

طرح مخلوطی برای بتن های فعال شده قلیایی بر پایه سرباره کوره آهنگدازی

محمد حسین نوفلاح^۱، مهدی نوفلاح^۲

۱- کارشناس آزمایشگاه شرکت دماوند سفید پاریس

۲- مدیر کنترل کیفیت شرکت دماوند سفید پاریس

MH.Nofallah@gmail.com

چکیده

در این مقاله رویه‌ای برای انتخاب مقادیر مصالح مختلف برای ساخت بتن‌های فعال شده قلیایی پیشنهاد می‌گردد. این طرح مخلوط برای بتن‌های پایه سرباره مناسب بوده و که به وسیله محلول قلیایی-سیلیکاتی متشکل از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم فعال شده‌اند تدوین شده است. و همچنین مرور کوچکی است بر نتایج تحقیقات قبلی که در این زمینه انجام شده است. در این مقاله پارامترهای اصلی که بر خواص این دسته از بتن‌ها موثر هستند معرفی گردیده و طرح مخلوط‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن تاثیر هر یک از آنها مورد بحث قرار گرفته است. مهمترین عامل در مقاومت بتن‌های فعال شده قلیایی نسبت آب به مواد چسباننده است و در کنار آن عواملی دیگر نظیر نسبت محلول فعال کننده به مواد سرباره نیز از دیگر عوامل تاثیر گذار است. یکی دیگر از این عوامل غلظت محلول قلیایی می‌باشد که مشاهده گردیده است افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم افزایش مقاومت فشاری را به همراه داشته است. در انتها نمودارها و نتایج تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است تدوین گردیده که با استفاده از آن می‌توان مقادیر مصالح مصرفی و نسبت آنها برای دستیابی به مقاومت هدف را انتخاب نمود.

کلمات کلیدی: بتن فعال شده قلیایی، سرباره، طرح مخلوط، سیلیکات سدیم، هیدروکسید سدیم

۱. مقدمه

با پیشرفت روز افزون صنعت ساختمان و بروز مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سیمان‌های پرتلندی نیاز به مصرف مصالح جایگزین دوستدار محیط زیست بیش از پیش احساس می‌شود. بتن‌های فعال شده قلیایی از این دست مصالح هستند که در کسب مشخصات مورد نظر برای مصالح ایده‌آل برای جایگزینی بسیار مناسب بوده و آلودگی‌های زیست محیطی و مصرف انرژی بسیار پایین‌تری نسبت به سیمان‌های پرتلندی دارند (۱-۷) اما استفاده از بتن‌های فعال شده قلیایی نیازمند وجود یک روش طراحی مناسب و هدفمند است. که در برخی تحقیقات گذشته به آنها پرداخته شده است. (۸-۱۵) اما اکثر این تحقیقات بدلیل انجام شدن در محدوده کشورهای اروپایی و در دسترس بودن منابع خاکستر بادی وافر و غنی در این مناطق بر روی بتن‌های پایه خاکستر بادی انجام شده‌اند. طرح مخلوط پیشنهادی در این مقاله قابل استفاده برای ساخت بتن و ملات می‌باشد. اما برخی از متغیرها تاثیر خاصی بر ساخت هر یک می‌گذراند که مقاومت و کارایی را متاثر از خود می‌نمایند و بهتر است این دو دسته از مصالح به طور جداگانه مورد بررسی واقع گردند. (۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵) عواملی چون نسبت محلول فعال کننده قلیایی-سیلیکاتی (که از آن در این مقاله به نام محلول فعال کننده ذکر خواهد شد)، نسبت مقدار آب به مواد چسباننده (مجموع سرباره و مواد چسباننده جامد موجود در محلول فعال کننده) غلظت محلول قلیایی و دیگر پارامترهای اینچنینی هر یک به صورت

منحصر به فرد و یا ترکیبی مورد بحث قرار گرفته‌اند اما هیچگاه به ارائه روشی برای انتخاب طرح مخلوط نینجامیده‌اند. هدف این مقاله ارائه راهکاری و روشی برای طراحی طرح مخلوط بتن‌های فعال شده قلیایی به همراه جداول کمکی و مثال می‌باشد.

از فونت (B Nazanin 12pt) و فاصله خطوط single در تهیه متن اصلی مقاله استفاده گردد. متن مقاله بصورت تک ستونی و با حاشیه ۳۰ میلی متر از بالا و ۲۵ میلی متر از سمت راست، چپ و پایین تهیه گردد. عنوان هر بخش از مقاله با فونت (B Titr 10pt)، با شماره بخش نوشته شود. اولین خط همه پاراگراف‌ها، بجز اولین پاراگراف بعد از متن، بصورت هماهنگ ۵ میلی متر فرورفتگی داشته باشد.

