و همین‌گونه ترکیبات سیمان وابسته است [۵،۴]. توافق عمومی بر این است که خاکستر بادی و سرباره زمان‌های گیرش بتن را به تاخیر می‌اندازد که با درصد‌های جایگزین بیشتر این تاخیر طولانی‌تر می‌شود [۶]. در این پژوهش اثر دوده سیلیس، خاکستر بادی و سرباره بر زمان گیرش و روند کسب مقاومت بتن بررسی شده است.

## ۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

مصالح سنگی به کار رفته در این مطالعه شامل شن شکسته با بیشینه اندازه ۱۹ میلی‌متر از شرکت متوساک و ماسه رودخانه‌ای عبدی بروجرد است. برای به دست آوردن کارایی مطلوب و همگنی مخلوط، از فوق روان‌کننده GELENUM (110P) از نوع نسل سوم از شرکت BASF استفاده شده است.

سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ صادراتی محصول کارخانه سیمان هگمتان، میکروسیلیس (دوده سیلیس) از کارخانه فروسیلیس ازنا، خاکستر بادی از نوع کلسیم کم (نوع F) تولید آفریقای جنوبی و سرباره مصرفی از نوع آهن‌گذاری بوده و از کارخانه سیمان سپاهان تهیه شد که مشخصات مواد سیمانی و سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. در این پژوهش نمونه‌های بتنی با سه نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ ساخته شدند. خلاصه طرح‌های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

برای مقاصد عملی، متمایز نمودن گیرش از سخت شدن، که به معنی کسب مقاومت خمیر سیمان گیرش یافته، مهم است [۲]. واکنش‌های بین سیمان و آب، دلیل اولیه گیرش بتن است و بنا به دلایل مختلف از جمله وجود سنگدانه‌ها، زمان گیرش بتن با زمان گیرش سیمانی که بتن با آن ساخته می‌شود، هماهنگی ندارد. پدیده‌های سفت شدن، گیرش و سخت شدن، نمودهای فیزیکی واکنش‌های پیش رونده هیدراسیون سیمان است [۳]. اگرچه پدیده گیرش مرتبط با خاصیت بتن تازه است لیکن در خواص بتن سخت شده از جمله مقاومت و دوام نمی‌تواند بی-تأثیر باشد.

پیش بینی زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن در برنامه‌ریزی عملیات اجرایی سازه‌ها بسیار موثر است. در واقع این ویژگی بتن در برنامه‌ریزی مرحله‌های متفاوت عملیات اجرایی بتن از قبیل: تعیین مجاز حمل، در قالب ریختن، متراکم کردن و پرداخت سطحی به طور کامل موثر است. اطلاع از زمان‌های گیرش بتن برای تصمیم‌گیری در خصوص استفاده و یا عدم استفاده از انواع افزودنی‌های کندگیر کننده و تندگیر کننده بسیار ضروری است. زمان گیرش به دو مرحله گیرش اولیه و گیرش نهایی تقسیم می‌شود. گیرش اولیه نشان‌دهنده زمانی است که بتن تازه بیشتر از آن نمی‌تواند به خوبی مخلوط، جای دهی و متراکم شود و گیرش نهایی نیز نشان دهنده تقریباً زمانی است که بعد از آن کسب مقاومت بتن به میزان چشمگیری توسعه می‌یابد.

یک خمیر سیمان تازه گیرش یافته، کمی مقاومت داشته یا هیچ مقاومتی ندارد. زیرا تنها نشان‌دهنده شروع هیدراسیون  $C_3S$  است که ترکیب اصلی موجود در سیمان است. وقتی که هیدراسیون  $C_3S$  شروع شود، واکنش به سرعت برای چندین هفته ادامه پیدا می‌کند. فرآیند پیوسته پرشدن فضاهای خالی خمیر سیمان با محصولات حاصل از واکنش، منجر به کاهش تخلخل و تراوایی و افزایش مقاومت می‌شود [۳].

