

مطالعه و بررسی خواص بتنهای ساخته شده از سرباره سرب و

میکروسیلیس در سن ۲۸ روز

کد C - 34F

سید اسرافیل نبوی^۱، سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^۲

^۱ کارشناس ارشد سازه، مدرس آموزشکده فنی و حرفه ای سما واحد بندر انزلی،

nabavi_2011@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان،

hossghas@yahoo.com

چکیده

برای تعیین اثر کاربرد سرباره سرب به عنوان جایگزین ماسه بتنهایی و یا همراه با میکروسیلیس به عنوان ماده سیمانی، آزمایشهای مقاومت فشاری، چگالی، عرض ترک، جذب آب، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس فراصوتی (UPV) مورد بررسی قرار گرفتند. در مجموعه ۱۰ مخلوط بتنی با نسبت ثابت آب به سیمان ۰,۴، عیار مواد سیمانی kg/m^3 ۴۰۰، نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی ۱۰٪ و فوق روان کننده به میزان ۱,۵٪ وزنی مواد سیمانی طراحی شدند. سرباره سرب با درصدهای ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین ماسه شدند. نیمی از مخلوطها حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان افزودنی سیمانی بودند. نتایج نشان میدهند که بیشترین مقاومت فشاری را بتن حاوی ۳۰٪ سرباره با میکروسیلیس در ۲۸ روز دارد. کمترین جذب آب و عرض ترک بترتیب در بتن حاوی ۳۰٪ سرباره با میکروسیلیس و ۱۵ و ۵۰٪ سرباره با میکروسیلیس مشاهده شدند. بطور کلی استفاده از سرباره و میکروسیلیس مقاومت الکتریکی بتن را کاهش داد. بعلاوه، استفاده از سرباره چگالی را افزایش داد. اندازه گیری UPV نشان داد که بتنهای ساخته شده از سرباره و میکروسیلیس باعث کاهش UPV در مقایسه با بتنهای معمولی میشوند.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، بتن، سرباره سرب، میکروسیلیس، عرض ترک، UPV

۱- مقدمه

تمدن هر کشوری با روشها و مصالح پیشرفته بکار رفته در ساخت ساختمانهای آن کشور سنجیده میشود. بتن جزء اصلی مصالح ساختمانی است، و توسعه آن از گسترش تحقیقات مهندسی تبعیت میکند. امروزه بتن مسلح مهمترین مصالح در صنعت ساخت است و برای انواع مختلفی از پروژه های مهندسی عمران مانند تونلها، پلها، فرودگاهها، پروژه های آبی و زهکشی، و دیگر پروژه ها استفاده میشود. تحقیقات بر روی افزایش مقاومت و کارایی بتن برای تطبیق با انواع کاربردها تمرکز می کنند.

مهمترین چالشی که مهندس در کار با صنعت بتن با آن مواجه است، افزایش مقاومت و کارایی بتن برای بهبود دوام آن در طول عمر بتن می باشد. بنابراین، بتن با مقاومت بالا (HSC)، بتن با کارایی بالا (HPC)، و بتن با کارایی فوق العاده بالا (UHPC)، و نیز بتن خودتراکم (SCC) بطور گسترده ای مورد تحقیق قرار میگیرند.

همه انواع بتنهای پیشرفته به استفاده از مصالح جدید، پیشرفته و دانستن آگاهی زیاد از کارایی شان وابسته اند. این مصالح ترکیبات معدنی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس، و سرباره کوره بلند، و مصالح مصنوعی، مانند فوق روان کننده و انواع مختلفی از افزودنیهایی که خواص بتن را بهبود می بخشند، می باشند. بطور کلی، مزایای استفاده از افزودنیهای معدنی عبارتند از: کارایی بهتر، قابلیت پرداخت آسانتر، مقاومت فشاری و خمشی بالاتر، نفوذپذیری کمتر، بهبود مقاومت در برابر حملات شیمیایی، خواص بتن تازه و سخت شده پایدارتر، رنگ روشنتر [۱].

از سالها پیش سنگدانه های مصنوعی مانند سرباره ها بطور گسترده ای در بسیاری از کشورها در اقصی نقاط دنیا استفاده شده است. اساسا این کاربرد بدلیل زیست محیطی و اقتصادی و نیز کمبود سنگدانه در طبیعت می باشد. یکی از سرباره هایی که بطور قابل توجهی در صنعت تولید میشود، سرباره سرب است. سرباره سرب یک محصول جانبی غیرفلزی شامل سیلیکاتها، کلسیم، و سایر ترکیباتی است که بصورت مذاب همزمان با سرب در کوره بلند سرب (LBF) تولید میشود.

میکروسیلیس به عنوان یک پوزولان مصنوعی، حاوی سیلیس فراوان به میزان ۸۵ تا ۹۵ درصد می باشد. ذرات میکروسیلیس عمدتا کروی شکل با قطر متوسطی در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میکرون یعنی یکصدم اندازه ذرات سیمان و دارای ساختاری آمورف می باشد. با توجه به ویژگیهای یاد شده، میکروسیلیس به عنوان یک ماده پرکننده موثر، تا حدی به عنوان پرکننده منافذ بین ذرات سیمان و همچنین یک پوزولان بسیار فعال مطرح می باشد. در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ به خاصیت پوزولانی بودن این ماده پی برده شد و از حدود ۳۰ سال پیش مصرف میکروسیلیس در بتن در کشورهای اسکانندیناوی بخصوص نروژ آغاز شده است. ثابت شده است خاصیت سیمانی یا میزان واکنش پذیری میکروسیلیس بین ۴ و ۵ برابر سیمان پرتلند معمولی است. این بدین معناست که مقدار زیادی از سیمان پرتلند را میتوان با مقدار کمی از دوده سیلیس جایگزین کرد بطوریکه که بتن همچنان مقاومت مورد نظر را داشته باشد [۲].

