

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزودن پوزولان‌های مختلف در بهبود مشخصات مکانیکی و جذب آب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده

قاسم پاچیده^۱، مجید قلهکی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

mgholhaki@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت ۹۷/۰۵/۱۸

چکیده

بلوک سبک هبلکس (AAC) در ساختمان‌های کوتاه مرتبه و همچنین میانقاب‌ها به عنوان یک عنصر سازه‌ای استفاده می‌شود. مشکل اصلی این بلوک، مقاومت فشاری و کششی پایین و همچنین میزان جذب آب بالای آن بوده که هنگام اجرا آب ملات را به خود جذب کرده و کار را سخت می‌کند. در این مقاله به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و جذب آب این نوع از بلوک‌ها، سه نوع پوزولان شامل میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره ی کوره آهن گدازی با مقادیر ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ وزنی سیمان به دوغاب بلوک اضافه شد. بدین منظور نمونه‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر و استوانه ای به ابعاد 20×10 سانتی متر برای انجام آزمایش‌ها مقاومت فشاری و کششی و جذب آب ساخته شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از پوزولان‌ها در ترکیب بلوک هبلکس، خواص مکانیکی و جذب آب آن را بهبود می‌بخشد. بطوری که استفاده از میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره به ترتیب مقاومت فشاری را تا حدود $1/84$ ، $1/72$ و $1/72$ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از مقدار ۲۱٪ وزنی سیمان از پوزولان‌ها، سبب بهبود مقاومت کششی تا ۲۵٪ می‌شود. بطور کلی استفاده از میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره در مقادیر مختلف وزنی سیمان تا ۵۰٪، ۴۵٪ و ۳۵٪ از مقدار جذب آب بلوک‌های هبلکس می‌کاهد.

کلمات کلیدی: بلوک سبک هبلکس (اتوکلاو)، میکروسیلیس، ژئولیت، سرباره کوره آهن گدازی، جذب آب و مقاومت فشاری و کششی.

۱- مقدمه

استفاده از مصالح سبک به علت کاهش تلاش‌های ناشی از زلزله در سال‌های اخیر گسترش روزافزونی داشته است [1] به همین دلیل تعداد کارخانه‌های تولیدکننده بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده در کشور رشد روزافزونی داشته است. بتن سبک هوادار اتوکلاو شده، بتنی است که شامل سیمان،

آهک، آب و ماسه ی ریزدانه است که به وسیله دستگاه آسیاب گلوله‌ای ریزدانه شده است. اگرچه گاهی استفاده از خاکستر بادی به جای درصدی از مصالح ریزدانه نیز استفاده شده است [2]. این نوع بتن به علت وزن مخصوص کم در حدود ۴۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، دارای خواص عایق حرارتی مناسب نسبت به بتن‌های با چگالی بیشتر بوده

بتن سبک هوادار اتوکلاو شده یک جایگزین مناسب برای استفاده گسترده از ضایعات صنعتی غنی از CaO و SiO_2 است. تعدادی از پژوهشگران به بررسی جایگزینی مواد بازیافتی از جمله مایع مس و سرباره کوره آهن گدازی [15]، خاکستر بادی صنعتی [16] و خاکستر ذغال سنگ [17] به جای ماسه و آهک در تولید بتن سبک هوادار اتوکلاو شده پرداختند.

کاراکورت و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر افزودن ژئولیت طبیعی به پروسه تولید بلوک سبک اتوکلاو پرداختند [18-19]. همچنین طبق پژوهش‌های کاراکورت و همکاران، ژئولیت استفاده شده در دو سایز ۱۰۰ میکرومتر و ۰/۵-۱ میلی‌متر بوده و با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین سیمان شدند. نتایج نشان داد که با توجه به طرح اختلاط استفاده شده و مقادیر جایگزینی ژئولیت، مقدار ۵۰٪ جایگزینی بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر نمونه‌ها خواهد داشت [18].

در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین عدم وجود پژوهش‌های جدی در چندین سال اخیر، به منظور بهبود خواص بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده (در این مقاله از بلوک‌های تولیدی کارخانه بنای سبک قدس رضوی استفاده شده است) که بتواند خواصی از جمله مقاومت فشاری، کششی و میزان جذب آب آن را بهبود بخشد، با افزودن پوزولان‌هایی از جمله میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی که رایج‌ترین و بهترین مواد پوزولانی در دسترس هستند، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقاومتی و جذب آب نمونه‌ها، رابطه ریاضی برای پیش بینی نتایج طبق طرح اختلاط بکار رفته، ارائه شد.

۲- فرآیند ساخت بلوک سبک هبلکس (اتوکلاو) در کارخانه بنای سبک قدس رضوی

شرکت کارخانجات بنای سبک قدس رضوی به عنوان نخستین تولید کننده بلوک‌های هوادار اتوکلاو شده (AAC) در سال ۱۳۵۳ تأسیس و با نام تجاری هبلکس و بهره‌گیری از

و همچنین باعث کاهش وزن ساختمان نیز می‌شود و برای همین، کاربرد آن در سطح جهان به ویژه در کشورهای لرزه‌خیز در حال گسترش است [3]. همچنین از بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده به عنوان سیستم سازه‌ای برای ساختمان‌های کوتاه مرتبه با ویژگی‌های زیر استفاده می‌شود [4-7]:

- چگالی خیلی کم نسبت به بتن معمولی (یک‌ششم تا یک‌سوم بتن معمولی) که می‌تواند باعث حمل و نقل آسان و همچنین کاهش نیروی ناشی از زلزله در ساختمان‌هایی که از این محصول استفاده می‌کنند، شود.

- حدود ۳۰ الی ۹۰ درصد حجم آن را حفره در برمی‌گیرد که در کنار کاهش وزن این بتن می‌تواند عایق صوتی و حرارتی مناسبی در مقایسه با بتن معمولی باشد.