عبارت گیرش، دلالت بر جامد شدن خمیر سیمان خمیری دارد. زمان شروع جامد شدن، که گیرش اولیه نامیده می‌شود، نقطه زمانی را مشخص می‌سازد که خمیر کارایی خود را از دست

جدول ۱ مشخصات سیمان و مواد سیمانی مورد استفاده

Chemical Components	Cement Type 1-425	Silica Fume	Fly Ash	Slag
SiO <sub>2</sub>	21.41	92.9	47.8	25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.88	1.2	24.9	6.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.82	0.74	8.7	3
CaO	63.69	0.02	4-10	57.5
SO <sub>3</sub>	2.36	0.1	0.9	1.25
MgO	1.56	1.0	1-2.5	4.51
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.42	1.2	0.45
K <sub>2</sub> O	0.65	1.32	3.6	0.9
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.04	0.1-0.2	-
Compounds				
C <sub>3</sub> S	51.59	-	-	-
C <sub>2</sub> S	22.48	-	-	-
C <sub>3</sub> A	6.47	-	-	-
C <sub>4</sub> AF	11.62	-	-	-

جدول ۲ طرح‌های اختلاط نمونه‌های بتنی

Concrete Mixes	Sand (ssd)	Gravel (ssd)	Water	Silica Fume	Fly Ash	Slag	Cement	S.P	Slump
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	gr/m <sup>3</sup>	cm
W0.55C375	784.0	958.2	206.3	-	-	-	375.0	-	11.0
W0.55C325	818.8	1000.8	178.8	-	-	-	325.0	-	8.0
W0.45C375	812.0	992.4	168.8	-	-	-	375.0	750	12.5
W0.45S.F7	807.8	987.4	168.8	26.3	-	-	348.8	1125	7.0
W0.45C425	767.3	937.8	191.3	-	-	-	425.0	850	10.5
W0.45F.A15	805.8	984.9	168.8	-	56.3	-	318.8	750	12.0
W0.45F.A25	801.7	979.8	168.8	-	93.8	-	281.3	750	10.5
W0.45S25	808.4	988.1	168.8	-	-	93.8	281.3	750	6.5
W0.45S35	807.0	986.4	168.8	-	-	131.3	243.8	750	10.0
W0.35C425	816.8	998.3	148.8	-	-	-	425.0	2337	8.0
W0.35S.F7F.A15	805.1	984.0	148.8	29.8	63.8	-	331.5	2337	10.5

شده است. روش استاندارد برای اندازه‌گیری زمان گیرش بتن با اسلامپ بیشتر از صفر، با آزمایش کردن ملاتی که از مخلوط بتن الک شده است فراهم می‌شود. به طور خلاصه، آزمایش شامل خارج کردن جز ملات از بتن، متراکم کردن آن

### ۳- آزمایش‌ها

#### ۳-۱- گیرش:

برای تعیین زمان‌های گیرش اولیه و نهایی مخلوط‌های بتن، از روش مقاومت در برابر نفوذ (ASTM C403) [۱۱] استفاده

C<sub>3</sub>A (تری کلسیم آلومینات) و C<sub>3</sub>S (تری کلسیم سیلیکات) موجود در مخلوط این طرح‌ها و آهنگ کندتر هیدراسیون خاکستر بادی و سرباره مخصوصاً در سنین اولیه نسبت به هیدراسیون سیمان پرتلند باشد.

با افزایش سن نمونه‌ها و ادامه هیدراسیون و انجام واکنش پوزولانی که منجر به تشکیل هیدرات‌های سیلیکات کلسیم اضافی می‌شود مقاومت به تدریج افزایش یافته و فاصله‌های مقاومت طرح‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره با طرح شاهد کمتر می‌شود.

فاصله‌ی بیشتر مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره در سنین کوتاه مدت ۱ تا ۷ روز از یکدیگر و جمع‌تر شدن نمودارها در سن ۹۱ روز نیز حاکی از این امر است. حتی مشاهده می‌شود که در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در سنین بلندمدت طرح‌های دارای خاکستر بادی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به طرح شاهد را دارد و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و طرح ترکیبی خاکستر بادی و میکروسیلیس مقاومت فشاری سن کوتاه مدت کم‌تر از شاهد و به مرور زمان و در سنین بلند مدت مقاومت فشاری طرح ترکیبی گوی سبقت را از طرح شاهد می‌گیرد.

