

بخش اول

مقدمه

۱-۱- دلایل تدوین راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن

پس از تدوین روش ملی طرح مخلوط بتن به منظور آشنایی بهتر و تسلط دست‌اندرکاران طرح مخلوط بتن با جهت استفاده از آن، لازم دیده شد تا راهنمایی برای روش ملی تهیه گردد. همچنین با توجه به موارد مذکور راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن تدوین شد همچنین نرم‌افزار آن نیز تهیه گردید.

در متن راهنما نکاتی وجود دارد که در متن اصلی وجود ندارد و به نوعی علاوه بر هدایت استفاده کنندگان، اطلاعات تکمیلی را در اختیار قرار می‌دهد. این موارد عبارتند از:

- ارائه حاشیه امنیت مقاومت برای محاسبه مقاومت فشاری متوسط لازم جهت تهیه طرح مخلوط بتن طبق آیین نامه بتن ایران، مقررات ملی ایران (مبحث نهم)، مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی و راه (نشریه شماره ۵۵ و ۱۰۱)
- ارائه راهکار برای تهیه طرح مخلوط با استفاده از سیمان‌های پرتلند و آمیخته و سفید علاوه بر سیمان پرتلند نوع ۱ با سه رده مقاومتی که در روش ملی طرح مخلوط بدانها اشاره شده است.
- ارائه راهکار برای تهیه طرح مخلوط بتن با مقاومت مشخصه در سنین بالاتر از ۲۸ روز
- ارائه روش تعیین درصد شکستگی شن‌ها و محاسبه درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های درشت با توجه به سهم مصرفی آن‌ها در مخلوط سنگدانه بتن
- تهیه منحنی‌های رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بتن در صورتی که روان‌کننده مورد استفاده قرار گیرد (به ویژه برای نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵)
- ارائه مدل‌های ریاضی منحنی‌های نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری
- ارائه رابطه اصلاح شده فولر - تامسون برای دانه‌بندی مطلوب مخلوط سنگدانه بتن



- ارائه جدول دانه‌بندی مطلوب مخلوط سنگدانه برای حداکثر اندازه‌های مختلف بجای منحنی‌های مزبور به ویژه برای حداکثر اندازه جدید ۱۲/۵ میلی متر برای الک‌های مختلف و اضافه نمودن الک‌های ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی متر به این جدول و ارائه دانه‌بندی با توان‌های مختلف از ۰/۶۷ تا ۰/۱ با گام‌های ۰/۰۵
- ارائه پیشنهاد کاربرد محدوده‌های مختلف دانه‌بندی مطلوب در طرح‌های مختلف با توجه به شرایط اجرایی و مشخصات بتن مورد نیاز
- ارائه رابطه برای محاسبه معادل درصد شکستگی متوسط برای سنگدانه‌های بتن جهت تعیین مقدار آب بتن
- ارائه مدل‌های ریاضی رابطه مقدار آب آزاد بتن و مدول نرمی سنگدانه و ایجاد امکان برای محاسبه آب کارآیی‌های مختلف به ویژه در ارتباط با درون یابی بین منحنی‌های موجود
- راهنمایی در مورد تغییر مقدار آب بتن با توجه به مصرف دوده سیلیسی، پوزولان‌های طبیعی، خاکستر بادی، مواد حبابزا و روان کننده
- ارائه راهکار در مواردی که در طرح مخلوط بتن، بن بست ایجاد می شود
- ارائه محدوده تقریبی چگالی ذرات انواع سیمان و مواد پودری معدنی
- ارائه رابطه برای تعیین چگالی متوسط ذرات مواد سیمانی و سنگدانه
- استفاده از رابطه حجم مطلق در ویرایش جدید روش ملی طرح مخلوط برای تعیین حجم سنگدانه و مشخص نمودن مقادیر هر یک از سنگدانه‌ها با فرض تفاوت جدی در چگالی آن‌ها و ایجاد سهولت برای طرح مخلوط بتن نیمه سبکدانه
- راهنمایی در مورد ساخت مخلوط آزمون بر اساس طرح مخلوط اولیه بتن
- توضیح در مورد نحوه اصلاح و تعدیل طرح مخلوط اولیه بتن
- راهنمایی در مورد خواسته‌های بتن و داده‌های مورد نیاز طرح مخلوط
- راهنمایی در مورد ارائه طرح مخلوط بتن و ایجاد زمینه برای تهیه شرح خدمات جهت تهیه طرح مخلوط
- ارائه روش جایگزین برای تعیین مقادیر تقریبی آب آزاد بتن بصورت مستقیم بر اساس روابط پایه
- ارائه ملاحظات خاص در طرح مخلوط بتن‌های ویژه و بکارگیری روش ملی طرح مخلوط

