



بررسی تاثیر عمل آوری تحت حرارت و فشار بر روی مقاومت فشاری بتن

WWW.SARVAZMA.IR

خلاصه

از ویژگی‌های بتن افزایش تدریجی مقاومت فشاری آن بعد از ساخت است. یکی از عواملی که بر سرعت افزایش مقاومت فشاری بتن اثر دارد، شرایط محیط بتن (رطوبت، دما، فشار) می‌باشد. برای عمل آوری بتن تحت فشار، رطوبت و دمای مشخص از دستگاه اتوکلاو استفاده می‌شود. در این پژوهش به بررسی چگونگی عمل آوری بتن توسط اتوکلاو، تحت سه روند اعمال حرارت و فشار متفاوت بر روی بتن‌هایی با چهار نوع طرح اختلاط مختلف پرداخته شده است. پس از مقایسه حالات مختلف تاثیر پارامترهایی چون عیار و نوع سیمان در عمل آوری بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در پایان با مقایسه سه روند اعمال حرارت و فشار، مناسبترین رژیم عمل آوری مشخص می‌گردد.

کلمات کلیدی: عمل آوری، مقاومت فشاری بتن، سیمان پرتلند تیپ II، سیمان پوزولانی، اتوکلاو

۱. مقدمه

در فرآیند تولید بتن بلافاصله پس از بتن‌ریزی و اتمام عملیات پرداخت، مرحله عمل آوری بتن آغاز می‌گردد. زمان مورد نیاز برای این مرحله، یعنی مرحله‌ی سخت شدن، و رسیدن به مقاومت فشاری نهایی، ۲۸ روز در نظر گرفته می‌شود [۱]. کوتاه نمودن زمان عمل آوری بتن در مورد بتن‌های پیش ساخته در کارخانه‌ها و همچنین نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده‌های زیادی برای تولیدکنندگان و پژوهشگران دارد و باعث کاهش هزینه و اقتصادی تر شدن فعالیت‌ها می‌گردد. به منظور تسریع عمل آوری بتن از دستگاهی به نام اتوکلاو استفاده می‌شود. این دستگاه با اعمال حرارت و فشار عمل آوری را سرعت بخشیده، بسیاری از ویژگی‌های بتن را بهبود می‌دهد [۲]. وجود آب در محفظه‌ی بسته‌ی اتوکلاو و اعمال حرارت به سیستم باعث افزایش فشار داخل محفظه می‌شود. در پی افزایش فشار، رطوبت و دمای سیستم افزایش می‌یابد. در این مجموعه در فشار ۲ مگاپاسکال رطوبت سیستم به رطوبت اشباع و دمای سیستم به ۲۱۲ درجه سانتیگراد می‌رسد [۳]. گرما و رطوبت عواملی هستند که عملیات هیدراسیون خمیر سیمان را سرعت می‌بخشند.

۲. پژوهش‌های پیشین

عمل آوری بتن تحت فشار و دمای بالا در سال ۱۹۲۰ در کشور سوئد مطرح گردید و در زمینه عمل آوری بتن‌های پیش ساخته توسعه یافت. تاکنون پژوهش‌های متفاوتی در این زمینه انجام گرفته است که به بررسی تاثیر فشار، حرارت و مدت زمان عمل آوری پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها با توجه به نوع مصالح مصرفی (سیمان، سنگدانه، مواد افزودنی) و نوع بتن، نتایج و الگوهای عمل آوری گوناگونی معرفی شده است. در پژوهشی که توسط اونگسونکونگ و همکاران در تایلند انجام پذیرفت با مطالعه‌ی پارامترهایی نظیر نوع سیمان و مواد زودگیر کننده متفاوت برای بتن عمل آوری شده در اتوکلاو (Autoclaved Aerated Concrete-AAC)، عمل آوری در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۸ ساعت به عنوان رژیم مناسب

پیشنهاد شده است [۴]. در پژوهشی دیگر توسط ونگ در ژاپن، به بررسی تاثیر نوع سنگدانه‌های مصرفی بر روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن AAC پرداخته شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که با افزایش چگالی سنگدانه‌های مصرفی، عمل آوری بتن AAC بهبود می‌یابد [۵].

