

بررسی خواص مکانیکی بتن آهکی-پوزولانی حاوی دوده سیلیس، سرباره کوره ذوب آهن و زئولیت

ابوالفضل عرب زاده^{۱*}، علی احمدی^۲

- ۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

arabzade@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۴/۲۹

چکیده

امروزه به دلیل آثار زیست محیطی مضر تولید سیمان پرتلند، تحقیق در مورد چسباننده‌های آهکی-پوزولانی به عنوان جایگزین، به صورت مدرن مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق جنبه مقایسه‌ای دارد و در آن با هدف رسیدن به خواص مطلوب برای بتن با چسب غالب آهکی-پوزولانی، بتن‌های مختلف با ترکیبات دوگانه و سه‌گانه از آهک هیدرولیکی با دوده سیلیس، سرباره کوره ذوب آهن و زئولیت ۲ نسبت با ترکیب ۳۰٪ سیمان پرتلند با آهک و پوزولان، به همراه بتن معمولی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای بهبود کارایی بتن از فوق روان‌کننده در همه مخلوط‌ها استفاده شد. نسبت آب به چسباننده بتن برای همه نمونه‌ها برابر ۰/۳۵ بود، به استثنای نمونه‌های حاوی زئولیت که با توجه به عدم امکان ساخت در نسبت کم، برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. آزمایش اسلامپ روی بتن تازه و مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، مقاومت کششی دو نیم شدن در سن ۲۸ روزه و مقاومت خمشی در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه روی بتن‌های سخت شده انجام گرفت. نتایج اسلامپ نشان داد که استفاده از فوق روان‌کننده در بتن آهکی-پوزولانی، موجب ارتقای کارایی آن می‌شود که بالاترین اسلامپ‌ها در بتن آهکی سیمانی سرباره‌ای و آهکی سیلیسی سرباره‌ای به ترتیب برابر ۲۳ و ۲۲ میلی‌متر به دست آمد. از نتایج مقاومتی بتن‌های آهکی-پوزولانی نیز مشخص شد که ۴ نسبت مخلوط (دو نسبت شامل ۵۰٪ آهک و ۳۰٪ سیمان پرتلند با ۲۰٪ دوده سیلیس یا ۲۰٪ سرباره و یک نسبت با ترکیب ۵۰٪ آهک، ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ سرباره و دیگری با ترکیب ۷۰٪ آهک و ۳۰٪ دوده سیلیس) با کسب بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی، خواص قابل رقابتی را با بتن معمولی نشان دادند و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آنها بیش از ۳۰ MPa (به ترتیب برابر ۵۸/۶، ۴۰/۲، ۴۰/۱ و ۳۳/۵) به دست آمد. با انجام آنالیز حرارتی روی نمونه‌های بتنی مشخص شد که به طور کلی در بتن آهکی-پوزولانی، دوده سیلیس با مصرف بیشتر کلسیم هیدروکسید فعال‌تر از سرباره کوره ذوب آهن عمل می‌کند و هردوی آنها از زئولیت فعال‌تر هستند.

واژگان کلیدی: خواص مکانیکی، بتن، سیمان، آهک هیدرولیکی، پوزولان

۱- مقدمه

در تمدن‌های باستانی قبل از ظهور سیمان پرتلند، آهک چسب اصلی اتصال‌دهنده اجزای بتن بود. در قرن ۱۹ تحولی در تکنولوژی چسب‌بتن به وجود آمد و اولین تحقیقات علمی برای خواص هیدرولیکی چسب‌های بتن توسط اسمیتون (۹۲-۱۷۲۴) و ویکات (۱۸۶۱-۱۷۸۶) انجام گرفت. تحقیق جامع آنها در نهایت منجر به اختراع سیمان پرتلند در سال ۱۸۲۴ توسط “ژوزف اسپین” شد. با گسترش سیمان پرتلند به علت سرعت گیرش و کسب مقاومت بالا در بتن، تکنولوژی آهکی-پوزولانی به عنوان یک چسباننده در بتن ناپدید شد [1].

امروزه به دلیل آثار زیست محیطی مضر تولید سیمان پرتلند، نگرانی گسترده‌ای برای یافتن جایگزین سیمان در صنعت ساخت و ساز ایجاد شده است. در میان پیشرفت فناوری‌های جدید، علاقه‌ای جدیدی به سیمان‌های سابق -آهک و پوزولان- به وجود آمده است، با این انتظار که در مقیاس بزرگ با همان بازده تولیدی مشابه سیمان پرتلند عمل کند چرا که طرز تهیه و تولید آهک و پوزولان از سیمان راحتتر است.

هلمز و ویتتیج در سال ۱۹۷۷ پتانسیل استفاده از بتن‌های پایه آهکی به عنوان جایگزین بتن معمولی سیمانی، در اجزای سازه را برجسته کردند. رمبل نیز در سال ۲۰۰۸ با یک کار معماری، یک سقف پوسته‌ای دوطرفه با بتن آهکی-پوزولانی ساخت [1]. اولین تحقیقات علمی و کاربردی روی بتن آهکی-پوزولانی در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ میلادی توسط ولوسا، کاشیم و روشا [2, 3] انجام و اثر اضافه کردن دو پوزولان رس کلسینه و متاکائولین بر مقاومت فشاری بتن آهکی-پوزولانی را بررسی شد. از نتایج تحقیقات آنها، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۱۱ MPa، با جایگزینی ۲۰٪ از آهک هیدرولیکی با پسماندی از تولید رس منبسط شده و ۱۷ MPa با جایگزینی ۲۰٪ آهک هیدرولیکی با متاکائولین، به دست آمد. گریست و همکاران نیز در چند مرحله تحقیق، ملات‌ها و بتن‌های آهکی-پوزولانی را مورد مطالعه قرار دادند. اولین تحقیق آنها، در سال ۲۰۱۳ [4] در مورد توسعه مقاومت فشاری ۲۲ نوع ملات آهکی-پوزولانی مختلف بررسی شد. نتایج نشان دادند که ملات حاوی ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ سرباره کوره ذوب آهن به عنوان چسب بتن، میانگین مقاومت ملات ۲۸ MPa را در نسبت آب به

چسباننده ۰/۵ کسب کرد [4]. گریست و همکاران در سال ۲۰۱۵ [5]، تحقیق دیگری این بار روی بهترین ترکیبات از بتن‌های آهکی-پوزولانی انجام دادند که ماکزیمم مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه، با ترکیب ۷۰٪ آهک هیدرولیکی با ۳۰٪ دوده سیلیس، برابر ۳۵ MPa به دست آمد [5]. به علت عدم توانایی بتن‌های آهکی-پوزولانی در به هم پیوستگی در نسبت‌های پایین آب به چسباننده، تحقیق آزمایشگاهی دیگری توسط گریست و همکاران در سال ۲۰۱۵ [6]، با هدف ارتقای کارایی این بتن‌ها انجام شد که در آن درصد دوده سیلیس به ۱۲٪ محدود و اثر فوق‌روان‌کننده روی ترکیبات مختلف آهکی-پوزولانی با ترکیب آهک، دوده سیلیس و سرباره بررسی شد. با آزمایش فوق‌روان‌کننده‌های ویژه، یک بتن آهکی-پوزولانی با کارایی مطلوب و مقاومت ۲۸ روزه ۴۹ MPa تولید شد [1]. به این ترتیب مشاهده شد که بتن آهکی-پوزولانی پتانسیل ارتقا یافتن و رقابت با بتن سیمانی معمولی را برای استفاده در سازه، دارد.

۲- اهداف

تحقیق پیش رو، با هدف به دست آوردن نسبت‌های مخلوط مناسب برای تولید بتن با چسباننده غالب آهکی-پوزولانی که ضمن داشتن کارایی مطلوب، به مقاومت مکانیکی خوبی در حد استفاده در سازه (قابل رقابت با بتن معمولی) برسد، انجام شد. این تحقیق جنبه مقایسه‌ای دارد و برای این کار از بهترین نتایج تحقیقات گذشته استفاده شد و مواد مختلف با نسبت‌های گوناگون در بتن مورد بررسی قرار گرفتند.

۳- ابزار و روش**۳-۱ مواد و مصالح**

در این تحقیق، شن طبیعی شکسته با حداکثر اندازه دانه ۱۹ mm به عنوان درشت‌دانه و ماسه دوبارشور طبیعی به عنوان ریزدانه، از معدن شهید بروجردی واقع در استان تهران تهیه و استفاده شدند. در شکل (۱) نتایج توزیع دانه‌بندی سنگدانه‌ها به همراه محدوده دانه‌بندی استاندارد ASTM C136 [7] ارائه شده است. مدول نرمی ماسه استفاده شده از روی نتایج دانه‌بندی آن، ۲/۹۶ به دست آمد.