- در این موارد شامل بتن پمپی، بتن ترمی، بتن پاشیدنی، بتن سنگین، بتن تمام سبکدانه و نیمه سبکدانه، بتن پیش آکنده، بتن حبابدار، بتن الیافی و بتن خود تراکم. لازم به ذکر است دامنه کاربرد روش ملی طرح مخلوط بتن دربرگیرنده این موارد نیست اما در این راهنما امکان بکارگیری این روش برای بسیاری از بتن‌های ویژه نیز فراهم شده است.
- توضیح و تبیین دقیق تر اثر حباب هوای عمدی بر تعیین آب مورد نیاز و مقاومت فشاری
 - ارائه توصیه‌هایی در مورد حداقل و حداکثر عیار سیمان و دانه‌های ریز بتن
 - ارائه مثال‌های کاربردی و راهنمایی برای استفاده از روش ملی طرح مخلوط بتن و موارد مذکور در این راهنما
- همچنین همراه این راهنما، نرم افزاری ارائه شده است که بکارگیری آن نیازمند مطالعه این راهنما می‌باشد.

۲-۱- دلایل و چگونگی انتخاب مبانی و اصول روش ملی طرح مخلوط بتن

۱-۲-۱- کلیات

- پس از مطالعات مختلف، جهت تدوین روش ملی طرح مخلوط بتن مراحل در نظر گرفته شد که در زیر بدانها اشاره می‌شود.
- الف- بررسی روشهای مختلف طرح اختلاط بتن که در دنیا شناخته شده و پر کاربرد هستند و شناخت نقاط قوت و ضعف آنها .
 - ب- ساخت مخلوط‌های آزمایشگاهی بر اساس روش‌های مختلف با دانه‌بندی‌های مختلف سنگدانه، روانی و مقاومت‌های متفاوت.
 - پ- انتخاب روش مناسب بر اساس نزدیک‌تر بودن نتایج آزمایشگاهی با ویژگی‌های پیش‌بینی شده و مشخصات مصالح موجود در ایران و خواسته‌های مورد نظر.
 - ت- اصلاح روش انتخاب شده بر اساس ویژگی‌های مصالح مصرفی در ایران و تدوین نهایی روش ملی طرح.

۲-۲-۱- دلایل کنار گذاشتن برخی روش‌های معتبر موجود

- بنابراین دلایلی که در زیر از نظر می‌گذرد برخی روش‌های معتبر موجود در دنیا به طور کلی یا جزئی در این روش ملی مورد استفاده قرار نگرفت و از آن‌ها بهره‌ای اندک یا ناچیز گرفتیم.
- ۱-۲-۲-۱- در بررسی‌های بعمل آمده دریافتیم که روش مرسوم در هندوستان به دلیل

عدم امکان طراحی مخلوط با مقاومت نسبتاً زیاد و هم چنین تغییرات بسیار ناچیز مقدار آب در طرح مخلوط، روش مناسبی نمی باشد و از تقریب های زیادی برخوردار است و در تعیین آخرین مجهول که مقدار کل سنگدانه خواهد بود از رابطه حجم مطلق استفاده نمی کند.

۱-۲-۲- در روش انگلیسی جدید، دانه بندی سنگدانه ریز نقش خاصی در تعیین سهم سنگدانه ها ندارد و صرفاً از درصد گذشته از ال ک ۶۰۰ میکرون استفاده شده است. بافت دانه بندی مخلوط سنگدانه نیز تأثیری در تعیین مقدار آب مخلوط اولیه ندارد و فقط حداکثر اندازه سنگدانه مد نظر قرار گرفته است. هم چنین تأثیر عیار سیمان بر آب مورد نیاز بتن دیده نشده است.

در تعیین مقدار کل سنگدانه بتن در روش انگلیسی بر اساس تخمین تقریبی وزن مخصوص بتن تازه اقدام شده است که دقت کافی ندارد و امکان محاسبات دقیق را از بین می برد.