تحقیقات کمی برای بررسی اثر سرباره سرب در بتن به تنهایی یا همراه با افزودنیهای دیگری مانند میکروسیلیس وجود دارد. برای استفاده از سرباره ای مانند سرباره کوره بلند آهن در بتن، استانداردهایی در ASTM وجود دارد، درحالیکه چنین استانداردی برای استفاده سایر سرباره ها در بتن وجود ندارد. میکروسیلیس نیز به عنوان یک ماده سیمانی باید با استاندارد ASTM C1240 همخوانی داشته باشد.

در برخی از تحقیقات، سرباره سرب به تنهایی در بتن استفاده شده و ویژگیهای بتن جدید با بتن معمولی مقایسه شده است. همچنین استفاده همزمان از میکروسیلیس و برخی از افزودنیها در بتن مورد بررسی قرار گرفته است، ولی تحقیقی درباره استفاده و تاثیر همزمان استفاده از سرباره سرب و میکروسیلیس مشاهده نشده است.

موریسون و همکاران (۲۰۰۳)، ویکس و همکاران (۲۰۰۸) مطالعات جامعی را برای بررسی کاربرد سرباره فروسیلیکات، حاصل از تولید روی از کوره ذوب صنعتی، به عنوان سنگدانه بتنی انجام دادند. این سرباره شامل مقادیر کمی از سرب و روی می باشد، وقتی بجای ماسه استفاده شود، باعث کاهش زمان گیرش بتن میشود. با اینکه اساسا آب انداختگی یونهای سرب و روی در محیطهای قلیایی بالا افزایش می یابد، با اینحال ترکیب سرباره فروسیلیکات و خاکستر بادی آسیاب شده یا سرباره کوره بلند آهنگدازی این آب انداختگی را حتی در محلولهای با قلیایی بالا میکاهد. نتیجه دیگر این تحقیق افزایش مقاومت فشاری بتن بعد از ۲۸ روز می باشد [۳،۴].

بارنا و همکاران (۲۰۰۴) آب انداختگی مصالح جاده ای حاوی سرباره های سرب و روی را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که آزاد شدن سرب و روی از این مصالح در شرایط اشباع با میزان قلیایی محیط کنترل میشود. در شرایط مرطوب، آزادسازی این آلاینده ها بطور قابل توجهی کاهش می یابد [۵].

پنیولچارین (۲۰۰۵) نشان داد که کاربرد سرباره سرب ثانویه به عنوان سنگدانه یا سیمان در بتن منجر به مقاومت فشاری بیشتر و جذب آب بالاتری نسبت به نمونه های بدون سرباره میشود. نتایج آشکار کرد که ترکیبات اکسیدی سرباره مشابه با ترکیبات سیمان پرتلند معمولی (OPC) بودند [۶].

موسوی نژاد و همکارش (۲۰۱۲) بر روی مقاومت بتن حاوی ۳۰٪ سرباره سرب آزمایش کردند. نتایج آزمایش افزایش چگالی و جذب آب، کاهش اسلامپ و مقاومت خمشی و اثر ناچیز بر مقاومت فشاری را نشان دادند [۷].

این مقاله به ارزیابی نتایج یک برنامه آزمایشگاهی برای تحقیق درباره خواص بتن ساخته شده با سرباره سرب به عنوان جایگزین سنگدانه ریز با و بدون ۱۰٪ میکروسیلیس با افزودن به سیمان می پردازد. برای این منظور از ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سرباره جایگزین ماسه استفاده شده است. برای تحقیق درباره خواص بتن ساخته شده با افزودنیهای معدنی، آزمایشات مقاومت فشاری، چگالی، عرض ترک، جذب آب، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس فراصوتی (UPV) بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر انجام میشود.

۲- مصالح

سیمان مصرفی در این مطالعه، سیمان پرتلند پوزولانی محصول کارخانه سیمان اردبیل می باشد. سرباره سرب از شرکت ملی سرب و روی ایران واقع در زنجان تهیه شد. ترکیب شیمیایی PPC، LS و MS بکار رفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند پوزولانی (PPC)، سرباره سرب (LS) و میکروسیلیس (MS)

اجزا	PPC	LS	MS
	(/%)		
SiO ₂	۲۶,۸۵	۱۲,۵	۹۵,۱
Al ₂ O ₃	۶,۵	-	۰,۶
Fe ₂ O ₃	۳,۲	-	۱,۱
CaO	۵۶,۵	۱۹	۱,۰۲
MgO	۰,۴	۲	۰,۶
K ₂ O	۱,۱	-	-
Na ₂ O	۰,۴۴	-	-
SO ₃	۰,۸	-	۱,۲
Cl	۴,۰	-	-
Pb (Total)	-	۳,۰	-
Zn (Total)	-	۱۱	-
Fe (Total)	-	۲۲,۵	-
As (Total)	-	۰,۵۵	-
Cr (Total)	-	۰,۳	-

عناصر فلزی که در جدول شیمیایی عناصر به صورت Total گزارش شده اند در سرباره به صورت های مختلف اکسیدی و ترکیبی می باشند.

دانه بندی سنگدانه های درشت شکسته، ماسه طبیعی، سرباره سرب در جداول زیر ارائه شده اند. جدول ۲ نتایج آنالیز الکترونیک سنگدانه درشت را نشان میدهد. سنگدانه درشت به عنوان سنگدانه خوب دانه بندی شده با الزامات استاندارد ASTM C۳۳ برای سنگدانه درشت با حداکثر اسمی سنگدانه ۲۵ میلیمتر همخوانی دارد.