۳. پژوهش پیش رو

همان‌طور که گفته شد هدف این پژوهش بررسی تاثیر شرایط عمل آوری بتن بر مقاومت فشاری بتن است. عواملی که بر پروراندن بتن تاثیرگذار می‌باشند عبارتند از فشار، رطوبت و دمای محیط عمل آوری. به همین منظور در این پژوهش از دستگاه اتوکلاو استفاده شده است. اتوکلاو قادر است نمونه‌های بتن را برای مدت مشخصی در دما و فشار مشخص و رطوبت اشباع نگه دارد. در این پژوهش با ساخت بیش از ۱۲۰ نمونه به بررسی عمل آوری بتن در حرارت و فشار، تحت رژیم‌های متفاوت پرداخته شد. با مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در مخزن آب پس از ۱۴ روز و نمونه‌های بتن AAC با رژیم‌های گوناگون، رژیمی که بیشترین اثرگذاری را بر روند عمل آوری دارد، شناسایی می‌شود. همچنین در این پژوهش به بررسی تاثیر اتوکلاو بر روی نمونه‌هایی تحت روند عمل آوری یکسان ولی با طرح اختلاط‌هایی با عیار و نوع سیمان متفاوت پرداخته شده است. برای تهیه بتن با سیمان پرتلند تیپ II از سه عیار ۲۵۰، ۴۰۰ و ۵۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شد. افزون بر این سه طرح اختلاط، یک طرح دیگر با سیمان پوزولانی و عیار ۴۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات این چهار طرح اختلاط در جدول ۱ آورده شده است.

مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها عبارتند از: شن شکسته با بزرگترین اندازه ۱۲/۵ سانتیمتر، ماسه شکسته با مدول نرمی ۳/۲، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان شرق و سیمان پوزولانی خاش. با توجه به محدودیت ابعاد دستگاه اتوکلاو و با توجه به اهمیت بسیار بالای یکنواختی کامل نمونه‌های تهیه شده در هر رژیم، بتن ریزی در ۳ قالب سه قلوئی ساخته شده از ورق MDF با ابعاد ۷/۵×۷/۵×۷/۵ سانتیمتر مکعب انجام شد که در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- قالب نمونه‌های بتنی

برای تهیه هر دسته از نمونه‌ها، ۱۰ لیتر بتن آماده و در ۱۰ قالب از پیش چرب شده قرار گرفت و با روش استاندارد متراکم شد. تمامی نمونه‌ها پس از بتن ریزی به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب و در شرایط استاندارد قرار گرفتند [۶]. سپس، ۵ نمونه به صورت تصادفی از میان آنها به عنوان شاهد برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۱۴ روزه در آب آهک اشباع قرار گرفت. پنج نمونه دیگر در دستگاه اتوکلاو چیده شد تا تحت شرایط عمل آوری مختلف قرار گیرد.

در این پژوهش نمونه‌های مربوط به هر طرح اختلاط در سه رژیم مختلف در دستگاه اتوکلاو عمل آوری شد و مقاومت فشاری آن‌ها با نمونه‌های شاهد مقایسه گردید. طبق پیشنهاد ASTM و با توجه به اهمیت جلوگیری از بروز تنش‌های حرارتی در اثر تغییر دمای ناگهانی، از رژیم‌های به شرح زیر استفاده شد. در تمام روش‌های عمل آوری نخست، افزایش حرارت به گونه‌ای اعمال می‌شود که فشار در مدت ۷۵ دقیقه به میزان ۲ مگاپاسکال برسد. همین‌طور برای سرد نمودن نمونه‌ها در تمامی روش‌های عمل آوری، در پایان، با روشن کردن سیستم خنک کننده دستگاه فشار در مدت ۹۰ دقیقه به فشار اتاق رسانده می‌شود [۷]. تفاوت بین رژیم‌های عمل آوری در مدت زمان نگهداشتن نمونه‌ها تحت فشار می‌باشد. زمان نگهداری نمونه‌ها در رژیم‌های ۱ تا ۳ به ترتیب ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ساعت در فشار ۲ مگاپاسکال می‌باشد. شایان به ذکر است که اصول ترمودینامیک در زمان رسیدن فشار به ۲ مگاپاسکال می‌بایست دمای سیستم برابر ۲۱۲ درجه سانتیگراد باشد. [۳]