۱-۲-۳- در روش امریکایی ACI، اثر نوع سیمان و مقاومت آن و تأثیر شکل سنگدانه ها در تعیین نسبت آب به سیمان به صورت جامع تعریف نشده است. هم چنین تأثیر بافت دانه بندی مخلوط سنگدانه و عیار سیمان بر مقدار آب مورد نیاز بتن دیده نشده و صرفاً حداکثر اندازه سنگدانه مد نظر است. در تعیین مقدار آب، تأثیر شکل سنگدانه ها با ابهام و تناقض همراه است. ضمناً در تعیین مقدار سنگدانه ریز (آخرین مجهول)، تخمین تقریبی وزن مخصوص بتن تازه مورد استفاده می باشد. تخمین وزن مخصوص بتن به چگالی مخلوط سنگدانه مرتبط شده است، در حالی که وقتی مقدار سنگدانه ریز مجهول می باشد، تعیین چگالی متوسط مخلوط سنگدانه نیز امکان پذیر نیست.

در روش امریکایی سهم سنگدانه ها در پایان طراحی طبق روال پیش بینی شده و به صورت ناخودآگاه بدست می آید و تصویری از دانه بندی مخلوط مطلوب در دست نمی باشد و دانه بندی سنگدانه درشت و ریز باید دقیقاً در چارچوب استاندارد مورد نظر باشد که در ایران این انطباق معمولاً حاصل نیست.

از آن جا که مقاومت سیمان ها و طبقه بندی مقاومتی سیمان ها در امریکا با آن چه در ایران موجود است مطابقت ندارد، در سازگاری این روش برای ایران تردید وجود دارد. هم چنین در استاندارد ایران دانه بندی الزامی ماسه با استاندارد امریکا مطابقت ندارد و مدول ریزی ماسه ها در ایران به مراتب بالاتر از ۳/۱ می باشد.

۱-۲-۴- در روش آلمانی، ال ک های اروپایی بکار رفته است که با ال ک های مصرفی در

ایران تطابق ندارد. مقاومت‌های بتن به صورت مکعبی منظور شده است، اما به طور کلی در این روش مزایایی دیده می‌شود که امکان استفاده از این روش وجود داشت. این موارد در ادامه مطرح می‌گردد.

۱-۲-۲-۵- در ساخت مخلوط‌های آزمایشگاهی با سیمان پرتلند ۳۲۵-۱ مقاومت‌های بدست آمده از مقادیر پیش‌بینی شده در روش انگلیسی و امریکایی (ACI) کمتر بود. هم‌چنین روانی بدست آمده از مقادیر پیش‌بینی شده در روش آلمانی کمتر بود و دقت کافی را نداشت.

۱-۲-۳- دلایل انتخاب روش آلمانی به عنوان مبنائی برای تدوین روش ملی

۱-۳-۲-۱- در روش آلمانی، منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب وجود دارد و امکان تعیین سهم سنگدانه‌های درشت و ریز به هر تعداد فراهم می‌گردد در حالی که در روش انگلیسی و امریکایی این امر میسر نیست. دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت و ریز در ایران دقیقاً منطبق با استاندارد ملی ایران (به شماره ۳۰۲) نمی‌باشد و در روش آلمانی می‌توان از سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی غیر استاندارد نیز استفاده نمود و این یک مزیت برای روش ملی به حساب می‌آید.

۱-۳-۲-۲- در روش آلمانی مقدار آب مورد نیاز با توجه به دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها تعیین می‌شود و اثر حداکثر اندازه سنگدانه نیز به نوعی در این روش دیده شده است. سطوح و طبقه‌بندی روانی نیز منطقی انتخاب گشته است و با طبقه‌بندی روانی بتن در استاندارد ایران انطباق دارد.

۱-۳-۲-۳- در روش آلمانی نسبت آب به سیمان بر اساس مقاومت فشاری بتن و مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد با توجه به سیمان مصرفی بدست می‌آید. به نظر می‌رسد می‌توان تغییرات مقاومتی سیمان را در این روش در طرح مخلوط منظور نمود. این مزیتی است که در روش ملی می‌توان از آن استفاده نمود. ضمناً تعیین مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد در ایران و اروپا (آلمان) یکسان است و این انطباق، امکان استفاده از این مقادیر را فراهم می‌کند.

۱-۳-۲-۴- مهمترین مزیت روش آلمانی، استفاده از رابطه حجم مطلق برای یافتن آخرین مجهول می‌باشد که از دقت برخوردار است و امکان می‌دهد، اثر چگالی ذرات سیمان، افزودنی، سنگدانه‌ها و درصد‌های متفاوت هوا در تعیین مقدار کل سنگدانه دیده شود.

