

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه:

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی می‌باشد. محققان در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری جهت یافتن مواد و محصولاتی که بتوانند جایگزین سیمان در مخلوط بتن کنند، انجام داده‌اند. عمده توجه آنها به ضایعات دیگر بوده است و در این راستا به پیشرفت‌های شایان توجهی نیز دست یافته‌اند. از جمله این محصولات می‌توان به خاکستر بادی، دوده سیلیسی و سرباره کوره ذوب آهن اشاره نمود که استفاده مناسب از آنها باعث بهبود خواص مهندسی و پایایی بتن می‌گردد.

سرباره^۱ نوعی پوزولان مصنوعی می‌باشد که بعنوان یک محصول جانبی در صنایع فلزی و غیرفلزی به شمار می‌رود. عمده‌ترین صنایع تولیدکننده سرباره عبارتند از:

۱. صنایع تولید آهن و فولاد

۲. صنایع تولید مس و روی

۳. صنایع تولید آلومینیوم و منگنز

۴. صنعت تولید فسفر [۲]

به استفاده از پودر سرباره در بتن از دو دیدگاه بایستی توجه نمود؛ دیدگاه نخست این است که با انجام این عمل، از یک محصول جانبی کوره ذوب آهن استفاده مفید شده است. دیدگاه دوم این است که با انجام این عمل از مصرف محصولی کاسته‌ایم که با فرایندی گران، انرژی‌بر و آلاینده شدید محیط زیست تولید می‌گردد.

در این پژوهش با توجه به تحقیقات انجام یافته پیشین بر آنیم تا تأثیر جایگزینی بخش از سیمان پرتلند موجود در مخلوط بتن با پودر سرباره فولاد میباید را بررسی و به یک نسبت بهینه با بیشترین مقاومت فشاری برسیم.

۱-۲ آشنایی با سرباره

۱-۲-۱ منشأ تولید سرباره:

در کارخانه ذوب آهن جهت جدایش آهن از سایر ناخالصی‌های موجود در سنگ معدنی آهن از موادی به عنوان کمک ذوب مانند آهک و .. استفاده می‌شود. این مواد با سایر ناخالصی‌های

موجود در سنگ معدن آهن مانند سیلیکات‌ها، کلسیت‌ها، اکسیدها و ... در کوره واکنش داده و بصورت ترکیبی یکپارچه که به آن سرباره گفته می‌شود در آمده و بخاطر چگالی پایین نسبت به آهن در بالای کوره تجمع می‌کنند و آهن مذاب نیز بخاطر وزن مخصوص بالاتر در قسمت تحتانی کوره جمع می‌گردد. در نهایت این دو از دریچه‌های مختلف که در بالا و پایین کوره تعبیه شده است خارج می‌گردند. صنعت فولاد مقدار بسیار زیادی سرباره تولید می‌کند. تنها سرباره تولیدی در قسمت کوره بلند بین ۰/۱ تا ۰/۲۳ تن به ازای تولید هر تن فولاد می‌باشد. [۷] این در حالی است که در سایر کوره‌های ذوب فلز شبیه قوس الکتریکی و ... نیز سرباره داریم.

سرباره‌ها می‌توانند قسمت زیادی از فضای کارخانه ذوب آهن را اشغال کنند که این نیز می‌تواند باعث ایجاد یکسری مشکلات و هزینه‌های مضاعف گردد.

مصارف سرباره‌ها تاکنون بسیار محدود بوده است. این مصارف شامل استفاده بعنوان لاشه در زیرسازی جاده‌ها و راه‌آهن، ایجاد فرودگاه‌های صحرایی، ساخت آجر نسوز و ... می‌باشد. البته تلاش‌هایی جهت استفاده بهینه از سرباره در کوره‌های مختلف انجام گرفته است که این تلاش‌ها به خاطر غیراقتصادی و غیرعملی بودن بدون نتیجه باقی مانده است.

۱-۲-۲ تاریخچه استفاده:

در ادامه تلاش جهت کاربرد سرباره در صنایع، فرایندی^۱ در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد گردید که این فرایند مخفف عبارتی خاص^۲ می‌باشد. با استفاده از این روش سرباره کم‌ارزش با کمترین هزینه به سیمان پرتلند تبدیل می‌گردد.

سیمان سرباره ای مصرف عمده ثانوی روبراره کوره آهن گدازی بشمار می‌آید. روبراره دانه شده خشک همراه با کلینکر سیمان پرتلند بداخل آسیابهای ساچمه ای ریخته می‌شود و سنگ گچ نیز برای کنترل گیرش سیمان به آنها افزوده می‌گردد. سالهای متمادی است که سرباره آهن گدازی در اسکاتلند تولید می‌گردد و همچنین در ایالات متحده (بوسیله توام آسیاب نمودن و یا مخلوط کردن) نیز تحت نام نوع IS ساخته می‌شود و مشخصات آن در آیین نامه ASTM C595 آمده است. سیمان پرتلند آهن گدازی همچنین در آلمان به اسمهای ایزن پرتلند^۳ (تا ۳۵ درصد روبراره کوره) و هاچوفن^۴ (۳۶ تا ۸۵ درصد روبراره) و در فرانسه که معروفترین آنها