- کار کردن با آن خیلی ساده است، بطوری که می‌توان با اهر معمولی و ابزار نجاری ساده آن را به شکل‌های موردنظر برید.

- هرگونه ضایعاتی که در طول فرآیند تولید این نوع بتن رخ دهد، دوباره در خط تولید قرار می‌گیرد

- انرژی لازم برای تولید اولیه این محصول خیلی کم است.

به علت وجود مقدار زیاد سیلیس و کلسیم موجود در بلوک سبک هوادار، از ضایعات آن می‌توان ماده ژئولیت بدست آورد که شکل آن تقریباً مشابه خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی است [8-13]. اگرچه در سالهای اخیر پژوهش‌های محدودی در رابطه با جایگزینی پوزولان‌های مختلف به اختلاط بلوک سبک هبلکس صورت پذیرفته است اما به صورت جدی به آن پرداخته نشده است.

Xiao و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده حاوی سرباره مس و سرباره کوره آهن‌گدازی پرداختند. چگالی و مقاومت فشاری بلوک آزمایش شده به ترتیب برابر ۶۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۴ مگاپاسکال بوده است. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که افزودن سرباره مس و کوره آهن‌گدازی در فرآیند هیدراتاسیون بلوک موثر است [14].

حرکت درآمده و توسط ریسمان های نازک فلزی در راستای افقی و قائم برش خورده می شود. لازم به ذکر است که اگر قالب در زمان معین از یک جدا نشود، بیش از اندازه سفت شده و هنگام برش خوردن دچار ترک های عمیق شده و غیرقابل استفاده می شود. یکی از مزایای بلوک سبک هبلکس نسبت به سایر بلوک ها، امکان ورود مجدد آن به چرخه تولید بوده پس می توان قالب هایی که ترک خوردند را از طریق حوضچه هایی که در کف تعبیه شده دوباره به خط تولید برگرداند. پس از اتمام عملیات برش خوردن کیک، روی صفحات تخت فلزی قرار گرفته و به مدت ۱۲ ساعت در دمای حدود ۲۲۰ درجه سانتی گراد با فشار ۱۲ اتمسفر در داخل دستگاه اتوکلاو قرار می گیرد (شکل ۱-ت). پس از خارج شدن قالب از دستگاه اتوکلاو، آماده ی بسته بندی و حمل می شود (شکل ۱-ث).

شکل ۱. مراحل تولید بلوک هبلکس



الف) ریختن دوغاب بلوک از سیلو به داخل قالب



ب) سالن پیش گرمایش



پ) هدایت قالب با جرثقیل به سمت خط برش

ماشین آلات مدرن و تکنولوژی روز دنیا، فعالیت خود را آغاز و امروزه با ظرفیت اسمی تولید روزانه ۱۰۰۰ مترمکعب در دو خط تولید مجزا محصولات خود را به منظور عرضه مصالح ساختمانی نوین و کارا هماهنگ با مبحث ۱۸ و ۱۹ مقررات ملی ساختمان در ابعاد مختلف به مهندسين مشاور و پیمانکاران عرضه می کند. مشخصات فنی بلوک های تولید شده در این کارخانه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی بلوک های تولید شده در کارخانه بنای سبک

قدس رضوی	
Compressive strength	35-40 kg/cm ²
Bending strength	16.6 kg/cm ²
Thermal expansion coefficient	18×10 ⁻⁶ 1/k
Heat transfer coefficient	0.17 W/K
Nominal density of the block	550-650 kg/m ³

Table. 1. Technical Specifications of Blocks Produced at the Ghods Razavi Structure Factory

برای تولید بلوک سبک هبلکس، فرآیند تقریباً مشابهی بین کارخانجات تولید داخل ایران طی می شود، که در اینجا به بیان فرآیند تولید بلوک سبک هبلکس کارخانه بنای سبک قدس رضوی پرداخته می شود. ابتدا مواد مختلف (آهک، سیمان، آب، پودر آلومینیوم و...) در داخل سیلوی بزرگی با یکدیگر ترکیب شده و تشکیل دوغاب بلوک را می دهند (شکل ۱-الف). سپس توسط لوله ای که در زیر آن (سیلوی بزرگ) تعبیه شده با شدت به داخل ظرف مکعب مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع ۵، ۱/۴۰ و ۰/۶۰ متر در مدت زمان حدود ۱ دقیقه تا نیمی از ارتفاع قالب ریخته می شود (شکل ۱-الف). سپس به کمک خطوط ریلی تعبیه شده در کف کارخانه، به داخل سالن پیش گرمایش با درجه حرارت ۵۰ درجه ی سانتی گراد و رطوبت ۸۰ درصد شکل (۱-ب) هدایت شده و به مدت حدود ۳ الی ۴ ساعت در آن جا باقی می ماند. باید توجه شود که ورودی و خروجی سالن گرمایش به خوبی پوشانده شود تا مانع از اتلاف رطوبت و حرارت شود. پس از آماده شدن قالب (اصطلاحاً آماده شدن کیک بلوک)، از سالن پیش گرمایش به کمک جرثقیل سقفی تعبیه شده در کارخانه وارد قسمت برش می شود (شکل ۱-پ). قالب در این قسمت بر روی ریلی که تعبیه شده به آرامی به

در کارخانه بر طبق استاندارد EN 196-6 [20] دارای سطح مخصوص ۲۷۶۶ سانتی‌متر مربع بر گرم که ۸۵٪ آن از الک ۹۰ میکرون عبور می‌کند، است. برای تولید گاز در تشکیل بلوک، از پودر آلومینیوم با سطح مخصوص ۱۸۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و خلوص آلومینیوم در پودر ۷۰٪ استفاده شد. در جدول (۲) ویژگی‌های آهک مصرفی آورده شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های آهک مصرفی

the amount of CaO	Temperature release time (min)	Released temperature (° C)
85.2%	3	65.3

Table 2. Characteristics of Lime Consumption

همچنین سیمان مصرفی از نوع تپ دو کارخانه سیمان شاهرود است که آنالیز فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جداول (۳ و ۴) آورده شده است.