بیشترین مقاومت فشاری متعلق به نمونه‌های دارای ۰/۷ میکروسیلیس و ۱۵٪ خاکستر بادی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ است که مقاومت آن ۷۵/۷۷ مگاپاسکال در سن ۹۱ روزه است که اثر متقابل میکروسیلیس و خاکستر بادی بر روند صعودی مقاومت فشاری به دلیل بهبود خواص ناحیه انتقال و کاهش خلل و فرج بتن است

#### ۴-۲- گیرش:

زمان‌های گیرش طرح‌های بتنی در نمودارهای شکل ۴ و ۵ با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زمان گیرش با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین زمان گیرش متعلق به مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ است با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۴۵ و ۰/۵۵ زمان گیرش به ترتیب به میزان ۱۰٪ و ۱۸٪ افزایش می‌یابد.

در ظرف استاندارد و اندازه‌گیری نیروی موردنیازی که سبب نفوذ سوزن به مقدار ۲۵ میلی‌متر در داخل ملات می‌شود. زمان‌های گیرش از روی منحنی جامد شدن تعیین می‌شود، که از ترسیم خطی داده‌ها در زمان سپری شده به عنوان محور افقی و مقاومت در برابر نفوذ به عنوان محور عمودی، به دست می‌آید. گیرش‌های اولیه و نهایی به عنوان زمان‌هایی تعریف شده‌اند که در آن‌ها مقاومت نفوذ به ترتیب برابر با ۳/۵ و ۲۷/۶ مگاپاسکال است.

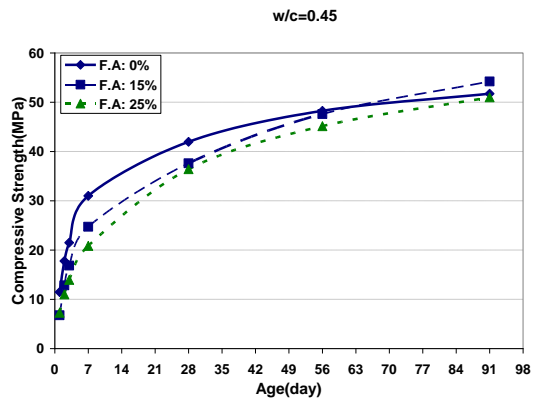
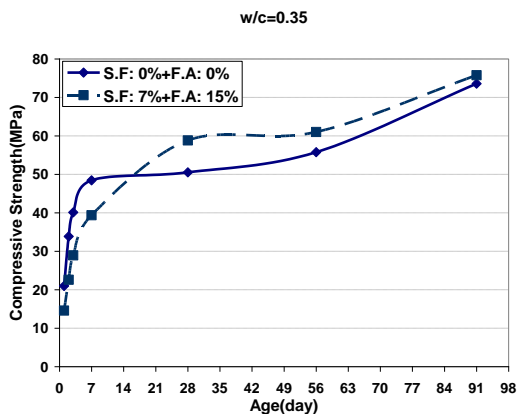
#### ۳-۲- مقاومت فشاری:

آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط بر طبق استاندارد BS 1881: part 116 [۱۲] روی آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری در هریک از سنین ۱، ۲، ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز انجام گرفت. این آزمون‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه‌ی آب آهک با دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند.