۱ - Cemstar

۲ - System and technolagg for advanced recycling

۳ - Eisenportland

۴ - Hochofen

متالورژیک میکس^۱ (۵۰ درصد روباره) و سیمنت دو هات فورنیو^۲ (۶۵ تا ۷۵ درصد روباره) می باشند، مصرف میشوند. در هلند این میزان به ۸۵ درصد نیز می رسد. یک توسعه بلژیکی این سیمان روش تریف^۳ است که در آن سرباره دانه شده مرطوب بصورت دوغاب، همراه با سیمان پرتلند و سنگدانه ها مستقیماً بداخل دستگاه مخلوط کننده بتن ریخته می شود و مخلوط می گردد. بدین طریق از هزینه خشک نمودن سرباره اجتناب می شود و همچنین برای مصرف نیروی یکسان، آسیاب نمودن در حالت تر منتهی به نرمی بیشتر از حالت خشک می گردد. روش دیگری که در انگلستان تحت نام سمسو^۴ و در افریقای جنوبی با نام اسلگمنت^۵ بکار برده می شود بدین صورت است که روباره خشک و دانه شده بهمان نرمی سیمان آسیاب می گردد و در هنگام مخلوط نمودن بتن بعنوان بخشی از سیمان بداخل دستگاه مخلوط کن ریخته می شود. بدین طریق بتن حاوی سیمان پرتلند آهن گذاری در کارگاه تولید می شود. شایان ذکر است که در این تحقیق از این روش استفاده شده و سرباره پودر شده به مخلوط بتن اضافه شده است. بتنی که سمسو ساخته می شود، مانند بتن حاوی سیمان پرتلند سرباره ای دارای مقاومت اولیه کمتری از بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی می باشد. اما در دراز مدت این مقاومت بهبود می یابد و کارایی بتن نیز اصلاح می گردد. [۱۰]

در این فرایند همچنین میزان آلاینده های گازی به حداقل می رسد. از این روش پس از ظهور نتایج فوق العاده آن در عرض چند سال امتیاز این روش به بسیاری از کشورهای جهان فروخته شده جهت پی بردن به اهمیت اقتصادی این روش کافی است بدانید میزان تولید سیمان شرکت *TXI* آمریکا تنها با استفاده از این روش (این روش جزء طرح توسعه این کارخانه محسوب می شود) از ۱/۱ میلیون تن در سال ۱۹۹۹ به ۲/۵ میلیون تن در سال ۲۰۰۲ رسیده است. استفاده از این روش در آمریکا سبب گشت علاوه بر سرباره های جدید تولیدی، سرباره هایی که در طول سالیان سال بدون استفاده بر روی هم جمع شده بود به ماده با ارزش سیمان تبدیل گردد. مقدار مصرف سرباره جهت تولید سیمان از ۱۶۰/۰۰۰ تن در سال ۹۹ به ۳۴۰/۰۰۰ تن در سال ۲۰۰۲ رسیده است. [۱۱]

۱- *metallurgique mixte*

۲- *ciment de haut fourneau*

۳- *Trief*

۴ - *Cemsave*

۵ - *Slagment*

۱-۲-۳ ملاحظات زیست محیطی:

در نظر نگرفتن محیط زیست بعنوان عامل مهم در سیاست گذاری های توسعه صنعتی باعث تخریب روز افزون محیط زیست طی دهه های اخیر شده است. لذا نگرانی های بوجود آمده در سطح بین المللی در دو دهه اخیر عاملی بوده است تا در اوایل دهه ۱۹۹۰ جامعه جهانی با تدوین و انتشار اسناد استانداردهای زیست محیطی قدمی جدی در قانونمند کردن عملکرد زیست محیطی صنایع مختلف بر دارد. در سال ۱۹۹۲ حدود ۱۶۰۰ دانشمند برجسته جهان از جمله ۹۶ نفر از برندگان جایزه نوبل در بیانیه ای که توسط اتحادیه دانشمندان متعهد انتشار یافته بود، نگرانی عمیق خود را از آلاینده اعلام کرده و متذکر شده بودند که تداوم فعالیت های مخرب بشر ممکن است چنان تغییری در جهان زنده ایجاد کند که ادامه زندگی به شکلی که ما می شناسیم ناممکن شود.

با توجه به واقعیت فوق الذکر، کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه، توسعه پایدار را بدین صورت تعریف می نماید: " توسعه ای که احتیاجات نسل حاضر را بدون لطمه زدن به توانایی نسل های آتی در تأمین نیازهای خود برآورده می نماید." که به مفهوم عدالت هم به بعد درون نسلی (بطوریکه افراد یک نسل به طور یکسان از منابع محیط زیست استفاده نمایند) و هم به بعد بین نسلی (بطوریکه افراد نسل های مختلف از شرایط مساوی در بهره برداری از منابع زیست محیطی برخوردار باشند) توجه دارد. [۵]

در جریان برنامه ریزی بخش های مختلف صنایع باید به اهدافی چون پایان دادن به فقر، اطمینان از سهم بودن تمامی انسان ها در منابع جهانی و نهایتاً بر جای گذاشتن یک بوم سامانه پایدار اندیشیده شود.

جهانی سازی شامل صنعت بتن و سیمان نیز شده است و خوشبختانه بتن بعنوان یکی از پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در احداث مهم ترین سازه های زیربنایی و توسعه ای، دارای پتانسیل مشارکت مهم و مثبت با محیط زیست بوده و می تواند از این واقعیت را به نحو جدی به عرصه ظهور برساند.

از جمله جلوه های این تعامل می توان به استفاده از سیمان تولید شده در کارخانجاتی با تکنولوژی مدرن تولید با مواد خام بازیافتی و منابع انرژی جایگزینی بویژه ضایعات، که مجموعاً باعث کاهش گازهای گلخانه ای از جمله CO_2 ، SO_2 ، NO_x و ... می شوند. استفاده از سنگدانه هایی که در جریان تولید آنها کمترین صدمه به محیط زیست وارد آید، بکارگیری تولیدات فرعی صنایع دیگر مانند میکروسیلیس و سرباره و ... بازیافت ضایعات ایجاد شده از خود بتن و ... اشاره نمود.

مبنای بحث در اینجا سرباره است که هم بصورت مستقیم و هم بصورت ترکیبی و فرایند تولید سیمان می تواند نقش مهمی در کاهش انرژی مصرفی جهت تولید سیمان و بالتبع کاهش آلودگی های زیست محیطی گردد. هرچه میزان مصرف سرباره بعنوان جایگزین سیمان در مخلوط

بتنی افزایش یافته و با استفاده افزودنیهای قابل دسترس و ارزان از کاهش مقاومت جلوگیری نماییم، بطور قطع و یقین به سمت کاهش هزینه ها و بهبود خواص بتن پیش رفته ایم.