جدول ۳: آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی

test method	Factory standard	National Iranian 389 Standard	Test results	Description of test	ردیف
390	At least 2900	At least 2800	3055	Blin surface (cm / g)	1
391	Maximum 0.6	Maximum 0.8	0.036	Autoclaving test (percent)	2
Wicket Needle Time					3
392	At least 70	At least 45	145	Elementary (min)	1-3
392	Maximum 5	Maximum 6	3:45	Ultimate (Speed)	2-3
Compressive strength (kg / cm ²)					4
393	-	-	-	1 days	1-4
393	-	-	-	2 days	2-4
393	At least 170	At least 100	۲۴۵	3 days	3-4
393	At least 250	At least 175	310	7 days	4-4
393	At least 350	At least 315	411	28 days	5-4
Heat of hydration (calories per gram)					5
394	-	-	-	7 days	1-5
394	-	-	-	28 days	2-5

Table 3. Physical analysis of cement consumption



(ت) انتقال کیک به داخل اتوکلاو



(ث) بسته بندی و حمل بلوک های تولید شده

Fig. 1. The stages of the production of the block of AAC

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه و آزمایش جذب آب روی بلوک سبک هبلکس تولید شده در کارخانه بنای سبک قدس رضوی واقع در شهرستان قرچک انجام شد. بدین منظور، انواع پوزولان‌ها شامل میکروسیلیس، زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ وزنی سیمان به دوغاب بلوک اضافه شد. شکل (۲) تصویر نمونه‌ها در سالن پیش گرمایش را نشان می‌دهد.

شکل ۲: تصویر نمونه‌ها در سالن پیش گرمایش



Fig. 2. Sample images in the preheating hall

۳-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

برای ساخت بلوک سبک هبلکس، مواد اولیه شامل آهک، سیلیس، سیمان و پودر آلومینیوم نیاز داریم. سیلیس مصرفی

جدول ۴. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

Row	Description of test	Test results	National Iranian Standard 389	Factory standard	test method
1	(%) SiO ₂	21.11	At least 20	At least 20.5	
2	(%) Al ₂ O ₃	4.42	Maximum 6	Maximum 5	
3	(%) Fe ₂ O ₃	3.96	Maximum 6	Maximum 5	1692
4	(%) CaO	63.36	-	-	
5	(%) MgO	1.51	Maximum 5	Maximum 25	
6	(%) SO ₃	2.70	Maximum 3	Maximum 2.9	
7	(%) Na ₂ O	0.32	-	-	1695
8	(%) K ₂ O	0.51	-	-	
9	(%) L.O.I	2.02	Maximum 3	Maximum 2.9	
10	Acid remaining insoluble (%)	0.32	Maximum 0.75	Maximum 0.70	1692
11	Free lime (%)	1.23	-	-	
12	(%) C ₃ S	53	-	-	
13	(%) C ₂ S	20.8	-	-	
14	(%) C ₃ A	5	Maximum 8	Maximum 6.5	

Table 4. Chemical analysis of cement consumption

همچنین آنالیز شیمیایی پوزولان‌های استفاده شده در ساخت بلوک سبک در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵. آنالیز شیمیایی پوزولان‌های استفاده شده

	silica fume	Zeolite	Slag iron furnace
H ₂ O	0.8	-	1-7
SiC	0.5	-	-
C	0.3	-	-
SiO ₂	96.4	۶۷/۷۹	34-40
Fe ₂ O ₃	0.87	۱/۴۴	0.3-1.3
Al ₂ O ₃	1.32	۱۳/۶۶	7-11
CaO	0.49	۱/۶۸	34-40
MgO	0.97	۱/۲	6-9
Na ₂ O	0.31	-	0.25-0.75
K ₂ O	1.01	-	0.3-1.3
P ₂ O ₅	0.16	-	-
SO ₃	۰/۱۰	۰/۵	-
CL	۰/۰۴	-	-
S	-	-	۱/۵-۰/۹

Table 5. Chemical analysis of pozzolans used

۲-۳- طرح اختلاط بتن مصرفی

در جدول (۶) طرح اختلاط بلوک تولید شده در هر متر مکعب آورده شده است. کلیه مراحل اختلاط، ساخت و عمل

آوری نمونه‌ها در کارخانه بنای سبک قدس رضوی انجام شد. یکی از نکات بسیار مهم در تهیه و ساخت بلوک‌های سبک هبلکس در کارخانجات، تفاوت‌های جزئی در طرح اختلاط در هر میکسر است. به بیان دیگر، برای اینکه مقدار مواد موجود در اختلاط در نمونه‌ها متفاوت نباشد، کلیه طرح‌ها از یک میکسر در زمان‌های برابر انتخاب شدند. همچنین نکته قابل توجه دیگر در ساخت بلوک‌های سبک هبلکس این است که، اگر ارتفاعی که ملات در درون ظرف یا قالب ریخت می‌شود، بیشتر از حدود ۲۵ سانتی‌متر باشد، پس از حدود نیم ساعت قسمتی از دوغاب بلوک ته‌نشین شده و همگنی طرح زیر سوال می‌رود. بدین منظور با توجه به اینکه نمونه‌های استاندارد استفاده شده دارای ارتفاع‌های ۲۰ (نمونه استوانه‌ای) و ۱۰ (نمونه‌های مکعبی) سانتی‌متر بوده، پس چنین مشکلی رخ نخواهد داد.