آهک به کار رفته در بتن آهکی-پوزولانی از نوع هیدرولیکی (آبی) است که خواصی شبیه سیمان دارد. از آنجا که در ایران آهک هیدرولیکی (NHL) تولید نمی‌شود، برای تهیه آهک هیدرولیکی طبیعی از منابع سنگ‌های آهکی رسی (حاوی حدود ۲۵ درصد رسی) در دامنه کوه‌های اطراف سربندارن، واقع در شهرستان دماوند استان تهران استفاده شد. نمونه سنگ‌های آهکی ابتدا خرد شده و در کوره آزمایشگاهی الکتریکی قرار گرفته و تا

دمای 1200°C حرارت دیده و کلسینه شدند. آهک زنده به دست آمده با اضافه کردن آب به اندازه کافی (حدود ۳۰٪ وزن)، به روش خشک در آزمایشگاه شکفته یا هیدراته شد. در نهایت با جداسازی آهک‌های شکفته نشده، آهک به دست آمده طبق استاندارد ملی ایران ۴۷۳۸ [8] الک و سرنده شد. شکل (۲) نتایج آنالیز XRD را روی این آهک نشان می‌دهد.

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی الف) شن و ب) ماسه (نمودار خط‌چین مجاز استاندارد ASTM-C136 [7] را نشان می‌دهد)

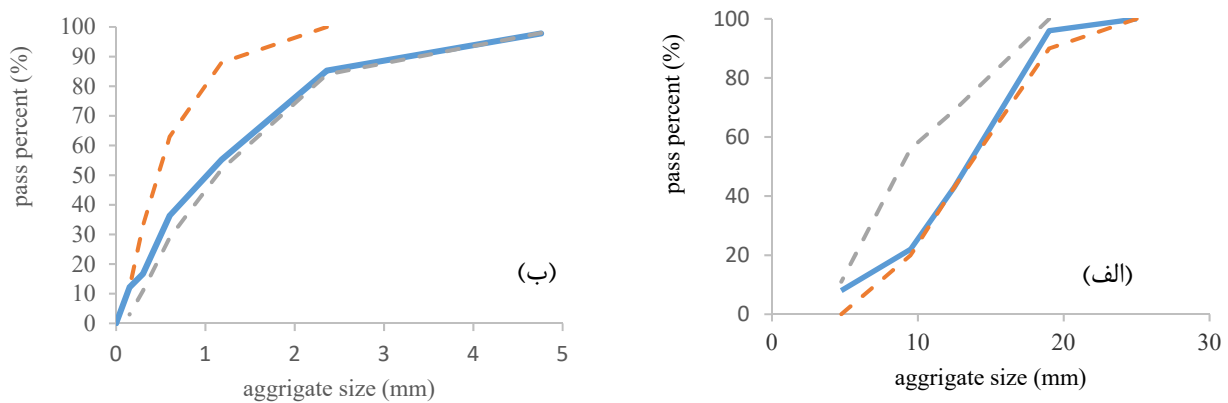


Fig. 1. Sand grading chart of (الف) gravel (ب) sand (The dashed line chart shows the standard allowed range of ASTM-C136 [7])

شکل ۲. نتایج آنالیز XRD روی آهک هیدرولیکی

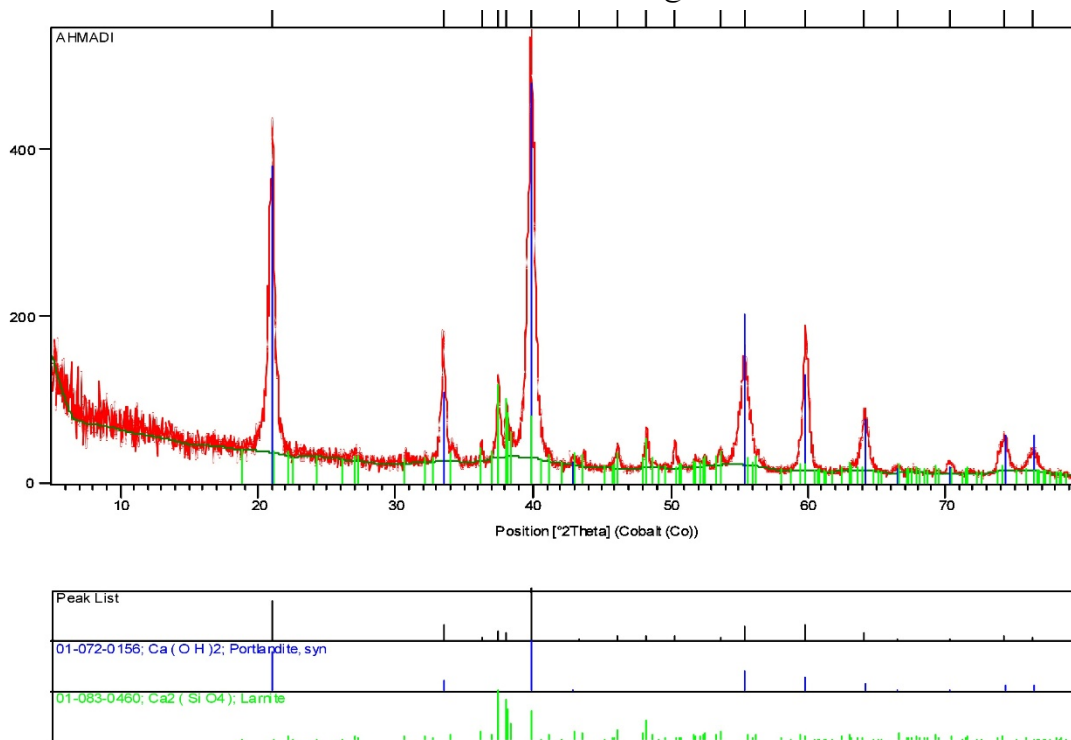


Fig. 2. XRD analysis results on hydraulic lime

پوزولان‌های به کار رفته در بتن‌ها، عبارت بودند از دوده سیلیس (SF)، سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) که در تحقیقات پیشین بهترین نتیجه را ایجاد کرده بودند و زئولیت (ZE) که اثر آن بررسی نشده بود. دوده سیلیس با عنوان پودر میکروسیلیکا،

پوزولان‌های به کار رفته در بتن‌ها، عبارت بودند از دوده سیلیس (SF)، سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) که در تحقیقات پیشین بهترین نتیجه را ایجاد کرده بودند و زئولیت (ZE) که اثر آن بررسی نشده بود. دوده سیلیس با عنوان پودر میکروسیلیکا،

همدان و دارای ذرات کوچکتر از $300\mu\text{m}$ و چگالی ویژه $2/45$ ، تهیه و به کار گرفته شد. همچنین سیمان مصرفی این تحقیق، از نوع پرتلند تیپ II محصول شرکت سیمان تهران بود. درصد ترکیبات شیمیایی مواد آهکی، سیمانی و پوزولانی با استفاده از آنالیز XRF به دست آمده و در جدول (۱) ارائه شده است.

محصول کارخانه ازنا مورد تایید استاندارد ASTM C1240 [9]، از شرکت فروسیلیس ایران تهیه شد که چگالی ویژه آن $2/25$ بود. سرباره کوره ذوب آهن نیز طبق الزام استاندارد ملی ایران ۱-۲۱۳۱۹ [10]، از شرکت زیست فناور واقع در همدان با چگالی ویژه $2/75$ تهیه شد. زئولیت نیز به عنوان پوزولان طبیعی با رعایت ضوابط ASTM C618 [11]، از شرکت زیست فناور

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح استفاده شده

Material	Natural hydraulic lime (NHL)	Ground Granulated Blastfurnace Slag (GGBS)	Silica Fume (SF)	Zeolite (Ze)	Portlant Cement (C)
CaO	70.55	38	1.87	2.996	63.30
MgO	4.399	9.9	1.61	0.461	1.59
MnO	<<	0.05	-	0.035	-
SiO ₂	6.854	35.6	89.22	70.255	21.13
Na ₂ O	-	0.4	0.556	1.138	0.42
K ₂ O	0.422	0.17	1.056	1.075	0.69
Al ₂ O ₃	2.096	11.8	1.2	8.983	5.04
Fe ₂ O ₃	2.419	1	2.12	1.011	3.76
TiO ₂	<<	-	0.1	0.175	-
SO ₃	<<	2	-	0.14	2.30
P ₂ O ₅	<<	0.04	-	0.036	-
Cu	<<	-	-	0.004	-
Zn	-	-	-	0.004	-
Rb	-	-	-	0.874	-
Se	-	-	-	0.012	-
Zr	<<	-	-	0.033	-
Sr	-	-	-	0.121	-
Ag	-	-	-	0.007	-
Ba	-	-	-	0.079	-
Pb	-	-	-	0.012	-
L.O.I	13.26	-	2.6	12.51	3

Table 1. Chemical compounds of used materials

برای بهبود کارایی بتن های آهکی-پوزولانی از فوق روان کننده محصول شرکت آبادگران سازه، به نام سوپر فوق روان کننده AK، ماده ای پلی کربوکسیلات بر پایه اتر، استفاده شد.