جدول ۱- طرح اختلاط بتن های ساخته شده

نوع سیمان	سیمان (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	چگالی بتن (kg/m ³)
سیمان پرتلند تیپ II	۵۵۰	۸۲۰	۷۳۰	۲۱۵	۰/۴۰	۲۳۱۰
سیمان پرتلند تیپ II	۴۰۰	۸۲۰	۸۸۰	۱۹۰	۰/۴۷	۲۳۰۰
سیمان پرتلند تیپ II	۲۵۰	۸۲۰	۱۰۸۵	۱۸۵	۰/۷۴	۲۳۴۰
سیمان پوزولانی	۴۰۰	۸۱۵	۸۸۰	۲۰۵	۰/۵۱	۲۳۰۰



شکل ۳ - نمونه‌ها پس از قرار گیری در دستگاه اتو کلاو



شکل ۲- دستگاه اتو کلاو

بر اساس دستورالعمل استفاده از دستگاه اتو کلاو، قبل از قرار دادن نمونه‌ها در داخل دستگاه اتو کلاو، درون مخزن اتو کلاو به ارتفاع ۱۰ سانتیمتر آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ریخته می‌شود، نمونه‌ها در سه ردیف بر روی پایه‌ای که بدین منظور تهیه شده است قرار می‌گیرند و درون اتو کلاو گذاشته می‌شوند. پس از بستن درب دستگاه، گرم‌کننده آن روشن می‌گردد و شیر تخلیه دستگاه در حالت باز قرار داده می‌شود. پس از گذشت چند دقیقه با مشاهده خارج شدن بخار آب از لوله خروجی، شیر در حالت بسته قرار داده می‌شود. با سپری شدن ۷۵ دقیقه فشار دستگاه به ۲ مگاپاسکال می‌رسد و پس از گذشت زمان مورد نظر برای رژیم‌های سه گانه (۱/۵ ، ۳/۰ و ۴/۵ ساعت) گرم‌کننده خاموش می‌شود و خنک کننده دستگاه روشن می‌گردد. پس از ۹۰ دقیقه فشار دستگاه به فشار محیط می‌رسد و سپس شیر خروجی دستگاه باز می‌شود. در این مرحله نمونه‌ها باید از دستگاه خارج شوند و درون آبی با دمای ۹۰ درجه سانتیگراد قرار داده شوند. در این عملیات، با اضافه نمودن تدریجی آب سرد به این آب، دمای نمونه‌ها در عرض ۱۵ دقیقه به ۲۵ درجه سانتیگراد کاهش داده می‌شود.

بعد از عمل آوری به وسیله اتو کلاو، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط اتاق نگهداری شدند و سپس مقاومت فشاری آنها به وسیله دستگاه بتن شکن با سرعت بارگذاری ۱/۲ کیلو نیوتن بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نمونه‌های شاهد نیز طبق استاندارد در سن ۱۴ روز شکسته شدند[۸].



شکل ۵ - نمونه‌ها پس از شکستن



شکل ۴- دستگاه بتن شکن



در جدول شماره ۲، تمام داده‌های مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها آورده شده است. توجه به این مطلب ضروری است که داده‌هایی با اختلاف بیش از ۱۵ درصد از میانگین از محاسبات حذف شده و در جدول با رنگ خاکستری نشان داده شده‌است.