جدول ۶. طرح اختلاط بلوک سبک هبلکس (کیلوگرم بر

مترمکعب)

Aluminum powder	Plaster	Lime	Silica	water	cement
0.350	0.260	100	300	250	100

Table 6. Block mixing plan per cubic meter (kg)

بنابراین برای تولید دوغاب بلوک، ابتدا به مدت حدود ۱ دقیقه دوغاب سیلیس و سه‌چهارم آب با یکدیگر ترکیب شدند. سپس سیمان و پوزولان اضافه شده و حدود ۳۰ ثانیه با یکدیگر میکس شدند. در نهایت آب باقیمانده، گچ و پودر آلومینیوم به ترکیب اضافه شده و حدود ۴۵ ثانیه باهم ترکیب شدند. باید توجه شود، به دلیل اینکه پودر آلومینیوم بسیار واکنش پذیر است و حرارت بالایی را از خود ساطع می‌کند، بنابراین عملیات میکس شدن باید در کمتر از ۵ دقیقه انجام شده و سپس قالب‌ریزی شود.

بعد از قالب‌ریزی، نمونه‌ها به مدت ۳ الی ۴ ساعت در دمای حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت ۸۰ درصد در داخل گرمخانه قرار گرفتند. سپس ملات خمیری (کیک) از درون قالب‌ها باز شده و در دستگاه اتوکلاو با دمای حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۲ اتمسفر (۱۲ Atmosphere) قرار گرفته و پس از مدت ۱۲ ساعت عمل‌آوری نهایی به اتمام رسیده و بلوک آماده استفاده شد.

میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب با حروف M، Z و S نشان داده شدند.

جدول ۷. چگونگی نامگذاری نمونه‌ها

Concept	Symbol
Block containing silica fume	M
Block contains zeolite	Z
Blast containing slag iron furnace	S

Table. 7. How to name the samples

۴- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از اتمام مراحل ساخت، تولید و عمل آوری نمونه‌های بلوک، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و جذب آب طبق استاندارد روی آن‌ها انجام شد.

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نمای کلی چگونگی انجام آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی که بر طبق استاندارد EN 679 [22] انجام شده است، در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها



Fig. 4. Testing the compressive strength of the samples

همان‌گونه که از شکل (۴) مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک که به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر واقع شده‌اند، قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار گرفتند. برای انجام این آزمایش نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و از هر نمونه تعداد ۵ عدد ساخته شدند. نمونه‌ها در دمای کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده تا مقدار رطوبت آن‌ها به

شکل‌های (۳-الف تا ۳-پ) تصاویر پوزولان‌های بکار رفته در بتن متخلخل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میکروسیلیس و ژئولیت رنگ روشنی داشته اما خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی تقریباً به حالت خاکستری رنگ هستند.

شکل ۳. تصاویر پوزولان‌های استفاده شده



ب) ژئولیت

الف) میکروسیلیس



پ) سرباره کوره آهن‌گدازی

Fig. 3. Pozzolans used images

۳-۳- روش آزمایش

بلوک‌های ساخته شده دارای مقاومت زمینه یکسان است. بدین معنی که طرح اختلاط پایه آن‌ها مطابق جدول (۴) بوده و به مقادیر ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ وزنی سیمان از انواع پوزولان‌ها شامل میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره ی کوره آهن‌گدازی به آن اضافه شد.

پس از ساخت بلوک‌ها، کلیه نمونه‌ها در زیر جک تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی و همچنین آزمایش جذب آب قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه (۳۹۲۵ نیوتن بر ثانیه) و ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه (۱۵۷۰ نیوتن بر ثانیه) بر طبق استاندارد EN-12390-13 [21] انتخاب شد. چگونگی نام گذاری نمونه‌ها مطابق جدول (۷) است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی

شکل ۵: مقاومت فشاری برحسب درصد پوزولان

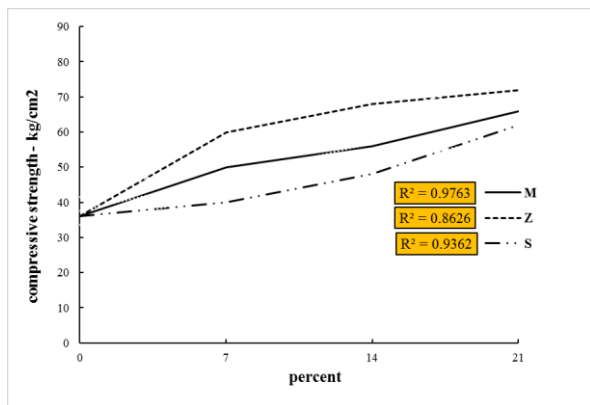


Fig. 5. Compressive strength per pozzolan percentage

به منظور ارزیابی و درک بهتر از نتایج بدست آمده، مقادیر مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها به تفکیک برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸. مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

Specimen name	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Average
Reference	35.81	36.33	36.20	34.75	36.91	36
M-7%	51.02	48.39	50.78	49.35	50.46	50
M-14%	55.49	57.22	56.01	53.67	57.61	56
M-21%	64.22	66.45	67.80	65.92	65.61	66
Z-7%	60.14	61.21	58.56	62.65	57.44	60
Z-14%	68.02	68.55	69.03	68	66.40	68
Z-21%	73	70.45	71.53	70.60	74.38	72
S-7%	41.72	40.40	38.05	39.72	40.11	40
S-14%	47.55	48.28	48.10	47.14	48.93	48
S-21%	60.89	62	63.06	62.56	61.49	62

Table 8. Compressive strength values of specimens (kg/cm²)

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیر مستقیم یا روش برزلی بر طبق استاندارد ASTM C496 [23] استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته بطوری که هیچگونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیرو، منجر به شکست نمونه می‌شود. نمونه‌ها در قالب‌های فلزی استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی متر ساخته شده و برای رسیدن رطوبت درونی محصول نهایی به ۴٪ وزن کل، حدود

حدود ۶ درصد جرمی رسید. سپس برای جلوگیری از تغییرات رطوب، برای حداقل ۲ ساعت پس از تست نمونه‌ها تحت محافظت قرار گرفتند تا از تعادل حرارتی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی (دمای حدود ۲۰ درجه ی سانتی گراد) اطمینان حاصل شود.