جدول ۲: دانه بندی سنگدانه های درشت

اندازه الک (mm)	شاخص ASTM	درصد گذشته	محدوده ASTM ۲۵ تا ۴,۷۵
۳۷,۵	۱ و ۱/۲ in	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۱ in	۱۰۰	۹۵-۱۰۰
۱۹,۶	۳/۴ in	۸۹,۹	-
۱۲,۵	۱/۲ in	۵۶,۴	۲۵-۶۰
۹,۵	۳/۸ in	۳۷,۵	-
۴,۷۵	# ۴	۰	۰-۱۰
۲,۳۶	# ۸	۰	۰-۵

جدول ۳ نتایج آنالیز الک ماسه طبیعی و LS را نشان میدهد. همچنین محدودیت های دانه بندی ASTM C۳۳ و BS ۸۸۲ نشان داده شده اند. ماسه با محدودیت های استاندارد ASTM C۳۳ برای سنگدانه ریز همخوانی ندارد، ولی در محدوده استاندارد BS ۸۸۲ هستند. سرباره سرب نیز در محدوده استاندارد ASTM قرار دارند.

جدول ۳: دانه بندی سنگدانه های ریز

اندازه الک (mm)	شاخص ASTM	ماسه	LS	محدوده ASTM (%)	الزامات دانه بندی BS
۱۰	۳/۸ in	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۵	# ۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۵-۱۰۰	۸۹-۱۰۰
۲,۴۰	# ۸	۷۱,۳	۸۴,۹۶	۸۰-۱۰۰	۶۰-۱۰۰
۱,۲۰	# ۱۶	۴۱,۴	۷۲,۲۹	۵۰-۸۵	۳۰-۱۰۰
۰,۶۰۰	# ۳۰	۱۸,۰	۵۲,۹۱	۲۵-۶۰	۱۵-۱۰۰
۰,۳۰۰	# ۵۰	۶,۴	۲۰,۹۸	۱۰-۳۰	۵-۷۰
۰,۱۵۰	# ۱۰۰	۱,۹	۱۲,۰۵	۲-۱۰	۰-۱۵

خواص فیزیکی سنگدانه درشت، ماسه و سرباره سرب در جدول ۴ ارائه شده است. مدول نرمی ماسه و LS بترتیب برابر ۳,۶۱ و ۲,۵۷ هستند. وزن مخصوص ماسه و سرباره با استفاده از استاندارد ASTM C۱۲۷ اندازه گیری شده اند. برای بهبود کارایی بتن، فوق روان کننده از نوع افزودنی پلی نفتالن سولفونات استفاده شد.

جدول ۴: خواص فیزیکی سنگدانه های درشت، ریز و سرباره سرب

خواص	سنگدانه درشت	ماسه	LS
چگالی، gr/cm^3	۱,۵۶	۱,۶۰	۲,۲۱
وزن ویژه حجمی (خشک)	۲,۴۴۶	-	-
وزن ویژه حجمی (SSD)	۲,۵۲۳	۲,۴۳۹	-
وزن ویژه ظاهری	۲,۶۵۱	۲,۶۵۴	-
ارزش خردشدن سنگدانه، %	۲۹	-	-
جذب آب، %	۳,۱۵	۵,۶۳	-
میزان آب، %	۱,۸۸	۷,۹۱	۲,۸۶
مدول نرمی، %	-	۳,۶۱	۲,۵۷

SSD: اشباع با سطح خشک

۳- برنامه آزمایشگاهی

طرح اختلاط و آماده سازی

برای مطالعه اثر سرباره سرب و میکروسیلیس بر خواص بتن، ۳۰ نمونه بتنی با نسبت های ۰/، ۰/۱۵، ۰/۳۰، ۰/۵۰ و ۰/۱۰۰/ سرباره به نسبت وزنی ماسه، جایگزین ماسه و ۰/۱۰ میکروسیلیس، با افزودن به سیمان آماده شد. جدول ۵ نسبت اختلاط پایه مخلوط های بتن را نشان میدهد. نسبت آب به سیمان در مخلوط بدون میکروسیلیس، ۰/۴۴، و نسبت آب به ماده سیمانی (سیمان + میکروسیلیس) در مخلوطهای با میکروسیلیس، ۰/۴ بودند. عیار پایه سیمان 360 kg/m^3 ، میزان میکروسیلیس 40 kg/m^3 ، یعنی ۰/۱۰ وزنی عیار ماده سیمانی بودند. فوق روان کننده به میزان ۰/۱۵، ۰/۱۰ وزنی سیمان به مخلوط اضافه شد. پس از وزن نمودن، اجزای بتن بطور دستی مخلوط شدند. سنگدانه ها، سرباره و ماده سیمانی بمدت ۱ دقیقه مخلوط شدند، سپس با اضافه کردن آب و هم زدن مخلوط به مدت ۲ دقیقه، فوق روان کننده به آن اضافه شد و به مدت ۱ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت.

جدول ۵: نسبت طرح اختلاط

SP/c	w/b	نسبت اختلاط (kg/m^3)					
		آب	میکروسیلیس	شن	ماسه	سیمان	کل ماده سیمانی
۱,۵	۰,۴۴	۱۶۰	-	۱۱۵۲	۷۶۸	۳۶۰	۳۶۰
۱,۵	۰,۴	۱۶۰	۴۰	۱۱۵۲	۷۶۸	۳۶۰	۴۰۰

بعد از قالب گیری نمونه ها به وسیله میز ویبره متراکم شدند. سپس نمونه ها بوسیله نایلون پوشانده شدند و بعد از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شدند. کلیه بتن ها بمدت ۲۷ روز در آب با دمای $20 \pm 2^\circ$ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. کلیه نمونه ها قبل از آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای $50 \pm 10^\circ$ درجه سانتیگراد خشک شدند. برای تعیین مقادیر نتایج آزمایشها، ۳ نمونه مکعبی ۱۰ سانتیمتر برای هر مخلوط قالب گیری شد، سپس در سن ۲۸ روز بعد از خشک شدن در آون آزمایش شدند. وزن مخصوص بتن تازه، خشک (بعد از یک روز)، اشباع با سطح خشک (SSD)، و جذب آب مخلوط های بتنی در سن ۲۸ روز اندازه گیری شدند.

برنامه ریزی آزمایش ها

بعد از عمل آوری، آزمایشهای زیر بر روی نمونه های بتنی انجام شدند:

- آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر روی مکعبها بر طبق استاندارد ۱۱۶ بخش BS:۱۸۸۱ با سرعت بارگذاری 2.5 kN/s انجام شد.
- چگالی تازه همه مخلوط ها بر طبق ASTM C۱۳۸ و چگالی بتن سخت شده بر طبق استاندارد ASTM C۵۶۷ انجام شد. با استفاده از نتایج چگالی، مقادیر جذب آب ۲۸ روزه بتن ها براساس استاندارد ASTM C۶۴۲ محاسبه شدند.
- عرض ترک با میکروسکوپ ترک یاب جیبی اندازه گیری شد که توسط شرکت تکنوتست ساخته شده است. برای تعیین عرض ترک، از سه نمونه مکعبی استفاده شده، سپس حداکثر عرض ترک مشاهده شده از چهار طرف مکعبها گزارش شد.
- برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی در سن ۲۸ روز، از یک دستگاه اندازه گیر مقاومت الکتریکی بتن با فرکانس ۵۰ KHZ استفاده شد. متوسط سه قرائت برای هر مخلوط یادداشت شد.
- آزمایش سرعت پالس صوتی با میانگین گیری از سه قرائت مکعبها بر طبق استاندارد ASTM C۵۹۷ انجام شد.

۴- نتایج و بحث

جدول ۶ نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری، چگالی، عرض ترک، جذب آب، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس فراصوتی انجام شده بر نمونه های بتنی در سن ۲۸ روز را نشان میدهد. تحلیل این نتایج در ادامه ارائه میشود.

جدول ۶: چگالی (تر، خشک و اشباع با سطح خشک)، جذب آب و عرض ترک بتنهای حاوی مقادیر مختلف سرباره سرب و میکروسیلیس در ۲۸ روز

عرض ترک (mm)	جذب آب (%)	چگالی (kg/m ³)			نوع مخلوط	شماره مخلوط
		SSD	خشک	تر		
۰,۰۲	۱,۲۴	۲۲۸۴	۲۲۵۶	۲۲۹۸	100S	۱
۰,۰۶	۰,۸۷	۲۳۱۷	۲۲۹۷	۲۳۱۰	85S15LS	۲
۰,۰۲	۰,۷۲	۲۳۸۴	۲۳۶۷	۲۳۹۰	70S30LS	۳
۰,۰۲	۰,۶۱	۲۴۹۱	۲۴۷۶	۲۵۱۰	50S50LS	۴
۰,۱۲	۰,۵۰	۲۶۳۸	۲۶۲۵	۲۶۹۲	100LS	۵
۰,۰۲	۱,۵۱	۲۲۸۹	۲۲۵۵	۲۲۸۳	100S+MS	۶
۰,۰۱۵	۱,۲۲	۲۳۲۵	۲۲۹۷	۲۳۱۳	85S15LS+MS	۷
۰,۰۲	۱,۰۲	۲۳۷۰	۲۳۴۶	۲۳۶۵	70S30LS+MS	۸
۰,۰۱۵	۰,۸۴	۲۴۰۰	۲۳۸۰	۲۴۳۵	50S50LS+MS	۹
۰,۰۳	۰,۵۲	۲۵۳۰	۲۵۱۷	۲۶۱۳	100LS+MS	۱۰

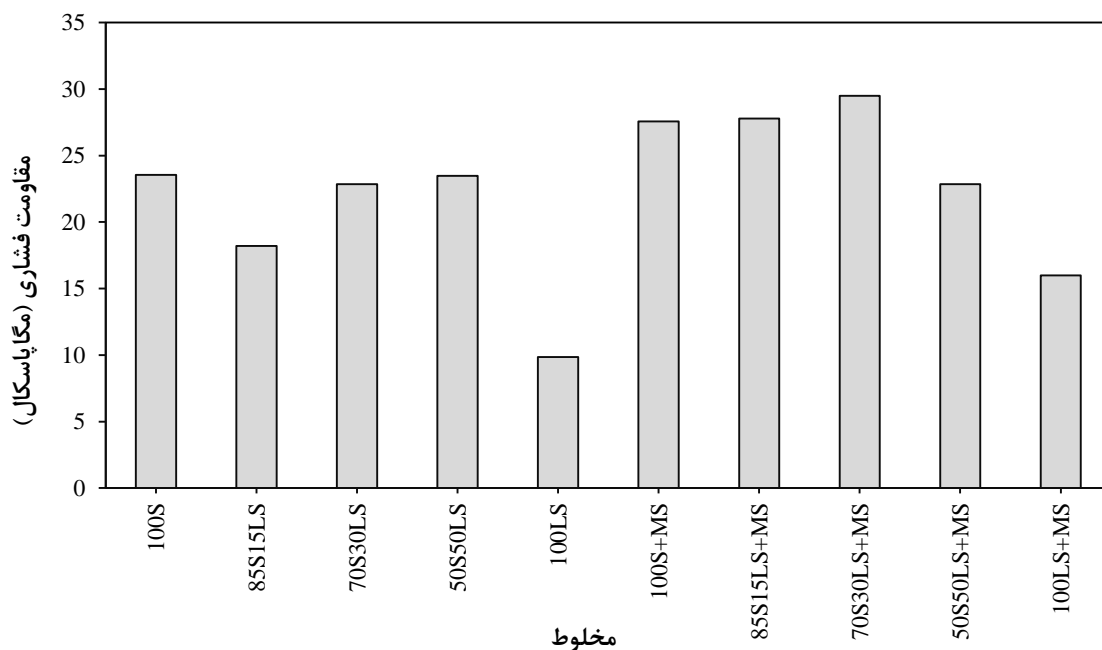
چگالی بتن عامل مهمی برای تعیین بارهای مرده برای تحلیل دقیق سازه می باشد. با دانستن چگالی بتن، میتوان مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را پیش بینی کرد. جدول ۶ چگالیهای تر، خشک و اشباع با سطح خشک ۲۸ روزه مخلوطهای حاوی میکروسیلیس و درصدهای مختلفی از سرباره سرب را در مقایسه با بتن معمولی نشان میدهد. همانطور که انتظار میرفت، باین دلیل که سرباره سرب نسبت به ماسه چگالی بیشتری دارد، جایگزینی بیشتر ماسه با سرباره منجر به افزایش چگالی بتن معمولی خواهد شد ولی استفاده از میکروسیلیس تغییری در چگالی ایجاد نکرد. هرچند مقدار سرباره در بتن حاوی میکروسیلیس افزایش یابد، اختلاف چگالی بتن مورد نظر نسبت به بتن بدون میکروسیلیس محسوستر خواهد شد. وجود ۵۰٪ سرباره، چگالی خشک بتن را در حدود ۱۶٪ افزایش میدهد، در حالیکه وجود ۵۰٪ سرباره همراه با ۱۰٪ میکروسیلیس، چگالی بتن را حدود ۶٪ افزایش میدهد. تغییر واکنشهای شیمیایی بدلیل وجود مواد پوزولانی جدید در بتن سبب این تفاوت در چگالی هاست. طبق استاندارد ACI 318-08، در تمامی موارد، بجز بتن 100LS، بتن با وزن معمولی بحساب می آید.

میتوان از جدول ۶ مشاهده کرد که با افزایش سرباره به بتن معمولی، جذب آب بشدت کم میشود. سرباره سرب به عنوان یک پوزولان با واکنش پذیری کم، باعث کاهش سرعت هیدراتاسیون سیمان میشود. بنابراین نسبت به بتن با سنگدانه طبیعی، برای عمل آوری نیاز کمتری به آب دارد. اما دلیل مهم تر آنست که سنگدانه سرب به عنوان یک تفاله فلزی و ماده ای سخت در مقایسه با ماسه بطور طبیعی نفوذناپذیر است. بنابراین جذب آب مخلوط بتنی سرباره ای بسیار پایینتر از بتن ماسه ای می باشد و با افزایش سرباره، کاهش جذب آب چشمگیرتر میشود. برعکس، میکروسیلیس به عنوان یک پوزولان مصنوعی با شدت واکنش پذیری زیاد و نیز سطح ویژه بسیار زیاد، سرعت هیدراتاسیون را افزایش و جذب آب را بالا می برد. در بتنهای حاوی میکروسیلیس نیز با افزایش سرباره جذب آب کم میشود. همه بتنهای با میکروسیلیس در مقایسه با بتن بدون میکروسیلیس، جذب آب بیشتری را از خود نشان

میدهند. بیشترین جذب آب نمونه ها را مخلوط ساخته شده از ۱۰٪ میکروسیلیس بدون سرباره به میزان ۱,۵۱٪ از خود نشان داد.

یکی از پارامترهایی که نشاندهنده کیفیت بتن است، عدم وجود ترک در سطح بتن می باشد. عدم ترک در کنار تراکم و فشردگی از عواملی است که از نفوذپذیری آب در بتن یا هر ماده دیگری که سبب خوردگی میلگرد فولادی در بتن شود، جلوگیری میکند. از طرف دیگر وجود ترکهای سطحی در بتن، بخصوص در مورد بتنهای نما، کف سازی، روسازی و ...، علاوه بر تاثیر منفی بر دوام، زیبایی بتن سطحی را از بین می برد. بنابراین اندازه گیری عرض ترک برای پیش بینی دوام بتن مسلح اهمیت اساسی دارد. نتایج نشان میدهد مقدار عرض ترک سطحی نیمی از مخلوطها بدون تغییر، یعنی ۰,۰۲ میلیمتر، باقی مانده است. روند منظمی در مقادیر عرض ترکها مشاهده نمیشود. در مجموع استفاده از میکروسیلیس باعث عدم تغییر عرض ترک بتن معمولی و کاهش عرض ترک بتنهای سرباره ای میشود. سرباره سرب عرض ترک بتن معمولی را بویژه در مخلوط 100LS بشدت افزایش میدهد. میتوان نتیجه گرفت استفاده همزمان از سرباره و میکروسیلیس تاثیر محسوسی بر عرض ترک بتنها دارد. دلیل آن اینست که از یک طرف سرباره باعث کاهش جمع شدگی بتن، و از طرف دیگر میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت اولیه بتن شده، بنابراین عرض ترک کمتر خواهد شد. کاهش عرض ترک به دوام بتنها و کاهش خوردگی درازمدت بتنها کمک زیادی میکند.