۲. پیشینه تحقیق:

طرح مخلوط‌های پیشنهادی برای بتن فعال شده قلیایی نیز به مانند طرح مخلوط بتن سیمان پرتلندی بسیار متأثر از نسبت آب به مواد چسباننده بسان آب به سیمان در بتن‌های سیمان پرتلندی است. (۱۶) در سیمان پرتلندی تشکیل فاز-S-C-H که از هیدراتاسیون اکسیدهای سیمان ناشی می‌شود منجر به تشکیل ساختار چسب گونه می‌گردد که این ساختار نگهدارنده سنگدانه‌ها که نقش اسکلت بتن را ایفا میکنند در کنار یکدیگر است. در بتن‌های فعال شده قلیایی نقش سنگدانه‌ها به سان بتن سیمان پرتلندی است تنها تفاوت میان این دو بتن نوع ماده چسباننده سنگدانه‌ها به یکدیگر است. در این نوع بتن شکست پیوند در اکسید سلیس و اکسید آلومینیوم و ترکیب آنها با یکدیگر و تشکیل ساختار چهاروجهی پایدار منجر به تشکیل فاز چسب گونه پایدار می‌شود. (۱۳) به همین دلیل انتخاب روش انتخاب سنگدانه برای این بتن می‌تواند کاملاً شبیه به روش‌های انتخاب سنگدانه برای بتن‌های سیمان پرتلندی باشد. اما بی شک خواص ذاتی و تفاوت‌های بین نوع چسباننده‌ها منجر به ایجاد تفاوت‌هایی در برخی خواص بتن ساخته شده می‌گردد که در بتن‌های فعال شده قلیایی این موضوع به طور جداگانه باید مورد بررسی قرار گیرد. (۱۷ و ۱۸) محققان بررسی‌های درباره تاثیر نسبت آب به مواد چسباننده بر مشخصات بتن‌های فعال شده قلیایی مانند مقاومت مکانیکی و کارایی آن انجام داده‌اند. با وجودی که این تحقیقات هنوز در سطح مناسبی از رضایت قرار نگرفته‌اند اما نشان می‌دهند که استفاده از روش مخلوط بتن‌های سیمان پرتلندی برای بتن‌های فعال شده قلیایی به هیچ عنوان مناسب نیست. پس سعی بر آن شد که روش اصولی برای طراحی این نوع بتن‌ها پیشنهاد و بررسی گردد.

۳. شیمی مصالح فعال شده قلیایی

در فعال سازی قلیایی اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در حضور فلزهای قلیایی با هم واکنش می‌دهند. و ترکیب محصول این واکنش با سنگدانه‌ها منجر به ساخت بتن می‌گردد. گاهی این بتن‌ها به نام مرسوم بتن‌های ژئوپلیمری شناخته می‌شوند اما بتن‌های فعال شده قلیایی عنوان جامع تری از این نوع مصالح است و عموماً به بتن‌های فعال شده قلیایی که منابع آنها از نوع مواد کم کلسیم مانند خاکستر بادی کلاس F و یا متاکائولن است اطلاق می‌شود. برای ساخت مصالح فعال شده قلیایی نیاز به یک منبع سیلیکات آلومینیومی به عنوان ماده پایه است. از سرباره کوره آهنگدازی، خاکستر بادی، میکروسیلیس و حتی شلتوک برنج میتوان بدین منظور استفاده نمود. (۱۹، ۱۲) این مواد عموماً به عنوان پسماندهای صنعتی یافت می‌شوند و بر خلاف سیمان پرتلندی نیازی به کلسینه شدن (از دست دادن آب شیمیایی) ندارند و جایگزینی هر متر معکب از بتن فعال شده قلیایی به جای بتن سیمان پرتلندی منجر به کاهش بین ۴۵ تا ۸۰ درصدی مقدار گاز CO₂ می‌شود. (۲۰، ۲)

با وجود اینکه تحقیقات زیادی در زمینه مصالح فعال شده قلیایی انجام شده است، اما محققان در یک موضوع اتفاق نظر دارند که واکنش ماده پایه با محلول فعال کننده در ۳ مرحله انجام می‌گیرد. مرحله اول انحلال سیلیسیم و آلومینیوم،

تشکیل ژل و در نهایت تغلیظ و تشکیل ساختار شبکه سه بعدی از سیلیکات آلومینیوم (۲۱،۱۹،۱۷-۲۵) در تحقیقاتی که در کشورهای اروپایی انجام گرفته است بر پایه استفاده از خاکستر بادی به عنوان منبع سیلیکات آلومینیوم بوده است. اما در کشور ما از حیث وجود منابع بسیار غنی و کثیر از مواد دیگر چون سرباره کوره آهنگدازی و کمبود منبع خاکستر بادی استفاده از سرباره در تحقیقات بسیار رایج تر است. این مواد در سیمان پرتلندی به عنوان مواد آمیخته شمنده با سیمان استفاده می‌گردد اما نقشی که در سیمان پرتلندی به عنوان جایگزین سیمان برای مقاصدی مانند کنترل کارایی و کاهش حرارت هیدراتاسیون ایفا می‌کنند بسیار متفاوت از عملکرد آنها در بتن فعال شده قلیایی است که منبع اصلی ساخت بتن رد حضور محلول قلیایی است (۲۷،۲۶،۱۶). سرباره در انواع مختلف و کلاس های متفاوت یافت می‌شود که معمولاً بر اساس مقدار وجود اکسید کلسیم در آن انواع آن از یکدیگر تمیز داده می‌شوند. سرباره‌های حاوی درصد بالای CaO بتن زود گیر را تشکیل می‌دهند و از طرفی نیز گاهاً دیده شده است که مقدار خیلی بالای آنها در بتن منجر به بروز مشکلات دوامی در بتن شود (۲۸،۱۵) پس در هنگام استفاده از منبع سیلیکات آلومینیومی باید به این موضوع توجه نمود.