جدول ۲ - مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های بتن (مگاپاسکال)

انحراف معیار	میانگین	شماره نمونه					رژیم	نوع عمل‌آوری	عیار سیمان	نوع سیمان
		۵	۴	۳	۲	۱				
۰/۰۷	۸/۹	۸/۸	۸/۸	۸/۸	۸/۸	۹/۰	۱			
۰/۲۴	۹/۰	۹/۴	۹/۱	۸/۸	۸/۷	۸/۸	۲	AAC		
۰/۲۰	۵/۴	۵/۳	۵/۵	۵/۲	۵/۷	۵/۱	۳		۲۵۰	پرتلند تیپ II
۰/۳۰	۱۱/۳	۱۱/۲	۱۱/۶	۱۱/۳	۱۰/۸	۱۱/۷	۱			
۰/۳۰	۱۱/۳	۱۱/۶	۱۰/۸	۱۱/۷	۱۱/۳	۱۱/۲	۲	شاهد		
۰/۸۴	۱۱/۳	۱۰/۷	۱۲/۴	۸/۸۹	۱۴/۲	۱۰/۷	۳			
۱/۰۳	۱۵/۱	۱۶/۰	۱۶/۰	۱۳/۵	۱۱/۷	۱۴/۹	۱			
۰/۳۶	۱۳/۸	۱۴/۲	۱۴/۰	۱۳/۷	۱۳/۹	۱۳/۱	۲	AAC		
۰/۴۵	۱۰/۴	۱۰/۹	۹/۶	۱۰/۷	۱۰/۴	۱۰/۵	۳		۴۰۰	پرتلند تیپ II
۱/۳۶	۲۳/۱	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۳/۸	۲۲/۱	۲۵/۵	۱			
۱/۳۶	۲۳/۱	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۵/۵	۲۳/۸	۲	شاهد		
۱/۴۷	۲۱/۴	۲۳/۰	۲۳/۰	۱۹/۷	۲۱/۴	۱۹/۷	۳			
۲/۴۴	۲۲/۳	۱۸/۱	۲۸/۴	۲۲/۹	۱۹/۰	۲۴/۹	۱			
۲/۰۶	۱۸/۶	۱۸/۱	۱۶/۴	-	۲۱/۳	-	۲	AAC		
۱/۵۹	۱۱/۱	۱۳/۰	۹/۲	۱۲/۳	۹/۸	۱۵/۸	۳		۵۵۰	پرتلند تیپ II
۱/۵۹	۳۳/۷	۳۲/۴	۳۲/۲	۳۴/۱	۳۶/۵	۳۳/۴	۱			
۱/۵۸	۳۳/۷	۳۳/۴	۳۲/۲	۳۶/۵	۳۴/۱	۳۲/۴	۲	شاهد		
۰/۸۸	۲۷/۲	۲۶/۳	۲۵/۹	۲۷/۴	۲۸/۱	۲۸/۰	۳			
۰/۶۷	۱۱/۴	۱۰/۷	۱۱/۶	۱۱/۵	۱۲/۴	۱۰/۶	۱			
۱/۸۱	۱۸/۸	۱۹/۶	۱۷/۷	۲۱/۳	۱۶/۰	۱۹/۵	۲	AAC		
۱/۳۸	۲۰/۵	۲۱/۳	۱۷/۸	۲۱/۶	۲۱/۳	۲۰/۹	۳		۴۰۰	پوزولانی
۱/۳۷	۲۰/۰	۲۰/۸	۱۸/۴	۲۱/۷	۱۳/۳	۱۸/۸	۱			
۱/۳۷	۲۰/۰	۲۱/۷	۲۰/۹	۱۸/۴	۱۸/۸	۱۳/۳	۲	شاهد		
۱/۸۱	۱۸/۳	۱۸/۲	۲۰/۴	۱۸/۳	۱۹/۶	۱۵/۱	۳			

بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های که به وسیله اتوکلاو عمل‌آوری شده‌اند و مقایسه‌ی آن‌ها با مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد، میزان تاثیر رژیم عمل‌آوری را بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد. به طوری که به منظور بیان تاثیر این اثر بر روی مقاومت فشاری بتن، از محاسبه نسبت