شکل ۱ مقاومت فشاری مخلوطها را نشان میدهد. استفاده از سرباره بجای ماسه باعث کاهش مقاومت فشاری میشود. همانطور که از جدول ۱ پیداست، آهک سیمان پرتلند پوزولانی بیش از ۵۶٪ است درحالیکه سرباره سرب مقدار آهک کمتری، تقریباً ۱۹٪ دارد. این نشان میدهد که سرباره سرب از نظر شیمیایی یک ماده با واکنش پذیری زیاد نیست. از طرفی وجود کمی سیلیس با همین مقدار آهک کافی است تا مانند یک پوزولان، سرعت هیدراسیون سیمان را کم کند، بنابراین مقدار مقاومت بتن را میکاهد. دلیل افزایش نسبی مقاومت با جایگزینی بیشتر سرب، افزایش واکنشهای شیمیایی ناشی از وجود این اکسیدها در مخلوط بتنی می باشد. اما کمترین مقاومت بتن با جایگزینی کامل ماسه با سرباره دیده میشود چراکه دیگر میزان آب آزاد موجود برای انجام واکنش کافی نمی باشد.

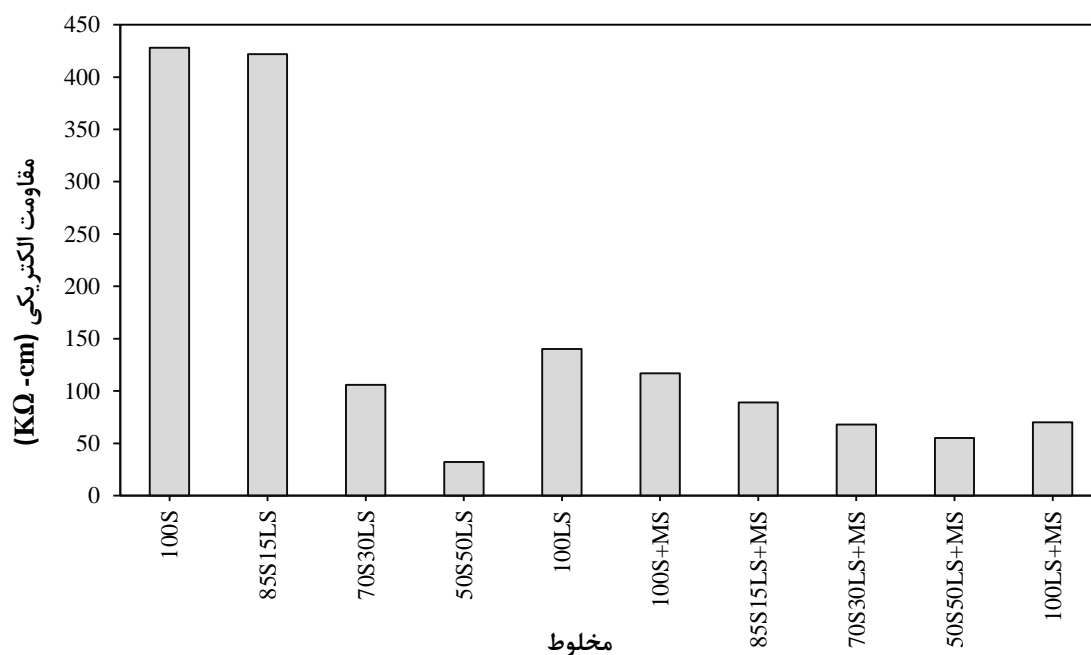


شکل ۱: مقاومت فشاری بتنهای ساخته شده با مقادیر مختلف سرباره سرب با و بدون میکروسیلیس در سن ۲۸ روز

بیشترین مقدار مقاومت فشاری مشاهده شده در بین بتنهای سرباره ای بدون میکروسیلیس را مخلوط 50S50LS از خود نشان داد که حدود ۰,۳٪ کمتر از بتن معمولی است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط 100S+MS برابر ۲۷,۵۶