فصل دوم

بررسی کیفی سرباره

۱-۲ منشا تولید:

سرباره نوعی پوزولان مصنوعی می‌باشد که بعنوان یک محصول جانبی در صنایع فلزی و غیرفلزی به شمار می‌رود. به طور کلی بسته به مواد اولیه صنایع ایجادکننده سرباره و همچنین فرایندهایی که بر روی آنها اعمال می‌گردد، سرباره‌های متنوعی خواهیم داشت که هر کدام برای کاربردهای مختلفی مناسب می‌باشند. از دیدگاه فوق مهم‌ترین انواع سرباره را می‌توان موارد زیر بر شمرد:

۱. سرباره خنک شده با هوا،

۲. سرباره گرانولی،

۳. سرباره کلوخه‌ای [۱۲]

در عملیات پخت برای تولید آهن مذاب از سنگ آهن ناخالص، کانی‌های آهن (عمدتاً ترکیبات اکسیدی آهن) با ذغال کک مخلوط و تا 1600°C حرارت داده می‌شوند. تحت این شرایط اکسیدهای آهن با کربن ترکیب می‌شوند و تولید CO ، CO_2 می‌کنند. در این فرایند، کانی احیا و تبدیل به آهن فلزی شده و به صورت مذاب در قسمت تحتانی کوره جمع می‌شود. سنگ آهن دارای ناخالصی‌هایی است که باید از آهن جدا شوند. عمده این ناخالصی‌ها ماهیت رسی دارند یعنی ترکیباتی مانند اجزاء سیلیس و آلومینیم می‌باشد. از آنجایی که جداسازی این مواد در حالت جامد از آهن بسیار مشکل می‌باشند، لذا به بار کوره موادی مانند آهک و منیزیم اضافه می‌کنند. به راحتی قابل ذوب هستند این مواد در سطح فوقانی مذاب جمع می‌شوند و تشکیل سرباره را می‌دهند. [۱۳]

سرباره مذاب تولید شده در طول فرایند ذوب در کوره بلند روشن‌تر است و بر روی حوضچه مذاب آهن شناور می‌باشد. سرباره مذاب در دمای حدود 1500°C برای انتقال به قسمت سردتر و یا به واحد قوس‌سازی یا گرانول‌سازی، از طریق هادی ملاقه‌ای جریان می‌یابد. با توجه به درصد آهن موجود در سنگ معدن آهن، سرباره تولیدی از حدود ۲۵۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم سرباره بازای هر تن آهن تغییر می‌کند. در کشوری مثل بریتانیا میزان سرباره تولیدی در صنایع ذوب آهن از حدود ۲۷۰ تا ۳۱۰ کیلوگرم سرباره بازای هر تن آهن متغیر است. [۱۴]

۲-۲ استانداردهای مربوط به سرباره

استاندارد ویژگیهای سیمانهای سرباره‌ای به شماره ۳۸۹ که بوسیله کمیسیون فنی سیمان تهیه و تدوین شده و در سی و هفتمین کمیته ملی استاندارد صنایع ساختمانی مورخ ۱۳۷۳/۷/۱۳ مورد تأیید قرار گرفته، اینک به استناد بند ۱ ماده ۳ قانون اصلاحی قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ به عنوان استاندارد رسمی ایران منتشر می‌گردد.

این استاندارد با بررسی امکانات و مهارتهای موجود و اجرای آزمایشهای لازم به استناد ASTM-C۵۹۵-۹۲ و DIN-۱۱۶۴-۱-۱۹۹۱ تهیه و تدوین گردیده است. این استاندارد، تعریفها و ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی سه نوع سیمان مخلوط را که با استفاده از سرباره‌های آهن گدازی همراه با کلینکر سیمان پرتلند ساخته می‌شود و برای کارهای عمومی و ویژه ساختمانی استفاده می‌شود، ارائه می‌نماید. [۸]

۲-۲-۱ ویژگی‌ها

ویژگیهای شیمیایی سیمانهای سرباره‌ای باید با مندرجات جدول ۲-۱ که در این استاندارد ذکر شده، مطابقت نماید.

جدول ۲-۱: ویژگیهای شیمیایی سیمانهای سرباره‌ای [۸]

روش آزمون	سیمان سرباره‌ای	سیمان پرتلند سرباره ضد سولفات	سیمان پرتلند سرباره‌ای	انواع سیمان	
				ترکیب شیمیایی	ردیف
استاندارد ملی ایران "۱۶۹۳"	۴	۳	۳	گوگرد بصورت (SO_3^{--}) (حداکثر درصد)	۱
	۲	۲	۲	گوگرد بصورت سولفید (S^{--}) (حداکثر درصد)	۲
	۱	۱	۱	باقیمانده نامحلول (حداکثر درصد)	۳
	۴	۳	۲	افت حرارتی (حداکثر درصد)	۴
	۰/۰۳	--	--	قلیایی‌های قابل حل در آب (حداکثر درصد)	۵

چنانچه خریدار از تولیدکننده گواهی ترکیبات شیمیائی سیمان خریداری شده را دریافت نماید، ترکیب شیمیائی محموله‌های تحویل شده مندرج در گواهی مذکور می‌تواند با استفاده از رواداری اختیاری شیمیائی جدول ۲-۲ در نظر گرفته شود.

جدول ۲-۲: رواداری اختیاری شیمیایی [۸]

ردیف	ترکیب	رواداری
۱	اکسید سیلیسیم (SiO_2)	± 3
۲	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	± 2
۳	اکسید کلسیم (CaO)	± 3

ویژگی‌های فیزیکی سیمان‌های سرباره‌ای باید با مندرجات جدول ۲-۳ که در این استاندارد ذکر شده، مطابقت نماید.

