# بررسی تأثیر جایگزینی پودر سرباره به جای سیمان پرتلند درخواص بتن

صمد دیلمقانی* و فریدون زینعلی**

گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تبریز

دفتر فنی سازمان آب زنجان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۶/۸/۲۴ - دریافت نسخهٔنهایی: ۱۳۷۷/۲/۶)

*چکیده - در این پژوهش ۲۱۰ نمونهٔ بتنی به شکل مکعب به ابعاد ۱۵ سانتیمتر با جایگزینی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد پودر سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان به جای سیمان پرتلند با نسبت آب به سیمان ۰/۵۱ ساخته شد. عیار سیمان نمونه‌های بتن شاهد ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شد. کارایی مخلوطهای بتنی و مقاومت فشاری آنها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی به دست آمده و نتایج مقایسه شدند. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که جایگزینی حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد پودر سرباره به جای سیمان برای دستیابی به بتن با مقاومت وکارایی مناسب، رضایتبخش است. همچنین با افزایش درصد پودر سرباره به جای سیمان پرتلند جمع‌شدگی سیمانهای سرباره‌ای و مقاومت بتن ساخته شده از این سرباره‌ها در برابر حمله سولفاتها افزایش پیدا می‌کند.*

# Effect of Use of Granulated Slag Instead of Portland Cement on the Properties of Concrete

**S. Dilmaghani and F. Zainali**

Department of Civil Engineering, University of Tabriz

**ABSTRACT-** In this research, 210 concrete cube specimens (15cm) were made replacing 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 and 60 percent of slag powder from Isfahan Steel Mill for cement. The control specimens were made with 350 kg/m3 cement content and the water cement ratio in all specimens was 0.51. The Slump value and compressive strength of concrete specimens in 7, 28 and 90 days were obtained and the results were compared. The test results show that replacement of 25 to 35 percent of slag powder for cement gives satisfactory results in obtaining concrete with suitable compressive strength and slump value. Also the results indicate that by increasing the percentage of slag powder replaced for cement, the shrinkage of the concrete and its resistance against sulphates will increase.

---

* دانشیار ** کارشناس ارشد مهندسی سازه



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۱- روابط نسبتهای ترکیبات شیمیایی برای ارزیابی قدرت هیدرولیکی سرباره

| ردیف | فرمول | مقدار برای بهتر بودن خصوصیات | ملاحظات |
|---|---|---|---|
| ۱ | $CaO/SiO_2$ | بزرگتر از ۱/۳ | مدول قلیائیت |
| ۲ | $\frac{CaO+MgO}{SiO_2}$ | بزرگتر از ۱/۴ | |
| ۳ | $\frac{CaO+MgO}{SiO_2+Al_2O_3}$ | ۱/۰-۱/۳ | |
| ۴ | $\frac{CaO+0/56\ Al_2O_3+1/4MgO}{SiO_2}$ | بزرگتر از ۱/۶۵ | |
| ۵ | $\frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2}$ | بزرگتر از ۱ | مدول اکتیویته |

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه در کشورمان هم‌اکنون سالیانه در حدود هفت میلیون تن فولاد و آهن از کارخانجات ذوب‌آهن و نورد لوله تهیه می‌شود و با در نظر گرفتن این موضوع که به ازای تولید هر تن فولاد ۳۰۰ کیلوگرم تا یک تن سرباره در کنار آن حاصل می‌شود اهمیت به کارگیری از این فراورده‌های ثانوی در دیگر صنایع مشخص می‌شود. با مطالعهٔ سوابق علمی در خصوص کاربرد سرباره در ساخت بتن مشاهده می‌شود که از پودر این ضایعات در تهیه بتن به عنوان جانشین سیمان و از شکل دانه‌ای آن به عنوان شن و ماسه سبک در تهیه بتن می‌توان استفاده کرد.

در این تحقیق با در نظر گرفتن کارهای انجام یافتهٔ قبلی به بررسی سربارهٔ تولید شده در کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان پرداخته و در زمینهٔ چگونگی استفاده از این مواد در تهیه بتن با خصوصیات مناسب اشاره شده است. با دانستن این موضوع که مسیر تولید سرباره در کارخانهٔ فولاد شبیه به همان مراحل تهیه کلینکر سیمان پرتلند در کارخانهٔ سیمان است و تنها با این تفاوت که ترکیبات شیمیایی آنها کمی با همدیگر متفاوت‌اند پیش‌بینی می‌شود که پودر سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن نیز با توجه به ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی آن به خصوص فاز شیشه‌ای سرباره می‌تواند رفتاری مشابه سیمان در طرح اختلاط بتن از خود نشان دهد.

## ۲- کارهای انجام شدهٔ قبلی

اولین تحقیقاتی که در مورد پودر آسیاب شدهٔ سرباره به عنوان یک مادهٔ سیمانی به عمل آمد در سال ۱۷۷۴ توسط فردی به نام لوریت بود که از پودر سرباره در ساخت نوعی شفتهٔ آهکی استفاده کرد[۱]. ترکیبات شیمیایی سربارهٔ مورد استفاده و فاز شیشه‌ای آن عامل مهمی در قدرت هیدرولیکی سرباره به شمار می‌رود[۲و۳]. روابط برای مقایسهٔ قدرت هیدرولیکی سرباره در جدول (۱) ارائه شده است. با استفاده از این روابط خصوصیات هیدرولیکی هر نوع سرباره را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد[۴]. بهتر است پودر سربارهٔ آسیاب شده شرایطی مشابه از نظر دانه‌بندی و بلین با سیمان مورد استفاده داشته باشد.

سیواساندرام و همکارش[۵] طی آزمایشهایی که برای استفاده از پودر سرباره در تهیه بتن انجام دادند به این نتیجه رسیدند که افزودن سرباره موجب کاهش گرمای هیدراتاسیون می‌شود. همچنین استفاده از پودر سرباره در درصدهای بالاتر از ۶۰٪ موجب کاهش شدید مقاومت و کارایی بتن می‌شود. ولی با استفاده از پودر سرباره به عنوان جانشین سیمان به مقدار ۳۰ تا ۶۰ درصد نتایج قابل قبولی از نظر میزان مقاومت فشاری حاصل شده است.