۴. نسبت‌های موثر بر خواص بتن‌های فعال شده قلیایی:

مشخصات مکانیکی و دوامی بتن‌های فعال شده قلیایی بطور بسیار ویژه‌ای تحت تاثیر نوع ماده چسباننده پایه و همچنین محلول فعال کننده مصرفی می‌باشد. پس بدیهی است که تخصیص مقدار به هریک از مواد تشکیل دهنده متاثر از این موضوع باشد. به برخی از مقادیر مرتبط با این موضوع در ادامه اشاره می‌شود.

۴-۱ نسبت آب به مواد چسباننده قلیایی

این پارامتر به نسبت کل آب موجود در بتن اعم از آب موجود در سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم و هرگونه آب آزاد اضافی به بتن به مجموع مقدار سرباره، مقدار ماده جامد محلول در هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم اطلاق می‌گردد. مقدار ماده جامد موجود در محلول‌های تشکیل دهنده محلول فعال کننده قلیایی در ابتدا با استناد به اطلاعات تولید کننده و انطباق آن با نتایج درصد ماده خشک هر ماده بررسی شده است و در این نسبت قرار گرفته است. این موضوع واضح گردیده که نسبت آب به مواد چسباننده در بتن‌های فعال شده قلیایی تاثیر همانند این نسبت در بت‌های سیمان پرتلندی دارد (۱۸).

۴-۲ نسبت وزنی محلول قلیایی به سرباره

در این تحقیق از دو محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم برای ساخت محلول فعال کننده قلیایی-سیلیکاتی استفاده گردید. که یکی از پارامترهای موثر بر خواص بتن تازه و سخت شده فعال شده قلیایی نسبت مقدار محلول حاصل از ترکیب به مقدار سرباره مصرفی در این بتن است. به نحوی که صورت این نسبت مقدار وزنی محلول قلیایی فارغ از غلظت مولار و نسبت مواد تشکیل دهنده آن به یکدیگر است. درباره این نسبت بیشتر در حوزه کارایی بتن بحث گردیده است اما تغییر مقدار آن بر مقاومت فشاری بتن فعال شده قلیایی نه به اندازه نسبت آب به مواد چسباننده اما در نوع خود تاثیر گذار است (اصل مقاله) نکته حائز اهمیت در بتن‌های سرباره‌ای فعل شده قلیایی این پارامتر دارای مقدار بهینه است. افزایش مقدار محلول فعال کننده با ثابت بودن مقدار سرباره باعث افزایش روانی بتن و کاهش بیش از اندازه آن نیز باعث افت شدید روانی و کارایی می‌گردد.

۵. نحوه عمل آوری و زمان استراحت نمونه‌ها بعد از ساخت

در تحقیقات گذشته این موضوع آشکار گردیده که عمل آوری حرارتی نمونه‌ها عموماً منجر به افزایش روند کسب مقاومت آنها می‌گردد. (۱۲، ۲۲، ۲۳، ۲۵). دمای عمل آوری همچون طول مدت آن تاثیر بسزایی در روند کسب مقاومت و حتی مقاومت نهایی نمونه‌ها دارد. از فاصله زمانی بین پرداخت و نمونه‌گیری بتن و شروع عملیات عمل آوری (حرارتی، رطوبتی و یا توام) را با عنوان زمان استراحت نمونه‌ها یاد میکنند. در عمل آوری‌های حرارتی مشاهده شده است که با طولانی شدن زمان استراحت نمونه‌ها مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. (۱۸)

در بتن‌های سیمان پرتلندی مشخصه‌های مقاومتی، کارایی و حتی دوام بتن به وسیله نسبت آب به سیمان کنترل می‌شوند اما این موضوع در بتن‌های فعال شده قلیایی بسیار پیچیده تر است و عوام بیشتری در این موضوعات تاثیر گذارند که با یکدیگر نیز اندرکنش دارند. در کنار نسبت‌هایی چون نسبت آب به مواد چسباننده و محلول قلیایی به سرباره و یا نحوه عمل آوری نمونه‌ها عوامل دیگری مانند نوع کاتیون موجود در محلول هیدروکسیدی و غلظت محلول در محلول قلیایی و نسبت اکسید سیلیسیوم به اکسید سدیم در محلول سیلیکاتی و همچنین نسبت سیلیکاتی به محلول قلیایی نیز بر خواص بتن ساخته شده موثر هستند. و با توجه به تحقیقاتی که در گذشته انجام شده است تقریباً می‌توان گفت که محققان در مورد موارد زیر اتفاق نظر دارند. (۱۷، ۱۸، ۲۵، ۲۹)

-نسبت آب به سیمان تاثیر معکوس بر مقاومت بتن فعال شده قلیایی دارد
-با افزایش زمان و دمای عمل آوری مقاومت بتن افزایش می‌یابد.