جدول ۲-۳: ویژگیهای فیزیکی سیمانهای سرباره‌ای [۸]

ردیف	نوع سیمان	سیمان پرتلند سرباره‌ای	سیمان پرتلند سرباره ضد سولفات	سیمان سرباره‌ای	روش آزمون استاندارد ملی شماره:
۱	نرمی: سانتی متر مربع بر گرم (حداقل)	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۳۹۰
۲	انبساط با آزمون اتوکلاو (حداکثر درصد)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۳۹۱
۳	انقباض با آزمون اتوکلاو (حداکثر درصد)	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۳۹۱
۴	زمان گیرش با آزمون ویکات	۱-۴ اولیه (حداقل به دقیقه)	۴۵	۴۵	۳۹۲
		۲-۴ نهایی (حداکثر به ساعت)	۷	۷	۳۹۲
۵	حداقل تاب فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۱-۵ سه روزه	۱۲۰	۱۰۰	۳۹۳
		۲-۵ هفت روزه	۲۰۰	۱۸۰	۳۹۳
		۳-۵ بیست و هشت روزه	۲۲۰	۲۰۰	۳۹۳
۶	حداکثر حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم)	۱-۶ هفت روزه	۷۰	۷۰	۳۹۴
		۲-۶ بیست و هشت روزه	۸۰	۸۰	۳۹۴

۳-۲ ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند

قبل از ورود به بحث ترکیبات سرباره و روند واکنش های موثر در بتن سرباره ای، لازم است تا ابتدا به بررسی سیمان پرتلند بپردازیم.

مواد خام مصرف شده در تولید سیمان پرتلند عمدتاً از سنگ آهک، سیلیس، آلومینا و اکسید آهن می باشد. در داخل کوره این ترکیبات با یکدیگر واکنش حاصل نموده و تشکیل یکسری ترکیبات پیچیده تری می دهند و بااستثنای کمی از آهک ترکیب نشده که زمان کافی برای واکنش نداشته است، مواد به حالت تعادل شیمیایی می رسند. ولیکن در جریان سرد شدن تعادل حفظ نمی شود و روند سرد شدن بر درجه تبلور و مقدار مواد بی شکل (آمورف) موجود در کلینکر سرد شده تأثیر خواهد داشت. خواص این مواد آمورف که شیشه نامیده می شوند بمیزان قابل ملاحظه ای با خواص مواد متبلور که اسماً ترکیبات شیمیایی مشابهی دارند متفاوت است. پیچیدگی دیگر در اثر واکنش بخش مایع کلینکر با ترکیبات متبلوری که قبلاً بوجود آمده است ایجاد می شود.

بهر حال می توان سیمان را در حالت تعادل منجمد در نظر گرفت. یعنی چنین فرض می شود که محصولات سرد شده مجدداً به حالت تعادل موجود در درجه حرارت کلینکر شدن برسند. در حقیقت چنین فرضی در محاسبه ترکیبات مرکب سیمانهای تجاری صورت می گیرد. استعداد ایجاد ترکیبات را از مقادیر اندازه گرفته شده اکسیدهای موجود در کلینکر و با این فرض که تبلور کامل محصولات در حالت تعادل رخ داده باشد محاسبه می کنند.

معمولاً چهار ترکیب اصلی بنام ترکیبات بوگ [۲۸] را بعنوان مواد عمده تشکیل دهنده سیمان در نظر می گیرند. این ترکیبات در جدول ۲-۴ همراه با علائم اختصاری آنها داده شده اند. این علائم اختصاری که در شیمی سیمان بکار برده می شوند نشان دهنده هر اکسید بوسیله یک حرف می باشند. یعنی $Cao=C$ ، $Sio_2=S$ ، $Al_2O_3=A$ ، $Fe_2O_3=F$ و بهمین صورت H_2O در سیمان هیدراته را بصورت H نمایش می دهند.

جدول ۲-۴: ترکیبات اصلی سیمان پرتلند [۲۸]

علامت اختصاری	ترکیب اکسیدی	نام ترکیب
C_3S	$3Cao. Sio_2$	سه کلسیم سیلیکات
C_2S	$2Cao. Sio_2$	دو کلسیم سیلیکات
C_3A	$3Cao. Al_2O_3$	سه کلسیم آلومینات
C_4AF	$4Cao. Al_2O_3 Fe_2O_3$	تترا کلسیم آلومینات فریت

این ترکیبات یا فازها از نظر شیمیایی حقیقی نیستند. ولی نسبت های مربوط به آنها اطلاعات با ارزشی را برای پیش بینی خواص سیمان فراهم می سازد. توسعه مقاومت سیمان اساساً بستگی به مقادیر C_2S و C_3S دارد که حدوداً ۷۵ درصد سیمان را تشکیل می دهند.

۴-۲ ترکیبات سرباره

ترکیبات اصلی سرباره همان اکسیدهایی هستند که در سیمان پرتلند می باشند، یعنی آهک، سیلیس، آلومین ولی با نسبت های مختلف است. این ترکیبات با تغییرات زیادی بر حسب ماهیت سنگ آهن مصرفی، ترکیب سنگ آهن مذاب، مصرف کک و نوع آهن ساخته شده، همراه است. ترکیب سرباره همچنین با تغییرات منابع اولیه و نوع سنگ آهن مصرفی، تغییر می کند که این تغییرات، محتویات چهار تشکیل دهنده اصلی یعنی آهک، سیلیس، آلومین و منیزیم و همچنین ترکیبات فرعی گوگرد به شکل سولفور و اکسیدهای آهن و منگنز را تحت تأثیر قرار می دهد.