برای انجام آزمایش، سطوح فک دستگاه بارگذاری کاملاً تمیز شده و نمونه‌ها در مرکز بین دو فک دستگاه قرار گرفتند. بار به صورت محوری عمود بر جهت ریختن بلوک در قالب اعمال شد. نمونه‌ها با نرخ ثابت تا رسیدن به مرز گسیختگی، بارگذاری شده و ماکزیمم باری که توسط نمونه تحمل شد (باری که جک ثبت کرده است)، ثبت شد.

شکل (۵) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را برحسب درصد پوزولان نشان داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزودن انواع پوزولان‌ها با درصدهای مختلف (۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪) مقاومت فشاری افزایش یافته است. علت این پدیده را می‌توان به آزاد شدن ژل C-S-H در ترکیبات مرتبط دانست. به طوری که با افزایش مقدار استفاده از پوزولان در بلوک سبک اتوکلاو، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در این بین، استفاده از ژئولیت بیشترین تأثیر را داشته به گونه‌ای که تا ۲ برابر مقاومت فشاری را نسبت به نمونه شاهد (نمونه‌ای که بدون پوزولان است) افزایش داده است که این مقدار برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره به ترتیب برابر با ۸۳٪ و ۷۲٪ است. علت این افزایش مقاومت بیشتر ترکیبات حاوی ژئولیت را می‌توان به زودتر به مقاومت نهایی رسیدن آن نسبت به ترکیبات حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی مرتبط دانست. هنگامی که درصد سیلیسیم در ترکیبات افزایش یابد، حضور ژئولیت باعث ایجاد بافت پیوندی مناسبی شده و هنگام قرار گرفتن در فشار ۱۲ اتمسفر، این بافت مستحکم‌تر می‌شود.

همچنین از ضریب رگرسیون بدست آمده از نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها شکل (۵) مشاهده می‌شود که داده‌ها از پیوستگی مناسبی برخوردار و نتایج قابل اطمینان هستند.

افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد نداشته و با افزایش مقدار استفاده از آن، بر مقاومت کششی افزوده شد به گونه‌ای که شیب افزایش مقاومت کششی آن در ناحیه‌ی ۱۴ تا ۲۱ درصد بیشتر از شیب ناحیه‌ی ۷ تا ۱۴ درصد است. در نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن گدازی، در مقدار استفاده ۷٪ از آن در بلوک مقاومت کششی به مقدار کمی افزایش یافته و با افزایش مقدار استفاده از آن نیز رشد بیشتری در مقاومت رخ داد. بطور کلی در نمونه‌های حاوی سرباره، استفاده کمتر از ۷ درصد و بیشتر از ۲۱ درصد تأثیر چندانی در بهبود مقاومت کششی آن ندارد. همچنین از ضریب رگرسیون بدست آمده از نمودار تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که داده‌ها از پیوستگی مناسبی برخوردار، و نتایج قابل اطمینان هستند.

شکل ۷. مقاومت کششی بر حسب درصد پوزولان

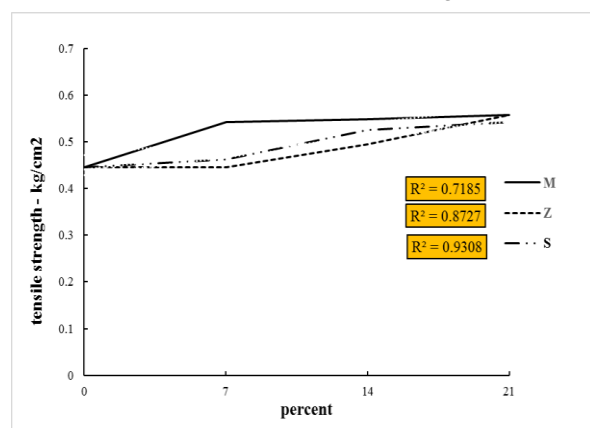


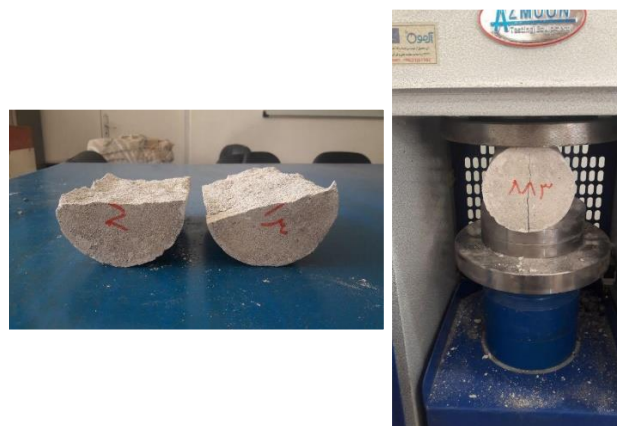
Fig. 7. Tensile strength in terms of pozzolan

۳-۴- آزمایش جذب آب (دوام)

آزمایش جذب آب نمونه‌ها مطابق استاندارد DIN EN 772-11 انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر به مدت ۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه در ارتفاع ۵ میلی‌متری آب قرار گرفته و وزن ابتدایی و انتهایی آن اندازه‌گیری شد. شکل (۸) نمای کلی نمونه‌ها پس از قرارگیری در آب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بسته به نوع پوزولانی که در نمونه‌ها استفاده شده است، مقدار ارتفاع جذب آب در آن‌ها متغیر است.