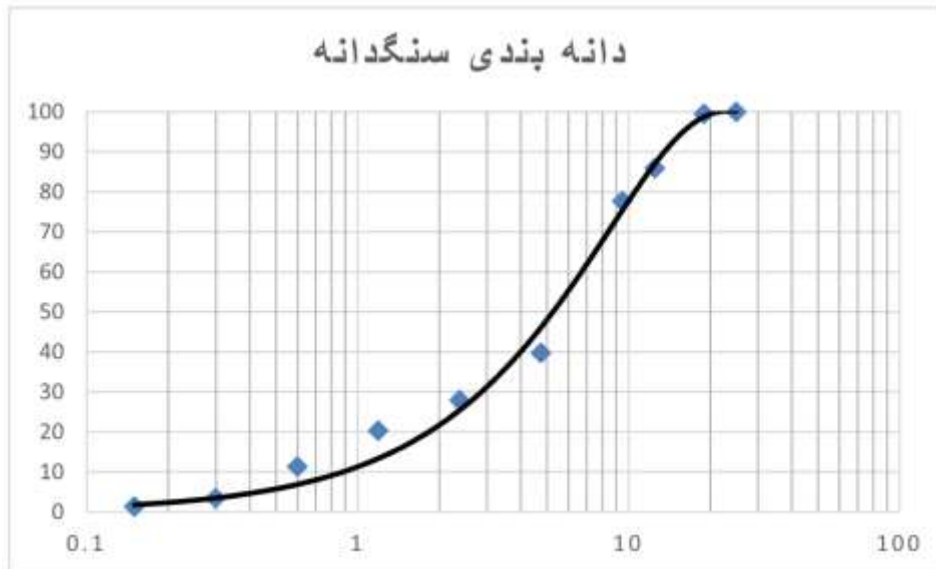
با این وجود این پژوهش نشان می‌دهد که نسبت آب به مواد چسباننده نمی‌تواند کاملاً به عنوان پارامتر تعیین کننده مقاومت و روانی بتن فعال شده قلیایی معرفی شود. این موضوع برای نسبت محلول قلیایی به سرباره نیز صادق است بلکه این دو پارامتر با یکدیگر اندرکنش داشته و با تغییر مقدار هر دو پارامتر می‌توان به مقاومت و کارایی مورد نظر دست یافت.

۶. مشخصات مصالح

همانند بتن سیمان پرتلندی مشخصات مصالح و تناسب مورد استفاده نقش بسزایی در تعیین خواص بتن فعال شده قلیایی دارد. (۳۰-۳۳) در جداول ذیل میزان جذب رطوبت سنگدانه‌ها ریزدانه و درشت دانه و وزن مخصوص آنها آمده است. در این تحقیق نظر به بررسی عوامل موثر بر روی مشخصات بتن مرتبط با خمیر چسباننده مورد بررسی بوده و تحقیقی بر روی دانه بندی مصالح و تاثیر آن بر روی مشخصات بتن سخت شده و یا تازه انجام نشده است. در ادامه منحنی دانه بندی مصالح و درصد باقی مانده بر روی هر الک برای مشخص بودن دقیق تر دانه بندی مورد استفاده قرار گرفته مشخص گردد.

این نکته شایان ذکر است تغییر نوع و مشخصات سنگدانه‌ها مقاومت و کارایی بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد همانطور که پیشتر نیز در مورد آن بحث گردید این تغییر به سان تغییر رخ داده در بتن سیمان پرتلندی است و با استفاده از روش‌های انتخاب سنگدانه برای بتن‌های سیمان پرتلندی می‌توان سنگدانه مورد نظر برای ساخت این بتن را مشخص نمود. برای ساخت این بتن از محلول سیلیکات سدیم با نسبت SiO_2 به NaO برابر با $\frac{2}{3}$ استفاده شده است که سیلیکات تولیدی شرکت باوند شیمی می‌باشد. در مقالات متعدد استفاده از سیلیکات سدیم با نسبت $\frac{1}{5}$ تا $\frac{2}{3}$ برای فعال سازی خاکستر بادی توصیه شده است (خود مقاله) اما با انجام آزمایش‌های اولیه و مقایسه انواع محلول سیلیکات سدیم با یکدیگر نسبت $\frac{2}{3}$ به عنوان نسبت بهینه انتخاب گردید. هیدروکسید سدیم به صورت محلول آماده به مصرف از صنایع پتروشیمی بندر امام با خلوص ۹۸ درصد و غلظت ماده جامد ۵۰ درصد تهیه گردیده است. که این مقدار ماده جامد برابر با غلظت $\frac{18}{75}$ مولار است. همچنین سرباره مورد استفاده در این تحقیق سرباره پسماند کارخانه ذوب آهن اصفهان است که در کارخانه سیمان سپاهان آسیاب گردیده

است. ریزی این سرباره برابر با ۴۵۰۰ متر مربع بر گرم است. ترکیب شیمیایی سرباره مصرفی توسط آزمایش XRF مشخص شده است که در جدول زیر قابل مشاهده می‌باشند.