در موقع بهره برداری از کوره بلند، سنگ آهن به وسیله کک به فلز آهن احیاء می شود، در حالی که تشکیل دهنده های سیلیس یا آلومین با آهک و منگنز ترکیب و دوباره مذاب را تشکیل می دهند. در سطح بالای آهن مذاب (بدلیل کم بودن وزن مخصوص سرباره) در کوره جمع می شوند، خود آهن بعضی از این تشکیل دهنده ها را به شکل احیاء شده آن در خود حل می نماید که از آنها سیلیس، منگنز و گوگرد، قابل ملاحظه است. سرباره فولاد میباید با توجه به تغییرات محدود مواد اولیه مصرفی در کوره، دارای ترکیب شیمیایی تقریباً ثابت بدین صورت است:

جدول ۴-۲: ترکیب شیمیایی سرباره فولاد میباید

Feo	Mn_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO/SiO_2	ترکیب
۰/۹۷	۱/۴۸	۳۶/۵	۳۸/۶۱	۶/۹۷	۱۱/۸۵	۰/۹۴۵	میزان ترکیب (درصد)

۲-۵ خواص هیدرولیکی سرباره

خواص هیدرولیکی سرباره عموماً بستگی به دو عامل ترکیب شیمیایی و وضعیت فیزیکی سرباره دارد. هر چقدر قلیائیت سرباره یعنی نسبت آهک به سیلیس بیشتر باشد، سرباره مرغوب‌تر و همچنین بالابودن مقدار Al_2O_3 بر مرغوبیت سرباره می‌افزاید. سرباره‌های اسیدی که دارای سیلیس بالایی هستند و در آنها نسبت آهک به سیلیس (CaO/SiO_2) کمتر از یک است دارای اکتیویته و مرغوبیت کمتری می‌باشند و مناسب برای ساخت سیمان سرباره‌ای نمی‌باشند. متناسب‌بودن سرباره به عنوان یک ماده هیدرولیک با مدول زیر که به نام مدول اکتیویته است بیان می‌گردد. [۳۱]

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1 \quad (1-2)$$

که نسبت فوق برای سرباره فولاد میباید برابر $1/43$ می‌باشد. البته نسبت آهک به سیلیس سرباره فولاد میباید برابر $0/94$ می‌باشد که از این نظر مقداری از حد مرغوبیت سرباره مذکور کاسته خواهد شد. یکی از روش‌های جبران این مشکل اضافه کردن درصدی آهک به ترکیب سیمان می‌باشد که در ادامه و در روند آزمایشات بررسی و نتیجه آن ارائه خواهد شد.

بطور کلی یک سرباره از نظر شیمیایی بایستی ترکیبی در حدود ارقام زیر داشته باشد:

جدول ۲-۵: ترکیب استاندارد سرباره [۳۱]

ترکیب	S	Al_2O_3	MgO	SiO_2	CaO	Mn_2O_3	Feo
میزان ترکیب (درصد)	۰-۲	۸-۱۸	۰-۸	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	۰-۳	۰-۱

از نقطه نظر فیزیکی می‌بایست سرباره دارای یک حالت شیشه‌ای یا آمورف باشد. در سیستم‌های پیشرفته و جاهایی که مشکل کمبود آب وجود ندارد، با استفاده از آب‌پاش‌های دارای فشار بالا شرایطی را بوجود می‌آورند که فاز شیشه سرباره حدود $100 - 95$ درصد می‌رسد. حالت شیشه‌ای یا بی‌شکل بودن سرباره فاکتور بسیار مهمی در تعیین قدرت هیدرولیکی (تشکیل اتصال با آب) سرباره می‌باشد. اصولاً اغلب مواد را اگر تا بالاتر از نقطه ذوب حرارت داده و با عدم تشکیل هسته مرکزی سرد شوند، می‌توان آنها را تا درجه حرارت پایین‌تر سرد کرد، یعنی آنها حتی در درجه حرارتی پایین‌تر از نقطه ذوب پایدار نیز به حالت مایع باقی خواهند ماند. چنین

مایع پایین سرد شده‌ای همچنان که درجه حرارت آن پایین آورده می‌شود، چسبندگی بیشتری پیدا می‌کند و تبدیل به جامد ایزوتوپ و سختی می‌گردد.

انتقال از یک حالت مایع به حالت جامد کریستالی همراه با قرارگرفتن مجدد یون‌هاست که در کریستال تغییر وضع معینی پیدا می‌کند و ویسکوزیته سیلیکات‌های مذاب در حوالی نقطه انجماد آنقدر زیاد است که این قرارگیری مجدد فقط به کندی صورت می‌گیرد اگر سردکردن سریع باشد، گروه‌های یونی بیشتر ترتیب غیرمنظم خود را حفظ کرده و همچنانکه درجه حرارت پایین می‌آید ویسکوزیته به سرعت افزایش می‌یابد سرباره از حالت مایع به حالتی می‌رسد که سختی آن به جامد نزدیک می‌شود، بدون اینکه ساختمان کریستال آن تکمیل شده باشد. دلیل گسترش سرباره شیشه‌ای وجود اکسیدهای آمورف است که در شرایط و حالت بی‌نظم در کنار یکدیگر قرار دارند. با نگاه کردن از طریق یک میکروسکوپ پلاریزه به سرباره‌ای که به آرامی سرد شده، به خوبی می‌توان کریستال‌های درشت $2SiO_2$ ، MgO و $2CaO$ (آکرومانیت) و SiO_2 ، Al_2O_3 و $2CaO$ (کلینیت) و SiO_2 ، $2CaO$ (ولاستونیت) و غیره را دید. این در حالی است که با مشاهده سرباره شیشه‌ای چنین کریستال‌هایی وجود خارجی ندارند. در سرباره شیشه‌ای انرژی لازم برای کریستالی شدن ترکیبات فوق به صورت نهایی در سرباره ذخیره شده است. لذا می‌توان سرباره شیشه‌ای را بعنوان ماده‌ای که دارای استعداد تشکیل اتصال (باند هیدرولیکی) است بشمار آورد. [۲۷]