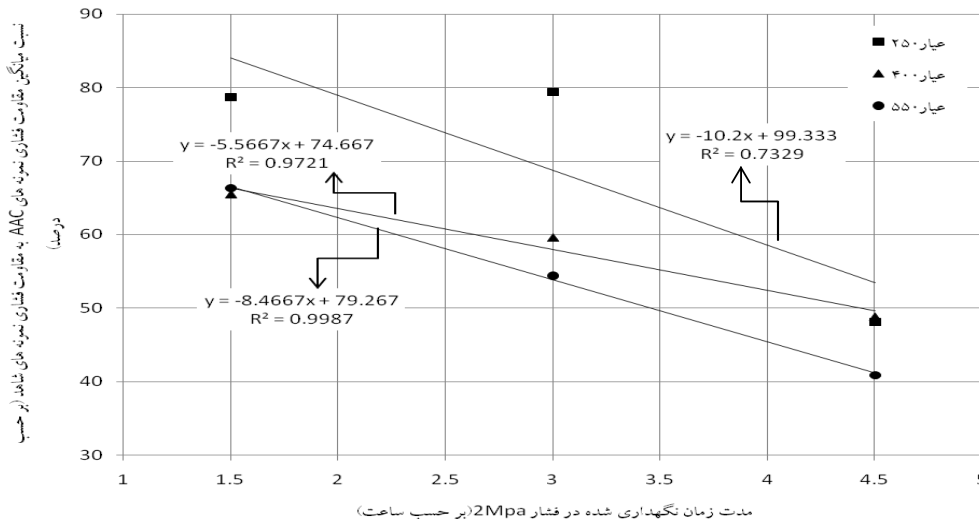
مقاومت فشاری نمونه‌های AAC به مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط نگهداری استاندارد به مدت ۱۴ روز استفاده شده است. جدول ۳ این نسبت‌ها را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نگهداری بتن در فشار بالا تاثیر اتوکلاو بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ II کم می‌شود. به عبارت دیگر نسبت مقاومت فشاری بتن‌های AAC به مقاومت فشاری نمونه‌های ۱۴ روزه با افزایش زمان نگهداری بتن در اتوکلاو کاهش می‌یابد. که در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۳- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های AAC به مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد (%)

نوع سیمان	عیار (kg/cm ³)	رژیم ۱	رژیم ۲	رژیم ۳
سیمان پرتلند تیپ II	۲۵۰	۷۸/۷	۷۹/۴	۴۸/۱
سیمان پرتلند تیپ II	۴۰۰	۶۵/۵	۵۹/۶	۴۸/۸
سیمان پرتلند تیپ II	۵۵۰	۶۶/۳	۵۴/۴	۴۰/۹
سیمان پوزولانی	۴۰۰	۵۷/۰	۹۴/۴	۱۰۷/۲

با دقت بیشتر در نمودار در می‌یابیم که تاثیر اتوکلاو بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با مقدار سیمان مختلف، متفاوت است. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های AAC به مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده استاندارد ۱۴ روزه، در نمونه‌هایی که در آن‌ها سیمان بیشتری به کار رفته، کمتر می‌باشد. صحت این مطلب نیز با جابجایی خطوط مربوط به عیارهای بالاتر در جهت عمودی تایید می‌گردد.