همچنین سرباره مورد استفاده در این تحقیق سرباره پسماند کارخانه ذوب آهن اصفهان است که در کارخانه سیمان سپاهان آسیاب گردیده است. ریزی این سرباره برابر با ۴۵۰۰ متر مربع بر گرم است. ترکیب شیمیایی سرباره مصرفی توسط آزمایش XRF مشخص شده است که در جدول زیر قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سرباره

Oxide	GGBFS [wt. %]
Silicon dioxide, SiO ₂	32.09
Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	15.14
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	1.53
Calcium oxide, CaO	39.32
Potassium oxide, K ₂ O	1.53
Sodium oxide, Na ₂ O	0.42
Magnesium oxide, MgO	8.75
Sulphur trioxide, SO ₃	2.28

۷. طرح مخلوط پیشنهادی

طرح مخلوط پیشنهادی بر اساس نمودارها و مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده با غلظت‌ها و نسبت‌ها آب به مواد چسباننده و نسبت محلول به سرابه متفاوت انجام شده است و در هر جدول وضعیت بتن تازه از منظر روانی نیز مشخص گردیده است که با استفاده از آن و در نظر داشتن مقاومت هدف و روانی مطلوب و عیار مورد نظر برای ساخت بتن می‌توان مقادیر هر یک از مصالح را تعیین نمود. در نمودار فلوجارت ارائه شده مسیر پیشبرد تعیین مقادیر طرح مخلوط به صورت شماتیک رسم گردیده است. که این مسیر را می‌توان به چند مرحله و چند زیر مرحله تقسیم نمود.

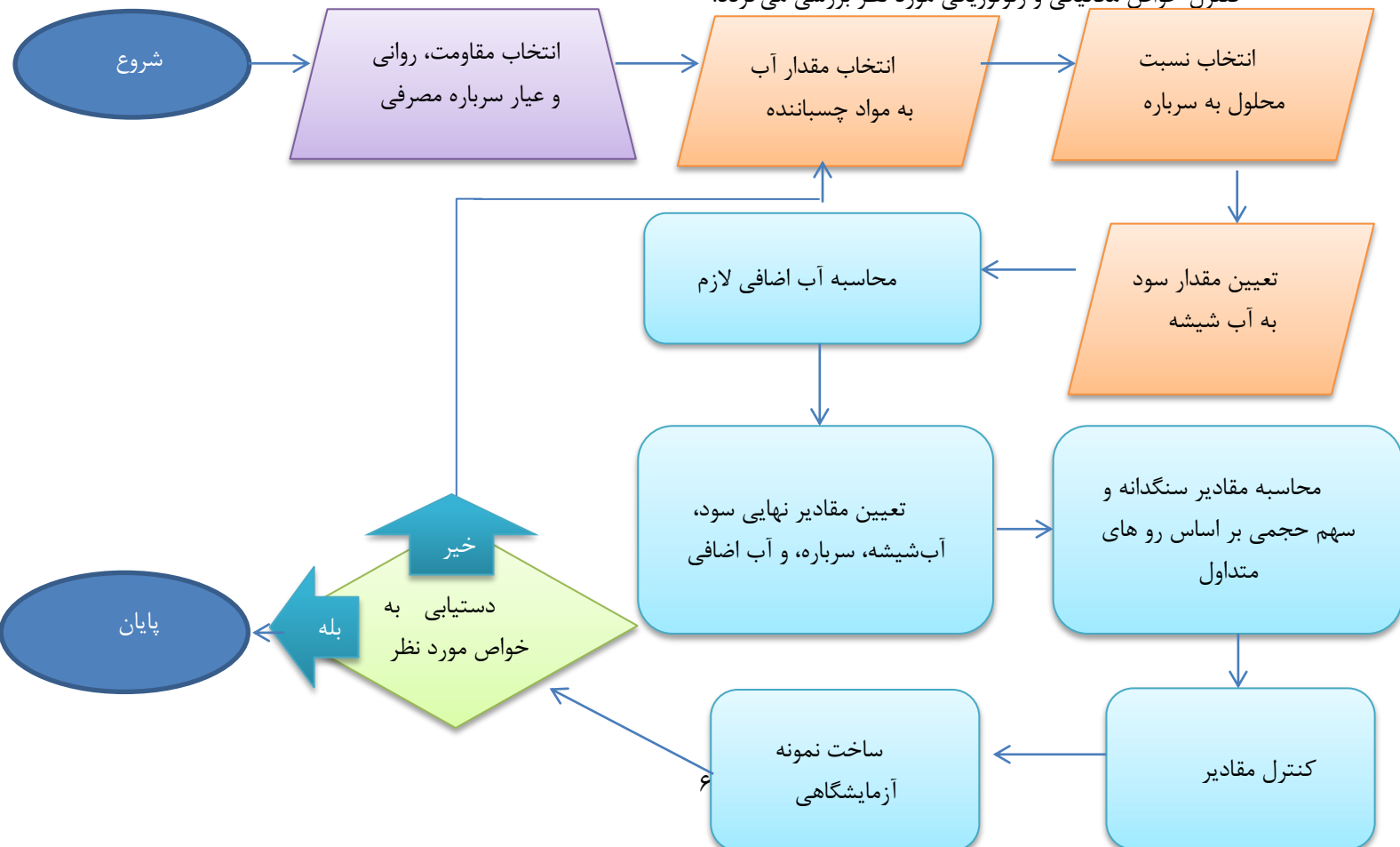
با در نظر گرفتن عیار، مقاومت هدف و روانی مورد نظر و همچنین دانستن غلظت محلول هیدروکسید سدیم مورد استفاده و رجوع به جدول مرتبط با غلظت مورد نظر می‌توان نسب آب به ماده چسباننده مناسب برای ساخت طرح را با در نظر گرفتن قرار گیری در محدوده روانی انتخاب نمود. در این تحقیق ۳ جدول برای ۳ غلظت مولاریته محلول هیدروکسید سدیم برابر با