هنگامی که این سرباره به‌همراه یک فعال کننده (مثلاً کلینکر سیمان پرتلند) پودر شود، انرژی کریستالیه شدن در محیط آهکی آزاد گشته و سیستم آب به سرباره، کلینکر شروع به گیرش و سخت شدن می‌نماید. در صورتیکه سرباره آهسته سرد شده را پودر نمائیم این پودر به خوبی قادر به جذب آب و تشکیل باند هیدرولیکی نخواهد بود. زیرا که اکسیدهای موجود در این سرباره به صورت ترکیب شیمیایی کریستاله هستند. در شرایط عادی فشار و درجه حرارت سرباره کریستاله دارای خاصیت گیرشی و سخت شدن نمی‌باشد، زیرا همان طور که اشاره شد، خواص هیدرولیکی سرباره حالت نهائی دارد. صرفاً با افزودن مقداری فعال کننده است که این خاصیت ظهور می‌کند. در سیمان‌های سرباره‌ای وجود کلینکر پرتلند است که نقش محرک را بازی می‌کند. البته در این پژوهش یکسری مواد به پودر سرباره اضافه گردیده و نمونه‌هایی جهت آزمایش ساخته شده که در ادامه ارائه می‌گردد، شایان ذکر است این مواد با توجه به خصوصیات فیزیکی - شیمیایی سرباره فولاد میبند یعنی پایین بودن نسبت قلیائی CaO/SiO_2 و نیز مقدار اکسید آلومینیم آن Al_2O_3 و همچنین مقدار درصد فاز شیشه به علت روش سردکردن سرباره تعیین شده است.

۲-۶ خصوصیات کیفی سیمان‌های سرباره‌ای

۲-۶-۱ هیدراتاسیون سیمان‌های سرباره‌ای

ممکن است انواع ترکیبات موجود در سیمان به دو طریق با آب واکنش حاصل نمایند. در نوع اول قدری از مولکولهای آب مستقیماً به مولکولهای سیمان افزوده می‌شوند و این یک واکنش حقیقی هیدراتاسیون خواهد بود. واکنش نوع دوم بصورت هیدرولیز خواهد بود. بهر حال مناسب و معمول است که عبارت هیدراتاسیون برای کلیه واکنشهای سیمان با آب بکار برده شود. اساساً هیدراتاسیون سیمان عبارت است از ترکیب آب با اجزاء تشکیل دهنده سیمان. در اثر این ترکیب ابتدا جسم خمیری شکل بدست می‌آید که قابلیت شکل‌پذیری دارد و سپس با گذشت زمان سخت می‌گردد.

تغییر حالت خمیری شکل به جسمی سخت صورت مقطعی و یکباره نیست بلکه این تحول به صورت تدریجی می‌باشد. در ابتدا ملات قابلیت تحمل فشار و نیرو را ندارد ولی در حالت سخت‌شدن، هرچه زمان می‌گذرد قابلیت تحمل فشار و نیرو بالا می‌رود. در طول جریان هیدراته و سخت‌شدن سیمان، یکسری تغییرات و واکنش‌هایی به مرور یا همزمان با یکدیگر صورت می‌گیرد که عبارتند از:

الف) واکنش‌های شیمیایی، خصوصاً واکنش هیدراته شدن و ترکیب اجزاء سیمان با آب.
ب) واکنش‌های مربوط به حل شدن و کریستاله شدن اجزاء سیمان مانند بوجود آمدن ترکیبات ژله‌ای و کریستاله و ناشی از بوجود آمدن نیروهای جاذبه سطحی جدید در بین سطوح مشترک فازهای هیدراته شده و نهایتاً ایجاد اتصالات هیدرولیکی مابین اجزاء تشکیل دهنده سیمان.

واکنش‌های هیدراتاسیون حرارت زا می‌باشد، خصوصاً تولید حرارت در فاصله یک تا سه روز اول مقدار این گرما و سرعت آزاد شدن آن بستگی به نوع سیمان (خصوصاً فازهای سیمان، نرمی سیمان و سازنده‌های فرعی موجود در سیمان نظیر سرباره) دارد. نتیجه کلی هیدراته شدن به وجود آمدن جسمی سخت است که دارای مقاومت بالایی می‌باشد.

لوچاتلیر^۱ اولین کسی بود که در حدود نود سال قبل مشاهده کرد محصولات هیدراتاسیون سیمان از لحاظ ترکیب شیمیایی بهمان صورت محصولات هیدراتاسیون ترکیبات جداگانه موجود در سیمان تحت شرایط مشابه می‌باشند. این موضوع بعداً بوسیله استینور^۲ با این

۱-Le Chatelier

۲-Steinour

شرط که ممکن است محصولات واکنش ها بر یکدیگر نیز اثر بگذارند و یا اینکه ممکن است خود با ترکیبات موجود دیگری در سیستم فعل و انفعال حاصل کنند مورد تایید قرار گرفت. [۲۷]

محصولات هیدراتاسیون سیمان دارای قابلیت حل شدن کمی در آب می باشند که بوسیله ثبات خمیر سخت شده سیمان در تماس با آب معلوم می شود. سیمان هیراته شده به ذراتی که واکنش حاصل نکرده اند، کاملاً می چسبد ولی نحوه دقیق وقوع این امر کاملاً مشخص نشده است. احتمال می رود محصولات جدید هیدراته شده تشکیل قشری می دهند که از درون بوسیله عمل آبی که بداخل نفوذ نموده است رویش حاصل می کنند. برعکس ممکن است سیلیکاتهای حل نشده از این قشر بگذرند و بصورت یک لایه خارجی رسوب نمایند. احتمال سوم این است که پس از رسیدن به حالت اشباع، محلولهای کلوئیدی در سر تا سر جرم رسوب نمایند و هیدراتاسیون بیشتری در داخل این بافت ادامه یابد.

