

ارزیابی خواص مکانیکی بتن شاهد و مرکب دارای پودر سنگ آهک و پوزولان

رحمان نصیری^۱، علی اکبر مقصودی^{۲*}، محمد مقصودی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشجوی دکتری بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

maghsoudi.a.a@uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۸/۸]

چکیده

با وجود اینکه سیمان‌های مرکب در تعداد محدودی از کشورها، در ساخت بتن استفاده شده است، اما در ایران به تعداد زیاد کارخانه‌های سیمان و صرفه اقتصادی آنها، کاربرد چنین سیمان‌هایی در بتن توجه جدی نشده است. پس، به منظور کاربردی کردن این نوع سیمان در کشور لازم است، فاز خمیری، خواص مهندسی و عمر و دوام آنها بررسی شود. در این پژوهش پارامترهای موثر در فاز خمیری و سخت شده ده نسبت اختلاط بتن‌های ساخته و آزمایش شده، شاهد و مرکب (سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان کرمان، پوزولان رفسنجان و سنگ آهک) بررسی شده است. بدین منظور در فاز خمیری آزمایش‌های: روانی، زمان گیرش و انبساط حجمی نمونه‌ها و در فاز سخت شده: آزمایش‌های مقاومت فشاری (در شرایط عمل آوری غرقابی و سولفاتی)، انواع مقاومت‌های کششی در سنین کوتاه و بلند مدت و جذب آب موثیه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، به منظور کاربردی کردن چنین بتن‌هایی در سازه‌های بتن مسلح، نمودارهای تنش- کرنش فشاری و کششی آنها به کمک حسگرهای نصب شده، گزارش شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد: زمان گیرش نمونه‌های بتنی مرکب کمتر از بتن شاهد است، جایگزینی پودر سنگ آهک و پوزولان با سیمان، منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن مرکب نسبت به شاهد در سنین کوتاه و بلند مدت شده است، هر چند کرنش فشاری نهایی (ϵ_{cu}) بیشتر نمونه‌ها، بیش از مقدار 0.003 (توصیه آیین‌نامه آمریکا) است و عمل آوری نمونه‌ها در شرایط محیطی سولفاتی و غرقابی تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته است.

واژگان کلیدی: بتن مرکب، پوزولان، انبساط حجمی، جذب آب موثیه و خواص مهندسی.

۱- مقدمه

می‌نماید تا کوشش‌های وسیعی برای استفاده بهتر از ذخایر حیاتی انرژی و سالم نگه داشتن محیط زیست صورت گیرد. در این راستا کاربرد مواد پوزولانی و پودر سنگ آهک نه تنها

در جهان امروز نیاز به صرفه‌جویی در انرژی، حفظ محیط زیست، حفظ ذخایر انرژی و سایر جنبه‌های اقتصادی، ایجاب

هزینه تمام شده سیمان را کاهش می‌دهد، بلکه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد مصرفی در بتن، که زمینه مناسبی برای اصلاح قابل ملاحظه در بتن بوجود می‌آورد را نیز تغییر می‌دهد. دستیابی به خواص ایده‌آل بتن و ارتقای پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن، سبب شده است تا امروزه پوزولان‌ها جایگاه ثابتی در میان اجزای تشکیل دهنده بتن پیدا کنند. ضرورت استفاده بهینه از سیمان در بتن و افزایش دوام آن از اهمیت خاصی در خصوص کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف بهینه انرژی برخوردار است [1]. پس با استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در سیمان، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، به داشتن محیط زیست سالم نیز کمک خواهد شد. از این رو ضرورت استفاده از سیمان‌های پوزولانی کاملاً آشکار است و در این زمینه پژوهش‌های بسیار گسترده‌ای در جهان و ایران، صورت گرفته است. استفاده پوزولان‌های مصنوعی به عنوان جایگزین سیمان، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی می‌باشد. هرچند ممکن است کاهش مقاومت در سنن اولیه را در پی داشته باشد [2].

نیلی و صالحی [3] دریافتند که، جایگزینی خاکستر بادی و پوزولان طبیعی در کوتاه مدت باعث کاهش مقاومت اولیه شده و این روند کاهش مقاومت با افزایش مقدار جایگزینی بیشتر می‌شود. همچنین در این راستا، پژوهشگران دریافتند که استفاده از پودر سنگ آهک در بتن نیز می‌تواند مفید واقع شود. اولین مطالعات در مورد استفاده از پودر سنگ آهک در بتن، به وسیله‌ی شیرامورا [4] انجام شد. در این مطالعات، تأثیر اختلاط‌های مختلف پودرهای معدنی خوب مثل پودر سنگ، بر مقاومت فشاری بتن بررسی شد. آثار ریز ساختار، روی ویژگی‌های فیزیکی بتن تهیه شده با جایگزینی پودر معدنی به جای ریز دانه، به وسیله یو چیکاوا و همکارانش [5] انجام شد. در پژوهش‌های یوچیکاوا، واکنش هیدراسیون و ساختار حفره‌ها بررسی شد. همچنین مقاومت فشاری ۹۱-۳ روزه بتن با جایگزینی ۳۶٪ ریز دانه با پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان ۰/۵۹ مورد پژوهش قرار گرفت. نتیجه پژوهش‌های آنها،