۱۸/۷۵، ۱۵، ۱۱/۲۵ تهیه گردیده است که هریک از غلظت ها به ترتیب برابر با ۵۰٪، ۴۰٪ و ۳۰٪ ماده جامد در محلول می‌باشند. مقدار ماده چسباننده برابر است با جمع مقادیر تمام موادی جامدی که خمیر چسباننده را تشکیل می‌دهند و مقدار آب نیز متشکل از آب آزاد بعلاوه آب موجود در سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم خواهد بود که نسبت آب به مواد چسباننده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

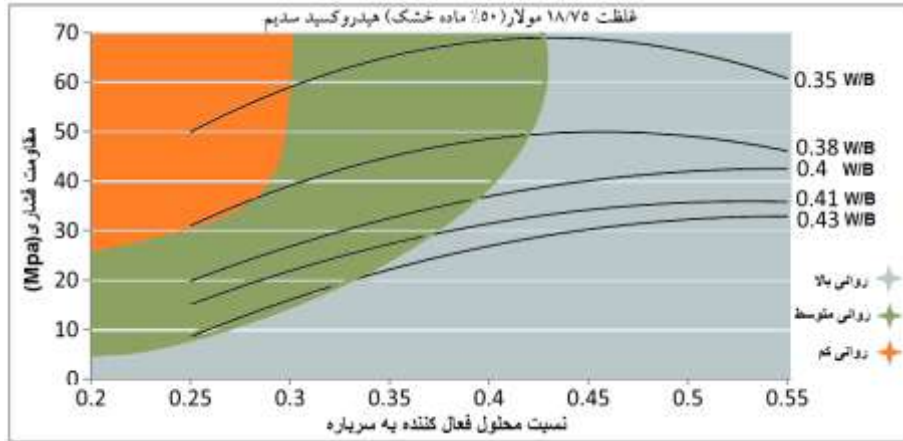
$$\text{آب} = \frac{\text{آب آزاد} + \text{آب سیلیکات سدیم} + \text{آب هیدروکسید سدیم}}{\text{مواد چسباننده} + \text{سرباره} + \text{مواد جامد سیلیکات سدیم} + \text{مواد جامد هیدروکسید سدیم}}$$

در جایگاه دوم از منظر تاثیر بر مقاومت نهایی بتن تعیین نسب محلول قلیایی به سرباره در مرحله بعدی قرار می‌گیرد. انتخاب نسبت محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم تاثیر کمتری نسبت به دو پارامتر گفته شده بر روی مقاومت بتن دارد که در این تحقیق این مقدار برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد باید مقدار آب آزاد اضافه شده به بتن محاسبه گردد. آب کل بتن متشکل از آب موجود در محلول هیدروکسید سدیم، آب موجود در سیلیکات سدیم و کل مقدار آب آزاد موجود در بتن خواهد شد. در این مرحله مقدار سرباره، سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم محاسبه شده. حجم آنها محاسبه گردیده و با در نظر گرفتن درصد هوای ناخواسته بتن حجم خمیر بتن تعیین میگردد. و سپس می‌توان حجم سنگدانه بتن را تعیین نمود. با استفاده از روش‌های متداول تعیین درصد تخصیص حجمی سنگدانه‌ها درصد تعیین گردیده و سپس سهم هریک به مقادیر جرمی تبدیل می‌گردد. در این مرحله جهت صحت سنجی مقادیر محاسبه شده کنترل احجام محاسباتی هک باید مجموعی برابر با ۱ متر مکعب داشته باشند الزامی است.