رسوب محصولات هیدراتاسیون بهر نحو که انجام پذیرد سبب می شود روند هیدراتاسیون بطور مداوم کاهش یابد، بطوریکه حتی پس از یک مدت طولانی مقداری از سیمان هیدراته نشده باقی خواهد ماند.

تفاوت اصلی سیمانهای سرباره‌ای و پرتلند از نظر هیدراتاسیون، وجود ترکیبات جدیدی است که با اضافه کردن سرباره به سیمان پرتلند باعث تغییراتی در هیدراتاسیون آن می گردد. محصولات هیدراته‌ای که به‌طور وضوح در سیمانهای سرباره‌ای گسترش یافته تشخیص داده شده‌اند عبارتند از:

۱. فاز کلسیم سیلیکات هیدراته توبرموریت مانند که احتمالاً دارای آلومین در حال، محلول جامد می‌باشند زیرا نمی‌توان تمام آلومین را به حساب سایر محصولات هیدراته گذاشت، این فاز ممکن است همچنین دارای منیزیم در محلول جامد باشد زیرا نمی‌توان $Mg(OH)_2$ آزاد در سیمان گیرش یافته پیدا کرد.

۲. هگزاگونال تتراکلسیم آلومینات هیدراته یا محلول جامد آن یا درهم رشد یافته
 $3CaO (Al_2O_3, Fe_2O_3). CaSO_4, 12H_2O$

۳. فاز از نوع اترینجیت

$3CaO (Al_2O_3, Fe_2O_3). CaSO_4, 3H_2O$

$Ca(OH)_2$

۴. هیدروکسید کلسیم

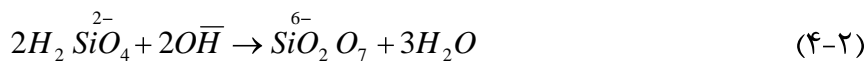
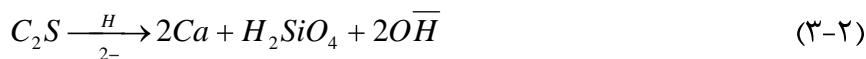
برای تشریح بیشتر هیدراتاسیون سیمان، هیدراتاسیون C_3S را که مهمترین تشکیل دهنده سیمان است بررسی می کنیم.

C_3S بلافاصله بعد از تماس با آب ایجاد یک واکنش گرمازا و کوتاه مدت می کند که بوسیله یک پریود طولانی و غیر فعال ادامه پیدا می کند. در طول این پریود یک تبادل یون بین محلول و C_3S انیدر-جامد به وجود می آید که باعث ایجاد یک پریود افزایش سرعت در واکنش می گردد.

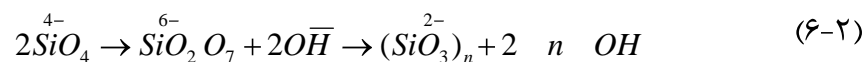
در این مرحله از فعل و انفعال مقدار زیادی از محلول هیدراتاسیون با دانسیته کم و حجم بیشتر از فاز انیدر، در فضای باقیمانده جا می گیرد و باعث کاهش در خلل و فرج سیستم می گردد.

اولین هیدرات تشکیل شده C_3SH_n که هنوز قابل مشاهده نیست به دومین هیدرات تبدیل می شود که در آن نسبت CaO/SiO_2 بسیار کوچک است و از یک لایه نازک تشکیل شده است. چون این هیدرات در مقابل یون هائی که به طرف سطح C_3S می آیند و همراه با آن می شوند، بسیار نفوذپذیر است، افت نامناسب را می توان پایان پرپود افزایش سرعت هیدراتاسیون دانست و سرانجام این هیدرات به سومین هیدرات تبدیل می شود. ($C/S=1/5-2$)

به طور کلی می توان پرپودها را به طور شماتیک به قرار زیر بیان کرد:



در انتهای این پرپود



۲-۶-۲ هیدراتاسیون آلومینات منوکلسیک خالص CA

فرآیند هیدراتاسیون CA بسیار پیچیده تر از C_3S است و این به خاطر طبیعت هیدرات تشکیل شده می باشد. که به طور چشمگیری تابعی از درجه حرارت می باشد. در درجه حرارت $t < 15^\circ C$ این هیدرات تقریباً، فقط به صورت هیدرات هگزگونال CAH_{10} می باشد.



در درجه حرارت $t > 27^\circ C$ این هیدرات C_7AH_8 و ژل آلومین AH_3 می باشد.



در درجه حرارت $27^{\circ}C < t < 15^{\circ}C$ و همچنین درجه حرارت $25^{\circ}C$ که آزمایشات انجام شده، به طور همزمان AH_3 و دو هیدرات هگزگونال یعنی CHA_1 و C_7AH_8 ، تشکیل می‌شوند.

۷-۲ اثر ترکیبات موجود در سرباره بر روی هیدراتاسیون سیمان پرتلند

۱-۷-۲ نقش آلومین در هیدراتاسیون C_3S

تحقیقات انجام شده به وسیله کاتین و وایبرت^[۸] به طور واضح اثر آلومین را در واکنش هیدراتاسیون سیلیکات سه کلسیم ثابت کرده است. به علت میل ترکیبی شدید فاز C_7A موجود در کلینکر با آب، آلومین وارد شده و باعث به وجود آمدن یک لایه هیدرات محافظ (C_7AH_n) بر روی سطح دانه‌های C_3S می‌گردد که منجر به کندی فرآیند حل شدن C_3S و بنابراین به طور محسوسی بر روی هیدراتاسیون سیلیکات تری کلسیک اثر می‌گذارد.