#### ۴-۱- بحث و بررسی نتایج:

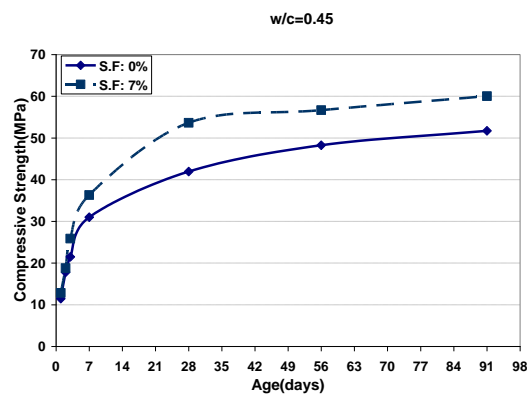
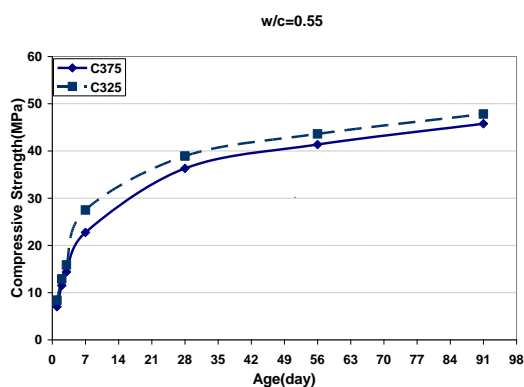
##### ۴-۱-۱- روند کسب مقاومت فشاری طرح‌های بتنی:

مقاومت فشاری بتن یک ویژگی است که شاخص خوبی از کیفیت آن است. روند توسعه مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در طول سنین عمل آوری برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۳۵ و ۰/۵۵ در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ قابل مشاهده است. با افزایش سن عمل آوری، مقاومت فشاری تمامی طرح مخلوط‌ها افزایش یافته و با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی و سرباره با سیمان از میزان مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن به صورت متناسب کاسته شده است و طرحی که میزان خاکستر بادی و سرباره آن کمتر است نتایج مقاومت فشاری بیشتری را دارا است. این در حالی است، که در نسبت جایگزینی ۰/۷ میکروسیلیس با سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ دارای نتایج مقاومت فشاری بیشتری از نمونه شاهد است که این امر در اثر اصلاح ساختار ناحیه انتقال که بدون شک یکی از مهمترین قسمت‌های تاثیرگذار روی مقاومت فشاری بتن است است. علت کاهش مقاومت آزمون‌های دارای خاکستر بادی و سرباره می‌تواند ناشی از کمتر بودن



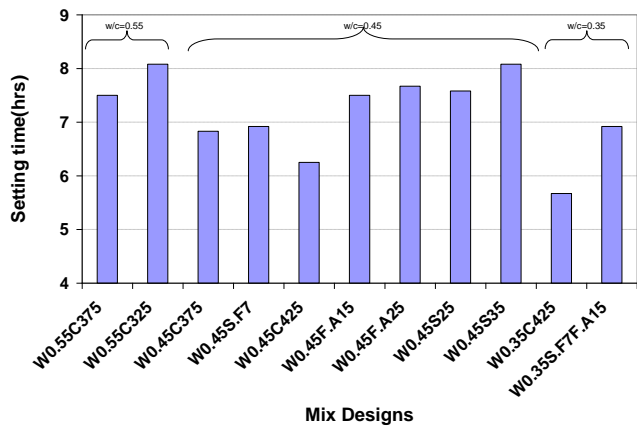
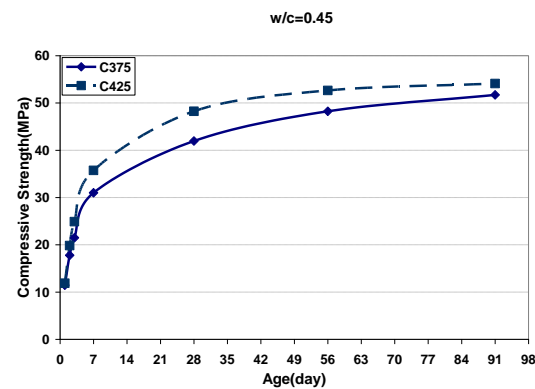
شکل ۲ روند توسعه مقاومت فشاری مخلوط های بتن برای نسبت آب به