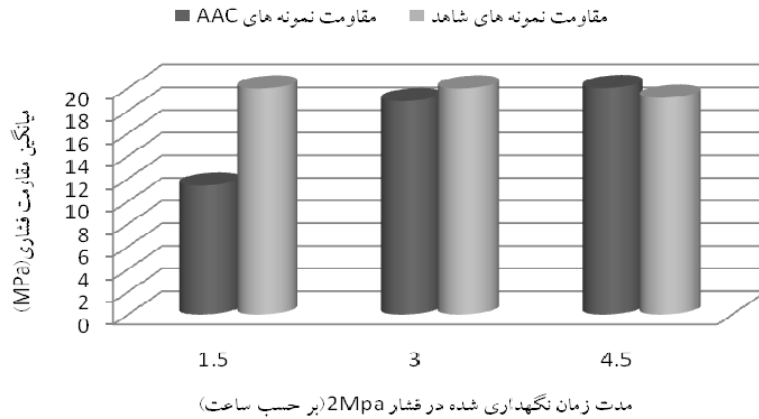


شکل ۶- نمودار نسبت میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های AAC به بتن شاهد برای عیارهای مختلف

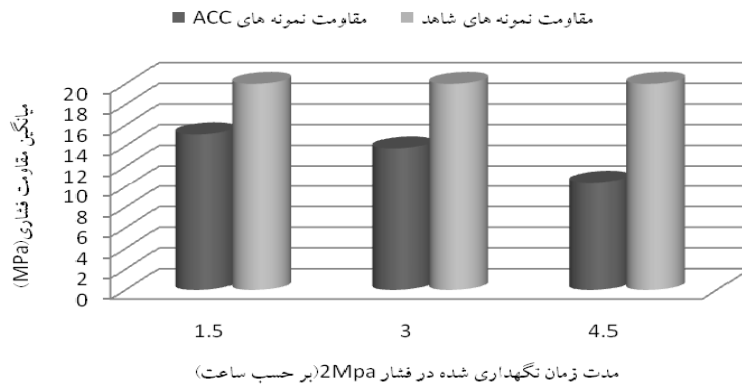
در شکل ۷ و ۸، مقاومت فشاری نمونه‌های AAC و مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد بتن دارای سیمان پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ II با عیار سیمان ۴۰۰ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است با افزایش زمان نگهداری بتن در فشار ۲ مگاپاسکال، مقاومت فشاری نمونه‌های AAC دارای سیمان پوزولانی به مقاومت فشاری ۱۴ روزه آن‌ها نزدیک‌تر می‌شود. یعنی با افزایش زمانی که نمونه‌ها در فشار ۲ مگاپاسکال قرار دارند تاثیر اتوکلاو بر روی مقاومت فشاری بیشتر می‌شود.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد اتوکلاو بر روی بتن‌هایی که در آنها از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شده است با عملکرد آن بر روی بتن‌های با سیمان پوزولانی متفاوت می‌باشد. تاثیر اتوکلاو در مقاومت فشاری بتن با سیمان پرتلند تیپ II با افزایش زمان نگهداری بتن در فشار ۲ مگاپاسکال، کاهش می‌یابد. در حالی که این نسبت برای بتن با سیمان پوزولانی با افزایش زمان نگهداری در فشار ۲ مگاپاسکال، افزایش

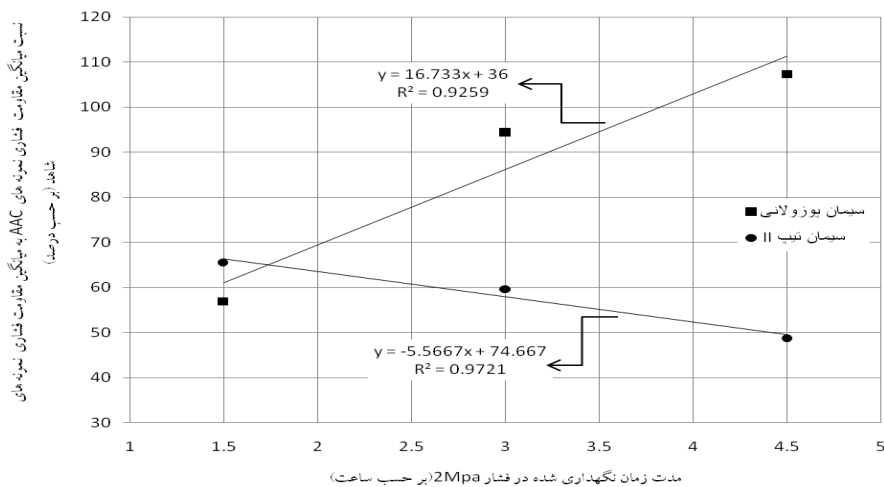
می‌باید. به نظر می‌آید که مدت زمان بهینه نگهداری بتن در فشار ۲ مگاپاسکال، که بیشترین تاثیر را بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی دارد برای بتن‌هایی که با سیمان پرتلند تیپ II ساخته شده‌اند کمتر از ۱/۵ ساعت و برای بتن‌های ساخته شده با سیمان پوزولانی بیشتر از ۴/۵ ساعت است. آشکار است که برای رسیدن به مدت زمان بهینه می‌بایست مدت زمان‌های کمتر از ۱/۵ و بیشتر از ۴/۵ ساعت نیز مورد بررسی قرار گیرد. این مطلب در شکل ۹ بهتر به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۷- نمودار مقایسه میانگین مقاومت فشاری بتن AAC با سیمان پوزولانی با نمونه‌های شاهد (عیار 400 kg/cm^3)