۳-۲ نسبت های مخلوط

بتن های آهکی-پوزولانی با دو نوع نسبت مشابه پژوهش های گذشته که بهترین نتایج مقاومتی را نشان داده بودند، تحت عنوان (L.SF.GG و L.SF) و یک نسبت با ترکیب دوگانه آهک و سرباره (L.GG) انتخاب شدند. همچنین اثر زئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی و سیمان پرتلند روی ترکیبات سه گانه از بتن آهکی پوزولانی در ترکیب با دوده سیلیس و سرباره در چهار نسبت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. یک بتن معمولی (C)

شاخص خاصیت سیمانی (CI) برای مصالح چسباننده، بر اساس این فرض تعریف می شود که سیلیکا با 3CaO.SiO_2 و آلومینا تحت عنوان $2\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$ در ترکیبات وجود دارند و اکسید آهن و منیزیم با معادلشان از آلومینا و آهک جایگزین شده اند که ترکیبات با خواص مشابهی را شکل می دهند. این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می شود [12]. طبق جدول (۱) مقدار CI برای آهک هیدرولیکی مصرفی این تحقیق برابر $0/3$ به دست می آید؛ این مقدار برای آهک هیدرولیکی تحقیق گریست و همکاران [6] برابر $0/7$ و برای سیمان پرتلند حدود $1/1$ تا $1/2$ است [12].

$$CI = \frac{[(2/8 \times \%SiO_2) + (1/1 \times \%Al_2O_3) + (0/7 \times \%Fe_2O_3)]}{(\%CaO) + (1/7 \times \%MgO)} \quad (1)$$

در نظر گرفته شده است. برای همه ترکیبات بتنی، از فوق روان‌کننده استفاده شده است. با توجه به سطح ویژه بالای آهک و مواد پوزولانی، مقدار استفاده از فوق روان‌کننده برای بتن‌های آهکی-پوزولانی بیشتر از بتن معمولی و برابر ۱٪ و در مورد بتن L.SF برابر ۱/۲٪ از مواد چسباننده در نظر گرفته شد. این نسبت برای بتن سیمان پرتلندی برابر ۰/۵٪ در نظر گرفته شد. طرح مخلوط بتن به روش آیین‌نامه ACI-211 [13] انجام شده است. مقدار نسبت آب به چسباننده بتن (w/b) برای همه بتن‌های آهکی-پوزولانی و بتن سیمان پرتلندی به جهت کسب بهترین مقاومت مکانیکی، برابر ۰/۳۵ ثابت نگه داشته شد. برای بتن‌های حاوی زئولیت با ساخت نمونه آزمایشی در نسبت w/b = ۰/۳۵ و مشاهده عدم پیوستگی مطلوب بتن، این نسبت اصلاح شده و برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. نسبت‌های مخلوط بتن‌های ساخته شده در جدول (۲) ارائه شده است.

نیز با ۱۰٪ سیمان پرتلند به عنوان بتن مرجع برای مقایسه ساخته شد. نسبت‌های مواد چسبیده در بتن‌ها به شرح زیر بود:

- ۷۰٪ آهک هیدرولیکی و ۳۰٪ دوده سیلیس (L.SF)
- ۷۰٪ آهک هیدرولیکی و ۳۰٪ سرباره (L.GG)
- ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ سرباره (L.SF.GG)
- ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ زئولیت (L.SF.ZE)
- ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۲۵٪ سرباره و ۲۵٪ زئولیت (L.GG.ZE)
- ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۳۰٪ سیمان پرتلند و ۲۰٪ دوده سیلیس (L.C.SF)
- ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۳۰٪ سیمان پرتلند و ۲۰٪ سرباره (L.C.GG)
- ۱۰۰٪ سیمان پرتلند (C)

به منظور مقایسه، یک بتن معمولی بدون فوق روان‌کننده (با عنوان C-NS) نیز با استفاده از نتایج تحقیق گریست و همکاران [5]

جدول ۲. نسبت‌های مخلوط بتن‌های ساخته شده

Concrete Name	w/b	Water kg/m ³	Binder kg/m ³	Portland Cement kg/m ³	Natural Hydraulic Lime kg/m ³	Slica Fume kg/m ³	Ground Granulated Blastfurnace Slag kg/m ³	Zeolite kg/m ³	Gravel kg/m ³	Sand kg/m ³	Super plasticiser kg/m ³
L.SF	0.35	280	800	-	560	240	-	-	560	373	9.6
L.GG	0.35	280	800	-	560	-	240	-	599	400	8
L.SF.GG	0.35	270	771	-	386	193	193	-	621	472	7.7
L.SF.ZE	0.45	330	733	-	367	183	-	183	541	360	7.3
L.GG.ZE	0.45	305	678	-	339	-	169	169	626	426	6.8
L.C.SF	0.35	255	729	219	364	146	-	-	695	463	7.3
L.C.GG	0.35	255	729	219	364	-	1.46	-	713	476	7.3
C	0.35	215	614	614	-	-	-	-	926	617	3.1
C-NS [16]	0.35	230	660	660	-	-	-	-	910	590	-

Table 2. Mixed proportions of concretes made

از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شدند و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در حالت غوطه‌ور در آب و دمای ۲۰°C انجام گرفت.

۳-۴ آزمایش‌های انجام شده

با انجام آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 [15] روی نمونه بتن تازه، کارایی بتن‌های ساخته شده بررسی شد. برای سنجش خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده، آزمایش مقاومت فشاری مطابق ASTM C116 [16]، روی نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ cm، مقاومت کششی به روش برزیلی (دو نیم

۳-۳ شیوه ساخت و عمل‌آوری بتن‌ها

سنگدانه‌ها در بتن به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) به کار رفتند. برای اختلاط بتن آهکی-پوزولانی از میکسرهای کف‌های که دارای مخلوط‌کن هستند، استفاده شد؛ زیرا به علت سطح ویژه و جذب آب زیاد ذرات آهک و پوزولان‌ها، این مواد در میکسرهای غلتکی ثقلی به صورت کلوخه و گرد در می‌آیند و اختلاط به خوبی شکل نمی‌گیرد. بتن طبق استاندارد ASTM C192 [14] در قالب‌ها ریخته شده و متراکم شد. سپس قالب‌ها با روکش پلاستیکی به عنوان عایق رطوبتی پوشیده شدند. پس

نتایج اسلامپ بتن‌های مختلف ساخته شده، در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به آن مشاهده می‌شود که به کار بردن فوق روان‌کننده، اسلامپ بیشتر بتن‌ها را بهبود بخشیده است. سه نسبت بتنی آهکی-پوزولانی (L.GG.ZE, L.C.GG, L.SF.GG) از بتن سیمانی اسلامپ بیشتری داشتند (البته در بتن سیمانی فوق روان‌کننده نسبتاً کمتری به کار رفته بود). با مقایسه دو بتن آهکی-پوزولانی حاوی سیمان، مشاهده می‌شود که سرباره کوره ذوب آهن نسبت به دوده سیلیس کارایی بهتری را به وجود آورده است که می‌تواند به علت جذب آب بسیار بالای دوده سیلیس باشد. بتن آهکی سیمانی سیلیسی (L.C.SF) کمترین اسلامپ را نشان داد (۸ cm). جدول (۳) نشان می‌دهد با وجود اینکه نسبت آب به چسباننده بتن‌های حاوی زئولیت بیشتر از بتن‌های حاوی سرباره بود (۰/۳۵ < ۰/۴۵) بود، اسلامپ بتن زئولیتی کمتر از بتن سرباره‌ای به دست آمد که به دلیل سطح ویژه به مراتب زیادتر دانه‌های زئولیت از سرباره است.

شدن) بر اساس ASTM C496 [17]، روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm، مقاومت خمشی به روش بارگذاری مرکزی تیر ساده مطابق استاندارد ASTM C293 [18] روی نمونه‌های منشوری ۱۰×۱۰×۳۵ cm و مدول ارتجاعی بتن‌ها مطابق با ASTM C469 [19] روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm، انجام گرفت. به منظور بررسی واکنش‌های هیدراتاسیون و کربناتی، آنالیز وزن‌سنجی حرارتی هم‌زمان (STA: DTA/TG) نیز انجام شد. در این آزمایش تغییرات جرم نمونه‌های بتنی در اثر حرارت تا دمای ۱۰۰۰°C اندازه‌گیری شد. اتمسفر دستگاه گاز آرگون و سرعت برنامه‌دهی حرارتی ۱۰ °C/min بود.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج آزمایش‌های مختلف نمونه‌ها آورده و تحلیل شده و با نتایج تحقیقات مشابه مقایسه شده است.

۴-۱ کارایی

جدول ۳. نتایج اسلامپ بتن‌های ساخته شده

Concret name	L.SF	L.GG	L.SF.GG	L.SF.ZE	L.GG.ZE	L.C.SF	L.C.GG	C	C-NS
Slump (cm)	15.8	13	19.5	15.5	23	4	22	19	14

Table 3. Slump results of concretes made

۵۸/۵ شد (البته با اسلامپ خیلی کمتر). ترکیب دوگانه از آهک و سرباره مقاومت مطلوبی را در بتن آهکی-پوزولانی کسب نکرد. در شکل (۳) نمودار پیشرفت مقاومت فشاری بتن‌های آزمایش شده در سنین مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌شود که اگر چه واکنش‌های پوزولانی و همچنین سخت شدن آهک کند هستند، سرعت کسب مقاومت فشاری بتن‌های آهکی-پوزولانی مانند بتن سیمانی، زیاد بوده و حدوداً ۶۰-۵۵٪ از مقاومت ۵۶ روزه در ۷ و ۹۰-۸۵٪ مقاومت در ۲۸ روز کسب شدند. دلیل این موضوع می‌تواند اضافه کردن فوق روان‌کننده به بتن باشد که موجب تسریع در انجام واکنش‌های هیدراتاسیون شده است. همچنین مشخص شد که به کار بردن دوده سیلیس در بتن، مقاومت فشاری بیشتر و سریع‌تری نسبت به سرباره کوره ذوب آهن، در تمام سنین به دست می‌آورد. این موضوع به سبب فعالیت زیاد دوده سیلیس، با ایجاد زل‌های سیلیکاتی قوی‌تر در بتن به وقوع پیوسته است.

۴-۲ مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن‌های ساخته شده در جدول (۴) آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۴ مخلوط بتنی L.SF, L.SF.GG, L.C.SF و L.C.GG بالاتر از ۳۰ MPa کسب شده است که به عنوان یک بتن سازه‌ای مطلوب در مقایسه با بتن سیمان پرتلندی بدون فوق روان‌کننده (C-NS) قابل رقابت است. در میان نمونه‌های بدون سیمان پرتلند، ترکیب L.SF.GG بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نشان داد (۴۰/۱ MPa)، که نزدیک به مقاومت بتن مرجع C-NS بود. این موضوع یعنی بتن با آهک و پوزولان، بدون سیمان نیز می‌تواند مقاومت بالایی داشته باشد. همچنین مشخص شد که ترکیب ۳۰٪ سیمان پرتلند با آهک و پوزولان در بتن، مقاومت فشاری مطلوبی ایجاد می‌کند. بتن با آهک، سیمان و دوده سیلیس (L.C.SF) بهترین نتیجه را بین بتن‌های ساخته شده ایجاد کرد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن بیشتر از بتن سیمانی (C) و برابر MPa

جدول ۴. مقاومت فشاری، کششی و خمشی و مدول ارتجاعی بتن‌های ساخته شده

Concrete Name	Compressive strength, f_c (MPa)			Tensile splitting strength, f_t (MPa)	Flexural strength, f_r (MPa)		Elastic modulus, R_c (GPa)
	7 days	28 days	56 days	28 days	14 days	28 days	28 days
L.SF	20.12	33.45	36.37	2.38	4.05	4.11	13.74
L.GG	10.82	15.68	17.82	1.25	1.77	2.24	14.76
L.SF.GG	24.21	40.1	45.06	3.15	3.99	4.65	18.7
L.SF.ZE	15.94	24.61	27.56	1.5	1.67	2.28	11.63
L.GG.ZE	11.02	16.75	18.92	1.54	2.31	2.58	11.25
L.C.SF	36.83	58.55	59.5	3.25	5.95	6.24	21.75
L.C.GG	29.09	40.2	43.47	2.63	3.54	4.19	21.31
C	41.1	57.4	60.26	4.3	5.81	5.85	22.6
C-NS	33.5	49	52.5	-	-	-	-

Table 4. Compressive, tensile and flexural strength and elastic modulus of concretes made

شکل ۳. نمودار پیشرفت مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده در سنین مختلف

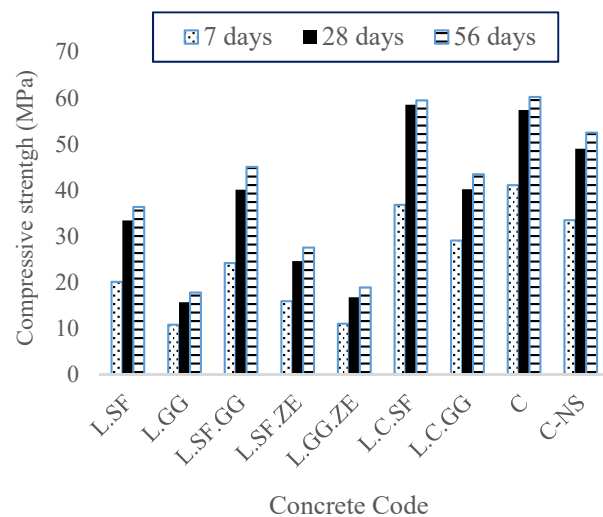


Fig. 3. Development chart of compressive strength of the concrete made in different ages

برخی از درخواست‌های سازه‌ای با نیاز مقاومتی کم، قابلیت کاربرد دارد.

به منظور مقایسه، در شکل (۴) نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه این تحقیق به همراه بهترین نتایج مشابه در تحقیقات پیش از آن آورده شده است. مشاهده می‌شود که هرچه نسبت آب به چسباننده (w/b) کوچکتر باشد، مقاومت فشاری بیشتری به دست می‌آید، و بیشترین مقاومت در مقدار $w/b=0.35$ به دست آمده است. از مقایسه دو بتن آهکی-پوزولانی تولید شده در این تحقیق و کار گریست و همکاران [5]، می‌توان نتیجه گرفت که در بتن دوگانه مشابه (SF/۳۰ - NHL/۷۰) با نسبت آب به چسباننده (w/b) یکسان و برابر ۰/۳۵، مقاومت‌های به دست آمده تفاوت چندانی با هم ندارند؛ اما مقاومت بتن این تحقیق کمی کمتر نسبت به کار گریست و همکاران [5] است (حدود ۲ MPa) که می‌تواند دو دلیل عمده داشته باشد. اول اینکه طبق توضیحات بخش (۲-۱) آهک هیدرولیکی به کار رفته در این تحقیق ضعیف‌تر بوده و مقدار مواد سیمانی به کار رفته آن نیز بیشتر بوده است. دلیل دیگر می‌تواند زیاد بودن مقدار فوق روان‌کننده در بتن L.SF این تحقیق باشد (۱/۲٪ از چسباننده بتن) که منجر به کاهش مقاومت شده است. با مقایسه اثر دو پوزولان طبیعی در شکل (۴)، واضح است که خاکستر بادی (FA) مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به زئولیت (ZE) در بتن آهکی-پوزولانی در ترکیب با آهک و دوده سیلیس ایجاد می‌کند.

با مقایسه بتن‌های آهکی-پوزولانی دوگانه و سه‌گانه، مقاومت‌های فشاری در بتن‌های سه‌گانه هم بیشتر و هم زودتر کسب شدند که علت آن مصرف کلسیم هیدروکسید بیشتر در بتن سه‌گانه با پوزولان‌های بیشتر بود. بتن L.C.SF در سن ۷ روزه مقاومت کمتر، اما در سن ۲۸ روزه مقاومتی بیشتری از مقاومت بتن سیمانی کسب کرد که دلیل آن، سرعت کم واکنش‌های پوزولانی است.

با توجه به نتایج جدول (۲) و شکل (۳)، مشاهده می‌شود که به کار بردن زئولیت به عنوان پوزولان طبیعی نیز در بتن آهکی-پوزولانی، مقاومت زیادی را کسب نکرد و بهترین نتیجه آن در بتن L.SF.ZE بود (حدود ۲۵ MPa) که برای استفاده در

شکل ۴. مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های این تحقیق با تحقیقات گذشته [5, 6]

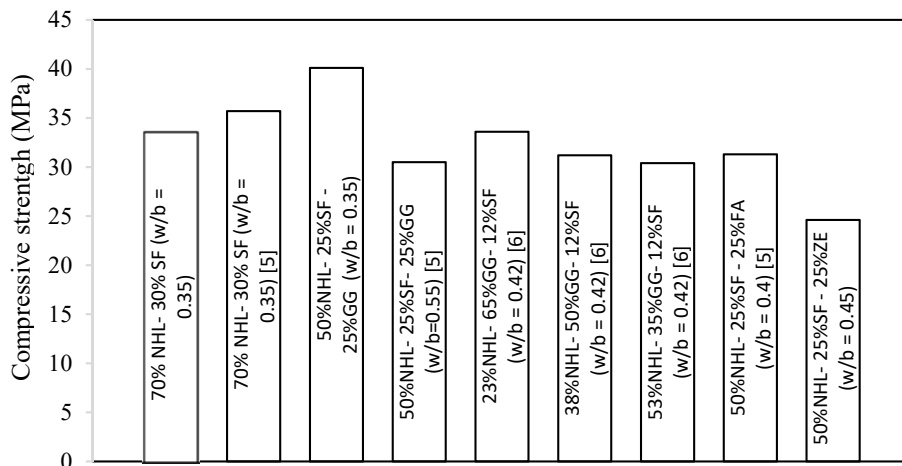


Fig. 4. Comparison of 28-day compressive strength results of this study with previous studies [5,6]

۳-۴ مقاومت کششی

پوزولان، در هر مورد مقاومت کششی کمتری را ایجاد می‌کند. همه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، در سمت چپ نتایج رابطه آیین‌نامه ACI 318 [20] قرار گرفته‌اند که نشان از مقاومت کششی کمتر بتن آهکی-پوزولانی نسبت به سیمانی دارد. با توجه به پراکندگی نتایج آزمایشگاهی، برای بتن‌های آهکی-پوزولانی نمی‌توان رابطه خاصی را برازش کرد.

شکل ۵. رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن‌های آزمایش شده به همراه نمودار ACI318 [20] در سن ۲۸ روزه

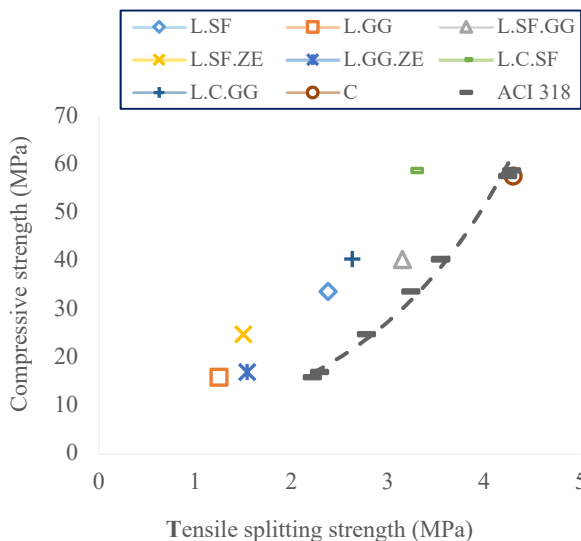


Fig. 5. Relationship between compressive strength and tensile strength of tested concretes with diagram of ACI318 [20] at 28 days of age

۴-۴ مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن‌های آزمایش شده در جدول (۴) ارائه شده است. مقاومت خمشی همه نمونه‌های بتنی از سن ۱۴ تا ۲۸ روزه تغییر خاصی نکرده است؛ این موضوع به کسب

با توجه به نتایج مقاومت کششی بتن‌های آزمایش شده در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که مقاومت کششی همه بتن‌های آهکی-پوزولانی، به مراتب کمتر از نمونه شاهد سیمانی کسب شده است. ضعیف‌ترین مقاومت کششی در بتن دوگانه آهک و سرباره (L.GG) مشاهده شد. بعد از آن نمونه‌های حاوی زئولیت مقاومت کششی کمتری را نسبت به بقیه نشان دادند. این موضوع نشان داد استفاده از زئولیت، نسبت به دوده سیلیس و سرباره کوره ذوب آهن، مقاومت کششی کمتری ایجاد می‌کند. همچنین دوده سیلیس، مقاومت کششی بیشتری را نسبت به سرباره، در بتن آهکی-پوزولانی ایجاد کرد. بیشترین مقاومت کششی بتن آهکی-پوزولانی در بتن L.C.SF، برابر ۳/۲۵ MPa (یک واحد کمتر از بتن مرجع) به دست آمد.

در شکل (۵) رابطه بین مقاومت فشاری و کششی بتن‌های آزمایش شده، در سن ۲۸ روزه نشان داده شده است. در این شکل نمودار رابطه بین مقاومت فشاری و کششی بتن سیمانی که در آیین‌نامه ACI 318 [20] پیشنهاد شده، از روی نتایج به دست آمده به کمک رابطه (۲) محاسبه و ارائه شده است. با توجه به شکل (۵)، مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری بتن آهکی-پوزولانی به یک نسبت متغیر، مقاومت کششی آن نیز افزایش می‌یابد.

$$f_t = 0.56(f_c)^{0.5} \quad (2)$$

که در آن f_t مقاومت کششی و f_c مقاومت فشاری است. همچنین طبق شکل (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که در مقاومت‌های فشاری مشابه، استفاده از سیمان در بتن آهکی-پوزولانی به جای

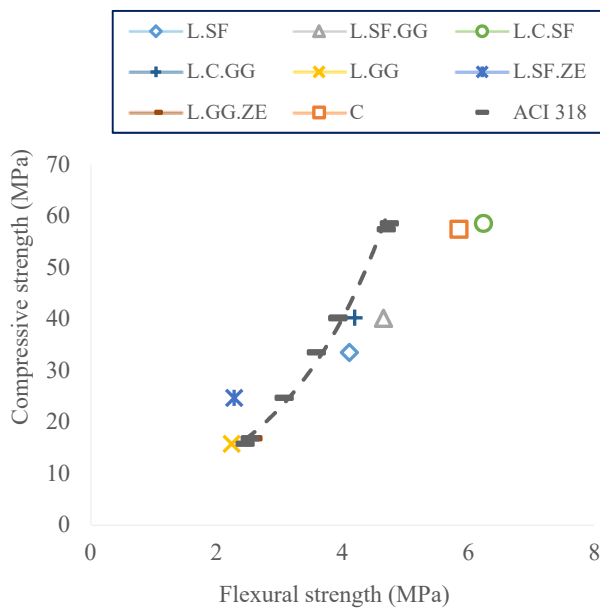


Fig. 6. Relationship between compressive strength and flexural strength of tested concretes with diagram of ACI318 [20] at 28 days of age

۴-۵-مدول ارتجاعی

نتایج مدول ارتجاعی بتن‌های آزمایش شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که همه بتن‌های آهکی-پوزولانی سختی کمتری نسبت به بتن سیمانی (C) داشتند. بتن‌های آهکی-پوزولانی که در ترکیب خود سیمان پرتلند داشتند (L.C.SF و L.C.GG)، سخت‌تر از بقیه بودند و مدولی نزدیک به بتن سیمانی کسب کردند. این موضوع به دلیل سختی بیشتر ذرات سیمان نسبت به آهک و پوزولان بود. با مقایسه بین نتایج، مقدار سختی بتن دوده سیلیسی بیشتر از بتن سرباره‌ای بود اما تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. ترکیب سه‌گانه دوده سیلیس و سرباره با آهک هیدرولیکی (L.SF.GG)، مدول ارتجاعی بیشتری را از ترکیب دوگانه هر کدام از آنها به دست آورد. نرم‌ترین بتن‌های آهکی-پوزولانی بتن‌های حاوی زئولیت بودند که به دلیل نرمی زیاد دانه‌های زئولیت بود.

در شکل (۷) نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های آهکی-پوزولانی در برابر مدول ارتجاعی آنها ناشی از آزمایش، به همراه نمودار رابطه پیشنهادی آیین‌نامه [20] ACI 318 برای بتن سیمانی رابطه (۴) رسم شده است.

با توجه به شکل (۷)، واضح است که با افزایش مقدار مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی نیز زیاد می‌شود. در بتن‌های آهکی-پوزولانی با مقاومت فشاری مشابه، سیمان پرتلند بتن سخت‌تری نسبت به سرباره کوره ذوب آهن ایجاد کرد ولی بتن

مقاومت سریع در سنین اولیه به علت استفاده از فوق روان‌کننده نسبت داده می‌شود. بیشترین مقاومت خمشی بتن آهکی-پوزولانی مربوط به بتن آهکی سیمانی سیلیسی بود که از بتن سیمانی نیز مقاومت بیشتری داشت (۶/۲۴ MPa). بعد از آن بتن L.SF.GG بود که با نتایج مقاومت خمشی بتن‌های L.SF و L.C.GG اختلاف کمی داشت. با مقایسه نتایج، مشخص می‌شود که به کار بردن سیمان پرتلند در بتن آهکی-پوزولانی، نسبت به سرباره کوره ذوب آهن مقاومت خمشی بیشتر و نسبت به دوده سیلیس مقاومت خمشی کمتری ایجاد کرد. مقدار مقاومت خمشی بتن‌های حاوی زئولیت (L.SF.ZE و L.GG.ZE) و بتن دوگانه (L.GG) نیز مشابه و ضعیف‌تر از سایر بتن‌ها بودند. همچنین بین نتایج مقاومت خمشی بتن با ترکیب دوگانه و سه‌گانه از آهک و پوزولان، تفاوت زیادی مشاهده نشد ولی مقدار مدول گسیختگی در ترکیب سه‌گانه با کاهش مقدار آهک، بیشتر از دو گانه به دست آمد.

نمودار رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن‌های آهکی-پوزولانی ۲۸ روزه ساخته شده، به همراه رابطه پیشنهادی آیین‌نامه [20] ACI 318 برای بتن سیمانی رابطه (۳)، در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به آن، نتایج آزمایشگاهی مشخص کرد که تغییر در مقاومت فشاری بتن آهکی-پوزولانی تاثیر بیشتری روی مقاومت خمشی آن دارد و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی در اکثر موارد زیاد می‌شود اما رابطه آیین‌نامه در مورد آن صادق نیست.

$$f_r = 0.62(f_c)^{0.5} \quad (3)$$

که در آن f_r مقاومت خمشی و f_c مقاومت فشاری است. با مقایسه نتایج بتن‌های آهکی-پوزولانی در شکل (۶)، ملاحظه می‌شود که بین دو بتن دارای زئولیت، مقاومت فشاری بتن دوده سیلیس بیشتر از بتن دارای سرباره کوره ذوب آهن اما مقاومت خمشی آن کمتر است؛ ولی در دیگر موارد بتن‌های دوده سیلیسی هم مقاومت فشاری و هم خمشی بالاتری نسبت به بتن‌های سرباره‌ای ایجاد کردند. همچنین سیمان پرتلند نسبت به همه پوزولان‌ها، در مقاومت فشاری مشابه، مقاومت خمشی کمتری را در بتن آهکی-پوزولانی کسب کرد.

شکل ۶. رابطه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن‌های آزمایش شده به همراه نمودار [20] ACI318 در سن ۲۸ روزه

نسبی TG و مشتق آن DTG هستند. در دماهایی که افت وزنی به صورت ناگهانی است، نمودار DTG به صورت پیک در آمده است.

در شکل (۸) با توجه به واکنش تجزیه کلسیم هیدروکسید در بازه دمایی 200°C – 550°C ، یک افت جرمی در این بازه در نمودار رخ داده که مقدار کلسیم هیدروکسید ناشی از این واکنش هیدراتی (CH_{hdr}) از رابطه (۵) به دست می آید. مقدار محاسبه شده، باید با اضافه کردن مقدار کلسیم هیدروکسیدی که در حضور کربن دی اکسید هوا کربنات می شود، اصلاح شود. کلسیم کربنات در بازه دمایی 850°C – 550°C تجزیه می شود، بنابراین مقدار کلسیم هیدروکسید ناشی از واکنش کربناتی از رابطه (۶) و در نهایت مقدار کل کلسیم هیدروکسید موجود در بتن (CH) از رابطه (۷) محاسبه می شود. مقدار کلسیم کربنات تولید شده در واکنش کربناتی (CC) نیز از رابطه (۸) به دست می آید.

$$\text{CH}_{\text{hdr}} = \frac{\text{ML}_{(420-550^{\circ}\text{C})} \cdot \text{MM}_{(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{\text{MM}_{(\text{H}_2\text{O})}} \times 100 \quad (5)$$

که در آن CH_{carb} مقدار کلسیم هیدروکسید ناشی از کربنات شدن؛ $\text{ML}_{(420-550^{\circ}\text{C})}$ افت جرمی بین 200°C – 550°C در نمودار TG؛ $\text{MM}_{(\text{Ca}(\text{OH})_2)}$ جرم مولی کلسیم هیدروکسید؛ $\text{MM}_{(\text{H}_2\text{O})}$ جرم مولی آب است.

$$\text{CH}_{\text{carb}} = \frac{\text{ML}_{(550-850^{\circ}\text{C})} \cdot \text{MM}_{(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{\text{MM}_{(\text{CO}_2)}} \times 100 \quad (6)$$

که در آن $\text{ML}_{(550-850^{\circ}\text{C})}$ افت جرمی بین دمای 850°C – 550°C در نمودار TG؛ $\text{MM}_{(\text{Ca}(\text{OH})_2)}$ جرم مولی کلسیم هیدروکسید؛ $\text{MM}_{(\text{CO}_2)}$ جرم مولی کربن دی اکسید است.

$$\text{CH} = \text{CH}_{\text{hdr}} + \text{CH}_{\text{carb}} \quad (7)$$

$$\text{CC} = \frac{\text{ML}_{(550-850^{\circ}\text{C})} \cdot \text{MM}_{(\text{CaCO}_3)}{\text{MM}_{(\text{CO}_2)}} \times 100 \quad (8)$$

که در آن CC مقدار کلسیم کربنات؛ $\text{ML}_{(550-850^{\circ}\text{C})}$ افت جرمی بین دمای 850°C – 550°C در نمودار TG؛ $\text{MM}_{(\text{CaCO}_3)}$ جرم مولی کلسیت؛ $\text{MM}_{(\text{CO}_2)}$ جرم مولی کربن دی اکسید است.

با دوده سیلیس نسبت به هردوی آنها سختی بیشتری را کسب کرده است.

طبق شکل (۷)، همه نتایج آزمایش مدول ارتجاعی در سمت چپ رابطه آیین نامه قرار گرفتند که به دلیل سختی کمتر بتن های آهکی-پوزولانی از بتن سیمانی است و همچنین معلوم شد این رابطه برای بتن آهکی-پوزولانی برقرار نیست.

$$R_c = 0.043(\rho^{1.5})(f_c)^{0.5} \quad (4)$$

شکل ۷. رابطه مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی بتن های آزمایش شده به همراه نمودار ACI318 [20] در سن ۲۸ روزه

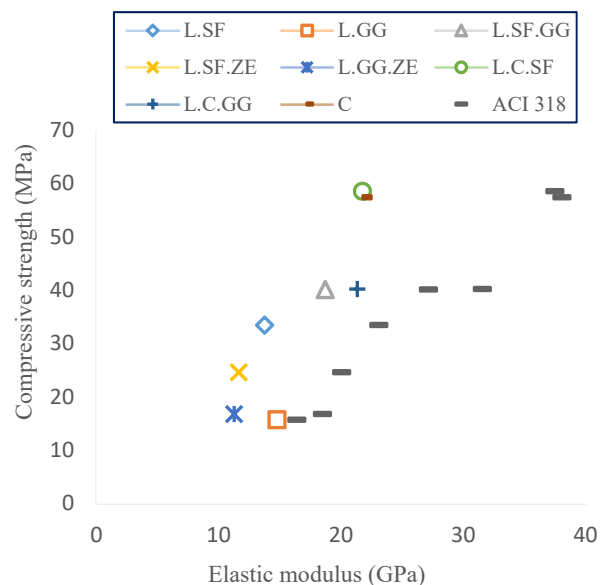


Fig. 7. Relationship between compressive strength and elastic modulus of tested concretes with diagram of ACI318 [20] at 28 days of age

۴-۶ بررسی فعالیت پوزولانی

چهار بتن L.SF، L.SF.GG، L.C.SF، L.C.GG و L.C.SF از این تحقیق که خواص مکانیکی مطلوبی برای نیازهای سازه ای نشان دادند، تحت آنالیز وزن سنجی حرارتی قرار گرفتند. آنالیز روی نمونه های ۲۸ روزه انجام شد و نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. نمودارهای شکل (۸) شامل دو نمودار افت جرمی

شکل ۸. نمودار TG و مشتق آن (DTG) برای بتن‌های (۱) L.SF، (۲) L.SF.GG، (۳) L.C.SF و (۴) L.C.GG در سن ۲۸ روزه

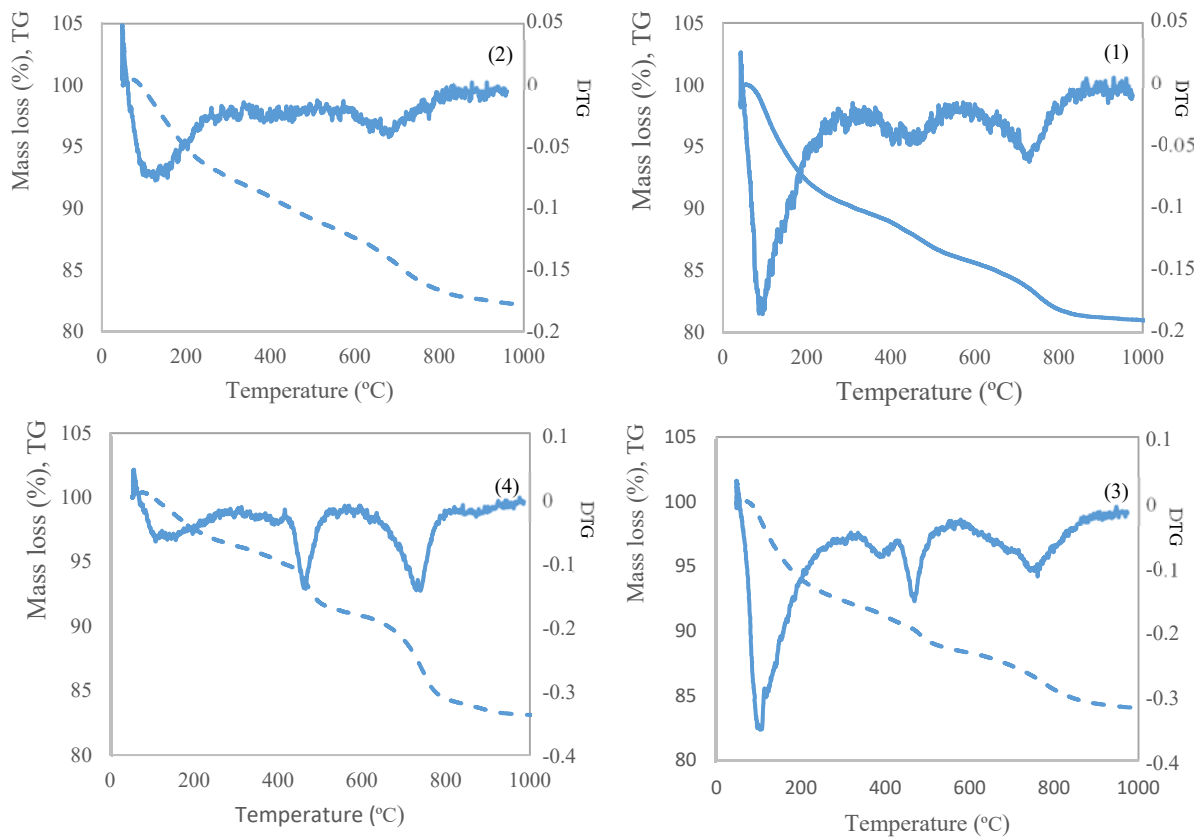


Fig. 8. TG and its derivative diagrams (DTG) for 1) L.SF, 2) L.SF.GG, 3) L.C.SF and 4) L.C.GG at 28 days of age

ملاحظه می‌شود که در بتن حاوی دوده سیلیس، مقدار کمتری از کلسیم هیدروکسید مانده است و این به معنی مصرف بیشتر کلسیم هیدروکسید طی واکنش پوزولانی در بتن است. بنابراین دوده سیلیس فعال‌تر از سرباره عمل کرده است.

با توجه به مقادیر CC در جدول (۵)، می‌توان فهمید در بتن‌های شامل سرباره این مقدار بیشتر است که به سبب فعالیت پوزولانی کمتر سرباره نسبت به دوده سیلیس بود که موجب شد کلسیم هیدروکسید بیشتری برای واکنش کربناتی موجود باشد. همچنین به کار بردن سیمان پرتلند در بتن آهکی-پوزولانی به جای دوده سیلیس، موجب کربنات شدن بیشتر بتن شد. این در حالی است که با جایگزینی سیمان با سرباره، کلسیم کربنات کمتری در بتن ایجاد شده است.

مقادیر درصد افت جرمی ناگهانی، کلسیم هیدروکسید (CH) و کلسیم کربنات (CC) موجود در نمونه‌های بتنی آنالیز شده در جدول (۵) خلاصه شده است. با توجه به آن مشاهده می‌شود که در همه بتن‌ها افت جرمی اولیه بیشتر از سایر افت‌ها است که به سبب از دست رفتن آب و تخریب ژل‌های سیلیکاتی و آلومیناتی به دست آمده است و اشاره به نیاز به آب بالای بتن‌های آهکی-پوزولانی به علت سطح ویژه بالای ذرات آنها دارد. این موضوع در بتن‌های حاوی دوده سیلیس (با سطح ویژه زیاد) مشهودتر است. با توجه به مقادیر CH در جدول (۵)، مشاهده می‌دهد که در نمونه بتنی بدون سیمان پرتلند، کلسیم هیدروکسید کمتری وجود دارد که این موضوع به دلیل حضور بیشتر پوزولان که با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و ژل‌های سیلیکاتی و آلومیناتی به وجود آوردند. در بین بتن‌های مشابه L.C.SF و L.C.GG

جدول ۵. نتایج افت جرمی، مقدار کلسیم هیدروکسید و کلسیم کربنات موجود در نمونه‌های آهکی-پوزولانی

Concrete Name	Relative mass loss (%)			CC (%)	CH (%)	CH _{carb} (%)	CH _{hdr} (%)
	550-850 °C	420-550 °C	50-420 °C				
L.SF	4.78	2.37	10.38	10.86	13.73	3.99	9.74
L.SF.GG	5.55	2.13	8.29	12.61	12.34	3.58	8.76
L.C.SF	3.9	2.16	8.2	8.86	12.51	3.63	8.88
L.C.GG	7.3	3.56	4.24	16.59	20.62	5.99	14.64

Table 5. Results of mass loss, calcium hydroxide and calcium carbonate content in lime-pozzolan samples

۵- نتیجه گیری

این تحقیق با هدف به دست آوردن نسبت مخلوط بتنی با چسباننده غالب آهکی-پوزولانی که خواص مکانیکی مطلوبی را از جهت سازه‌ای نشان دهد، انجام شد و جنبه مقایسه‌ای دارد. خلاصه‌ای از نتایج این تحقیق عبارت است از:

۱- استفاده از فوق روان‌کننده در بتن‌های آهکی-پوزولانی، کارایی آنها را بهبود بخشید. بتن حاوی سرباره بیشتر از دوده سیلیس و دوده سیلیس بیشتر از ژئولیت، کارایی داشت.

۲- مشخص شد با آهک هیدرولیکی ضعیف (کم‌مقاومت) نیز می‌توان بتن آهکی-پوزولانی با مقاومت مطلوب ساخت.

۳- از نتایج مقاومت‌های مکانیکی مختلف مشخص شد که ترکیب ۷۰٪ آهک هیدرولیکی و پوزولان با ۳۰٪ سیمان پرتلند به عنوان چسباننده بتن، می‌تواند بتنی با مقاومت مطلوب، قابل رقابت با بتن سیمانی معمولی ایجاد کند.

۴- در بین بتن‌های آهکی-پوزولانی، ۴ نوع بتن خواص مکانیکی قابل رقابتی را با بتن سیمانی بدون فوق روان‌کننده نشان دادند و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آنها بیشتر از ۳۰ MPa به دست آمد. دو ترکیب از ۵۰٪ آهک هیدرولیکی و ۳۰٪ سیمان با ۲۰٪ دوده سیلیس یا ۲۰٪ سرباره و دو ترکیب دیگر از ۷۰٪ آهک هیدرولیکی با ۳۰٪ دوده سیلیس و ترکیب سه‌گانه ۵۰٪ آهک هیدرولیکی ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ سرباره بودند.

۵- به کار بردن ۲۵٪ ژئولیت در ترکیب سه‌گانه بتن آهکی-پوزولانی توانست تا حدودی خواص مکانیکی را بهبود بخشد ولی مقاومت‌های پایین‌تری را نسبت به دیگر بتن‌ها، در بیشتر موارد نتیجه داد که ترکیب ژئولیت با دوده سیلیس بهتر از ترکیب ژئولیت و سرباره عمل کرد.

۶- مقایسه نتایج بتن‌های ساخته شده با کارهای پژوهشگران نشان داد که آهک هیدرولیکی به کار رفته در این تحقیق از نظر

مقاومتی ضعیف‌تر بوده و مقدار کلی ماده چسباننده بتن بیشتر بوده است. با این وجود در بتن با ۷۰٪ آهک هیدرولیکی و ۳۰٪ دوده سیلیس با نسبت $w/b=0/35$ مقاومت تقریباً مشابهی ایجاد شد ولی در مورد بتن با ۵۰٪ آهک هیدرولیکی، ۲۵٪ دوده سیلیس و ۲۵٪ سرباره کوره ذوب آهن با نسبت $w/b=0/35$ ، بتن ساخته شده در این تحقیق مقاومت بیشتری نسبت به سایر ترکیبات پوزولانی و موارد نظیر در کار پژوهشگران نشان داد.

۷- همه بتن‌های آهکی-پوزولانی سختی کمتری نسبت به بتن مرجع سیمانی نشان دادند. بتن‌های حاوی ۳۰٪ سیمان پرتلند، مدول ارتجاعی نزدیکی به بتن مرجع داشتند. بتن دوده سیلیسی سخت‌تر از بتن سرباره‌ای با اختلاف کم و هر دو سخت‌تر از بتن ژئولیتی بودند.

۸- رابطه بین مقاومت فشاری با مقاومت کششی و خمشی بتن آهکی-پوزولانی نشان داد با افزایش مقاومت فشاری، هر دو مقاومت کششی و خمشی افزایش می‌یابند اما رابطه دقیقی برازش نشد. همچنین بتن‌های آهکی-پوزولانی حاوی سیمان در مقاومت فشاری مشابه، مقاومت کششی و خمشی کمتری داشتند.

۹- با انجام آنالیز وزن‌سنجی حرارتی مشخص شد که هرچه مقدار پوزولان بیشتر شود کلسیم هیدروکسید بیشتری مصرف می‌شود. در بتن حاوی دوده سیلیس، مقدار کمتری از کلسیم هیدروکسید، نسبت به بتن حاوی سرباره، باقی ماند که نشان از فعال‌تر بودن دوده سیلیس دارد. همچنین به کار بردن سیمان پرتلند در بتن آهکی-پوزولانی بیشتر از دوده سیلیس و کمتر از سرباره موجب کربنات شدن بتن شد.

مراجع

- [1] Grist, E.R., Paine, K.A., Heath, A.; "Hydraulic lime – pozzolan concretes: Properties, uses and research needs". In: 9th ICC: Environment,

- National Iranian Standards Organization, Tehran, 2016, in Persian.
- [11] ASTM, (2012), ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, West Conshohocken, P.A., USA.
- [12] Ellison, P.T., Hydraulic Lime Mortars, Masters Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA., 1998.
- [13] Mostofi Nejad, Davood; Concrete Mixing Technology and Design; Arkan Publications, Isfahan, Ninth Edition, 2005, In Persian.
- [14] ASTM, (2002), ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken, P.A., USA.
- [15] ASTM, (2015), ASTM C143C1 M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, West Conshohocken, P.A., USA.
- [16] ASTM, (1990), ASTM C116, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure, West Conshohocken, P.A., USA.
- [17] ASTM, (2004), ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, P.A., USA.
- [18] ASTM, (2016), ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), West Conshohocken, P.A., USA.
- [19] ASTM, (2010), ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, West Conshohocken, P.A., USA.
- [20] ACI, (2014), ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute. Farmington Hills, M.I., USA.
- Efficiency and Economic Challenges for concrete.* Dundee, pp. 314-326, 2016.
- [2] Velosa, A., Cachim, P.; Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions. *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 5, pp. 2107-2111, 2009.
- [3] Velosa, A., Cachim, P., Rocha, F.; "Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions". *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 1, pp. 71-78, 2010.
- [4] Grist, E.R., et al.; "Compressive strength development of binary and ternary lime-pozzolan mortars". *Journal of Materials and Design*, vol. 52, pp. 514-523, 2013.
- [5] Grist, E.R., et al.; "Structural and durability properties of hydraulic lime-pozzolan concretes". *Journal of Materials and Design*, vol. 62, pp. 212-223, 2015.
- [6] Grist, E.R., et al.; "The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes". *Journal of Cleaner Production*, vol. 93, pp. 26-37, 2015.
- [7] ASTM, (2001), ASTM C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, West Conshohocken, P.A., USA.
- [8] National Iranian Standard No. 4738, Hydraulic Hydraulic Lime for Construction Use - Properties and Test Methods, Tehran, Iran: National Iranian Standards Organization, In Persian.
- [9] ASTM, (2015), ASTM C1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, West Conshohocken, P.A., USA.
- [10] National Iranian Standard No. 1-21319, High Furnace Slag Powder for Concrete, Mortar and Cement Mortar for Use in Concrete (Part 1-Definitions, Properties and Adaptation),

Evaluation of mechanical properties of lime-pozzolan concrete containing silica fume, blast furnace slag and zeolite

Abolfazl Arabzadeh¹, Ali Ahmadi²

1. Professor of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran, arabzade@modares.ac.ir
2. M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran, ahmadi.a@modares.ac.ir

Abstract

Growing apprehension about the environmental effects of producing Portland cement as the main component of the concrete, has raised widespread concerns in construction industry about the urgency of finding appropriate materials to substitute it. Recently, lime-pozzolan binders that were used before the advent of Portland cement, have been revived and reconsidered in a quite modern way showing reliable properties.

This study has a comparative aspect and according to past research on lime-pozzolan concrete, with the aim of producing concrete having dominant lime-pozzolan binder with desirable structural properties, different lime-pozzolan concrete mixes with double and triple compounds of hydraulic lime with silica fume, blast furnace slag and zeolite and two mixes with the presence of 30% Portland cement in lime-pozzolan concrete were made and tested in it. In all mixes, the super-plastisizer admixture was used to improve the concrete workability. To gain the most concrete strength, a constant water to binder ratio of 0.35 was used for manufacturing all concretes specimens except the one containing zeolite in which water to binder ratios lower than 0.45 wasn't practical. Portland cement binder concrete were manufactured as well for comparing purposes. Slump test was conducted on fresh concrete and compressive strength test on cubic molds (10×10×10 cm) in 7, 28 and 56 days, spilling tensile strength test on cylindrical molds (with a diameter of 10cm and a height of 20cm) in 28 days, flexural strength test on prismatic templates (10×10×35 cm) in 14 and 28 days and elastic modulus test on cylindrical molds (with a diameter of 10cm and a height of 20 cm) in 28 days was conducted on hardened concretes. To analyze pozzolanic activity, the Thermal Gravimetric Analysis (TGA) was performed on concrete samples which showed better strength results than others.

Slump's results show that the use of the super-plastisizer in the lime-pozzolan concrete improves their workability; Most slumps were obtained in lime-slag-silica and lime-slag-cement concrete at 22 and 23 mm, respectively. Four mixes of lime-pozzolan concrete (two mixes with 50% natural hydraulic lime (NHL) composition and 30% cement with 25% silica fume (SF) or 25% ground granulated blastfurnace slag (GGBS) and two other triple mixes 50% NHL, 25% SF and 25% GGBS and dual mixes 70% NHL with 30% SF) showed competitive mechanical properties compared to ordinary concrete and their 28-day compressive strength were achieved above 30 MPa (Equivalent to 58.6, 40.2, 40.1 and 33.5 MPa, respectively), which is quite favorable to be used as structural concrete. Concrete containing zeolite had less mechanical strength than others.

The results of thermal gravimetric analysis were determined in the lime-pozzolan concrete, more calcium hydroxide is consumed as the amount of pozzolan increases. Silica fume performed more active than blast furnace slag, because it consumed more calcium hydroxide in concrete. Also blast furnace slag was more active than zeolite.

Keywords: Mechanical properties, Concrete, Cement, Hydraulic lime, Pozzolan