با در نظر گرفتن اینکه مقاومت بتنهای حاوی سرباره در کوتاه مدت کم است، استفاده از میکروسیلیس در ساخت بتنهای سرباره‌ای می‌تواند موجب بهبود خصوصیات آن شود. در تحقیقاتی که در این زمینه توسط اوزیلدریم[۶] انجام شد اضافه کردن ۵ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس به بتنهایی که در آنها ۳۰ تا ۵۰ درصد سرباره و ۷۰ تا ۵۰ درصد سیمان پرتلند استفاده شده است موجب افزایش مقاومت ۷ روزهٔ این بتنها می‌شود و بتن حاوی ۶۰٪ سیمان پرتلند،

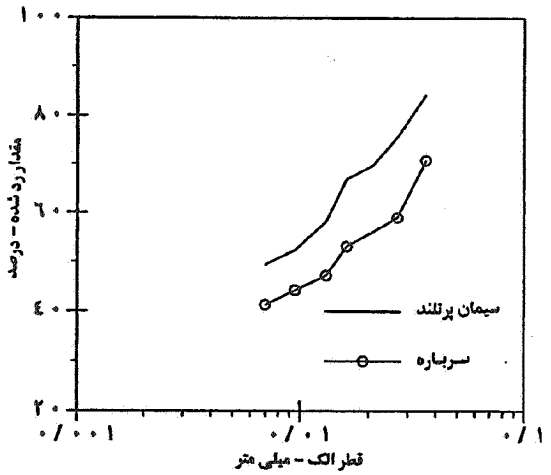


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۲ـ درصد ترکیبات شیمیایی چند نوع سرباره

| نام و محل کارخانه | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | $Fe_2O_3$ | MnO | S | Zn | Pb | سایر مواد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سربارهٔ ذوب آهن اصفهان | ۳۵/۵ | ۹/۱۷ | ۳۶/۷۳ | ۸/۶۷ | ۰/۸۱ | ۱/۳۴ | ۳/۶۳ | ۰ | ۰ | ۴/۲ |
| سربارهٔ سرب و روی زنجان | ۲۱ | ۰ | ۲۹ | ۷ | ۱۹/۵ | ۰ | ۰ | ۱۴ | ۵/۵ | ۴ |
| سربارهٔ ذوب آهن انگلیس | ۳۷-۴۲ | ۳۰-۳۶ | ۱۲-۲۲ | ۳-۱۱ | ۲/۱-۳/۰ | ۰/۴-۲/۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| سربارهٔ ذوب آهن آلمان | ۳۸-۴۶ | ۲۹-۳۵ | ۱۰-۱۶ | ۵-۱۱ | ۰۲-۱/۳ | ۰/۴-۲/۰ | ۰۹-۱/۹ | ۰ | ۰ | ۰ |
| سربارهٔ ذوب آهن هلند | ۳۲/۲ | ۱۶/۷ | ۳۷/۱ | ۱۰/۵ | ۱/۳ | ۰/۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| سربارهٔ ذوب‌آهن آمریکا (N.C) | ۳۵ | ۹/۳ | ۴۲/۹ | ۹/۸ | ۱/۸ | ۱/۱ | ۱/۲ | ۰ | ۰ | ۰ |
| سربارهٔ ذوب آهن نیوکاسل | ۳۶ | ۱۴ | ۳۴/۲ | ۱۱/۳ | ۱/۳ | ۱/۸ | ۱/۰ | ۰ | ۰ | ۰ |




شکل ۱ ـ دانه‌بندی هیدرومتری سیمان پرتلند و پودر سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان

در تحقیقات دیگری که توسط می‌فیلد[۸] انجام شد از سرباره به عنوان شن و ماسهٔ سبک در تهیه بتنهای سبک استفاده شده است. با توجه به عمل‌آوریهای متفاوت اعمال شده در این تحقیقات از سربارهٔ دانه‌ای با دانه‌بندی مناسب برای ساختن بتنهای سبک با وزن مخصوص کمتر از ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده و مقاومتهای فشاری تا ۵۰ مگاپاسکال به دست آمده است. در زمینهٔ استفاده از پودر سرباره در ساخت بتن تحقیقاتی نیز در سال ۱۳۷۱ در کشور صورت گرفته است [۹] و با وجود تفاوتهای احتمالی موجود از نظر دانه‌بندی و ترکیبات در سربارهٔ مورد استفاده در آن پژوهش و تحقیقات حاضر نتایج حاصله از هر دو کاوش به طور کلی با یکدیگر موافقت دارند.

۳۳٪ سرباره و ۷٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را در بین بتنهای سرباره‌ای و بالاترین مقاومت ۲۸ و ۷ روزه در بین سایر بتنهای ساخته شده از جمله بتن شاهد را از خود نشان داده است.

همچنین درتحقیقاتی که توسط هوتن[۷] انجام شده است خصوصیات ضد سولفاتی بتنهای حاوی سرباره مورد ارزیابی قرار گرفته است. از نتایجی که وی به دست آورد می‌توان به اضافه شدن مقاومت بتن درمقابل سولفاتهابااضافه شدن‌درصد سرباره‌درطرح‌اختلاط بتن‌اشاره کرد.

## ۳ـ مصالح مصرفی و نحوهٔ تهیهٔ نمونه‌های بتنی در تحقیقات اخیر

### ۳ـ۱ سیمان مصرفی

سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ I کارخانه سیمان صوفیان و بلین آن $۳۶۴۸cm^2/gr$ است. برای مقایسهٔ ریزی دانه‌های سیمان پرتلند و پودر سربارهٔ مصرفی با استفاده از روش هیدرومتری آزمایش دانه‌بندی برای هر دوی آنها انجام گرفته و منحنی دانه‌بندی آنها در شکل (۱) نشان داده شده است.



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۳ـ حدود ترکیبات سرباره برای بالابودن قدرت هیدرولیکی

| $Mn_2O_3$ | S | $Fe_2O_3$ | MgO | CaO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰-۳ | ۰-۲ | ۰-۱ | ۰-۸ | ۴۰-۵۰ | ۸-۱۸ | ۳۰-۴۰ |

جدول ۴ ـ ارزیابی قدرت هیدرولیکی سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان و چند سربارهٔ دیگر با استفاده از روابط جدول (۱)

| فرمول | اصفهان | سرب و روی | NC | هلند | آمریکا | اصفهان | سرب و روی | NC | هلند | امریکا |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱/۰۴ | ۱/۳۸ | ۰/۹۵ | ۱/۱۵ | ۱/۲۲ | ضعیف | خوب | ضعیف | ضعیف | متوسط |
| ۲ | ۱/۲۸ | ۱/۷۱ | ۱/۲۶ | ۱/۴۸ | ۱/۵۱ | ضعیف | خیلی‌خوب | متوسط | خوب | خوب |
| ۳ | ۱/۰۲ | ۱/۷۱ | ۰/۹۱ | ۰/۹۷ | ۱/۱۸ | خوب | خوب | ضعیف | ضعیف | خوب |
| ۴ | ۱/۵۲ | ۱/۸۴ | ۱/۶۱ | ۱/۹۰ | ۱/۷۷ | متوسط | خوب | متوسط | خیلی‌خوب | خوب |
| ۵ | ۱/۵۳ | ۱/۷۱ | ۱/۶۵ | ۲/۰ | ۱/۷۷ | خیلی‌خوب | خیلی‌خوب | خیلی‌خوب | خیلی‌خوب | خیلی‌خوب |

### ۳ـ۲ سرباره

در فرایند استخراج آهن در کارخانجات ذوب آهن، سرباره به علت داشتن وزن مخصوص کمتر از آهن به صورت کف برروی فلز مذاب قرار می‌گیرد. با تخلیه مواد مذاب از دریچه‌های تحتانی کوره، سرباره به طرف بیرون هدایت شده و با سیستمهای آبپاشی به سرعت سرد می‌شود. سرباره که دارای ترکیبات شیمیایی نزدیک به سیمان است در مدت استخراج آهن گرمایی بالغ بر ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد را تحمل کرده است. در این تحقیقات از سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان استفاده شده و ترکیبات شیمیایی آن به همراه ترکیبات چند نوع سرباره از چند کارخانهٔ دیگر در جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۳) حدود ترکیبات سرباره برای بالا بودن قدرت هیدرولیکی نشان داده شده است [۲و۴].

با استفاده از روابطی که در جدول (۱) برای ارزیابی قدرت هیدرولیکی سرباره ارائه شده است سرباره‌های ارائه شده در جدول (۲) مورد ارزیابی قرار گرفته و مدولهای مختلف هر سرباره حساب شده است. نتایج این محاسبات در جدول (۴) نشان داده شده اند. با استفاده از این جدول مرغوبیت سرباره مشخص می‌شود.

### ۳-۲-۱ عوامل مؤثر در قدرت هیدرولیکی سرباره

خواص هیدرولیکی سرباره عموماً بستگی به دو عامل اساسی ترکیبات شیمیایی و وضعیت فیزیکی سرباره دارد:

#### الف ـ اثر ترکیب شیمیایی و نقش آن در قدرت هیدرولیکی سرباره

آزمایشها نشان می‌دهند هرچه قلیائیت سرباره یعنی نسبت آهک به سیلیس $cao/sio_2$ بیشتر باشد سرباره موغوبتر است. همچنین بالا بودن مقدار $Al_2O_3$ بر مرغوبیت سرباره می‌افزاید[۲]. جدول (۲) راهنمای خوبی برای ارزیابی قدرت هیدرولیکی سرباره است. با توجه به این روابط سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان از نظر ترکیبات شیمیایی برای استفاده در طرح اختلاط بتن مناسب تشخیص داده می‌شود.

#### ب ـ وضعیت فیزیکی سرباره

از نقطه نظر فیزیکی سرباره باید دارای یک حالت شیشه‌ای باشد. حالت بی‌شکل (آمورف) بودن سرباره فاکتور بسیار مهمی در تعیین قدرت هیدرولیکی آن است و سردکردن سریع سرباره موجب عدم تشکیل کریستالهای بزرگ شده و یونهای موجود به صورت نامنظم در کنار همدیگر قرار می‌گیرند و جسم سخت را تشکیل می‌دهند. لذا اگر سرعت سرد کردن سریع باشد گروه‌های یونی بیشتری ترتیب نامنظم خود را حفظ کرده و بدون اینکه ساختمان



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

کریستالی آنها تکمیل شده باشند سخت می‌شوند. دلیل گیرش سربارهٔ شیشه‌ای نیز وجود همین اکسیدهای بی‌شکل در حالت بی‌نظم در کنار یکدیگرند [۲].

با نگاه کردن از طریق یک میکروسکوپ پلاریزه به سرباره‌ای که به آرامی خنک شده است می‌توان به خوبی کریستالهای درشت $2CaO,MgO,2SiO_2$ (آکرومانیت) و $2CaO,Al_2O_3,SiO_2$ (گلنیت) را مشاهده کرد. اما در سربارهٔ به سرعت سرد شده (شیشه‌ای) چنین کریستالهایی وجود ندارد و در سربارهٔ شیشه‌ای انرژی لازم برای کریستالی شدن ترکیبات فوق به صورت نهانی ذخیره شده است که در محیط مناسب آهکی و در کنار سیمان پرتلند این انرژی آزاد و پیوندهای هیدرولیکی شکل می‌گیرند [۲].

### ۳ـ۲ـ۲ خصوصیات سربارهٔ کورهٔ بلند ذوب آهن اصفهان

با توجه به جدول (۲) که درصدهای ترکیبات تشکیل دهندهٔ این سرباره آمده است و مقایسهٔ مدولهای جدول (۴) مشاهده شد که این سرباره مرغوب بوده و می‌تواند جانشین مناسبی برای سیمان پرتلند باشد. وزن مخصوص حقیقی سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان $3/10 gr/cm^3$ و وزن مخصوص لیتری آن ۱۲۵۰ گرم است.

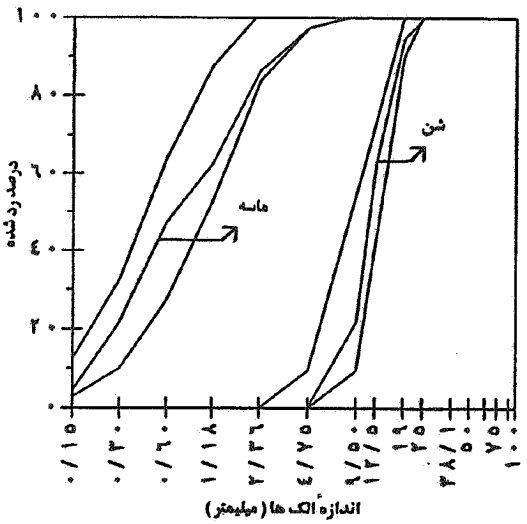
پس از پودر کردن این سرباره با آسیاب دیسکی در کارخانهٔ سیمان صوفیان با دستگاه مخصوص بلین سطح مخصوص آن برابر $3475 cm^2/gr$ تعیین شد. این مقدار نزدیک به سطح مخصوص سیمان پرتلند است که $3648 cm^2/gr$ به دست آمد. مقایسهٔ دانه‌بندی سیمان و پودر سرباره را نیز شکل (۱) امکانپذیر می‌سازد.

### ۳ـ۳ شن و ماسه

شن و ماسه مورد استفاده از نوع رودخانه‌ای بوده و از کارخانهٔ فیال تبریز تهیه شده است. دانه‌بندی شن و ماسه در شکل (۲) نشان داده شده است که در محدودهٔ تعیین‌شده توسط آیین‌نامهٔ ASTMC۳۳ قرار گرفته است.

### ۳ـ۴ آب مصرفی

در انجام آزمایشها و تولید نمونه‌های لازم برای این پژوهش از آب مشروب تبریز استفاده شده است.




شکل ۲ ـ منحنی دانه‌بندی شن و ماسه در محدودهٔ تعیین شده توسط ASTMC۳۳

### ۳ـ۵ طرح اختلاط مصالح و ساخت نمونه‌های بتنی و طرز عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق با توجه به دانه‌بندی شن و ماسه که در شکل (۲) آمده است اقدام به طرح اختلاط بتن با استفاده از روش وزنی ACI شد. عیار سیمان در طرح اختلاط ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شد که این مقدار سیمان با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد پودر سرباره جانشین شد به طوری که همواره عیار سیمان مخلوط حاصل همان ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب باشد.

مدول نرمی ماسه به کار رفته با توجه به منحنی دانه‌بندی آن برابر ۲/۸۱ و وزن مخصوص انبوهی میله خرده شن با انجام آزمایش مساوی $1678 kg/m^3$ به دست آمده در این طرح مقدار اسلامپ ۴۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. مقادیر زیر با استفاده از آیین‌نامه ACI برای شن و ماسه و آب اختلاط (با در نظر گرفتن رطوبت شن و ماسه و تصحیحات لازم) برای ساخت یک مترمکعب بتن به دست آمده است:

| | | |
|---|---|---|
| آب | ۱۸۰ | کیلوگرم |
| سیمان | ۳۵۰ | کیلوگرم |
| شن | ۱۱۶۷/۰۸ | کیلوگرم |
| ماسه | ۸۰۱/۲۳ | کیلوگرم |

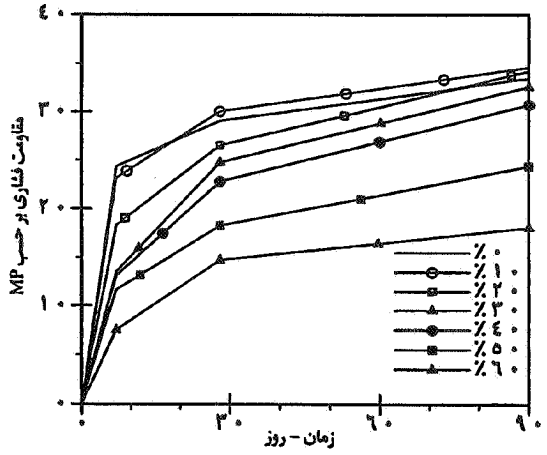
نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۱ بوده و قالبهای مورد استفاده



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۵ ـ مقاومت فشاری بتنهای ساخته شده با درصدهای مختلف سرباره به جای سیمان پرتلند برحسب مگاپاسکال

| ردیف | درصدهای سرباره به جای سیمان | W/C | اسلامپ (mm) | مقاومت فشاری بر حسب MPa | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ۷ روزه | ۲۸ روزه | ۹۰ روزه |
| ۱ | شاهد | ۰/۵۱ | ۳۵ | ۲۴/۳ | ۲۹/۰ | ۳۳/۵ |
| ۲ | ٪۵ | ۰/۵۱ | ۳۳ | ۲۳/۴ | ۲۹/۴ | ۳۵/۳ |
| ۳ | ٪۱۰ | ۰/۵۱ | ۳۴ | ۲۳/۲ | ۳۰/۰ | ۳۴/۶ |
| ۴ | ٪۱۵ | ۰/۵۱ | ۳۰ | ۲۲/۶ | ۲۹/۰ | ۳۴/۳ |
| ۵ | ٪۲۰ | ۰/۵۱ | ۳۲ | ۱۸/۳ | ۲۶/۵ | ۳۴/۲ |
| ۶ | ٪۲۵ | ۰/۵۱ | ۲۸ | ۱۵/۹ | ۲۴/۹ | ۳۳/۰ |
| ۷ | ٪۳۰ | ۰/۵۱ | ۲۵ | ۱۳/۳ | ۲۴/۷ | ۳۲/۶ |
| ۸ | ٪۳۵ | ۰/۵۱ | ۲۷ | ۱۳/۱ | ۲۴/۲ | ۳۲/۴ |
| ۹ | ٪۴۰ | ۰/۵۱ | ۲۵ | ۱۳/۱ | ۲۲/۸ | ۳۰/۷ |
| ۱۰ | ٪۵۰ | ۰/۵۱ | ۲۲ | ۱۱/۷ | ۱۸/۲ | ۲۴/۳ |
| ۱۱ | ٪۶۰ | ۰/۵۱ | ۲۱ | ۷/۵ | ۱۴/۷ | ۱۸/۱ |




شکل ۳ ـ نتایج مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰و ۶۰ درصد سرباره جایگزین شده

برای نمونه‌ها به صورت مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتیمتر بودند. نمونه‌های بتنی با حداکثر تراکم ممکن توسط میز لرزاننده ساخته شده و در سنین ۷،۲۸و ۹۰ روزگی تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.

## ۴ـ بررسی خصوصیات سیمان و بتنهای حاوی سرباره

### ۴ـ۱ آزمایش مقاومت فشاری بتن و اثر سرباره برروی آن

نمونه‌های بتن در سه لایه در داخل قالب ۱۵ سانتیمتری ریخته شده و با لرزاندن به خوبی متراکم شدند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب باز شده در محیط گرمخانه با دمای $27^{\circ}c$ و رطوبت متوسط ٪۶۳ قرار داده شده و برای سنین ۷و۲۸و ۹۰ روز عمل آورده شدند.

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و اسلامپ نمونه‌های بتنی که حاوی درصدهای مختلفی از پودر سرباره‌اند در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج مقاومتهای فشاری در این جدول، میانگین مقاومتهای سه نمونهٔ مشابه‌اند.

در شکل (۳) مقاومتهای فشاری اندازه‌گیری شده به ازای جانشین شدن ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد سرباره به جای سیمان پرتلند در نمونه‌های بتنی نشان داده شده است. همچنین شکل (۴) مقادیر مقاومت بتنهای سرباره‌ای به ازای ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد سرباره را مشخص کرده است.

با توجه به جدولها و شکلهای بالا می‌توان در مورد اثر افزودن سرباره بر روی مقاومت فشاری بتن موارد زیر را نتیجه گرفت:

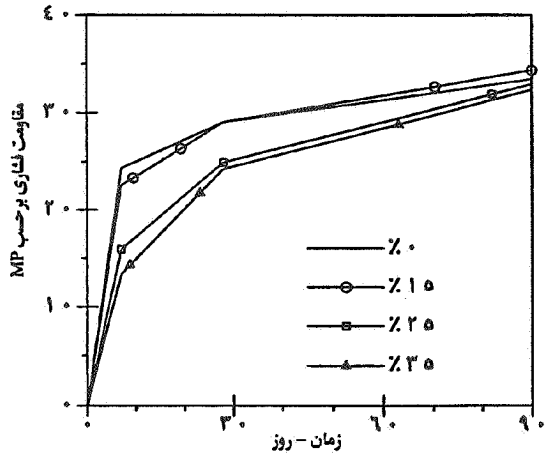
الف ـ افزودن ۲۵ تا ۳۵ درصد پودر سرباره کورهٔ ذوب آهن اصفهان با بلین $3475gr/cm^2$ مقاومتهای قابل قبولی در مقایسه با بتنهای



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۶ ـ نتایج آزمایش اتوکلاو (ثبات حجم)

| درصد سرباره در سیمان | طول اولیه ـ mm (a) | طول ثانویه ـ mm (b) | Δl=a-b mm | Δl در ۱m طول mm |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | L+۱۶/۲۸۲ | L+۱۶/۵۶۱ | ۰/۲۷۹ | ۱/۱۰ |
| ۱۵ | L+۱۷/۸۰۶ | L+۱۸/۰۰۹ | ۰/۲۰۳ | ۰/۸۰ |
| ۲۵ | L+۲۰/۲۱۸ | L+۲۰/۳۹۶ | ۰/۱۷۸ | ۰/۷۰ |
| ۳۵ | L+۱۸/۱۸۶ | L+۱۸/۳۶۴ | ۰/۱۷۸ | ۰/۷۰ |




شکل ۴ ـ نتایج مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با ۰،۱۵،۲۵و۳۵ درصد سرباره جایگزین شده

شاهد به دست می‌آید.

ب ـ مقاومت نمونه‌های حاوی سرباره در روزهای اولیه گیرش در مقایسه با بتن شاهد در حد پایینتری قرار داشته ولی با گذشت زمان مقاومت نمونه‌ها به مقدار بتن شاهد نزدیک و در بعضی موارد از آن بیشتر شده است.

ج ـ استفاده از پودر سرباره کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان با درصدهای بالاتر از ۴۰٪ وزن سیمان دارای نتایج ضعیفی بوده و افت شدید مقاومت فشاری و کارایی را باعث می‌شود.

### ۴ـ۲ اثر سرباره در کارایی بتن

اسلامپهای اندازه‌گیری شده برای بتن با درصدهای مختلف که در جدول (۵) نشان داده شده است بیانگر کاهش تدریجی اسلامپ با اضافه شدن درصد سرباره است. البته این کاهش در اسلامپ برای بتنهای حاوی سرباره با درصد بهینه ۲۵ تا ۳۵ درصد چندان زیاد نیست.

### ۴ـ۳ میزان ثبات حجم سیمانهای حاوی سرباره

برای اطمینان از سالم بودن سیمان پرتلند مصرفی و اندازه‌گیری ثبات حجم سیمانهای مخلوط سرباره‌ای بر اساس ASTM C ۱۵۱-۸۴ از آزمایش اتوکلاو استفاده شده است. به همین منظور نمونه‌هایی به ابعاد ۲/۵۴×۲/۵۴×۲۵/۴ سانتیمتر از خمیر خالص سیمان پرتلند و سیمانهای سرباره‌ای با درصدهای ۱۵و۲۵و۳۵ درصد تهیه شد. برای معین کردن میزان ثبات حجم، نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در شرایط استاندارد از قالبها خارج شده و طول آنها با قرائت عقربهٔ وسیلهٔ اندازه‌گیری طول و علاوه کردن آن به طول ثابت دستگاه (L) تعیین شد. اندازه‌گیریهای طول به وسیله میکرومتر دقیق دستگاه اندازه‌گیری انجام گرفت که هر تقسیمات از صفحهٔ مدرج آن ۰/۰۰۲۵۴ میلیمتر رانشان می‌داد و بنابراین قرائت تغییر طول به آن اندازه به راحتی ممکن می‌شد. سپس نمونه‌ها در شرایط اتوکلاو (۲۱۶ $C^{\circ}$ دما و ۲MPa فشار بخار آب) به مدت ۳ ساعت قرار داده شدند. نمونه‌ها ابتدا در داخل اتوکلاو و سپس در محیط آزمایشگاه خنک شد و طول آنها به همان ترتیب اندازه‌گیری و تعیین شد. نتایج آزمایش اتوکلاو و مقادیر افزایش طول نمونه‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است. چون افزایش طول نمونه‌ها با وجود تفاوتهای موجود در آنها از ۰/۸ درصد طول اولیه نمونه‌ها کمتر است بنابراین کلیه سیمانها سالم تشخیص داده‌شدند[۱۰]. همچنین، تغییرات مربوط به افزایش طول ناشی از وجود مواد مضر به ازای درصدهای مختلف سرباره در شکل (۵) آمده است.

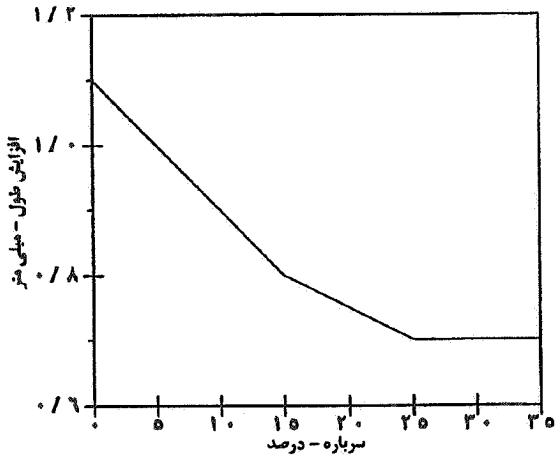


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

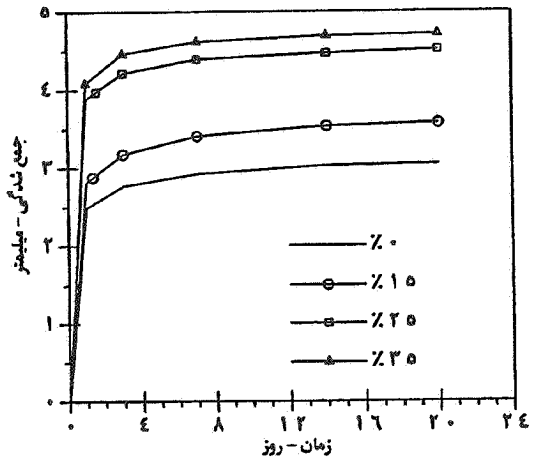
جدول ۷ ـ مقادیر جمع شدگی برحسب (mm) در یک متر طول

برای نمونه‌های خمیر خالص سیمان با درصدهای مختلف سرباره

| روز / درصد سرباره | ۱ روزه | ۳ روزه | ۷ روزه | ۱۴ روزه | ۲۰ روزه |
|---|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۲/۴۹ | ۲/۷۷ | ۲/۹۲۲ | ۳/۰۲۴ | ۳/۰۵ |
| ۱۵ | ۲/۸۲ | ۳/۱۷۶ | ۳/۴۰۵ | ۳/۵۳۲ | ۳/۵۷ |
| ۲۵ | ۳/۸۸ | ۴/۲۱ | ۴/۳۸۸ | ۴/۴۶۴ | ۴/۵۱ |
| ۳۵ | ۴/۰۸ | ۴/۴۶۱ | ۴/۶۱۳ | ۴/۶۸۹ | ۴/۷۱ |




شکل ۵ ـ تغییرات انبساط در اثر وجود مواد مضر در سیمانهای سرباره‌ای با درصدهای مختلف سرباره در آزمایش اتوکلاو




شکل ۶ ـ تغییرات جمع‌شدگی با زمان برای چهارنوع سیمان با ۰،۱۵،۲۵و۳۵ درصد سرباره

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشهای اتوکلاو و تعیین انقباض سیمان می‌توان گفت که افزودن پودر سرباره به جای سیمان با درصدهای مختلف در طرح اختلاط بتن می‌تواند موجب ثبات حجم بیشتر نمونه‌ها شود به طوری که هر چه درصد سرباره افزایش یابد از میزان افزایش طول نمونه‌ها کاسته می‌شود.

## ۴-۴ جمع‌شدگی سیمانهای حاوی سرباره

برای اندازه‌گیری مقدار جمع شدگی سیمانهای سرباره‌ای نمونه‌هایی مانند آزمایش اتوکلاو ساخته و بعد از گذشت ۲۴ ساعت قالبها باز شده و طول نمونه‌ها بعد از ۱،۳،۷،۱۴و۲۰ روز نگهداری در دمای ۲۰ درجهٔ سانتیگراد و رطوبت نسبی ۶۳٪ با دستگاه اندازه‌گیری طول به مانند بند ۴-۳ تعیین شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن سرباره در دراز مدت موجب افزایش انقباض نمونه‌ها می‌شود این نتایج در جدول (۷) و شکل (۶) آمده‌اند.

## ۴-۵ تأثیر جایگزینی پودر سرباره به جای سیمان برروی مقاومت بتن در مقابل حمله سولفاتها

اثرات محیطی و سولفاتها را بر روی بتن می‌توان با ارزیابی افت مقاومت، انبساط ایجاد شده و یا کاهش وزن آنها سنجید [۱۱]. ۱۰۸ نمونهٔ مکعبی شکل بتن با همان طرح اختلاط بند (۳-۵) برای بررسی رفتار بتنهای حاوی سربارهٔ کورهٔ ذوب آهن اصفهان در مقابل حملهٔ سولفاتها ساخته شد. در این سری از نمونه‌ها مادهٔ چسباننده طرح اختلاط شامل ۰،۱۵،۲۵و۳۵ درصد سربارهٔ جانشین شده به جای سیمان پرتلند بود. نمونه‌های ساخته شده بعد از گذشت ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و در داخل محلولهای حاوی سولفات منیزیم قرار داده شدند. سه



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

جدول ۸ ـ نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری بتنهای سرباره‌ای تحت اثر محلولهای ۲/۵٪ سولفات منیزیم، ۵٪ سولفات منیزیم و ۲/۵٪ نمک + ۲/۵٪ سولفات منیزیم

| درصدهای سرباره | | مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ۲۸ روز | ۹۰ روز | ۱۸۰ روز |
| محلول با ۵٪($MgSO_4$) | شاهد | ۳۲/۴ | ۳۷/۴ | ۳۵/۸ |
| | ٪۱۵ | ۲۸/۶ | ۳۷/۹ | ۳۷/۱ |
| | ٪۲۵ | ۲۸/۰ | ۳۸/۳ | ۳۷/۸ |
| | ٪۳۵ | ۲۴/۵ | ۳۸/۴ | ۳۶/۶ |
| محلول با ۲/۵٪($MgSO_4$) | شاهد | ۲۳/۹ | ۳۸/۵ | ۳۷/۱ |
| | ٪۱۵ | ۳۰/۴ | ۳۷/۵۴ | ۳۷/۲ |
| | ٪۲۵ | ۲۸/۸ | ۳۸/۷ | ۳۹/۳ |
| | ٪۳۵ | ۲۵/۶ | ۳۷/۸ | ۳۸/۰ |
| محلول با (٪۲/۵Nacl + ٪۲/۵ $MgSO_4$) | شاهد | ۲۸/۲ | ۳۲/۱ | ۲۸/۴ |
| | ٪۱۵ | ۲۹/۵ | ۳۳/۶ | ۳۱/۵ |
| | ٪۲۵ | ۲۴/۵ | ۲۹/۴ | ۳۰/۵ |
| | ٪۳۵ | ۲۱/۳ | ۳۱/۲ | ۳۲/۳ |

محلول سولفاتهٔ تهیه شده با غلظتهای ۲/۵ درصد و ۵ درصد سولفات منیزیم و محلول سوم شامل ۲/۵٪ سولفات منیزیم به علاوهٔ ۲/۵ درصد نمک طعام بود که نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد ۱۵ سانتیمتر به مدت ۲۸و۹۰و۱۸۰ روز در داخل محلولهای سولفاته فوق قرار داده شدند تا اثر حملهٔ سولفاتها و یونهای کلرید در درازمدت بر روی این بتنها معین شود. نتایج مقاومتهای فشاری به دست آمده که میانگین مقاومتهای سه نمونه مشابه است در جدول (۸) و شکلهای (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند.

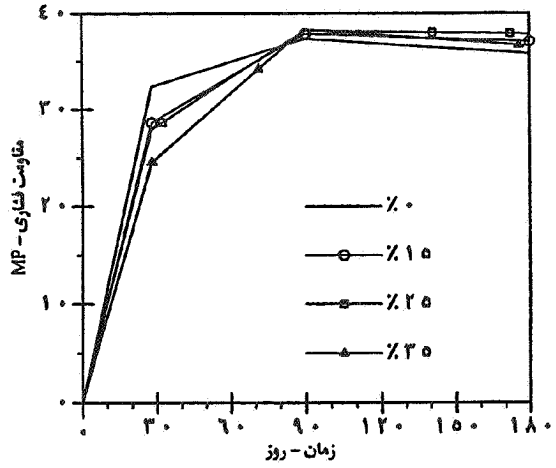
با توجه به شکلهای (۷) و (۸) و جدول (۸) در خصوص مقاومت بتنهای ساخته شده از سرباره در مقابل حمله سولفاتها می‌توان گفت:

الف ـ آسیب‌پذیری بتنهای شاهد در هر سه محلول نسبت به بتنهای حاوی سرباره بیشتر است به طوری که درصد افزایش مقاومت ۲۸ روزه در بتن شاهد همواره کمتر از دیگر بتنها بوده و درصد کاهش به ازای ۱۸۰ روز در بتن شاهد از تمام نمونه‌ها بیشتر است.

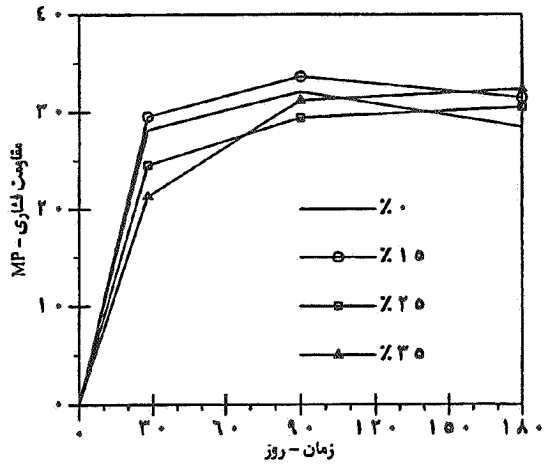


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]




شکل ۷ ـ نتایج مقاومت فشاری بتنهای حاوی سرباره با درصدهای ۰،۱۵،۲۵و۳۵٪ که در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۵٪ قرار گرفته‌اند




شکل ۸ ـ نتایج مقاومت فشاری بتنهای حاوی سرباره با درصدهای ۰،۱۵،۲۵و۳۵٪ که در محلول ۲/۵ درصد سولفات منیزیم به‌علاوهٔ ۲/۵٪ نمک طعام قرار گرفته‌اند

ب ـ با افزودن درصد سرباره افت مقاومت در مقابل حمله سولفاتها کاهش می‌یابد به طوری که در محلول حاوی نمک و سولفات منیزیم افت مقاومت بتن شاهد برابر ۱۱/۳ درصد بوده ولی بتن حاوی ۱۵٪ سرباره در همان محلول افت ۶/۴٪ و بتنهای ۲۵ و ۳۵ درصد سرباره افزایش مقاومتی برابر ۳/۶۷ و ۳/۷۷ درصد را از خود نشان می‌دهند.

ج ـ تأثیر محلول حاوی نمک و سولفاتها تقریباً در تمامی موارد بیشتر از حمله سولفاتها به بتن است و می‌توان گفت که محلول حاوی نمک و سولفات تقریباً شرایطی شبیه آب دریا را داشته و تأثیرات مخرب بیشتری را از خود برجای می‌گذارد.

د ـ همان طوری که ملاحظه می‌شود افزودن سرباره حتی به میزان ۱۵٪ مقاومت نمونه‌ها را در مقابل تهاجم سولفاتها افزایش می‌دهد. هـ ـ اثر تأثیر حمله سولفاتها بر روی بتن در عمرهای بالاتر از ۹۰ روزه به صورت تدریجی ظاهر می‌شود.

## ۵ـ نتیجه گیری

۱- با جایگزینی ۲۵ تا ۳۵ درصد پودر آسیاب شده سربارهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان به جای سیمان مصرفی در بتن کاهش زیادی در مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه بتن حاصل نشده و نتایج رضایتبخشی برای مقاومت فشاری به دست می‌آید.

۲- جایگزینی پودر سرباره به میزان بیشتر از ۴۰ درصد به جای سیمان موجب کاهش قابل توجه کارایی و مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف می‌شود.

۳- سیمانهای حاوی سرباره با درصدهای زیاد دارای جمع‌شدگی بیشتری هستند و با افزایش درصد سرباره میزان جمع‌شدگی سیمان در درازمدت افزایش می‌یابد.

۴- مقاومت فشاری اولیه (۷ روزه) بتنهای سرباره‌ای در حد پایینی بوده ولی بعد از گذشت زمان مقاومتهای قابل قبولی در ۲۸ و ۹۰ روز از خود نشان می‌دهد یا به عبارت دیگر روند هیدراتاسیون سیمان سرباره‌ای کندتر از سیمانهای پرتلند معمولی است.

۵- بتنهای حاوی سرباره دارای مقاومت بیشتری در مقابل حمله سولفاتها هستند.

به طور کلی نتایج آزمایشها نشان می‌دهند که استفاده از پودر آسیاب شدهٔ کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان با درصدهای بهینهٔ ۲۵ تا ۳۵ درصد موجب افزایش مقاومت در مقابل حملهٔ سولفاتها، مقاومت فشاری مناسب و قابل قبول ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با بتنهای شاهد می‌شود، در حالی که استفاده از این سرباره کاهش مقاومت اولیه بتن در مقایسه با بتنهای شاهد و جمع‌شدگی بیشتر نسبت به سیمانهای پرتلند معمولی را نیز سبب می‌شود.



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]

## مراجع


1. Orville, R., "Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete," *ACI Materials Journal*, July - August 1987.

۲- عزیزیان، م. ر.، *سیمان*، انتشارات حیدری، تهران، ۱۳۶۳

۳- دیلمقانی، ص.، *تکنولوژی بتن*، انتشارات دانشگاه تبریز، چاپ سوم، ۱۳۷۵.

4. Mantel, D. G., "Investigation into the Hydraulic Activity of Five Granulated Blast Furnace Slag with Eight Different Portland Cements," *ACI Materials Journal*, September - October 1994.
5. Sivasundaram, V., and Malhotra, V. M., "Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Granulated Slag," *ACI Materials Journal*, November - December 1992.
6. Ozyildirim, C., " Laboratory Investigation of Low - Permeability Concretes Containing Slag and Silica Fume," *ACI Materials Journal*, March - Aprill 1994.
7. Hooton, R., and Emery, J., " Sulphate Resistance of a Canadian Slag Cement," *ACI Materials Journal*, November - December 1990.
8. Mayfield, B., and Louati, M.," Properties of Pulverized Blast Furnace Slag Concrete,"*Magazine of Concrete Research*, 42, No:150, March 1990.

۹- رمضانیانپور، ع.ا.، "بررسی خواص مهندسی و پایایی بتنهای ساخته شده با سربارهٔ آهن گذاری ذوب آهن اصفهان و مقایسه با بتن کنترل،" کنفرانس بین‌المللی بتن، دفتر تحقیقات و سمینارهای فنی سازمان برنامه و بودجه و دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۱.

۱۰- رمضانیانپور، ع. ا.، و شاه‌نظری ، م.ر.، *تکنولوژی بتن*، تالیف نویل، آ.، و بروکس، ج. ج .، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، چاپ چهارم، تابستان ۱۳۷۴.

۱۱- فامیلی.، ه.، *بتن‌شناسی (خواص بتن)*، تالیف نویل، آ.، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران، ص ۵۳۸ - ۵۵۱، ۱۳۶۸.


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287698.1377.17.2.6.2 ]