سیمان ۰/۳۵

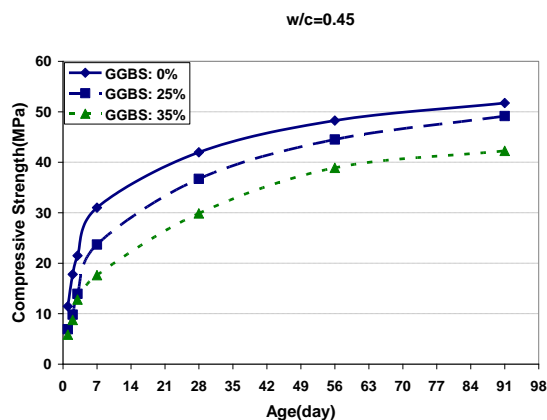


شکل ۳ روند توسعه مقاومت فشاری مخلوط های بتن برای نسبت آب به

سیمان ۰/۵۵



شکل ۴ زمان گیرش اولیه مخلوط های بتنی



شکل ۱ روند توسعه مقاومت فشاری مخلوط های بتن برای نسبت آب به

سیمان ۰/۴۵

بیشتر است و از آنجا که گیرش عمدتاً ناشی از سطح تماس بین دانه‌های سیمان و هیدراسیون این سطح تماس است پس انتظار داریم که در این شرایط گیرش تسریع شود. با جایگزین نمودن مواد معدنی پوزولانی به جای بخشی از سیمان مقدار سیمان مصرفی کاهش می‌یابد، در عوض فوق روان کننده مصرفی بر دانه‌های سیمان موثرتر عمل نموده و مانع ایجاد هیدراسیون اولیه می‌شود مضافاً بر اینکه پوزولان‌ها و فوق روان کننده نیز باعث جدایی دانه‌های سیمان می‌شود در نتیجه در مخلوط‌های حاوی پوزولان دانه‌های سیمان در محلول از یکدیگر جدا شده و از سطح تماس آن‌ها کاسته می‌شود بدین ترتیب به طور طبیعی زمان‌های گیرش در آن‌ها طولانی‌تر می‌شود. علاوه بر این مشارکت مواد افزودنی در تغییر در زمان‌های گیرش، به آغاز و سرعت فعالیت پوزولانی وابسته است.

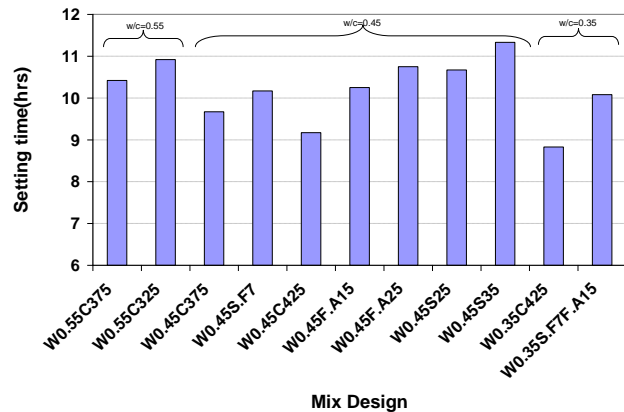
#### ۴-۴-۱- ارتباط مقاومت فشاری با زمان گیرش:

همان‌گونه که گفته شد زمان گیرش اولیه تعیین کننده محدوده زمانی جابه‌جا کردن بتن و زمان گیرش نهایی تعیین کننده شروع توسعه مقاومت مکانیکی آن است. یعنی گیرش نهایی نشان‌دهنده تقریباً زمانی است که بعد از آن، کسب مقاومت با میزان چشمگیری توسعه می‌یابد. در نمودارهای شکل ۶ مقاومت فشاری ۱، ۲، ۳، ۷ روزه در مقابل زمان گیرش نهایی به تفکیک رسم شده و ارتباط بین مقاومت فشاری با زمان گیرش نهایی به دست آمده است. در منحنی مقاومت فشاری ۷ روزه منحنی چند جمله‌ای درجه ۲ برای برازش نقاط و برای بقیه منحنی‌ها منحنی نمایی برای برازش نقاط در نظر گرفته شده است. توابع خطی، لگاریتمی و توانی هم برای به دست آوردن بهترین خط عبوری از بین داده‌ها امتحان شدند اما در منحنی‌های چند جمله‌ای برای مقاومت فشاری ۱ روزه و منحنی نمایی برای بقیه نمودارها ضریب همبستگی بالاتری به دست آمد که در منحنی‌ها نمایش داده شده است.