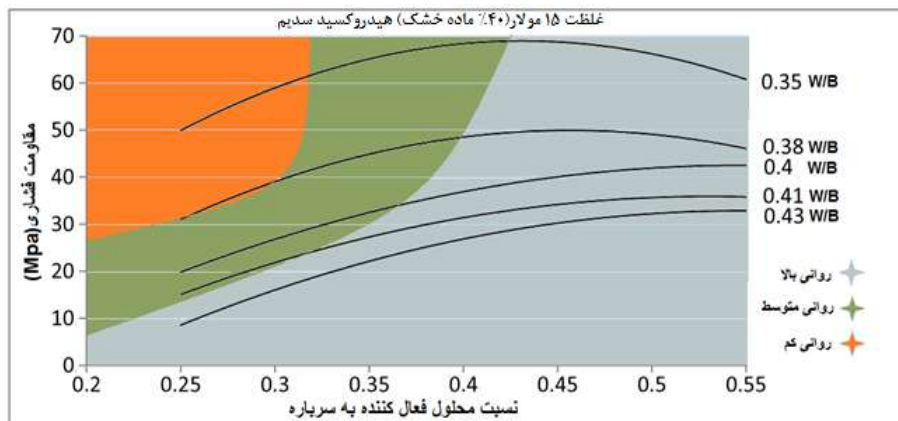
در مرحله نهایی مقدار حجم مورد نیاز از بتن برای ساخت نمونه آزمایشگاهی انتخاب گردیده و بتن آزمایشگاهی برای کنترل خواص مکانیکی و رئولوژیکی مورد نظر بررسی می‌گردد.



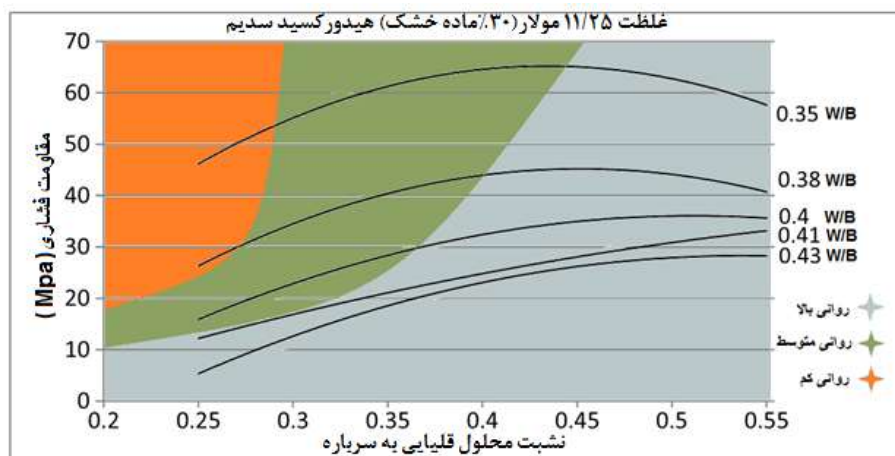
شکل ۱- فلوجارت طرح مخلوط بتن فعال شده قلیایی



نمودار ۱-۱- نسبت مقاومت به آب به بیندر و نسبت محلول قلیایی به سرباره (غلظت ۱۸/۷۵ مولار)



نمودار ۱-۲- نسبت مقاومت به آب به بیندر و نسبت محلول قلیایی به سرباره (غلظت ۱۵ مولار)



نمودار ۱-۳- نسبت مقاومت به آب به بیندر و نسبت محلول قلیایی به سرباره (غلظت ۱۱/۲۵ مولار)

۸. مثال هایی برای طرح مخلوط پیشنهادی

در این بخش نمونه‌های از طرح مخلوط ساخته شده با این روش مطرح میگردد و نتیجه پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه می‌گردند.

روند کلی طراحی بر اساس مقاومت ۲۸ روزه در نظر گرفته شده بود پس مثال‌هایی برای دستیابی به مقاومت ۵۰ مگاپاسکال و ۴۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه مورد بررسی قرار میگیرند. غلظت هیدروکسید انتخابی ۱۸/۷۵ مولار انتخاب گردیده. عیار سرباره ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و باقی مقادیر برابر با مقادیر ثابت در مقاله فرض شده است. با استفاده از نمودارنسبت آب به چسباننده ۰/۳۸ با نسبت محلول به سرباره ۰/۴۵ برای ساخت بتن رده مقاومتی ۵۰ مگاپاسکال و نسبت آب به چسباننده ۰/۳۸ با نسبت محلول به سرباره ۰/۳ و همچنین آب به چسباننده ۰/۴ با نسبت محلول ۰/۴۵ دو نسبت برای ساخت دو طرح مخلوط با روانی‌های مختلف برای رده مقاومتی ۴۰ مگاپاسکال انتخاب می‌گردند. در جدول زیر مقادیر وزنی کلیه مصالح برای هر طرح مشخص گردیده است.