۴۸ ساعت نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه در گرمکن قرار گرفتند. برای سرد شدن نمونه‌ها به صورت تدریجی تا رسیدن به دمای اتاق به دلیل جلوگیری از تغییرات مخرب در ساختار بلوری، درب گرمکن بسته ماند و پس از آن نمونه‌ها آماده آزمایش شدند. شکل (۶) تصویری از نمونه استوانه‌ای برای انجام آزمایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با توجه به مقاومت کششی بسیار کم این نوع از بلوک‌ها، نمونه‌ها به صورت دونیم‌شدن کاملاً شکافته می‌شوند.

شکل ۶. چگونگی انجام آزمایش مقاومت کششی



الف) چگونگی انجام آزمایش
ب) شکست نمونه

Fig. 6. How to test the tensile strength

شکل (۷) روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها برحسب درصد پوزولان‌های بکار رفته را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، مقاومت کششی در مقادیر استفاده ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته، بنابراین در همان مقدار ۷٪ مقاومت کششی به میزان ۲۳٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. علت این امر را می‌توان به شکننده بودن ساختار کلی بلوک هبلکس و عدم وجود سنگدانه‌های درشت از قبیل ماسه و شن مرتبط دانست، چرا که شن و ماسه‌ای در ترکیبات بلوک وجود ندارد تا مانند بتن معمولی بتواند در مقابل بارهای زیاد استقامت کرده و بصورت ترد نشکند. در نمونه‌های حاوی زئولیت، استفاده از مقدار ۷٪ تفاوتی در

شکل ۸. نمای کلی نمونه ها پس از قرارگیری در آب



Fig. 8. Overview of samples after being placed in water

میکروسیلیس به مقدار ۲۱٪ وزنی سیمان تا حدود ۲ برابر از میزان جذب آب نمونه ها کاسته شد.

اما در مدت زمان ۹۰ دقیقه ماندگاری نمونه ها در عمق ۵ میلی متری آب، روند تغییرات جذب آب کمی با مدت های ۱۰ و ۳۰ دقیقه متفاوت است. در تمامی نمونه ها در مقدار ۱۴٪ بر میزان جذب آب نسبت به مقادیر ۷٪ و ۲۱٪ افزوده شد. کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه های حاوی میکروسیلیس و ژئولیت در مقادیر استفاده ی ۲۱٪ است.

با جمع بندی نتایج بدست آمده از آزمایش جذب آب نمونه ها در زمان های مختلف می توان به این نکته اشاره نمود که با افزایش مقدار استفاده از پوزولان در ترکیب بلوک سبک هبلکس، از مقدار جذب آب نسبت به نمونه شاهد کاسته می شود. بنابراین دوام نمونه ها در مقابل خطرات شیمیایی و محیطی افزایش یافته و طول عمر بلوک افزایش می یابد. افزایش دوام به معنی کاهش تخلخل نمونه و کاهش ورود حملات شیمیایی و جانوران موزی است.

شکل ۹. درصد جذب آب نمونه ها پس از ۱۰ دقیقه

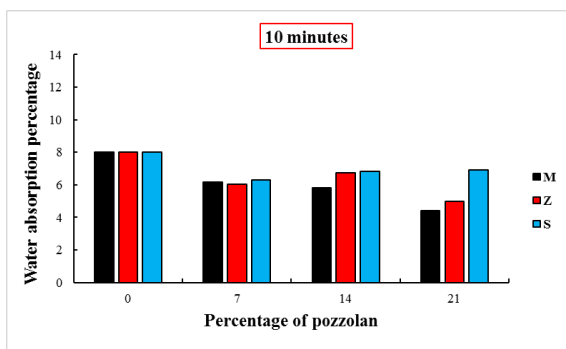


Fig. 9. Percentage of sample water absorption after 10 minutes

شکل ۱۰. درصد جذب آب نمونه ها پس از ۳۰ دقیقه

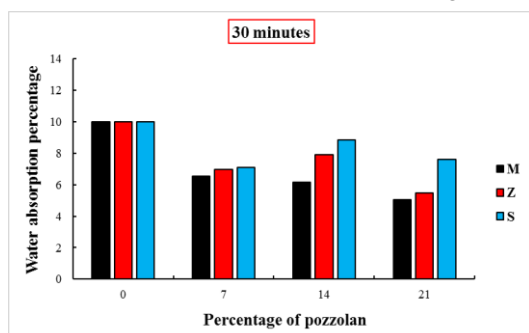


Fig. 10. Percentage of sample water absorption after 30 minutes

از آنجایی که یکی از معضلات اجرایی استفاده از بلوک سبک هبلکس، جذب آب بالای آن است، پس بیش از پیش توجه به این مسأله که بتوان با راهکارهای مناسبی از میزان جذب آب آن کاست، حائز اهمیت است. شکل های (۹ تا ۱۱) درصد جذب آب نمونه ها در مدت های مختلف با مقادیر مختلف پوزولان را نشان می دهند. همانطور که ملاحظه می شود در تمامی نمونه ها با درصدهای مختلف و با زمان های مختلف (۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه) با افزایش زمان بر درصد جذب آب نمونه ها افزوده می شود اما مقادیر آن ها با یکدیگر متفاوت است.

در مدت زمان ۱۰ دقیقه با افزایش درصد استفاده از میکروسیلیس، از مقدار جذب آب نمونه ها کاسته شده اما در رابطه با نمونه های حاوی سرباره این مقدار با شیب ملایمی پیوسته افزایش می یابد. در نمونه حاوی ژئولیت، در مقدار استفاده ۱۴٪ درصد جذب آب نسبت به ۷٪ و ۲۱٪ بیشتر است که نشانگر رفتار متفاوت این ماده در جذب آب است. البته با پژوهش بیشتر در این زمینه می توان به نتایج جدیدتری نیز دست یافت. از میان تمامی نمونه ها در مدت زمان ۱۰ دقیقه قرارگیری نمونه ها در آب، استفاده از میکروسیلیس به مقدار ۲۱٪ وزنی سیمان به علت آزاد شدن ژل میکروسیلیس در شرایط رطوبتی، تا حدود ۲ برابر از میزان جذب آب کاست.