طبیعتاً یک پدیده مشابه می‌باید در هنگام اضافه کردن سرباره به سیمان (چون سرباره دارای مقداری آلومین است) به وسیله تشکیل یک لایه هیدرات محافظ به وجود می‌آید که موجب تأخیر در گیرش سیمان‌های سرباره‌ای شود.

۲-۷-۲ نقش سیلیس (SiO_2) در هیدراتاسیون CA

بر طبق کارهای انجام شده توسط عده‌ای از محققین^[۱۲]، افزایش سرباره به سیمان پرتلند منجر به ایجاد CSH و C_7ASH_8 (هیدرات ژلنیت) می‌گردد. با استناد به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که سرعت تشکیل هیدرات خیلی سریعتر از سرعت تشکیل آلومینات‌های هگزگونال CAH_1 و C_7AH_8 می‌باشد. نتایج تجربی به دست آمده از بررسی ترموگران هیدراتاسیون مخلوط CA خالص با چهار نمونه سرباره (با درصدهای مختلف از سیلیس و آلومین) و رسم منحنی این تغییرات نشان می‌دهد که با افزودن سرباره به CA سرعت هیدراتاسیون افزایش می‌یابد و این افزایش با غنی‌تر بودن سرباره از سیلیس بیشتر می‌گردد.

۲-۸ حرارت هیدراتاسیون سیمان های سرباره‌ای

هیدراتاسیون ترکیبات سیمان مانند بسیاری از واکنش های شیمیایی حرارت زاست. هر گرم از سیمان تا حدود ۵۰۰ ژول (۱۲۰ کالری) حرارت آزاد می کند. از آنجا که هدایت حرارتی بتن نسبتاً کم است، لذا بعنوان عایق حرارتی عمل می نماید و در داخل یک توده عظیم بتنی، هیدراتاسیون می تواند منجر به یک افزایش شدید درجه حرارت گردد. همزمان سطح خارجی بتن مقداری از حرارت خود را از دست می دهد بطوریکه گرادیان حرارتی با شیب زیادی ایجاد گشته و در نتیجه در جریان سرد شدن بعدی در قسمت داخلی بتن ترکهای جدی ممکن است بوجود آید. اگرچه این رفتار توسط خزش بتن جبران می گردد.

از طرف دیگر حرارت تولید شده بوسیله هیدراتاسیون سیمان می تواند از یخ زدن آب در لوله های موئینه بتن تازه درجا ریخته شده در هوای سرد جلوگیری نماید. در چنین مواردی تولید حرارت زیاد دارای مزیت خواهد بود. حرارت هیدراتاسیون مقدار حرارت (بر حسب ژول بر گرم) سیمان هیدراته نشده می باشد که در یک دمای معین در اثر هیدراتاسیون کامل تولید می شود. معمول ترین روش تعیین حرارت هیدراتاسیون بوسیله سنجش حرارت های معمول هیدراته شده و هیدراته نشده سیمان در مخلوطی از اسیدهای نیتریک و هیدرو فلوریک می باشد. اختلاف بین دو مقدار معرف حرارت هیدراتاسیون می باشد. این روش در استاندارد *ASTM C-۱۸۶-۱۹۷۸* توصیف شده است. در حالیکه اشکال بخصوصی در این روش دیده نمی شود، باید دقت شود که از کربناته شدن سیمان هیدراته نشده جلوگیری بعمل آید. زیرا که جذب شدن یک درصد CO_2 منجر به کاهش ظاهری حرارت هیدراتاسیون بمقدار $24/3$ ژول بر گرم (۵/۸ کالری بر گرم) از حرارت هیدراتاسیون بین ۲۵۰ و بیش از ۴۲۰ ژول بر گرم (بین ۶۰ و ۱۰۰ کالری بر گرم) می گردد. [۴۳] همان طوری که گفته شد حرارت هیدراتاسیون یک سیمان سرباره‌ای را می توان با کالری متر ایزوترم اندازه گیری کرد، یا هدایت حرارتی را به وسیله حرارت انحلال به دست آورد. در مورد دوم معمولاً سیمان های پرتلند مورد آزمایش قرار می گیرند. نتایج حاصل از تحقیقات [۴۴] نشان داده است که حرارت هیدراتاسیون یک سیمان پرتلند سرباره‌ای به طور خطی با سرباره گرانوله آن تغییر می کند.

ضمناً از مشخصات سیمان های سرباره‌ای، پائین بودن حرارت هیدراتاسیون آنها در مقایسه با سیمان پرتلند است. جدول های زیر حرارت هیدراتاسیون سیمان سرباره‌ای و سیمان پرتلند را نشان می دهد.

جدول ۲-۶: حرارت هیدراتاسیون سیمانهای سرباره ای. [۳۰]

٪ سرباره اضافه شده	۰	۳۰	۵۰	۷۰	۸۵
مدت نگهداری	حرارت هیدراتاسیون (کالری هر گرم)				
۱۲ ساعت	۲۷	۱۶	۱۱/۵	۸	۶
۱ روزه	۶۲	۴۰	۳۰	۲۳	۱۸
۲ روزه	۷۵	۵۴	۴۳	۳۶	۲۷
۳ روزه	۷۹	۶۰	۴۸	۴۰/۵	۳۰
۴ روزه	۸۲	۶۴	۵۲	۴۳	۳۲/۵
۵ روزه	۸۵	۶۸	۵۵/۵	۴۵/۵	۳۴
۷ روزه	۹۰	-	۶۲	۴۹	۳۶/۵

جدول ۲-۷: حرارت هیدراتاسیون سیمانهای پرتلند و سرباره ای. [۳۰]

حرارت ایجاد شده (کالری هر گرم)			
نوع سیمان	۱ روزه	۲ روزه	۳ روزه
پرتلند معمولی	۲۳ - ۴۲	۴۲ - ۶۵	۴۷ - ۷۵
پرتلند سرباره ای	۱۷ - ۲۸	۳۰ - ۵۰	۳۳ - ۶۷