افزایش مقاومت فشاری بتن با پودر سنگ آهک، بود. ویژگی‌های ناحیه‌ی انتقال در خمیر سیمان با افزودنی‌های اطراف دانه‌ها، به وسیله کوبایشی [6] بررسی شد. در پژوهش وی، ناحیه‌ی انتقال خمیر سیمان محتوی پودر سنگ آهک، به آزمایش ویکرز مطالعه شده است. نتیجه‌ی مطالعات کوبایشی این بود که اضافه کردن پودر سنگ آهک به بتن، ضخامت ناحیه‌ی انتقال را کم می‌کند. همچنین افزودن LP به بتن و سطح مخصوص زیاد آن باعث کاهش آب انداختگی می‌شود. ساویز و هنگ [7] مطالعاتی در مورد دوام بتن با پودر سنگ آهک انجام دادند. در این پژوهش، تأثیر پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان روی دوام بتن در ۵٪ سولفات سدیم و مقاومت فشاری و جذب آب ۲۸ روزه بتن بررسی شد. مستوفی نژاد و نظری منفرد [8] در پژوهشی با افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن برای افزایش دوام آن در محیط سولفاتی پژوهش‌هایی انجام داده و نتیجه‌گیری کردند: ۱- استفاده از ۱۵٪ پودر سنگ آهک برای دستیابی به دوام بهتر بتن مناسب بود، اما استفاده از ۳۰٪ پودر سنگ آهک باعث کاهش دوام نمونه‌ها شد. ۲- استفاده از درصد سرباره به تخریب و کاهش وزن کمتر نمونه‌ها منجر شده و سبب بهبود دوام نمونه‌ها شد. حبیبی [9] ویژگی‌های مکانیکی بتن با پودر سنگ آهک را بررسی کرد و اظهار داشت با چشم‌پوشی از آثار منفی پودر سنگ آهک بر مقاومت کششی، استفاده از پودر سنگ آهک در بتن با نسبت آب به سیمان بالا، به خاطر آثار مثبت آن بر مقاومت فشاری و دوام موثر به نظر می‌رسد.

سیمان‌های پرتلند- سنگ آهک، نوع دیگری از سیمان‌ها هستند که هنگام کلینکر سیمان به همراه سنگ آهک و سولفات کلسیم تهیه می‌شوند. این روند تولید چند نتیجه مطلوب را به همراه دارد: ۱- کاهش مصرف سوخت به دلیل تولید کمتر سیمان. ۲- کاهش مصرف مواد خام برای تولید سیمان. ۳- کاهش تولید گازهای (گلخانه‌ای) CO_2 و N_2O و سازگاری بیشتر با محیط زیست.

در کشور، اولین پژوهش‌ها در مورد سیمان مرکب شامل: سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان کرمان، پوزولان رفسنجان و پودر

۱۵ سانتی متری و منشوری ۴۵ در ۱۰ سانتی متری ساخته شد و مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول (۱) نسبت اختلاط بتن شاهد C و η نسبت اختلاط بتن مرکب (با درصد های مختلف جایگزین سیمان با پودر سنگ آهک و پوزولان) آمده است. در این جدول حرف C معرف بتن شاهد و به ترتیب حروف L و PR، معرف پودر سنگ آهک و پوزولان رفسنجان و عدد درج شده بعد از این حروف، درصد جایگزین هر یک از این دو مصالح با سیمان هر طرح است. توجه به این نکته ضروری است که نسبت آب به سیمان در بتن شاهد شامل سیمان ولی در بتن مرکب مجموع سیمان و پوزولان است.

۲-۳- عمل آوری نمونه ها

کلیه نمونه ها ابتدا در قالب های مربوطه ریخته و به کمک میز ویبره به مدت ۱ دقیقه ویبره شده و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب با دمای ۲۰- ۱۵ درجه سانتیگراد با روش غرقاب (w) عمل آوری و در سن مورد نظر از حوضچه خارج و تحت آزمایش های مختلف قرار گرفت (برای نمونه های فشاری، عمل آوری شرط (s) بمدت ۲۸ روز نیز در نظر گرفته شد).

سنگ آهک به وسیله مقصودی و همکاران گزارش شده است [10-12]. هدف از انجام این پژوهش، مطالعه فاز خمیری و سخت شده بتن های مرکب با درصد های مختلف جایگزینی پوزولان رفسنجان و پودر سنگ آهک با سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان کرمان و مقایسه با بتن شاهد (دارای فقط سیمان مزبور) است. بدین منظور، آزمایش های فاز خمیری و سخت شده برای دو نوع بتن مرکب و شاهد (ده نسبت اختلاط)، برنامه ریزی شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی برای ساخت نمونه های بتنی عبارتند از: مصالح مصرفی سیمانی: سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان کرمان، پوزولان رفسنجان و پودر سنگ آهک کارخانه سیمان کرمان و مصالح مصرفی غیر سیمانی.

۲-۲- نسبت های اختلاط نمونه های بتنی

نسبت اختلاط اجزای بتن، مطابق با آیین نامه BS و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و اسلامپ ۵ سانتی متر انجام گرفت [13]. چهار نوع بتن (یک نوع بتن شاهد و سه نوع بتن مرکب) با نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی متری، نمونه های استوانه ای ۳۰ در

جدول ۱. *نسبت های اختلاط بتن (کیلو گرم بر متر مکعب) و دیگر مشخصات هر طرح

Slump	w/c	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Sand	Limestone powder	Pozzolan	Cement	Mix name	rank
5	0.45	180	350	600	883	-	-	400	Control	1
4.5	0.51	183.3	350	600	883	40	40	320	L10 PR10	2
4.5	0.54	183.3	350	600	883	60	20	320	L15 PR5	3
5	0.484	184	350	600	883	20	60	320	L5 PR15	4
5	0.50	175.8	350	600	883	50	50	300	L12.5PR12.5	5
5	0.51	175	350	600	883	60	40	300	L15 PR10	6
5	0.51	184	350	600	883	40	60	300	L10 PR15	7
4	0.56	191.7	350	600	883	60	60	280	L15 PR15	8
5	0.575	184	350	600	883	80	40	280	L20 PR10	9
5	0.53	191.7	350	600	883	40	80	280	L10 PR20	10

*All mix designs were selected based on British standard (BS)

Table 2. *Mix design of mixtures and other properties of mixtures (kg/m³)

۴-۲- روش‌های آزمایش

در فاز خمیری، قسمت اول تأمین اسلامپ ۵ سانتی‌متر و در قسمت دوم مقایسه زمان گیرش سیمان شاهد و مرکب توسط سوزن و یکات به صورت دستی است و در قسمت سوم انبساط حجمی فاز خمیری سیمان شاهد و مرکب بررسی شد. در فاز سخت شده مقاومت فشاری، کشش مستقیم اروپایی و برزیلی و ... در سنین مختلف انجام شد.

۳- نتایج و بحث آزمایش‌های فاز خمیری

۳-۱- زمان گیرش سیمان توسط سوزن و یکات

برای تعیین زمان گیرش سیمان هیدرولیکی دو روش طبق استاندارد ASTM C191-08 وجود دارد: روش آزمایش مرجع با استفاده از دستگاه ویکات دستی است، در حالی که روش دوم استفاده از یک ماشین ویکات اتوماتیک را مجاز می‌شمارد. آزمایش زمان گیرش سیمان‌های شاهد و مرکب توسط سوزن و یکات دستی به ازای ۲۵ میلی‌متر نفوذ سر سوزن در قالب انجام شد (جدول ۲) [14].

جدول ۲. نتایج زمان گیرش سیمان شاهد و مرکب

Influence time (min)	Mix name	rank
92.8	L15 PR5	1
94.29	L20 PR10	2
94.7	L10 PR10	3
95	L15 PR10	4
97	L15 PR15	5
105.6	L10 PR15	6
109.24	L10 PR20	7
109.4	L12.5 PR12.5	8
115	L5 PR15	9
124.5	Control	10

Table 2. Setting time of cement in control and composite Mixes

از نتایج جدول (۲)، مشهود است، بیشترین زمان گیرش برای سیمان شاهد با کسب زمان ۱۲۴/۵ دقیقه است در حالیکه، زمان گیرش نمونه‌های بتنی مرکب کمتر از نمونه بتنی شاهد

است. در بین سیمان‌های مرکب به ترتیب، نسبت اختلاط L15 PR5 دارای کمترین (۹۲/۸ دقیقه) و با کاهش ۲۶٪ و نسبت اختلاط L5 PR1 دارای بیشترین زمان گیرش (۱۱۵ دقیقه) با کاهش ۸٪ نسبت به سیمان شاهد است.

۳-۲- نتایج و بحث تعیین انبساط حجمی سیمان شاهد و مرکب براساس استاندارد ایران [15]

تعیین انبساط حجمی سیمان شاهد و مرکب مطابق با استاندارد ۳۹۱ ایران طبق: الف- روش لوشاتلیه ب- روش اتوکلاو انجام می‌گیرد. برای تعیین پایداری خمیر سیمان از روش اتوکلاو استفاده و نتایج در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳. انبساط حجمی نمونه‌های خمیری از طریق اتوکلاو

Percentage of volume expansion	Mix name	rank
14	Control	1
13	L10 PR10	2
11	L15 PR5	3
13	L5 PR15	4
17	L12.5 PR12.5	5
14	L15 PR10	6
17	L10 PR15	7
15	L15 PR15	8
17	L20 PR10	9
17	L10 PR20	10

Table 3. Volume expansion of specimens in plastic phase using autoclave method

در جدول (۳) مشهود است، انبساط حجمی نمونه بتنی L15 PR5 کمترین مقدار و نمونه‌های بتنی L10 PR15، L20 PR10 و L10 PR20 بیشترین مقدار نسبت به سیمان شاهد است. همچنین نتایج حاکی از آن است که با ثابت نگه داشتن درصد پودرسنگ و افزایش درصد پوزولان مصرفی، انبساط حجمی افزایش یافته است. بنابراین هیدروکسید کلسیم در مجاورت آب ناشی از محلولات هیدراتاسیون واکنش داده و تولید ژل (C-S-H) بیشتر و پر شدن فضاهای بیشتری را منجر

پودر سنگ آهک و پوزولان با سیمان، از مقاومت فشاری بتن مرکب نسبت به بتن شاهد کاسته است، اگرچه با ثابت نگه داشتن درصد پودر سنگ آهک و افزایش درصد پوزولان مصرفی، میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد، در ۹۰ روز و ۳ روز (بترتیب بلند و کوتاه مدت) در بیشتر نمونه‌ها بهم نزدیک است. به عنوان نمونه درصد کاهش مقاومت نمونه L10PR10 در سن ۳ و ۹۰ روز به ترتیب ۱۱ و ۱۶٪ و در نمونه L10PR20 به ترتیب ۳۱ و ۲۹٪ است. همچنین، همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده، عمل آوری نمونه‌ها در دو شرایط محیطی متفاوت تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری سن ۲۸ روز نداشته است، هر چند کاهش جزئی مقاومت در نمونه های مرکب نسبت به شاهد مشهود است.

جدول ۴. نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه ای

rank	Mix name	Load (kN)	$f_{sp_{cyl}}$ (MPa)
1	Control	188.7	2.67
2	L10 PR10	210.3	2.98
3	L15 PR5	213.5	3.0
4	L5 PR15	247.5	3.5
5	L12.5 PR12.5	226.7	3.2
6	L15 PR10	246.6	3.5
7	L10 PR15	227.5	3.22
8	L15 PR15	265.3	3.75
9	L20 PR10	234.4	3.32
10	L10 PR20	155.2	2.20

Table 4. Tensile strength of cylindrical specimens

۴-۲- مقاومت کششی نمونه‌های استوانه ای

آزمایش تعیین مقاومت کششی (آزمایش برزلی) نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با ابعاد ۱۵ در ۳۰ سانتی‌متر، براساس استاندارد آمریکا [16]، در سن ۲۸ روز، انجام گرفته و مقایسه نتایج میانگین مقاومت آنها در جدول (۴) نشان داده شده است.

می‌شود که این موضوع می‌تواند انبساط حجمی بیشتر را به همراه داشته باشد.

شکل ۱. مقاومت فشاری نمونه بتنی شاهد و نمونه‌های بتنی مرکب

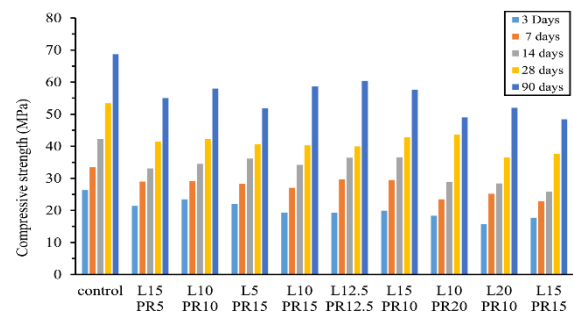


Fig. 1. Concrete compressive strength of control and composite specimens

شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه های بتنی در دو محیط متفاوت

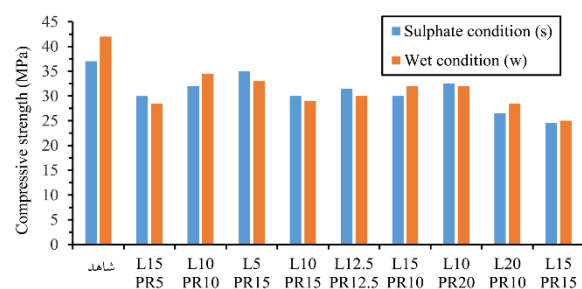


Fig. 2. Concrete compressive strength cured in different conditions

۴- نتایج و بحث آزمایش‌های فاز سخت شده

۴-۱- مقاومت فشاری کوتاه و بلند مدت

نمونه‌های مکعبی، پس از عمل آوری در سن آزمایش (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) از آب خارج شده و به مدت چند ساعت در محل آزمایشگاه نگهداری شده و سپس تحت آزمایش فشار تک محوره (کوتاه و بلند مدت تا سن ۹۰ روز) قرار گرفتند. نتایج میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل (۱) آورده شده است. همچنین، مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۲۸ روز در دو محیط متفاوت: الف- (w) و ب- (S) تعیین و مقایسه نتایج میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و مرکب برای دو شرط عمل آوری (W,S)، در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۱) نشان می‌دهد، جایگزینی

از جداول (۴ و ۵) نتیجه می‌گیریم که با درصد پودر سنگ آهک و پوزولان مصرفی تا ۲۰٪، مقاومت کششی استوانه‌ای ($f_{sp_{cyl}}$) به طور میانگین ۱۱٪ از مقاومت کششی نمونه‌های مکعبی ($f_{sp_{cu}}$) نظیر آن بیشتر است (رابطه ۱):

$$f_{sp_{cyl}} = 1.11 f_{sp_{cu}} \quad (MPa) \quad (1)$$

همچنین، از جداول (۵ و ۶) و شکل (۱) و استفاده از ضریب ۰/۸۵ برای تبدیل مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (f_{cu}) به مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (f'_c) استاندارد در سن ۲۸ روز، برای بتن‌های مرکب با درصد پودر سنگ آهک و پوزولان مصرفی تا ۲۰٪، می‌توان رابطه بین مقاومت کششی دونیم شدگی و جذر مقاومت فشاری را بکمک روابط (۲ و ۳) تخمین زد:

$$f_{sp_{cyl}} = 0.49 \sqrt{f'_c} \quad (MPa) \quad (2)$$

$$f_{sp_{cu}} = 0.45 \sqrt{f_{cu}} \quad (MPa) \quad (3)$$

۴-۴- مقاومت خمشی بتن با استفاده از بارگذاری تیر ساده در نقطه میانی (ASTM C293 – 02)

آزمایش تعیین مقاومت کشش ناشی از خمش (یا مدول گسیختگی) نمونه‌های منشوری با ابعاد منشور استاندارد ۱۰×۱۰×۴۵ سانتی‌متر، براساس استاندارد آمریکا [17]، مطابق با شکل (۱) در سن ۲۸ روز، انجام گرفته و نتایج آن در جدول (۶) آورده است. به منظور تعیین مقاومت کشش خمشی، از رابطه (۴) استفاده شد.

$$f_r = 3PL/2bd^2 \quad (MPa) \quad (4)$$

f_r مدول گسیختگی (MPa)، P بیشینه بار اعمالی (N)، L طول دهانه (mm)، b عرض متوسط نمونه در لحظه شکست (mm) و d عمق متوسط نمونه در لحظه شکست (mm) است (توجه: وزن تیر در محاسبات فوق گنجانده نشده است). در این آزمایش از بار گذاری تیر با تکیه گاه ساده، با یک بار چاقویی متمرکز در نقطه میانی استفاده شد و شکست نمونه‌ها در ۱/۳ میانی اتفاق افتاد.

به منظور تعیین مقاومت کشش دو نیم شدگی از رابطه (۱) پیشنهادی این آیین‌نامه استفاده شد.

$$f_{sp} = 2P/dL\pi \quad (1)$$

f_{sp} مقاومت کششی (MPa)، P بیشترین بار اعمال شده (N)، L طول نمونه (mm) و d قطر نمونه (mm) است.

جدول (۵) نشان می‌دهد، ثابت نگه داشتن درصد پودر سنگ آهک و افزایش پوزولان مصرفی تا ۱۵ درصد، منجر به میانگین افزایش ۳۰ درصدی مقاومت کششی دو نیم شدگی نسبت به نمونه شاهد شده است. درحالی‌که افزایش درصد پوزولان به ۲۰ درصد، منجر به کاهش ۱۸ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است.

۳-۴- مقاومت کششی نمونه‌های مکعبی

آزمایش نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر در سن ۲۸ روز، مطابق با استاندارد اروپایی [16]، انجام شد و متوسط نتایج دو نمونه به عنوان مقاومت کشش مستقیم به کمک رابطه (۱) در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج کشش اروپایی بتن شاهد و مرکب در جدول (۵) نشان داده شده است. نوع ابزار بکار برده شده برای آزمایش کشش نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی به شکلی است که می‌توان رابطه (۱) را برای محاسبه مقاومت کشش هر دو بکار برد.

جدول ۵. نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی نمونه های مکعب

rank	Mix name	Load (kN)	$f_{sp_{cu}}$ (MPa)
1	Control	97.5	2.76
2	L10 PR10	91.7	2.60
3	L15 PR5	123.8	3.50
4	L5 PR15	105.4	2.98
5	L12.5 PR12.5	92.1	2.60
6	L15 PR10	111.35	3.15
7	L10 PR15	90	2.55
8	L15 PR15	108.8	3.10
9	L20 PR10	109.9	3.11
10	L10 PR20	81	2.30

Table 5. Tensile strength of Cubic specimens

جدول ۶. نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی

rank	Mix name	Load (N)	f_r (MPa)
1	Control	15500	6.98
2	L10 PR10	13900	6.25
3	L15 PR5	9600	4.32
4	L12.5 PR12.5	14700	6.60
5	L15 PR10	15800	7.11
6	L10 PR15	15700	7.065
7	L15 PR15	13200	5.94
8	L20 PR10	12700	5.715
9	L10 PR20	8000	3.60

Table 6. Flexural strength of concrete specimens

آنگاه به مدت ۱۴ روز در آون با دمای 45°C نگهداری و خشک شدند (یا ۱ روز در آون با دمای 110°C) و بعد از یک روز نگهداری در هوای آزمایشگاه به جز یک قاعده نمونه، توسط پارافین پوشانده می‌شود. نمونه‌ها بر این اساس برای آزمایش آماده شدند. آزمایش نمونه‌های آماده شده، در دمای ۲۱ الی ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۸۱ الی ۸۵ درصد و زمان‌های تعیین شده در جدول (۷) برای دو زمان جذب مؤثره اولیه (تا ۶ ساعت) و ثانویه (تا ۷ روز) انجام شد. برای اندازه‌گیری اوزان از ترازویی با دقت یک صدم گرم استفاده شد. از رابطه (۷) برای محاسبه جذب آب استفاده شده است:

$$I = m_t / ad \quad (7)$$

I: جذب آب مؤثره (mm)، m_t تغییر جرم نمونه (gr)، a: مساحت قاعده نمونه (7854mm^2)، d چگالی آب (1gr/mm^3).

جدول ۷. زمان‌ها و نوسان‌های اندازه‌گیری جذب مؤثره اولیه و ثانویه

capillary absorption	Time	Oscillation
Primary capillary absorption	60 sec.	2 sec.
	5 min.	10 sec.
	10 min.	2 min.
	20 min.	2 min.
	30 min.	2 min.
	60 min.	2 min.
Secondary capillary absorption	For every hour up to 6 hours	5 min.
	Once a day for three days	2 hr.
	Fourth to seventh day (three measurements at intervals of 24 hours)	2 hr.

Table 7. Water capillary absorptions of specimens

در شکل (۳) جذب آب نمونه‌ها نسبت به جذر زمان (جذب آب 10^4 مرتبه بزرگتر شده است) ارائه شده است.

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد، نمونه‌های بتنی مرکب، مقاومت خمشی (f_r) بیشتر یا کمتری را نسبت به نمونه بتنی شاهد داراست. بیشترین درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد مربوط به نمونه L10 PR20 برابر با ۴۹٪ و بیشترین افزایش مربوط به نمونه L15 PR10 برابر با ۲٪ است. همچنین، از جدول (۶) و شکل (۱) و استفاده از ضریب تبدیل ۰/۸۵ مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (f_{cu}) به مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (f'_c) استاندارد در سن ۲۸ روز، برای بتن‌های مرکب با درصد پودر سنگ آهک و پوزولان مصرفی تا ۲۰٪، می‌توان رابطه بین مدول گسیختگی و جذر مقاومت فشاری را بکمک روابط (۵ و ۶) تخمین زد:

$$f_{r_{cyl}} = 0.8\sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

$$f_{r_{cu}} = 0.9\sqrt{f_{cu}} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

۴-۵- تعیین سرعت جذب آب مؤثره بتن براساس (ASTM C1585-04)

در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای بتنی 10×20 سانتی‌متری با سن ۲۸ روزه که برای هر طرح در اختیار می‌باشد، به وسیله دستگاه کاتر برش ۵ سانتی‌متری از ارتفاع زده شده و نمونه استوانه‌ای بتنی ۵ در ۱۰ سانتی‌متری تهیه شد.

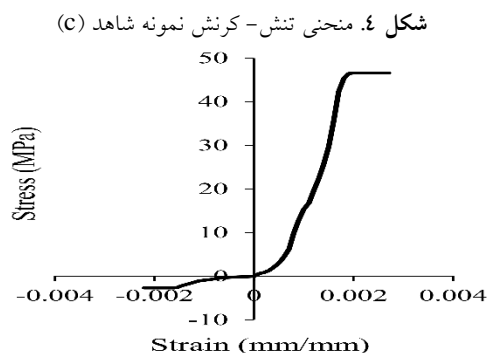


Fig. 4. Stress - strain diagram of control specimen

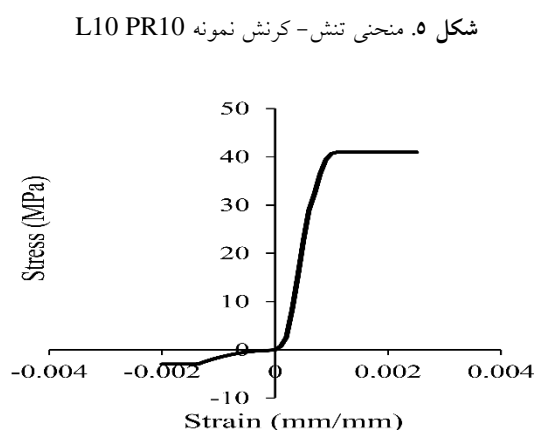


Fig. 5. Stress - strain diagram of L10 PR10

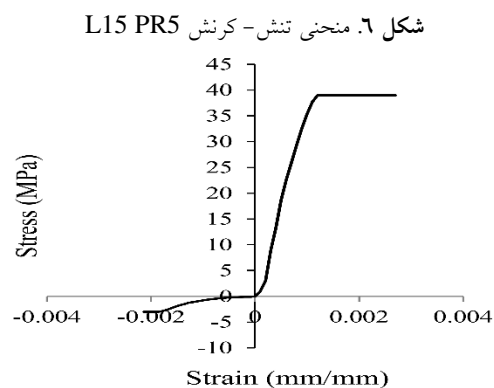


Fig. 6. Stress - strain diagram of L15 PR5

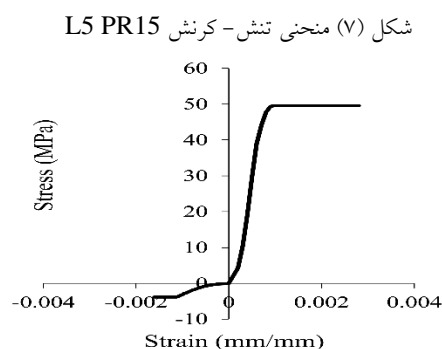


Fig. 7. Stress - strain diagram of L5 PR15

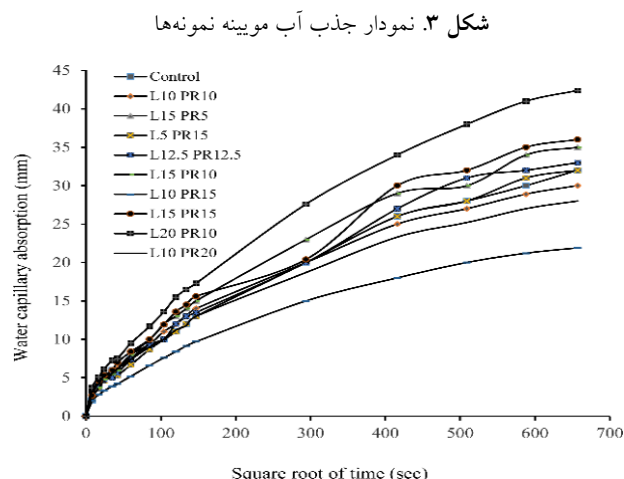


Fig. 3. Water capillary absorptions of specimens

همان‌گونه که در شکل (۳) مشهود است، کمترین و بیشترین مقدار جذب آب موئینه مربوط به نمونه L10 PR15 و L20 PR10 است. همچنین جذب آب موئینه نمونه‌های L10 PR10، L10 PR15، L15 PR10 و L10 PR20 نسبت به نمونه شاهد کمتر است. این بیانگر آن است که با افزایش درصد پوزولان جایگزین، به دلیل تبدیل بیشتر هیدروکسید کلسیم به ژل (C-S-H)، جذب آب موئینه کاهش بیشتری یافته است که در اینصورت منجر به افزایش عمر و دوام بتن در مناطق خورنده خواهد شد.

۴-۶- رسم نمودارهای تنش-کرنش فشاری بتن

با توجه به اینکه نمودار تنش-کرنش برای بتن‌های شاهد و نه بتن‌های مرکب در اختیار است، پس در حین آزمایش‌های فشاری و کشش برزیلی در سن ۲۸ روز، با نصب کرنش سنج مکانیکی امکان دسترسی به چنین منحنی‌هایی مقدور شد (شکل‌های ۴ الی ۱۱). خط افقی در نمودار بیانگر ثابت شدن بار نمونه است ولی شکست نمونه تا تخریب بیشتر ادامه یافته است. کرنش نهایی (ϵ_{cu}) همه نمونه‌ها (به جز L20PR10) بیش از ۰/۰۰۳ مقدار توصیه شده برای کرنش نهایی فشاری بتن‌های غیر مرکب در آیین‌نامه آمریکاست، است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش پارامترهای موثر در فاز خمیری، بعضی خواص مهندسی و عمر و دوام ده نسبت اختلاط بتن‌های ساخته و آزمایش شده، شاهد و دارای سیمان مرکب (سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه سیمان کرمان، پوزولان رفسنجان و سنگ آهک) بررسی و نتایج زیر به دست آمد:

۱- با جایگزینی مناسب سنگ آهک و پوزولان در روند تولید کلینکر سیمان منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای شده و استفاده از سیمان‌های مرکب در سازه‌های بتنی منجر به حفظ و سازگاری بیشتر با محیط زیست خواهد شد.

۲- تهیه سیمان مرکب با جایگزینی مناسب سنگ آهک و پوزولان بلحاظ اقتصادی کم هزینه‌تر از تولید سیمان است.

۳- بیشترین زمان گیرش برای سیمان شاهد بدست آمد در حالیکه، زمان گیرش نمونه‌های بتنی مرکب کمتر از بتن شاهد است. در بین سیمان‌های مرکب به ترتیب، نسبت اختلاط L15 PR5 دارای کمترین زمان گیرش با کاهش ۲۶٪ و نسبت اختلاط L5 PR15 دارای بیشترین زمان گیرش با کاهش ۸٪ نسبت به سیمان شاهد است.