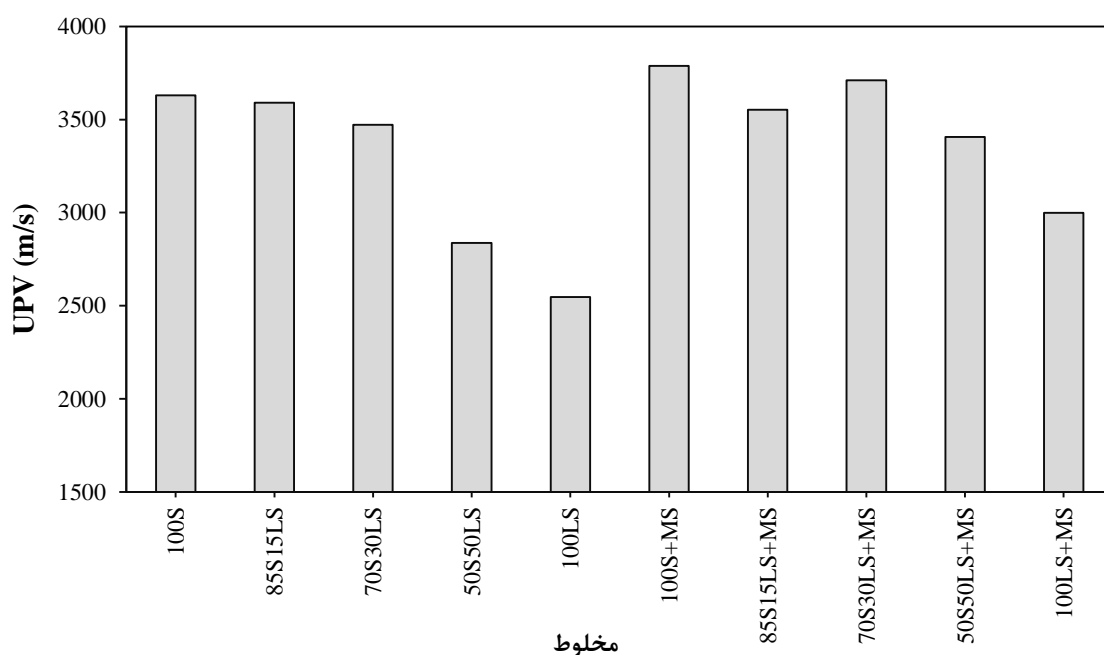
مگا پاسکال می باشد که حدود ۱۷٪ بیشتر از بتن معمولی است. وجود دی اکسید سیلیسیم آمورف در میکروسیلیس باعث کاهش ژل هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان پرتلند و افزایش کریستال تولیدی CSH در خمیر سیمان می گردد. این ترکیب عنصر اصلی مقاومت فشاری چنین بتن هایی است. همچنین وجود این کریستال باعث کاهش تخلخل و به هم فشردگی ذرات متشکله میگردد. از طرف دیگر نرمی زیاد ذرات خود میکروسیلیس باعث میشود که تمامی فضای مابین ذرات سیمان با دانه های ریز میکروسیلیس پر شود که این خود باعث بهبود مقاومت بتن میشود. جالب است بدانیم که افزایش سرباره سرب تا ۳۰٪ در بتن با میکروسیلیس، مقاومت فشاری را نسبت به سایر مخلوطها افزایش میدهد. چنانچه مخلوط 70S30LS+MS بیشترین مقدار را در بین ۱۰ مخلوط آزمایش داراست و نسبت به بتن معمولی، افزایش مقاومتی در حدود ۲۵٪ از خود نشان میدهد. بنظر میرسد که میکروسیلیس با ۳۰٪ سرباره سرب، بهترین واکنش شیمیایی را در مقایسه با سایر ترکیبها از خود نشان میدهد. ظاهرا ترکیب این دو ماده باعث مصرف بیشتر هیدروکسید کلسیم و تولید بیشتر ژل هیدرات سیلیکات کلسیم شده است. سایر تحقیقات نشان میدهند هرچند استفاده از سرباره سرب به عنوان سنگدانه در کوتاه مدت مقاومت فشاری را میکاهد ولی این احتمال وجود دارد که در درازمدت به مقاومت بتن معمولی برسد یا حتی از آن بیشتر شود، ولی استفاده همزمان آن با میکروسیلیس، همانطور که دیدیم، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز میشود.

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نشان میدهد که بیشترین مقاومت الکتریکی را بتن معمولی دارد و هر مقدار سرباره و میکروسیلیس مقاومت الکتریکی را بشدت میکاهد. بطوریکه مقاومت الکتریکی برای مخلوطهای تا ۵۰٪ سرباره با و بدون میکروسیلیس کاسته میشود، و در نمونه های با ۱۰۰٪ سرباره، تا حدی افزایش می یابد. همانطور که از شکل ۲ میتوان فهمید، اضافه کردن میکروسیلیس مقاومت الکتریکی را نسبت به بتن معمولی در حدود ۷۳٪ میکاهد. غیر از مخلوط با ۵۰٪ سرباره، در بقیه مخلوها، وجود میکروسیلیس مقاومت الکتریکی را نسبت به بتنهای بدون میکروسیلیس کم میکند. بنابراین استفاده همزمان از این دو نوع پوزولان میتواند باعث کاهش مقاومت الکتریکی شود. این امر بدین علت است که مجموع واکنشهای شیمیایی در بتن باعث تحرک یونی در بتن شده و عبور جریان را آسانتر میکند. کاهش شدید مقاومت الکتریکی بتن باعث تسریع در شروع خوردگی میلگرد و افزایش شدت خوردگی می گردد، بنابراین دوام بتن را با مشکل مواجه خواهد کرد.



شکل ۲: مقاومت الکتریکی بتنهای ساخته شده با مقادیر مختلف سرباره سرب با و بدون میکروسیلیس در سن ۲۸ روز

آزمایش سرعت پالس فراصوتی یک آزمایش غیرمخرب است. هدف اندازه گیری سرعت عبور امواج فراصوتی از درون عضو ساخته شده می باشد. در برخی از موارد از نتایج این آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیکی و دینامیکی، و نیز نسبت پواسون بتن استفاده میشود. هرچند دلیل اصلی انجام این آزمایش تعیین یکنواختی بتن مورد نظر است. همانطور که از شکل ۳ مشاهده میشود، استفاده از سرباره از سرب منجر به کاهش سرعت عبور امواج از داخل بتن میشود. مصرف بیشتر سرباره در بتن با کاهش بیشتر سرعت پالس همراه است. لازم بذکر است که میکروسیلیس اثر معکوسی بر سرعت پالس عبوری از بتن می گذارد. بطوریکه استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس، سرعت پالس را ۴٪ افزایش میدهد. البته استفاده بیشتر از سرباره در بتنهای با میکروسیلیس، بمانند بتنهای بدون میکروسیلیس، باعث کاهش سرعت عبوری امواج میشود. ولی درحال این مقدار در بتنهای سرباره ای با میکروسیلیس، بیشتر از نمونه های مشابه بدون میکروسیلیس می باشد. علت افزایش سرعت امواج با حضور میکروسیلیس، مصرف بیشتر هیدروکسید کلسیم بلوری و تولید ژل CSH متراکم تر و یکنواخت تر است.