مطابق این نمودارها مقاومت فشاری بتن در سنین ۱، ۲، ۳ و ۷ روزه به وسیله روابط ذیل و با زمان گیرش نهایی قابل پیش‌بینی است.

$$f_{c1} = 1.3459t_f^2 - 32.033t_f + 196.4 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$f_{c2} = 2070.8e^{-0.4824t_f} \quad \text{رابطه (۲)}$$



شکل ۵ زمان گیرش نهایی مخلوط‌های بتنی

#### ۴-۳-۱ اثر پوزولان‌ها:

همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر کلی پوزولان‌ها طولانی کردن زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن است. در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ هر سه پوزولان میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره دارای اثر تاخیری است و با افزایش میزان پوزولان این اثر شدیدتر می‌شود. با جایگزینی ۱۵٪ و ۲۵٪ خاکستر بادی به جای سیمان زمان گیرش نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب به میزان ۶٪ و ۱۲٪ افزایش و همچنین با جایگزینی ۲۵٪ و ۳۵٪ سرباره به جای سیمان زمان گیرش نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۱٪ و ۱۸٪ افزایش می‌یابد. در خصوص میکروسیلیس به علت ریزی فوق‌العاده این ماده پوزولانی میزان گیرش نهایی تاخیری حدود ۵/۵٪ نسبت به زمان گیرش بتن شاهد دارد.

تاخیر رخ داده در زمان‌های گیرش نمونه‌های حاوی پوزولان عمدتاً به این دلیل است که چون بخشی از سیمان با پوزولان‌ها جایگزین می‌شود مقدار سیمان در مخلوط کاهش یافته و اثر فوق روان کننده بیشتر می‌شود. در پژوهش‌های پیشین، اثر کلی فوق روان کننده‌ها در تاخیر زمان‌های گیرش گزارش و طولانی‌تر شدن تاخیر به نوع و مقدار فوق روان کننده، نوع سیمان و دما وابسته شده است [۹]. هیدراسیون سیمان و ترکیبات سیمان، مخصوصاً  $C_3S$  که مقاومت اولیه بتن به آن وابسته است و  $C_3A$  معمولاً به وسیله فوق روان کننده به تاخیر می‌افتد [۹]. به تاخیر افتادن فرآیند هیدراسیون ناشی از جذب سطحی فوق روان کننده در سراسر سطح ذرات سیمان است [۱۰]. در بتن‌های بدون پوزولان مقدار سیمان به کار رفته

## ۵- نتیجه گیری:

نتایج این پژوهش اینگونه است:

- ۱- جایگزینی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره با سیمان در بتن به طور کلی باعث افزایش زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن می‌شود.
- ۲- با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی و سرباره با سیمان در بتن زمان‌های گیرش طولانی‌تر می‌شود.
- ۳- میکروسیلیس، به علت ریزی فوق‌العاده و فعالیت پوزولانی موثر و نقش پرکنندگی فوق‌العاده، تخلخل بتن را کاهش داده و در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت فشاری را در تمام سنین افزایش می‌دهد. اما خاکستر بادی و سرباره به علت واکنش پذیری کند آن‌ها باعث کاهش مقاومت اولیه بتن می‌شود لیکن به مرور زمان و انجام واکنش‌های پوزولانی و در سنین بلند مدت مقاومت را افزایش می‌دهند.
- ۴- از آنجایی که زمان گیرش نهایی تعیین کننده شروع توسعه مقاومت مکانیکی در بتن است؛ روابط تجربی برای پیش بینی مقاومت کوتاه مدت بتن به کمک اندازه گیری زمان گیرش نهایی ارائه شده است.