۱-۳-۲-۵- روش بکار رفته در طرح مخلوط آلمانی این امکان را فراهم می‌کند که طرح مخلوط بتن سنگین و حبابدار را با همین روش، اما با مختصر تغییراتی، تهیه نماییم. هم

چنین می‌توان طرح مخلوط بتن سبکدانه (تمام سبکدانه و نیمه سبکدانه) را تهیه نمود، اما باید در مورد تعیین نسبت آب به سیمان منحنی‌های جدیدی ارائه داد. تهیه طرح مخلوط بتن کم عیار، پرمیال و بتن‌هایی با مقاومت کم و زیاد در آینده به کمک این روش با تغییرات جزئی امکان‌پذیر می‌باشد.

در این روش می‌توان پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی و سرباره را بکار برد و در تهیه طرح مخلوط، تأثیر آن‌ها را منظور کرد.

۱-۲-۳-۶- امکان تهیه طرح مخلوط رایانه‌ای با نوشتن نرم افزار مناسب در روش آلمانی وجود دارد، بنابراین می‌تواند از این نظر روش مناسبی به حساب آید.

۱-۲-۴- چگونگی تدوین روش ملی و تفاوت آن با روش آلمانی

بنابه دلایل زیر دقیقاً استفاده از روش آلمانی در ایران امکان‌پذیر نبود و نیازمند اصلاحاتی بود که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

۱-۲-۴-۱- منحنی‌های تعیین نسبت آب به سیمان با توجه به وضعیت سیمان‌های موجود در ایران و آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن‌هایی که با روش آلمانی طرح شده بودند اصلاح شدند. همچنین مقاومت استوانه‌ای باید مد نظر قرار می‌گرفت که این کار انجام گردید.

۱-۲-۴-۲- در روش آلمانی تأثیر شکل سنگدانه‌های درشت بر مقاومت بتن یا نسبت آب به سیمان در نظر گرفته نشده بود. بنابراین تیزگوشه یا گردگوشه بودن سنگدانه‌های درشت در روش ملی مد نظر قرار گرفت و منحنی‌های جداگانه‌ای با توجه به آزمایش‌های انجام شده تهیه گردید.

۱-۲-۴-۳- منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه در آلمان بر اساس الک‌های اروپایی تدوین شده است. بنابراین سعی شد با توجه به روابط مورد استفاده در روش آلمانی، منحنی‌های جدیدی تهیه گردد. در این رابطه تغییراتی در توان رابطه مورد نظر داده شد زیرا دانه‌بندی‌های بسیار ریز عملاً در ایران کاربردی ندارد و امکان استفاده از آن‌ها نیز فراهم نمی‌باشد. همچنین تعریف مرز سنگدانه و مواد ریزدانه متفاوت بود که تغییر در دانه‌بندی را ایجاب می‌نمود.

۱-۲-۴-۴- تعریف مدول نرمی (ریزی) مخلوط سنگدانه در روش آلمانی به ناچار در روش ملی طرح مخلوط بتن دستخوش تغییراتی شد، زیرا الک‌های بکار رفته در دانه‌بندی سنگدانه در ایران با استاندارد آلمان و اروپا متفاوت است. همچنین به علت اختلاف در تعریف مرز سنگدانه

و مواد ریزدانه امکان استفاده از تعریف مدول نرمی روش آلمانی میسر نبود.

۱-۲-۴-۵- در روش ملی طرح مخلوط بتن، مقدار آب مورد نیاز با توجه به تعریف جدید مدول ریزی (نرمی) مخلوط سنگدانه و بررسی‌های انجام شده بدست آمد و برای طبقه‌بندی رده‌های مختلف روانی (اسلامپ) منحنی‌هایی تدوین گشت که اثر شکل سنگدانه‌ها نیز در مقدار آب ملحوظ شده بود. ضمناً تأثیر عیار سیمان بتن بر مقدار آب بتن در نظر گرفته شد.

۱-۲-۴-۶- تأثیر وجود حباب هوای عمدی در مقاومت بتن (نسبت آب به سیمان) و روانی بتن (مقدار آب مورد نیاز) به صورت ساده مطرح گردید در حالی که در روش آلمانی بدان اشاره نشده بود.

۱-۲-۴-۷- در روش آلمانی توضیح زیادی در مورد تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن (مقاومت هدف طرح مخلوط) داده نشده بود. به هر حال با استفاده از مراجع مختلف و کسب اطلاعات از کارگاه‌های موجود در ایران و روابط موجود در آیین‌نامه بتن ایران، روش تعیین مقدار انحراف معیار مشخص شد و ارقامی به عنوان راهنما با توجه به سطح کنترل و نظارت کارگاهی تولید بتن مطرح گردید. هم چنین رابطه تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن بر اساس مقاومت مشخصه و انحراف معیار موجود طبق آیین‌نامه بتن ایران مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۲-۴-۸- در روش ملی طرح مخلوط بتن با توجه به EN206 و روش طرح مخلوط انگلیسی جدید، ضریبی به عنوان فاکتور مؤثر در بکارگیری دوده سیلیس و خاکستر بادی به عنوان افزودنی پودری معدنی جایگزین سیمان تعریف شد که در روش آلمانی موجود نبود.

۳-۱ نکات مهم در بکارگیری روش‌های طرح مخلوط بتن

۱-۳-۱- همان طور که در روش ملی طرح مخلوط بتن، تعریف طرح مخلوط بتن قید شده است، در همه روش‌های طرح مخلوط بتن دو بخش جداگانه وجود دارد. یکی از آن‌ها که مسلماً قبل از دیگری بدان پرداخته می‌شود، انتخاب اجزای بتن و مناسب بودن آن‌ها برای طرح مخلوط بتن می‌باشد و جنبه کیفی دارد. معمولاً این بخش به غلط به عنوان یک بخش اساسی شناخته نمی‌شود در حالی که در این مرحله کیفیت اجزای بتن باید به درستی انتخاب شود. برای مثال اگر از سیمان نامناسب در رابطه با شرایط حاکم بر محیط مجاور بتن استفاده نماییم ممکن است خسارات عمده‌ای وارد گردد. بنابراین وقتی مرحله کمی (بخش دوم) طرح مخلوط بتن به درستی انجام می‌پذیرد که در مرحله کیفی دچار اشتباه و خطای

فاحش نشویم.

بکارگیری سنگدانه مناسب از نظر شکل، دانه‌بندی و بافت سطحی یا از نظر مقدار مواد ریزدانه (گذشته از الک ۷۵ میکرون) و حداکثر اندازه بسیار مهم است و متأسفانه گاه اهمیت این موارد نادیده گرفته می‌شود. همواره توجه بیشتری به بخش دوم طرح مخلوط بتن معطوف می‌گردد که اساس طرح مخلوط را سست می‌نماید. استفاده از آب نامناسب و یا بکارگیری افزودنی‌هایی که چندان تناسبی با خواسته‌های بهره‌برداری و اجرا ندارد، می‌تواند لطمه شدیدی را به بتن و پروژه وارد نماید.

۱-۳-۲- مسلماً خواسته‌های مختلفی در ارتباط با بتن مورد نیاز مطرح می‌باشد که باید در چارچوب طرح مخلوط بتن برآورده گردد. بخشی از این خواسته‌ها با انتخاب اجزای مناسب برآورده می‌شود، اما بخش عمده‌ای از این خواسته‌ها در مرحله تعیین مقادیر و نسبت‌های اجزاء بتن تأمین می‌گردد. بنابراین گفته می‌شود طرح مخلوط بتن در واقع یک کار هنرمندانه است که با بکارگیری خواص اجزاء و نسبت‌های آن‌ها می‌توان به خواسته‌های مختلف و گاه متضاد دست یافت.

۱-۳-۳- به راحتی نمی‌توان رابطه‌ای را بدست آورد که نسبت آب به سیمان را برای تأمین مقاومت و دوام مورد نظر بدست دهد یا دقیقاً مقدار آب را برای دستیابی به روانی و کارایی مطلوب تعیین نماید، زیرا عوامل مؤثر بر مقاومت، دوام و روانی، متعدد هستند و این عوامل نیز با یکدیگر در ارتباطند. هنوز مدل‌های ریاضی جامعی برای این منظور ارائه نشده است و شاید انتظار تهیه چنین مدل‌هایی در آینده نزدیک نیز بیهوده باشد.

در همه روش‌های موجود طرح مخلوط بتن در دنیا فقط یک یا دو و یا حداکثر سه عامل اصلی مؤثر بر مقاومت، دوام و یا روانی برای تعیین نسبت آب به سیمان و مقدار آب مورد نیاز و در نهایت مقدار سیمان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین همه روش‌های موجود صرفاً رابطه‌ها یا منحنی‌ها یا جداولی را به عنوان راهنما ارائه می‌نمایند که نمی‌تواند دقیق باشد.

۱-۳-۴- روند صحیح تعیین مقادیر اجزاء و نسبت‌های بتن، معمولاً دارای سه مرحله است. مرحله اول استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود اجزاء بتن و خواسته‌های مقاومتی، دوامی و روانی آن به همراه نیازهای دیگر منجمله نمای مورد نیاز، بافت بتن، جاشدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی است تا بتوان مقادیر اجزاء و نسبت‌های اولیه مخلوط بتن را بدست آورد. سپس باید با توجه به مقادیر حاصله از طرح مخلوط اولیه، مخلوط آزمون

آزمایشگاهی را ساخت که مرحله مهمی محسوب می‌شود. با استفاده از بتن ساخته شده باید روانی، مقاومت، دوام و سایر نیازها را بدست آورد. در صورتی که ویژگی‌های این بتن منطبق بر خواسته‌های پروژه باشد، طرح مخلوط اولیه همان طرح مخلوط نهایی خواهد بود. امکان وقوع چنین حالتی بسیار ناچیز است. بنابراین باید تغییراتی در مقادیر و نسبت‌های اولیه در جهت دستیابی به خواسته‌ها و ویژگی‌های مطلوب ایجاد نمود تا به طرح مخلوط نهایی دست یافت. به مجموعه اقدامات و تغییراتی که طرح مخلوط اولیه را به صورت طرح مخلوط نهایی درمی‌آورد تعدیل یا اصلاح طرح مخلوط اولیه می‌گویند.

۱-۳-۵- این تصور باطل نزد برخی مهندسين وجود دارد که طرح مخلوط بتن را یک طراحی نظری و غیرآزمایشگاهی می‌دانند، در حالی که اطلاعات و داده‌های اجزاء بتن از طریق آزمایش بدست می‌آید و هم چنین مخلوط اولیه بدست آمده بر اساس طراحی‌های نظری باید در آزمایشگاه ساخته شود و سپس آزمایش‌هایی بر روی آن انجام گردد. حتی مشاهدات چشمی نیز پس از ساخت بتن از اهمیت برخوردار است که ممکن است منجر به تعدیل طرح مخلوط گردد. بنابراین آزمایش‌های آزمایشگاهی، حجم قابل توجهی از مجموعه عملیات طرح مخلوط بتن را در بر می‌گیرد.

۱-۳-۶- می‌توان گفت طرح مخلوط بتن یک عملیات تجربی - آزمایشگاهی است که در آن از برخی اطلاعات و داده‌های راهنما که در روش طرح مخلوط مورد نظر ارائه می‌شود استفاده می‌گردد. پس می‌توان اجازه داد که مهندسين یا طراحان مخلوط بتن از تجربیات شخصی در تعیین نسبت آب به سیمان یا مقدار آب و یا محدوده دانه‌بندی مطلوب مخلوط سنگدانه استفاده نمایند. بنابر این روشن می‌گردد که چرا در سایر کشورها و مجامع مرتبط با بتن، روش‌های طرح مخلوط به صورت اجباری در نیامده و استفاده از آن‌ها صرفاً توصیه شده است. بنابراین می‌توان گفت دلیل ارائه این روش‌ها آن است که وحدت رویه‌ای حاکم گردد، ضمن این که الزامی در کار نباشد.

بخش دوم

مبانی طرح

۲-۱- حاشیه ایمنی مقاومت

حاشیه ایمنی (امنیت) مقاومت، همانطور که در روش ملی مطرح شده است برای در نظر گرفتن نوسانات کمی مقاومت بتن به دلیل تغییرات و نوسانات کیفی و کمی احتمالی سیمان، سنگدانه، آب و افزودنی که ناشی از خطاهای انسانی، دستگاهی یا طبیعی است منظور می‌شود.

حاشیه ایمنی به مقاومت مشخصه بتن اضافه می‌شود و مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط یا همان مقاومت هدف یا نشانه طرح مخلوط بدست می‌آید. مسلماً به هر میزان بی‌دقتی در تأمین و بکارگیری اجزاء بتن و ساخت آن بیشتر باشد، نیاز به بکارگیری حاشیه امنیت مقاومتی بیشتری وجود دارد.

ملاک دقت یا بی‌دقتی در ساخت بتن و نوسانات مقاومتی حاصله را می‌توان انحراف معیار نتایج مقاومتی دانست. هر چند به نظر می‌رسد ضریب تغییرات که حاصل تقسیم انحراف معیار بر میانگین مقاومت است به نحو کامل تری بتواند دقت یا بی‌دقتی ساخت بتن برای تأمین مقاومت را نشان دهد اما معمولاً انحراف معیار کاربرد بیشتری دارد.

مسلماً در طرح مخلوط بتن فقط از مقاومت فشاری متوسط (مقاومت هدف یا نشانه) استفاده می‌گردد و از مقاومت مشخصه بتن که در طراحی سازه‌ای قطعات کاربرد دارد و در محاسبه مقاومت هدف نیز بکار رفته است در طرح مخلوط بتن استفاده نمی‌شود. تعیین حاشیه امنیت و مقاومت هدف طرح مخلوط مرحله مهمی از طرح مخلوط بتن تلقی می‌گردد.

۲-۲- روانی بتن

در تهیه یک طرح مخلوط بتن، دستیابی به روانی و کارایی مطلوب از جایگاه خاصی

برخوردار است. به منظور نظم‌دهی به روش ملی طرح مخلوط بتن از طبقه‌بندی روانی بتن بر اساس آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ۳۵۱۹ ایران استفاده شده است که در آن چهار طبقه یا رده روانی وجود دارد.

اگر اسلامپ بتن کمتر از ۱۰ میلی متر باشد می‌توان رده S_0 را تعریف کرد در حالی که اصولاً آزمایش اسلامپ برای مقادیر کمتر از ۱۰ میلی متر و بیشتر از ۲۱۰ میلی متر از اعتبار برخوردار نیست و لازم است از روش‌های دیگری برای سنجش کارایی بتن استفاده شود. رده روانی بتن با اسلامپ بیش از ۲۱۰ میلی متر را می‌توان S_5 نامید، بنابراین اسلامپ طبقه S_4 را می‌توان بین ۱۶۰ تا ۲۱۰ میلی متر دانست.

در این روش برای رده S_0 و S_5 و تعیین مقدار آب آن‌ها پیش‌بینی خاصی منظور نشده است و سعی می‌شود در این راهنما توصیه‌هایی بدین منظور صورت گیرد.

برای سنجش کارایی بتن‌های سفت‌تر از طبقه S_1 می‌توان از آزمایش‌های وی - بی و درجه تراکم‌پذیری استفاده نمود. برای سنجش کارایی بتن‌های روان‌تر از S_4 لازم است از آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم یا خود تراز استفاده کرد.

به هر حال برای سنجش کارایی بتن‌هایی با روانی معمول می‌توان از آزمایش‌های درجه تراکم پذیری و پهن‌شدگی (تخته یا میز آلمانی) نیز بهره گرفت اما آزمایش وی بی کاربردی نخواهد داشت.

۲-۳- آب آزاد بتن

به آبی که در زمان گیرش اولیه بتن در خمیر سیمان و بیرون سنگدانه‌ها وجود دارد آب آزاد می‌گویند. آب آزاد، کارایی خمیر سیمان در بتن را تأمین می‌کند و ساختار اولیه خمیر سیمان را بوجود می‌آورد به همین دلیل مقاومت و کیفیت و دوام خمیر سیمان، تابع نسبت وزنی آب آزاد بتن به مواد چسباننده آن (سیمان و مواد پوزولانی یا سرباره) می‌باشد. معمولاً از آنجا که این آب در خارج حجم سنگدانه‌ها قرار دارد و به درون جذب نشده است آب آزاد نامیده می‌شود. سنگدانه‌ها نیز در این حالت به صورت اشباع با سطح خشک فرض می‌گردد. آب درون سنگدانه اشباع با سطح خشک معادل ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها می‌باشد. اگر آب آزاد و آب موجود در داخل سنگدانه‌های بتن را با هم جمع کنیم آب کل مخلوط بتن حاصل می‌گردد. به هر حال گاه در محاسبات طرح مخلوط بتن تعریف آب آزاد

با آن چه در نظر گرفته می شود ممکن است یکسان نباشد و عمدتاً آب موجود در خارج سنگدانه در هنگام تعیین روانی مد نظر قرار می گیرد.