جدول ۲ مقادیر طرح مخلوط و نتایج

نام طرح	AAC _{۵۰-۱}	AAC _{۴۰-۱}	AAC _{۴۰-۲}
مقدار بوزولان (Kg)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
مقدار آب شیشه (Kg)	۱۳۵	۹۰	۱۳۵
مقدار سود (Kg)	۴۵	۳۰	۴۵
اب اضافی (Kg)	۷۱	۸۹	۸۲
مقدار شن بادامی (Kg)	۳۲۵	۳۳۵	۳۲۰
مقدار شن نخودی (Kg)	۳۲۵	۳۳۶	۳۲۰
مقدار ماسه (Kg)	۹۹۷	۱۰۳۰	۹۸۲
مقاومت پیش بینی شده (Mpa)	۵۰	۴۰	۴۰
مقاومت اندازه گیری شده (Mpa)	۴۸	۴۲	۴۱

۹. نتیجه

در تمامی طرح‌ها ملاحظه می‌شود که مقدار محلول فعال کننده به سرباره دارای مقدار بهینه است و افزایش و یا کاهش مقدار منجر به کاهش مقاومت بتن می‌گردد.

کاهش غلظت هیدروکسید سدیم باعث کاهش مقدار مقاومت‌های بتن می‌گردد

با تغییر مقادیر موثر میتوان بتن با روانی مختلف از بتن خود تراکم، بتن معمولی و حتی بتن بدون اسلامپ ساخت.

مقدار بسیار پایین نسبت محلول به سرباره باعث افت شدید مقاومت می‌گردد و این نشان دهنده این موضوع است که ذرات سرباره فعال نگرديده و واکنش نداده در داخل بتن باقی می‌مانند.

۱۰. منابع

- [1] Fling RS. Energy consumption in cement and concrete. J Am Concr Inst 1975;72.
- [2] Davidovits J. Global warming impact on the cement and aggregate industries. World Resour Rev 1994;6:263-78.

- [3] Aitcin PC. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cem ConcrRes* 2000;30:1349–59.
- [4] Worrell E et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Energy Environ* 2001;26:303–29.
- [5] Gartner E. Industrially interesting approaches to low CO₂ cements. *Cem ConcrRes* 2004;34:1489–98.
- [6] Duxson P et al. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cem Concr Res* 2007;37:1590–7.
- [7] Kayali O et al. Sustainability and emerging concrete materials and their relevance in the Middle East. *Open Constr Build Technol J* 2008;2:103–10.
- [8] Bakharev T. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem Concr Res* 2006;36:1134–47.
- [9] Hardjito D, Rangan BV. Development and properties of low-calcium fly ashbased geopolymer concrete. Curtin University of Technology; 2005.
- [10] Kong D, Sanjayan J. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cem Concr Res* 2010;40:334–9.
- [11] Kong D et al. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cem Concr Res* 2007;37:1583–9.
- [12] Lloyd NA, Rangan BV. Geopolymer concrete with fly ash. Presented at the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Italy.
- [13] Rangan B. Design and manufacture of fly-ash based geopolymer concrete. *Concr Aust* 2010;34:37–43.
- [14] Vargas ASd et al. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkaliactivated fly ash-based geopolymers. *Cem Concr Compos* 2011;33:653–60.
- [15] Wallah SE, Rangan BV. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: longtermproperties. Curtin University of Technology; 2006.
- [16] Neville A. Properties of concrete. 4th ed. Longman Group Limited; 1995.
- [17] Diaz-Loya EI et al. Mechanical properties of fly-ash-based geopolymerconcrete. *ACI Mater J* 2011;108:300–6.
- [18] Rangan BV. Concrete construction engineering handbook. 2nd ed. New York: CRC Press; 2007.
- [19] Davidovits J. Soft mineralogy and geopolymers. Proceedings of the Geopolymer 88 International Conference, France.
- [20] McLellana B et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *J Clean Prod* 2011;19:1080–90.
- [21] Davidovits J. Geopolymers inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal* 1991;37:1633–56.
- [22] Fernandez-Jimenez A, Palomo A. Alkaline activation of fly ashes. Manufacture of concrete not containing Portland cement. Presented at the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures.
- [23] Gourley TJ, Johnson GB. Development in geopolymer precast concrete. International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete, Perth, Australia.
- [24] Rickard WDA et al. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Mater Sci Eng A* 2011;528:3390–7.

- [25] Diaz-Loya EI et al. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel* 2010;89:992–6.
- [26] Junaid MT et al. Reducing bleeding in mix for bored pile application without affecting other fresh concrete properties: methodology and procedure. The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand.
- [27] Junaid MT et al. Reducing bleeding in mix for bored pile application without affecting other fresh concrete properties: results and discussion. The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand.
- [28] Gourley T. Recommended practice-geopolymer concrete. Concrete Institute of Australia; 2011.
- [29] Kong D, Sanjayan J. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cem Concr Compos* 2008;30:986–91.
- [30] American Standard for Testing Materials. ASTM C188–09: standard test method for density of cement, 2009.
- [31] Australian S. AS 1141.0-1999: methods for sampling and testing aggregates. List of methods, 1999.
- [32] Australian S. AS 1141.5-2000: methods for sampling and testing aggregates – particle density and water absorption of fine aggregate, 2000.
- [33] Australian S. AS 1141.6.1-2000: methods for sampling and testing aggregates – particle density and water absorption of coarse aggregate – weighing-in-ater method, 2000.
- [34] Junaid, M. Talha, et al. "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes." *Construction and Building Materials* 79 (2015): 301-310.