در مدت زمان ۳۰ دقیقه قرارگیری نمونه ها در درون آب به ارتفاع ۵ میلی متر، نیز روند کلی افزایش یا کاهش در میزان جذب آب مشابه مدت زمان ۱۰ دقیقه است. با بکار بردن

- بطور کلی استفاده از پوزولان در ترکیب دوغاب بلوک سبک هبلکس باعث بهبود مقاومت فشاری آن می‌شود. بطوری که با افزایش مقدار استفاده از میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره به ترتیب تا ۱/۸۴، ۲ و ۱/۷۲ برابر مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. اما در مقادیر بالا (۲۱٪) نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره، افزایش مقاومت را با شیب کمتری سبب می‌شوند.

- بر طبق نتایج، با افزایش میزان استفاده از پوزولان در ترکیب بلوک هبلکس تا حدود ۲۵ درصد باعث ارتقاء مقاومت کششی آن می‌شود. در این بین با مقدار استفاده ۷٪ وزنی سیمان از پوزولان، نمونه‌های حاوی ژئولیت و سرباره افزایش مقاومت چندانی را ایجاد نکرده و همچنین در درصدهای ۷، ۱۴ و ۲۱ نمونه‌های حاوی میکروسیلیس تقریباً به یک میزان باعث افزایش مقاومت کششی شدند (حدود ۲۵ درصد). بنابراین با توجه به سیر تغییرات مقاومتی ایجاد شده، می‌توان بیان نمود که استفاده از پوزولان به مقدار ۲۱٪ وزنی سیمان، افزایش مقاومت کششی مطلوبی را دربر دارد.

- بطور کلی استفاده از میکروسیلیس در ترکیب بلوک هبلکس در مدت ۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه به ترتیب تا مقدار ۴۵٪، ۵۰٪ و ۳۷٪ جذب آب را کاهش می‌دهد. همچنین نمونه‌های حاوی ژئولیت نیز در این مدت‌ها به ترتیب تا مقدار ۳۷٪، ۴۵٪ و ۲۴٪ باعث کاهش جذب آب می‌شوند. نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب تا مقدار ۱۳٪، ۲۴ و ۳۵٪ از میزان جذب آب بلوک سبک هبلکس کم می‌کند. بنابراین استفاده از میکروسیلیس برای کاهش میزان جذب آب بلوک سبک هبلکس نسبت به سایر پوزولان‌ها توجیه پذیرتر است.

شکل ۱۱. درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۹۰ دقیقه

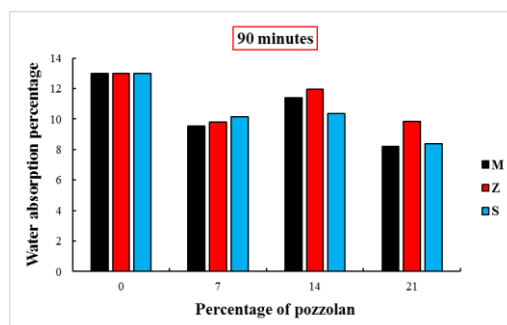


Fig. 11. Percentage of sample water absorption after 90 minutes

۶- رابطه مقاومت فشاری و کششی

در شکل (۱۲) تغییرات مقاومت فشاری برحسب مقاومت کششی برای هر نمونه به همراه رابطه پیشنهادی بین آن‌ها نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، بطور کلی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های حاوی ژئولیت در بالاترین رده قرار دارند. همچنین در نمونه‌ها حاوی سرباره، با افزایش مقاومت کششی بر مقدار مقاومت فشاری نیز افزوده شده اما در سایر نمونه‌ها کاهش پیدا کرد.

شکل ۱۲. رابطه مقاومت فشاری و کششی

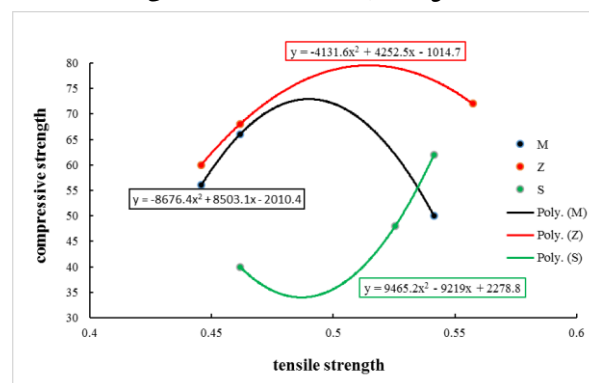


Fig. 12. The relationship between compressive strength and tensile strength

References

- [1] Al-Mudhaf, H. A. & Attigbe E. K. 1996 Performance of autoclaved aerated-concrete masonry walls in Kuwait. *Materials and Structures*, 29, 448-452.
- [2] Chusid, M. 1999 Building with Autoclaved Aerated Concrete, *Masonry Construction*.
- [3] ACI 523.4R. 2009 Guide for design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels.