۴- نمونه بتنی L15 PR5 کمترین مقدار انبساط حجمی و نمونه‌های L10 PR15، L20 PR10 و L10 PR20 بیشترین مقدار را نسبت به نمونه شاهد کسب کرده است. با ثابت نگه داشتن درصد پودر سنگ و افزایش درصد پوزولان مصرفی، انبساط حجمی به دلیل تولید ژل (C-S-H) بیشتر با پر کردن فضاهای خالی بیشتر، افزایش یافته است.

۵- جایگزینی پودر سنگ آهک و پوزولان با سیمان، از مقاومت فشاری بتن مرکب نسبت به شاهد کاسته است، اگرچه با ثابت نگه داشتن درصد پودر سنگ آهک و افزایش درصد پوزولان، میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد، در ۹۰ روز (بلند مدت) و ۳ روز (کوتاه مدت) در بیشتر نمونه‌ها بهم نزدیک است.

۶- عمل‌آوری نمونه‌ها در دو شرایط محیطی سولفاتی (S) و غرقابی (W) تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نداشته است.

شکل ۸. منحنی تنش - کرنش نمونه L15 PR10

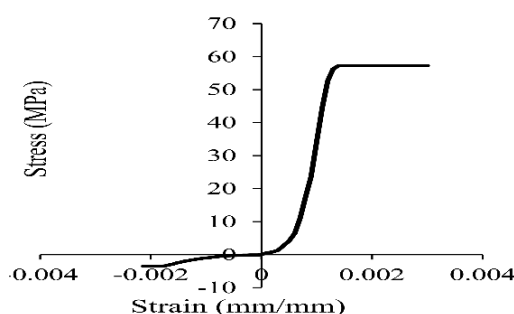


Fig. 8. Stress - strain diagram of L15 PR10

شکل ۹. منحنی تنش - کرنش نمونه L10 PR15

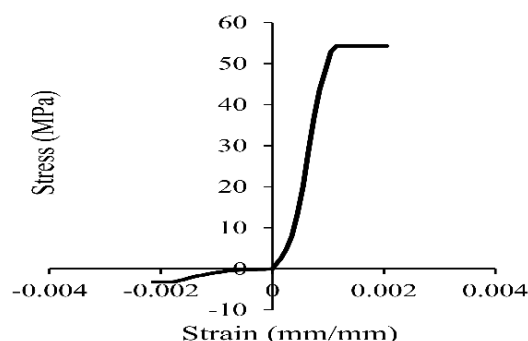


Fig. 9. Stress - strain diagram of L10 PR15

شکل (۱۰) منحنی تنش - کرنش L12.5 PR12.5

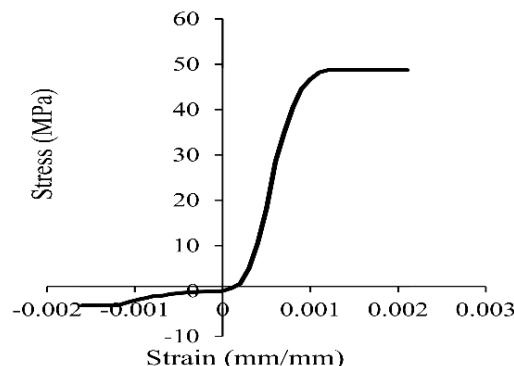


Fig. 10. Stress - strain diagram of L12.5 PR12.5

شکل ۱۱. منحنی تنش - کرنش نمونه L20 PR10

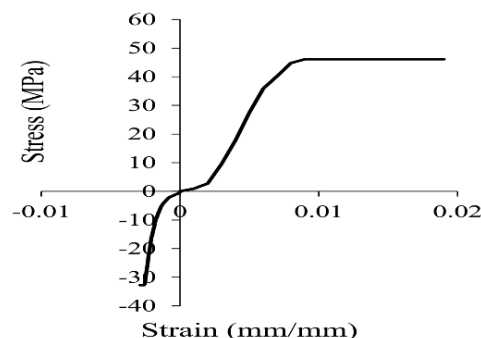


Fig. 11. Stress - strain diagram of L20 PR10

- [6] Koichi K., Atsushi H., Toyooki M. & Manabu F. 1996 Characters of interfacial zone of cement paste with additives around aggregate. *Zairyo/ J. Soc. Mater. Sci.*, **45**(9), 1001-1007.
- [7] Sawiez Z. & Heng S.S. 1996 Durability of concrete with addition of limestone powder. *Mag. Conc. Res.*, **48**(175), 131-137.
- [8] Mostoufi nejad D. & Nazari H. 2006 The addition of slag and limestone powder for increased durability of concrete in sulfate. *J. Transp. Res.*, **3**(2), 139-145.
- [9] Habibi A. 2009 Mechanical characteristics of concrete with limestone powder. *J. Conc. Res.*, **2**(2), 71-84.
- [10] Nasiri R. 2013 Design, construction and engineering properties of composite cement in concrete. A PhD thesis submitted to the graduate faculty of civil engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
- [11] Maghsoudi A.A. & Nasiri R. 2013 Construction and engineering properties of concrete composed of cement type 2 Kerman, Rafsanjan Pozzolan and Limestone. *2nd International Conference on Modern Materials and Structures in Civil Engineering*, Esfahan, Iran.
- [12] Maghsoudi A.A. & Loghmani S. 2013 Construction and engineering properties of concrete composed of cement type 2 Kerman, Rafsanjan Pozzolan and Limestone. *2nd International Conference on Cement Industry, Energy and the Environment*, Tehran, Iran.
- [13] Ramazanianpour A.A. 2011 Concrete mix design. *Sanaat Gostar Publication*, pp. 47.
- [14] ASTM C496/C 496M – 04, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", American Society of Testing Material.
- [15] Portland cement expansion set. 2007. *Institute of Standards and Industrial Research of Iran*, Iran Standard No. 391, fourth edition.
- [16] BS EN12390-6, "Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens", British Standard.
- [17] ASTM C 293 – 02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)", American Society of Testing Material. 2006 The addition of slag and limestone powder for increased durability of concrete in sulfate. *J. Transp. Res.*, **3**(2), 139-145.
- Concrete Specimens", American Society of Testing Material.
- [16] BS EN12390-6, "Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens", British Standard.
- [17] ASTM C 293 – 02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)", American Society of Testing Material.
- ۷- ثابت نگه داشتن درصد پودر سنگ آهک و افزایش پوزولان مصرفی تا ۱۵٪، منجر به میانگین افزایش ۳۰٪ مقاومت کششی دونیم شدگی نسبت به نمونه شاهد شد. افزایش درصد پوزولان جایگزین به ۲۰٪، منجر به کاهش ۱۸٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است.
- ۸- بیشترین درصد کاهش مقاومت خمشی (f_r) نمونه‌های مرکب به نمونه شاهد مربوط به L10 PR20 با ۴۹٪ و بیشترین افزایش مربوط به L15 PR10 با ۲٪ است.
- ۹- کمترین و بیشترین مقدار جذب آب موئینه به ترتیب مربوط به نمونه L20 PR10 و L10 PR15 است. جذب آب موئینه نمونه‌های L10 PR10، L10 PR15، L15 PR10 و L10 PR20 نسبت به نمونه شاهد کمتر است. با افزایش درصد پوزولان جایگزین و تبدیل بیشتر هیدروکسید کلسیم به ژل (C-S-H)، جذب آب موئینه نمونه‌های بتنی کاهش بیشتری یافته است که منجر به افزایش عمر و دوام بتن در مناطق خورنده خواهد شد.
- ۱۰- کرنش فشاری نهایی (ϵ_{cu}) همه نمونه‌ها (غیر از نمونه L20 PR10) بیش از ۰/۰۰۳ مقدار توصیه شده برای بتن‌های غیر مرکب آیین نامه ACI318-14 است، می‌باشد.

References

۶- مراجع

- [1] Mousavi H. 2011 Effective parameters on concrete compressive strength and durability. *Cement Tech.*, **45**, 1-6.
- [2] Ghrici M., Kenai S. & Mansour M. 2007 Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolan and limestone blended cements. *Cement and Conc. Compos.*, **29**(7), 542-549.
- [3] Nili M. & Salehi A. 2010 The impact of natural pozzolan, fly ash and silica fume on the compressive strength and water absorption volume of High-strength concrete. *Modares Civil Eng. J.*, **10**(4), 71-83.
- [4] Shiramura S. & Suzuki N. 1994 Effects of changing the mixing ratio of fine powders on characteristics of RCD concrete. *Proceedings of the Japan Society of Civil Eng.*, **484**, 77-86.
- [5] Uchikawa H., Henehara S. & Hirao H. 1996 Influence of microstructure on the physical properties of concrete by substituting mineral powder for part of fine aggregate. *Cement and Conc. Res.*, **26**(1), 101-111.

Evaluation of Engineering Properties of Control and Composite Concrete Consisting of Limestone Powder and Pozzolan

Rahman Naseri¹, Ali Akbar Maghsoudi^{2*}, Mohammad Maghsoudi³

1- MSc. Graduated in Civil Eng., Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2- Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3- PhD. Student, Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

maghsoudi.a.a@uk.ac.ir

Abstract:

Portland-limestone cement (PLC) is a new, more sustainable version of portland cement that is becoming widely available in North America. Known as Type II cement in the blended cement specifications of ASTM and AASHTO, it has already been approved by many transportation agencies and its use in structures and pavements is rapidly increasing. PLC implementation has been fueled mostly by interest in sustainability. However, some experiences have also shown that it can be used to improve concrete performance and even mix economics. Recent research has also studied optimum PLC properties, the most beneficial types and characteristics of SCMs, and the extent to which SCM replacement rates can be extended. In addition to improved strength development, setting, and durability, this more sustainable PLC concrete has been found to improve finishing properties and the quality of formed or slipped surfaces. More recently, the composite concrete which is consisting of Portland cement, lime stone powder and different types of pozzolans is used in a few countries. This type of concrete is more beneficial as a certain percentage of lime stone powder and pozzolan is substituted by cement weight in concrete. However, in Iran, although a considerable number of cement factories is available, and despite the economic cost of composite cement, the practical use of such cement has not yet been seriously taken into consideration. When designing a concrete structure using composite cement, some of its characteristics and engineering properties become different from those of normal concrete, NC. These differences in material properties may have important consequences in terms of the structural behavior and design of composite concrete members. The design provisions contained in the building codes are, in reality, based on tests conducted on NC. Therefore, it is necessary to investigate the plastic phase, engineering properties and durability considerations of this type of composite cement. In this paper, the chemical analysis of composite materials including cement, lime stone powder and Rafsenjan's pozzolan are performed and the results and analysis of ten designed concrete mixes which are constructed and tested are discussed. The mixtures include control concrete and nine composite concrete. In plastic phase, slump test, setting time and volume expansion tests are carried out on control and composite cement. In hardened phase, compressive strength tests on both wet (w) and %5 sulphate sodium (s) curing conditions, different types of tensile strength tests at short and long time ages, and water capillary absorptions are carried out. The compressive and tensile stress-strain diagrams are plotted by attaching sensors on two types of concrete. It was concluded that: (i) the setting time of composite specimens were lower than that of control one. (ii) replacing lime stone powder and pozzolan by cement weight caused the compressive strength of composite type to reduce to that of control concrete at early and long ages. However, ultimate compressive strain (ϵ_{cu}) of almost all the specimens reached 0.003 which is recommended by ACI standard. (iii) No considerable effect on the compressive strength of specimens was observed for both sulphate and wet curing regimes.

Keywords: Composite concrete, Pozzolan, Water capillary absorptions, Volume expansion, Engineering properties.