شکل ۸- نمودار مقایسه میانگین مقاومت فشاری بتن AAC با سیمان پرتلند تیپ II با نمونه‌های شاهد (عیار 400 kg/cm^3)



شکل ۹- نمودار نسبت مقاومت فشاری بتن AAC به بتن شاهد با عیار ۴۰۰ برای سیمان‌های مختلف



۵. نتیجه‌گیری

اثر عمل‌آوری در حرارت و فشار بالا برای نمونه‌های بتنی با عیارهای مختلف سیمان پرتلند تیپ II و سیمان پوزولانی تحت رژیم‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

- تاثیر اتوکلاو در مقاومت فشاری بتن با سیمان پرتلند تیپ II با افزایش زمان نگهداری بتن در فشار ۲ مگاپاسکال، کاهش می‌یابد به طوری که بهترین عمل‌آوری بتن AAC در رژیمی با مدت زمان نگهداری ۱/۵ ساعت در فشار ۲ مگاپاسکال حاصل گردید.
- با افزایش عیار سیمان در بتن با سیمان پرتلند تیپ II، نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های AAC به مقاومت فشاری ۱۴ روزهی بتن عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد کاهش می‌یابد.
- تاثیر اتوکلاو در مقاومت فشاری بتن با سیمان پوزولانی با افزایش زمان نگهداری بتن در فشار ۲ مگاپاسکال، افزایش می‌یابد به طوری که بهترین عمل‌آوری بتن AAC در رژیمی با مدت زمان نگهداری ۴/۵ ساعت در فشار ۲ مگاپاسکال حاصل گردید.

۶. قدردانی

با سپاس فراوان از حمایت گروه عمران و مسئولین آزمایشگاه‌های سازه و مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین همکاری مسئولین آزمایشگاه‌های شرکت سپاد اندیش شرق و بنیان بتن که بدون یاری این عزیزان، انجام این پژوهش میسر نبود. همچنین از کمک دوستانی که در طول این پژوهش ما را یاری نمودند سپاسگزاریم.

۷. مراجع

1. Kosmatka, S., Kerkhoff, B. and Panarese, W., "Design and Control of Concrete Mixtures", 13th Edition, Portland Cement Association
2. Popovics, S., "Concrete-making materials", by Hemisphere Publishing Corporation
3. Wylen, V., Borgnakke, S., "Fundamentals of Thermodynamics", 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
4. Ungsongkhun, T., Greepala, V., Nimityongskul, P., "The Effects of the Curing Technique on the Compressive Strength of Autoclaved Aerated Mortar",
5. Wang, H., "Effect of Autoclave Curing on the Compressive Strength and Elastic Modulus of Lightweight Aggregate Concrete", , Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung Univ. of Applied Sciences
6. ASTM Standard C192-06, "Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory"
7. ASTM Standard C151-09, "Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement"
8. ASTM Standard C39-05, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens"