

## عنوان: مدل ریاضی کنترل کیفی شیمیایی سیمانهای سرباره ای

مقدمه:

اولین مورد استفاده از سرباره (slag) به عنوان یک ماده معدنی در سیمان و بتن به حدود یکصد سال پیش بر می گردد خواص هیدرولیکی سرباره و همچنین مسائل اقتصادی آن این اجازه را دارد که بتوان آن را در صنعت سیمان مورد استفاده قرار داد در این مقاله سعی شده است علاوه بر ذکر مزایای استفاده از سرباره در سیمان و بتن مدلی برای کنترل کیفی شیمیایی سیمانهای سرباره ای و تعیین درصد کمی سرباره به کار رفته در این دسته سیمانها ارائه شود که نهایتاً منتج به ثبات و کنترل نوسانات کیفی سرباره در سیمانهای سرباره ای می گردد.

### ۱- تعریف سرباره:

سرباره کوره بلند یا سرباره از ترکیب سنگ آهک با خاکستر کک و پس مانده های سیلیکاتهای آلومینیوم در کوره ذوب آهن پس از احیاء و جداسدن آهن از سنگ معدن به دست می آید در واقع سرباره حاوی کلیه ناخالصی هایی است که در سنگ آهن و یا در کک مصرفی در کوره بلند و در فرآیند احیاء از سنگ آهن به چدن حضور داشته اند. سرباره در قعر کوره بلند و در سطح بالایی چدن مذاب جمع می شود ترکیب روباره با توجه به نوع آهن مورد نظر و نوع سنگ معدن مصرفی تغییر می نماید روباره دارای یک نقش مهم شیمیایی است و آن عبارت از اینست که گوگرد را از آهن مذاب جدا کند این نقش وقتی بیشتر اهمیت پیدا می کند که نسبت  $cao/sio_2$  در روباره تا حدی زیاد باشد کارخانجات سیمان سازی برای ساخت سیمان روباره از روباره متبلور (granulate) استفاده می کنند.

### ۲- ترکیب شیمیایی سرباره:

علی رغم این واقعیت که سرباره یک محصول جنبی می باشد، معذک سرباره ها معمولاً یک ترکیب شیمیایی نسبتاً ثابت دارند که به وسیله ملاحظات ترمودینامیکی (دیاکرام فاز  $Al_2O_3$ ،  $sio_2$ ،  $cao$ ) و همچنین ملاحظات متالورژیکی (خالص سازی چدن) دیکته می شوند. در بین مواد سیمانی افزودنی برای ساختن بتن، سرباره و کف سیلیکا (silica fume) موادی هستند که بیشترین ثبات ترکیب شیمیایی را دارند اگرچه سرباره یک ماده بی شکل (amorphous) است ولی کنترل ترکیب شیمیایی آن برای کنترل کیفیت اهمیت دارد. البته یک سرباره با ترکیب شیمیایی ثابت، بایستی خواص سیمانی ثابتی هم داشته باشد این موضوع فقط تا حدودی صحت دارد، زیرا درجه حرارت حداکثر در کوره بلند ذوب آهن و درجه حرارتی که سرباره در آن خنک شده است (Quenching) و سایر موارد می تواند واکنش پذیری (reactivity) سرباره، قبل از آسیاب کردن آن را تحت تأثیر قرار دهد. نهایتاً واکنش پذیری سرباره، به عنوان یک ماده معدنی افزودنی می تواند به وسیله کم و زیاد شدن نرمی آن در فرآیند آسیاب کردن، تنظیم گردد. نمونه ای از ترکیب شیمیایی سرباره در جدول ۱-۲ آمده است:

$Sio_2$	$Al_2O_3$	Cao	Mgo	Mno	Feo	s	$Tio_2$	$V_2O_5$	$K_2O$	$Na_2O$
---------	-----------	-----	-----	-----	-----	---	---------	----------	--------	---------

37.1	10.11	37.24	7.36	1.55	0.455	1.23	2.84	0.09	0.63	0.43
------	-------	-------	------	------	-------	------	------	------	------	------

### ۳- مزایای استفاده از سیمان سرباره ای

سیمانهای سرباره ای بنا به ضرورت‌هایی از جمله مصرف انرژی کمتر ، حفظ محیط زیست ، بازیابی و حفاظت از منابع و کاهش قیمت سیمان تولیدی مورد استقبال زیادی قرار گرفته اند . علاوه بر این استفاده از سرباره در هنگام ساختن بتن قابل بررسی و تأمل می باشد زیرا این کار ارزش یک محصول جنبی را که می تواند انرژی مصرفی برای ساختن یک متر مکعب بتن را کاهش دهد به نمایش می گذارد مقدار انرژی موجود در سرباره در هنگام انجام فرآیند تولید چدن مورد محاسبه قرار گرفته است . علاوه بر این با توجه به اینکه هیدراتاسیون سرباره به آهستگی صورت می گیرد حرارت هیدراتاسیون تولید شده به وسیله ذرات سرباره می تواند حین عمل ، در محیط اطراف تلف گردد و در نتیجه درجه حرارت بتن خیلی افزایش نیابد از آنجاییکه سیمان کمتری در بتن وجود دارد، حرارت کمتری نیز در هنگام گیرش بتن ایجاد می گردد . به عنوان نتیجه گیری می توان اظهار نمود که خمیر سیمان هیدراته شده نسبتاً فشرده تر بوده و بتن های ساخته شده با سرباره سابقه بهتری را از دوام در سازه های دریایی نشان می دهند به طور اختصار بتن های سرباره ای خصوصیات زیر را برود داده اند :

- ◀ مصرف آب کمی پایین تر
- ◀ مقاومت اولیه کمی پایین تر
- ◀ میکرواستراکچر فشرده تر
- ◀ نفوذپذیری کمتر
- ◀ حرارت هیدراتاسیون پایین تر
- ◀ مقاومت بهتر در مقابل حمله سولفات‌ها و یون کلر
- ◀ رفتار بهتر در حضور مصالح بتن سازی کمی قلیایی
- ◀ استحکام و دوام بیشتر
- ◀ رنگ روشنتر
- ◀ ویسکوزیته کمتر

### ۳-۱- مزایای اقتصادی

هزینه تولید سرباره بسیار پایین تر از کلینکر می باشد ، زیرا به عنوان محصول فرعی در تولید چدن بوده و هزینه تولید آن برای صنعت سیمان عمدتاً شامل حمل و نقل می باشد بنابراین نسبت به منابع تأمین سیمان و سرباره ، اختلاف هزینه های تولید می تواند تا حدودی تغییر کند . سرباره می تواند با همان کشتی هایی که کلینکر را حمل می کنند با تعرفه مساوی حمل شود اما بسیار آسانتر و کم هزینه تر است که آن را قبل از بارگیری و بعد از تخلیه ذخیره نمود ، زیرا سرباره خاصیت سیمانی شدن نداشته و در مقابل باران مقاومت می نماید از نقطه نظر اقتصادی جهانی ، مصرف سرباره

در سیمان و بتن برای بعضی از کشورها باعث کاهش واردات سوخت آنها خواهد شد. هر تن سرباره مصرفی باعث کاهش ۱۵۰ کیلوگرم زغال سنگ یا نصف بشکه گازوئیل می گردد.

### ۲-۳- مزایای زیست محیطی:

به طور کلی پذیرفته شده که یک تن CO<sub>2</sub> به ازاء هر تن کلینکر آزاد می شود در حقیقت مقدار گاز کربنیک رها شده در هنگام تولید کلینکر دارای سه منبع می باشد کلسیناسیون سنگ آهک (CaCO<sub>3</sub>) و احتراق سوخت مورد نیاز برای رسیدن به درجه حرارت کلینکریزاسیون (clinkerisation) و CO<sub>2</sub> تولیدی توسط سایر تجهیزات و دستگاههای موجود در کارخانجات سیمان استفاده از سرباره باعث نشر کمتر CO<sub>2</sub> به محیط زیست در محدوده ۴۶/۱-۲۹/۲٪ می شود.

### ۳-۳- مزایای ذخیره انرژی

برای تولید حجم یکسانی از سیمان سرباره ای در مقایسه با سیمان پرتلند حدود ۹۰٪ انرژی کمتری مورد نیاز است که بطور متوسط این کاهش انرژی از ۲۱/۱ تا ۴۸/۴٪ می باشد این انرژی شامل انرژی حاصل از سوختها توسط نیروگاههای گازی، انرژی الکتریکی و سایر انرژیها می شود کاهش مصرف سوخت به علت مصرف کمتر کربنات کلسیم می باشد زیرا تجزیه کربنات کلسیم یک عمل حرارتگیر می باشد (Endothermic) معمولاً هفت درصد کل سوخت مصرفی برای تجزیه کربنات کلسیم سوزانده می شود و لذا صرفه جویی در مصرف سوخت می تواند جالب توجه باشد.

### ۴-۳- بازیابی و حفاظت از منابع

در صورتی که از نظر فنی و اقتصادی توجیه پذیر باشد، امکان استفاده از سرباره برای تولید کلینکر سیمان پرتلند به عنوان منبع تأمین کننده CaO، SiO<sub>2</sub>، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> وجود دارد. همچنین کاربرد سرباره به عنوان یکی از کاراترین روشهای مقابله با مصالح ساختمانی، دارای واکنش قلیایی می باشد بنابراین با استفاده از یک سیمان مخلوط سرباره ای این امکان وجود خواهد داشت که به کار برخی از معادن مواد اولیه که می بایستی تعطیل می شدند، ادامه داد. به علاوه از حمل مصالح غیرفعال در فواصل زیاد جلوگیری خواهد شد. استفاده از سرباره به میزان ۴/۳ تا ۱۴/۶٪ به حفاظت از منابع طبیعی کمک می کند.

### ۴- سیمان سرباره ای و دوام بتن

نفوذپذیری و تخلخل که مهمترین عامل منفی در استحکام و دوام بتن است در بتن سیمانهای سرباره ای به حداقل می رسد که این علاوه بر شکل و بافت سطحی صافتر سرباره و ارتقاء کارائی بتن، به علت جذب هیدروکسید کلسیم Ca(OH)<sub>2</sub> ناشی از هیدراتاسیون فازهای C<sub>2</sub>S، C<sub>3</sub>S توسط سیلیس آمورف سرباره است در اثر این واکنش Ca(OH)<sub>2</sub> که یک عامل منفی در افزایش نفوذپذیری بتن است به CS که یک عامل ارتقاء سطح کیفی بتن است تبدیل می گردد. عامل منفی دیگر در دوام بتن

، انبساط سیمان است که در سیمانهای سرباره ای با کنترل عوامل افزایش انبساط (بخصوص آهک آزاد) توسط سرباره انبساط سیمانهای سرباره ای متناسب با درصد سرباره بسیار پایین و در حد صفر است.

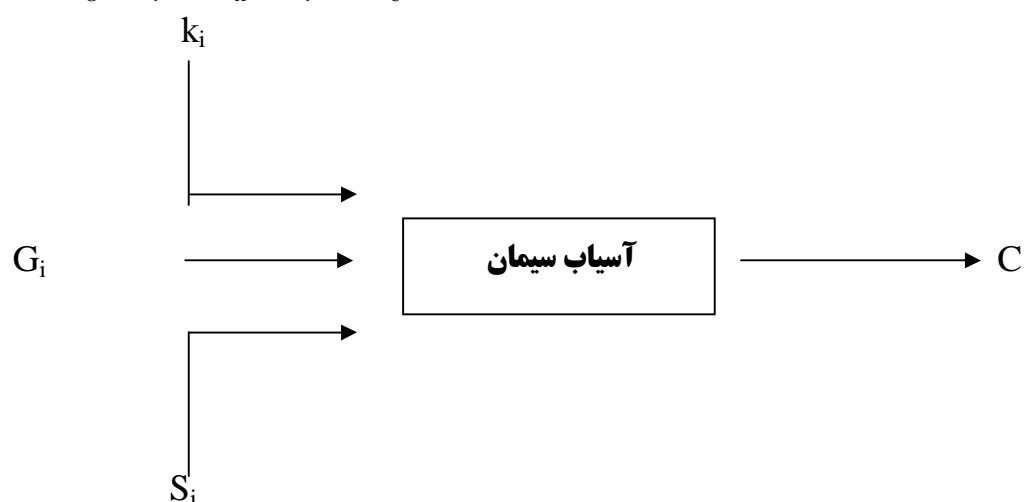
### ۵- مدل ریاضی کنترل کیفی شیمیایی سیمانهای سرباره ای

جهت محاسبه سرباره مصرفی در سیمانهای سرباره ای می توان از مدل ریاضی به شرح زیر استفاده نمود. بدین صورت که با نوشتن معادله موازنه جرمی حول آسیاهای سیمان دستگانه معادلاتی زیر حاصل می شود:

$$1 - G_i + S_i + K_i = 100$$

$$2 - SI_s \times S_i + SI_k \times K_i = SI_c \times 100$$

$$3 - SO_G \times G_i + SO_K \times K_i = SO_C \times 100$$



با حل این دستگانه با استفاده از ماتریسها و پیدا نمودن ماتریس الحاقی آن و همچنین حل دترمینان به روش ساروس نتایج زیر حاصل می شود

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & SI_s & SI_k \\ SO_G & 0 & SO_K \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} G_i \\ S_i \\ K_i \end{bmatrix} = (100 \times) \begin{bmatrix} 1 \\ SI_c \\ SO_C \end{bmatrix}$$

$$X = A^{-1} \times B \quad A^{-1} = \frac{1}{|A|} A^* \Rightarrow X = \frac{1}{|A|} A^* B$$

$$|A| = (SI_s - SI_k)(SO_G - SO_K) - (SO_K \times SI_k)$$

$$A^* = (SI_k \times SO_G) + (SO_K - SO_G) - SI_k$$

« رابطه I »

$$Slag = \frac{100[SI_k(SO_C - SO_K) + (SI_c - SI_k)(SO_G - SO_K)]}{(SI_s - SI_k)(SO_G - SO_K) - (SO_K \times SI_k)}$$

در این رابطه اندیسهای به کار رفته عبارتند از:

$$S_i = slag$$

$S_i$  = درصد سرباره ذوب آهن ورودی به آسیاب

$G_i$  = درصد گچ ورودی به آسیاب

$K_i$  = درصد کلینکر ورودی به آسیاب

$SI_k$  = درصد سیلیس کلینکر

$SI_c$  = درصد سیلیس سیمان

$SI_s$  = درصد سیلیس در سرباره ذوب آهن

$SO_c$  = درصد سولفات سیمان

$SO_k$  = درصد سولفات کلینکر

$SO_G$  = درصد سولفات سنگ گچ

همچنین زمانی که بخواهیم تغییرات درصد سرباره مصرفی را بر حسب تغییراتی که در مقدار سیلیس سیمان یا مقدار سیلیس کلینکر روی می دهد بررسی کنیم می توان با مشتق گیری جزئی از رابطه فوق (I) بر حسب سیلیس کلینکر و سیمان به هدف مورد نظر برسیم .

$$dslag = \left[ \frac{\partial slag}{\partial SI_c} \Big|_{SI_k = const} \right] \times dSI_c + \left[ \frac{\partial slag}{\partial SI_k} \Big|_{SI_c = const} \right] \times dSI_k$$
$$dslag = \frac{\left( \frac{SO_G - SO_K}{G} \right)}{SI_k \left( \frac{SO_G - SO_K}{G} \right) - (SI_k \times SO_G)} \times dSI_c + \frac{\left[ (SO_c - SO_k) - (SO_c - SO_k) \left[ SI_s (SO_c - SO_k) - (SI_k \times SO_G) \right] + SO_c \left[ SI_k (SO_c - SO_k) + (SI_c - SI_k) \times (SO_G - SO_K) \right] \right]}{\left[ SI_s (SO_c - SO_k) - (SI_k \times SO_G) \right]^2} \times dSI_k$$

(رابطه II)

اگر در رابطه II مقادیر اندیسهها را به صورت زیر در نظر بگیریم  
 $SO_G = 38$  ,  $SO_K = 0.1$  ,  $SI_s = 36.5$  ,  $SI_k = 22$  ,  $SO_c = 1/8$  ,  $SI_c = 24.5$   
به رابطه III خواهیم رسید «رابطه III»

$$dslag = 0.06924 dSI_c - 0.04937 dSI_k$$

$$Z = dslag$$

$$x = dSI_c$$

$$y = dSI_k$$

مورد استفاده رابطه III بدین صورت است که با داشتن تغییرات سیلیس سیمان یا سیلیس کلینکر یا هر دو بطور همزمان می توان به تغییراتی که در میزان مصرف سرباره ایجاد می شود پی برد یا بالعکس . بدین معنی که می توان با تغییراتی که در میزان سرباره توسط اتاق فرمان اعمال می شود به تغییرات نهایی در میزان سیلیس سیمان خروجی از آسیاب پی برد .

### نتیجه گیری :

با توجه به مزایا و اهمیت مصرف سرباره در تولید سیمانهای سرباره ای روابط مذکور می توانند راه حل مناسبی جهت ثبات کیفی و کنترل بیشتر نوسانات کیفی این دسته سیمانها ارائه کنند بدین صورت که با ثابت نگه داشتن هر یک از مقادیر سیلیس کلینکر ، سیلیس سیمان و همینطور میزان سرباره می توان کنترل نسبتاً دقیقی بر روی دو پارامتر دیگر داشت که نتیجه نهایی این کنترلها در کیفیت و دوام نهایی - بتن حاصله تأثیر بسزایی دارد . در پایان از سرکار خانم پریناز سالمی که در تهیه و تدوین مقاله مزبور مرا یاری نموده اند کمال تشکر را دارم .

- 3- The Birth Of The Slag Cement Association , By Jan R.Prusinski , P.E.  
Sep 1,2002
- 4- Life Cycle Inventory Of Slag Cement Concrete . Jan R.Prusinski , Medgar  
L.Marceau And Martha G.Van Geem Sugar Land , Texas , 2003
- 5- Eco Ev 27 , Leed Green Building Rating System And Concrete ,  
Environmental Council Of Concrete Organizations , Skokie , Illinois , 2002
- 6- [http : // Cement.americas . Com](http://Cement.americas.com)

دلایلی چند برای گزینش دستگاه X-RAY ARL 9900XP :

- ۱- سابقه ساخت دستگاههای کوانتومتر توسط شرکت ARL سوئیس که توانایی ساخت بهترین ، توانمندترین و بیشترین تعداد دستگاه کوانتومتر در صنایع را دارد به طوری که حداقل ۷۰ دستگاه تولیدی این شرکت در کارخانجات صنعتی ایران در حال کار می باشند.(که لیست آنها پیوست این نامه می باشد)ازمهم ترین دلایل انتخاب دستگاه مذکور می باشد. همچنین به دلیل وجود تعداد زیاد دستگاههای تولیدی ARL در ایران ، نمایندگیها شرکتهای پشتیبان و افراد متخصص برای تعمیر قطعات و ارائه خدمات پس از فروش آن در کشور حضور دارند .
- ۲- این دستگاه قابلیت در برگیرندگی دو سیستم XRF و XRD را به طور همزمان در یک دستگاه مشترک دارد که آنالیز مواد خام ، کلینکر ، سیمان و همچنین اندازه گیری فازهای کلینکر و آهک آزاد را با دقت ، سرعت و سهولت به طور جامع انجام می دهد .
- از مزایای دیگر ادغام دو دستگاه XRF و XRD در یک دستگاه می توان به صرفه جویی در زمان آنالیز ، صرفه جویی و کاهش در نیروی انسانی ، کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات دستگاه در مقایسه با یک دستگاه XRD مجزای نام برد . همچنین نصب دستگاه XRD به طور همزمان با دستگاه XRF به طور نسبتاً چشمگیری هزینه خرید دستگاه را در مقایسه با هزینه XRD به صورت مجزا کاهش می دهد .
- ۳- این دستگاه قابلیت آنالیز بیش از ۸۳ عنصر از بور تا اورانیوم را با غلظت قسمت در میلیون (PPm) تا ۱۰۰٪ را دارد. این دستگاه بهترین پاسخ را برای آنالیز سیمان ، آلومینیوم ، مس ، آهن ، فولاد و کانیها ارائه می دهد .
- ۴- قدرت آنالیز ، دقت و تکرارپذیری ۱۸ برابر دستگاه X-RAY با لامپ 200W است . به دلیل قدرت بالاتر در برانگیختگی زمان آنالیز نیز به همین نسبت کاهش می یابد .
- ۵- نیازی به دستگاه FUSION و دیگر تجهیزات برای آماده سازی نمونه نیست قرص پرس شده نمونه نتایج قابل قبولی برای آزمایشگاه خواهد داشت .

- ۶- لامپ در بالای نمونه قرار دارد و سطح لامپ در معرض ریزش نمونه نمی باشد .
- ۷- قابلیت نصب GONIOMETES با برنامه STANDARD LESS CALIBRATION که می تواند برای آنالیز عناصر خاصی برنامه ریزی شود (آنالیز کمی و کیفی) حرکت بخش های مکانیکی GONIOMETES است که فرسودگی و خرابی کمتری نسبت به دستگاههای دیگر دارد . امکان ارتقاء سیستم (اضافه کردن GONIOMETES) در هر زمان پس از خرید دستگاه امکان پذیر است .
- ۸- قابلیت نصب تا 32 کانل FIX برای آنالیز 32 عنصر به طور همزمان SIMULTANEUS
- ۹- قابلیت نصب AUTO SAMPLER یا نمونه گیر اتوماتیک با چند ظرفیت متفاوت .
- ۱۰- امکان قرار گرفتن سیستم در یک خط تمام اتوماتیک جهت ارسال نمونه و ارسال نتایج آنالیز .
- ۱۱- به دلیل برخورداری بودن این دستگاه از نرم افزار پیشرفته WIN XRF ، امکان کالیبراسیون دقیق و سریع را دارد و مشکلات نرم افزاری به ندرت مشاهده شده است .
- ۱۲- رضایت مشتریانی که از این دستگاه استفاده می کنند مانند سیمان آبیگ ، سیمان تهران ، سیمان ارومیه ، ذوب آهن اصفهان و فولاد آلیاژی یزد .
- ۱۳- در صورت بروز اشکالات در سیستم دستگاه و نیاز به تجهیزات و لوازم ضروری آن می توان از کارخانجات صنعتی که دارنده این دستگاه هستند یاری گرفت .
- ۱۴- از آنجائیکه آزمایشگاه سیمان سپاهان از زمره آزمایشگاههای مرجع صنعت سیمان کشور می باشد وجود دستگاهی با مشخصات مذکور ضروری و الزامی است .
- ۱۵- در صورت وجود این دستگاه در آزمایشگاه شرکت ، در نیروی انسانی نیز صرفه جویی می شود .
- ۱۶- به علت اهمیت آزمایشگاه شرکت سیمان سپاهان در کل آزمایشگاههای شرکتهای سیمان کشور وجود دستگاهها و تجهیزات پیشرفته ، کارآمد و مطابق با آخرین تکنولوژی دستگاههای دنیا ، در کارخانه الزامی است به طوری که در لیست عارضه های سازمانی که توسط گروه کارشناسان عارضه یابی اخیراً در کارخانه تهیه شده است به عدم وجود تجهیزات کافی و پیشرفته در قسمت آزمایشگاهها تأکید گردیده است .
- ۱۷- دارای سیستم WATER COOLING می باشد که باعث دوام بیشتر لامپ می گردد .

کردآورنده:

مهندس بهمنگ خانی- رئیس آزمایشگاههای شرکت سیمان سپاهان

کارشناس ارشد مهندسی صنایع