۵- مراجع

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور بهبود خواص مکانیکی و کاهش میزان جذب آب بلوک‌های سبک هبلکس (اتوکلاو)، تعدادی نمونه مکعبی و استوانه‌ای استاندارد حاوی انواع پوزولان‌ها شامل میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ وزنی سیمان به دوغاب بلوک اضافه شد، که نتایج زیر حاصل شد:

- [15] Huang X., Ni W., Cui W., Wang Z. & Zhu L. 2012 Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 27(1), 1-5.
- [16] Hauser A., Eggenberger U. & Mumenthaler T. 1999 Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 297-302.
- [17] Kurama H., Topçu I. B., & Karakurt C. 2009 Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 767-773.
- [18] Karakurt C., Kurama H. & Topcu I. B. 2010 Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 32, 1-8.
- [19] Albayrak M., Yörükoğlu A., Karahan S., Atlıhana S., Aruntaş Y. and Girgin I. 2007 Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment*, 42(9), 3161-3165.
- [20] EN 196-6. 2010 Methods for testing cement determination of fineness. Brussels, Belgium: *European Committee for Standardization*.
- [21] NF EN 12390-13 AFNOR. 2013 Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, 18-455.
- [22] BS EN 679, 2005 Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete.
- [23] ASTM C469/C496. 2011 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [4] Memari, A. M., Grossenbacher, S. V. & Iulo, L. D. 2012 Comparative evaluation of structural and water penetration performance of three different masonry wall types for residential construction. *JCES*, 1(1), 2-9.
- [5] Al-Khaled, G. 2000 Hebel design analysis program, A Thesis Presented to the Faculty of the School of Architecture. University of South California.
- [6] David, Z., Yankelevsky, U. & Itzhak, A. 1998 Autoclaved aerated concrete behavior under explosive action. *Construction and Building Materials*. 12(6-7), 359-364.
- [7] Holta, E. & Raiviob, P. 2005 Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. *Cement and Concrete Research*. 35(4), 796-802.
- [8] Aiello C., Colella, D. G. & Casey, L. B. 1980 Sand, Experimental zeolite crystallization in rhyolitic ash – sodium salt systems, 5th International Zeolite Conference (Ed.: L. C. V. Rees), London, UK, 49-55.
- [9] Holler H. & Wirsching, U. 1985 Zeolite Formation from Fly Ash. *Fortschr. Miner*, 63, 21-43.
- [10] Grutzeck M. & Siemer D. D. 1997 *J. Am. Ceram. Soc.* 80, 2449–2453.
- [11] Maenami H., Watanabe O., Ishida H. & Mitsuda T. 2000 *Am. Ceram. Soc.* 83, 1739–1744.
- [12] Miyake M., Tamura, C. & Matsuda M. 2002 *J. Am. Ceram. Soc.* 85, 1873–1875.
- [13] Murayama N., Yamamoto H. & Shibata J. 2002. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77, 280–286.
- [14] Huang X. Y., Ni W., Cui W. H., Wang Z. J. & Zhu L. P. 2012 Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 27, 1-5.

Experimental Study on the Effect of Different Pozzolans on Improving Mechanical Properties and Water Absorption of Autoclaved Aerated Concrete

Ghasem Pachideh¹, Majid Gholhaki^{*2}

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

mgholhaki@semnan.ac.ir

Abstract

Increasing builders waste of autoclaved aerated concrete (AAC) require new concepts for future recovery processes. There are two main aspects, underlining this basic necessity for developing AAC recycling models. Environment protection ranks first because of the risk of groundwater pollution by compounds leached out from AAC waste during its deposition. The second aspect is raw materials preserving because of the high content of the valuable potential recyclable calcium- silicate-hydrate phase 11 Å tobermorite ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) besides pure quartz and minor aluminate. In general the main constituents of AAC amount around 40–50 wt-% for tobermorite and approx. 30–40 wt-% for quartz. The tobermorite phase is causing the AAC strength and forms hydrothermally at 180–200 °C and 10–12 bar pressure during autoclaving from the raw materials lime, quartz, and water. Minor parts of aluminum powder for pore-forming and small amounts of cement and anhydrite for better handling of the AAC-green bodies are the further additives of the AAC raw materials mixture. The high silicate content, as well as the valuable calcium parts, display AAC waste as an interesting raw material for zeolite formation as known from the treatment of fly ashes and slags. According to their outstanding properties zeolites are used in sorption techniques, catalysis, molecular sieving, and ion exchange processes, and in previous studies, we already could show zeolite hydro sodalite formation beside hydrogarnet and other valuable calcium- and sodium aluminosilicates applying NaAlO_2 as an aluminum source in the reaction mixture. Those previous syntheses were performed in water and under low alkaline (1 m NaOH) and low acid (1 m citric acid) conditions. This mild reaction milieu was found to be responsible for relatively low AAC conversion rates and the formation of multiphase products. In reference, the aluminum source NaAlO_2 was added to the AAC always before the leaching reactions were performed. In contrast, the presented study investigates leaching of pure AAC in stronger alkaline media of 4–8 m NaOH and the combination with acid treatment, before the aluminate is added for the final crystallization process. This procedure is expected to be much more effective to synthesize uniform zeolite products at 100% AAC conversion rates, as shown in the following experimental study. Autoclaved Aerated Concrete (AAC) used in low-rise buildings and infilled frames as a structural member. One of the weaknesses of AAC is low mechanical strength. In addition, AAC blocks absorb water of mortar which can lead to executive problems. In this paper, the effect of silica fume, zeolite and granulated blast furnace slag (7%, 14% and 21% by weight of cement) was investigated on improving mechanical properties and water absorption of AAC. The compressive and tensile strength tests and water absorption test was conducted on 10 x 20 cm cylindrical and 10 x 10 x 10 cm cubical specimens. The results showed that pozzolanic materials can improve mechanical properties and water absorption of AAC. The compressive strength for AAC mixes containing silica fume, zeolite, and granulated blast furnace slag, increased up to 184%, 200%, and 172% compared with AAC control mix. In addition, the use of pozzolanic materials with the ratio of 21% by weight of cement improved tensile strength of AAC up to 25%. Generally, silica fume, zeolite and granulated blast furnace slag in different replacement levels decreased water absorption up to 50%, 45%, and 35%, respectively.

Keywords: Autoclaved Aerated Concrete (AAC), Silica Fume, Zeolite, Granulated Blast Furnace Slag, Water Absorption and Compressive and Tensile Strength.