شکل ۳: سرعت پالس فراصوتی بتنهای ساخته شده با مقادیر مختلف سرباره سرب با و بدون میکروسیلیس در سن ۲۸ روز

ویتهرست بتنهای با UPV در محدوده ۴۵۰۰ m/s و بالاتر، ۳۵۰۰-۴۵۰۰، ۳۰۰۰-۳۵۰۰، ۲۰۰۰-۳۰۰۰، و ۲۰۰۰ m/s را برترتیب به عنوان بتنهای عالی، خوب، مشکوک، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه بندی کرد. بنابراین بتنهای 100S ، 85S15LS ، 100S+MS ، 85S15LS+MS و 70S30LS+MS به عنوان بتن خوب طبقه بندی می شوند چراکه UPV آنها در محدوده ۳۵۰۰-۴۵۰۰ m/s قرار دارند. مخلوطهای 70S30LS و 50S50LS+MS به عنوان بتن مشکوک، همچنین بتنهای 100LS ، 50S50LS و 100LS+MS با داشتن UPV بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ m/s به عنوان بتن ضعیف طبقه بندی می شوند.

نتیجه نهایی آنست که استفاده همزمان از میکروسیلیس به عنوان ماده سیمانی و سرباره سرب به عنوان سنگدانه ریز، اثر مثبتی بر مقاومت فشاری، عرض ترک و سرعت پالس فراصوتی در مقایسه با بتن معمولی و یا بتن سرباره ای بدون وجود میکروسیلیس دارد. این بتن ترکیبی، بطور متوسط، جذب آب را افزایش و مقاومت الکتریکی را کاهش میدهد.

۵- نتیجه گیری

براساس یافته های این مطالعه نتایج زیر بدست می آید:

- ۱- بطور کلی استفاده از سرباره سرب به عنوان ماسه، جذب آب، مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه و سرعت پالس فراصوتی بتن را میکاهد. ولی بدلیل وزن مخصوص توده ای بالاتر نسبت به ماسه، چگالی بتن و بطور متوسط، عرض ترک را افزایش میدهد.
- ۲- علت کاهش مقادیر آزمایشهای بالا را میتوان بترتیب بدین صورت بیان کرد: نفوذناپذیری سنگدانه سرب، تخلخل در ریزساختار، تاخیر در سرعت هیدراتاسیون، کاهش یکنواختی و همگنی ریزساختار بتن. کاهش ساختار متراکم بتن به افزایش ترکهای سطحی نیز کمک میکند.
- ۳- مصرف ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان پوزولان، چگالی و عرض ترک را تغییر نمیدهد. ولی باعث افزایش مقاومت فشاری، سرعت پالس فراصوتی و جذب آب و همچنین کاهش شدید مقاومت الکتریکی میشود.
- ۴- علت نتایج بالا را میتوان به مصرف هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش شیمیایی سیمان توسط میکروسیلیس و پرشدن ریزترکها در خمیر سیمان، و همچنین ناحیه انتقالی دانست که باعث افزایش مقاومت، همگنی و نیاز به آب برای ادامه واکنش شیمیایی می شود.
- ۵- بطور کلی استفاده از سنگدانه سرب و میکروسیلیس باعث کاهش چگالی، مقاومت الکتریکی، عرض ترک، و همچنین افزایش جذب آب، مقاومت فشاری و سرعت پالس فراصوتی نسبت به نمونه های مشابه بدون میکروسیلیس میشود.
- ۵- از آنجایی که استفاده از سنگدانه سرب و میکروسیلیس به عنوان ماده سیمانی، باعث کاهش شدید مقاومت الکتریکی بتن میشود، باید در استفاده از این پوزولانها در مناطقی که خطر خوردگی زیاد است، و یا در سازه هایی مانند نیروگاهها یا پایه های دکلهای فشار قوی برق، که باید از بتنهای با مقاومت الکتریکی بالا استفاده کرد، حتی الامکان خودداری کرد.

منابع

- [1] El-Reedy, Mohamed A., "Advanced Materials and Techniques for Reinforced Concrete Structures", CRC Press, United States of America, 2009.
- [2] Newman, John, Choo, Ban Seng, "Advanced Concrete Technology", Butterworth - Heinemann, Britain, 2003.
- [3] Morrison, C., Hooper, R. and Lordner, K., "The use of ferro-silicate slag from ISF zinc production as a sand replacement in concrete", Cement & Concrete Res., 33, 2085-9, 2003.
- [4] Weeks, C., Hand, R.J. and Sharp, J.H., "Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate", Cement & Concrete Composites, 30, 970-978, 2008.
- [5] Barna, R., Moszkowicz, P. and Gervais, C., "Leaching assessment of road materials containing primary lead and zinc slags", Waste Management, 24, 945-955, 2004.
- [6] Penpolcharoen, M., "Utilization of secondary lead slag as construction material", Cement and Concrete Research, 35, 1050-1055, 2005.
- [7] Ghasemzadeh Mosavinezhad, S.H., Nabavi, S.E., "Effect of 30% Ground Granulated Blast Furnace, Lead and Zinc Slags as Sand Replacements on the Strength of Concrete", KSCE Journal of Civil Engineering, 16, 989-993, 2012.