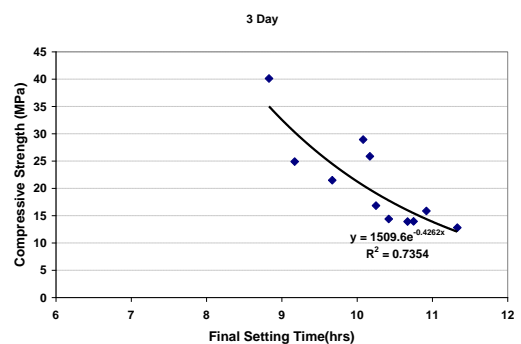
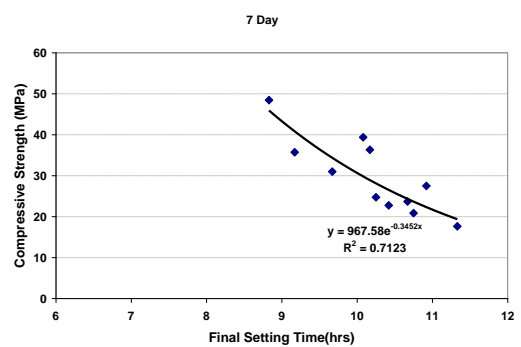
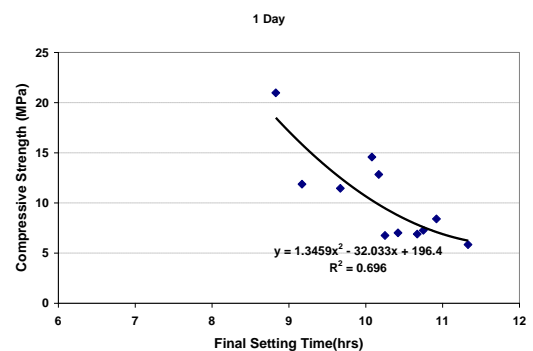
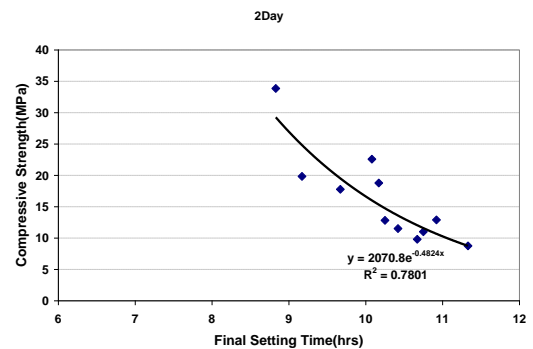
## ۶- مراجع

1. Mazloom, M., Ramezani pour, A.A. and Brooks, J.J. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", Cement & Concrete Composites, Vol. 26,2004, pp. 347-357.
2. Neville, A.M. "Properties of Concrete". John Wiley & Sons Inc,1997.
3. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. "Concrete Structures, properties and materials," Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
4. Kruml F. Setting process of concrete. In: Wierig H-J, editor. Properties of fresh concrete, Proceedings of the RILEM Colloquim, Hanover: Chapman & Hall, 1990. P.10-16.
5. Eren O, Brooks JJ, Celik T. Setting of fly ash and slag-cement concrete as affected by curing temperature. Cement, Concrete, and Aggregates 1995;17(1):11-7.
6. Sivasundaram V, Carett GG, Malhotra VM. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volume of low-calcium fly ash. In: Malhotra VM, editor.

$$f_{c3} = 1509.6e^{-0.4262t_f} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$f_{c7} = 967.58e^{-0.3452t_f} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن  $t_f$  زمان گیرش نهایی برحسب ساعت و  $f_{c1}$ ،  $f_{c2}$ ،  $f_{c3}$  و  $f_{c7}$  به ترتیب مقاومت فشاری ۱، ۲، ۳ و ۷ روزه بتن بر حسب مگاپاسکال است.



شکل ۶ رابطه مقاومت فشاری با زمان گیرش نهایی بتن

8. BS: 1881: part 116, "Methods for determination of compressive strength of concretecubes", British Standard Institution, 1983.
9. Ramachandran VS, Malhotra VM. Superplasticisers. In: Ramachandran VS, editor. Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, 1995. p. 410-506.
10. Nonat A, Mutin JC. From hydration to setting. In: Nonat A, Mutin JC, editors. Hydration and Setting of Cements, E & FN Spon, 1992. p. 171-191.
7. Proceedings of Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, ACI SP 114, vol. 1. 1989. P. 45-72.
7. ASTM C 403/C 403/M. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance. American Society for Testing and Materials, 1995. p. 217-221.