در طرح مخلوط بتن، همواره سنگدانه‌ها به صورت اشباع با سطح خشک فرض می‌شوند و آب آزاد محاسبه و تعیین می‌گردد، هرچند ممکن است عملاً اشباع نشده باشند. در ساخت بتن در آزمایشگاه و یا کارگاه، بهتر است آب کل محاسبه شود و مقدار آب موجود در سنگدانه‌ها در شرایط رطوبتی موجود از آب کل کسر گردد تا آب مصرفی برای ساخت بتن بدست آید و به داخل مخلوط‌کن ریخته شود. بدیهی است در این حالت وزن سنگدانه خشک با آب موجود در آن جمع می‌گردد و وزن سنگدانه مرطوب مصرفی بدست می‌آید. بنابراین در روش طرح مخلوط بتن در ابتدا به ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها پرداخته نمی‌شود و صرفاً آب آزاد مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۴- نوع سنگدانه‌ها

در طرح مخلوط بتن، جنس سنگدانه از نظر کمی تأثیری ندارد. جنس سنگدانه ممکن است بر دوام سنگدانه و بتن اثرگذار باشد. ویژگی‌های مکانیکی سنگدانه نیز در طرح مخلوط بتن از نظر کمی کاربردی ندارد. مسلماً در انتخاب سنگدانه، جنس سنگدانه از نظر کانی‌شناسی و ویژگی‌های مکانیکی آن به همراه ویژگی‌های دوام اهمیت جدی دارد.

بافت سطحی سنگدانه‌های درشت و ریز بر مقاومت و کارایی و دوام بتن تأثیر بسزایی دارد که همگان بدان معترفند، اما به دلیل عدم وجود آزمایش‌های استاندارد برای تعیین کیفیت بافت سطحی سنگدانه‌ها، نمی‌توان این عامل را به طور مستقیم در طرح مخلوط بکار برد. اما به هر حال بافت سطحی سنگدانه‌ها تأثیر خود را بر ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده مخلوط آزمون نشان خواهد داد و عامل مهمی در تغییر این ویژگی‌ها و تغییر در پیش‌بینی‌های اولیه طرح مخلوط اولیه می‌باشد. بافت سطحی زبر علاوه بر افزایش مقدار آب مورد نیاز، مقاومت بتن را افزایش می‌دهد. نباید انگاشت که هر سنگدانه تیز گوشه الزاماً دارای سطح زبر است و یا هر سنگدانه گرد گوشه بافت سطحی صافی را دارا می‌باشد.

شکل سنگدانه‌ها نیز عامل مهم و مؤثری در تغییر کارایی، مقاومت و تا حدودی دوام بتن می‌باشد. سنگدانه‌ها به دو شکل حجیم و غیرحجیم تقسیم می‌شوند. شکل غیرحجیم شامل ذرات پولکی (تخت یا ورقه‌ای)، کشیده (طویل) و سوزنی است که نامطلوب تلقی می‌شوند. و به کارایی بتن لطمه جدی می‌زنند و از نظر تأمین مقاومت فشاری و دوام بتن نیز نامناسب

هستند. شکل‌های حجیم مربوط به ذراتی است که سه بعد آنها نزدیک بهم می‌باشد و شامل سنگدانه‌های کاملاً گردگوشه تا کاملاً تیزگوشه می‌باشد. ذرات غیر حجیم شامل ذرات پولکی (تخت)، کشیده (طویل) و سوزنی می‌باشد.

محدودیت‌هایی در آیین‌نامه‌ها یا استانداردها برای این نوع دانه‌ها در مورد سنگدانه‌های درشت وجود دارد، اما متأسفانه تاکنون اندازه‌گیری شکل‌های غیر حجیم به صورت کمی در سنگدانه‌های ریز، طبق یک دستور استاندارد مقدور نبوده است، در حالی که وجود چنین ذراتی در سنگدانه‌های ریز نیز به شدت بر کارایی بتن تأثیر می‌گذارند. در هیچ یک از روش‌های طرح مخلوط بتن، میزان اثر سنگدانه‌های غیرحجیم بر مقاومت، دوام و بویژه کارایی بتن مشخص نشده و روابطی برای آن ارائه نگشته است. تأثیر این ذرات را صرفاً در نتایج آزمایش‌های مخلوط آزمون می‌توان تا حدودی حس نمود. بهتر است تا حد امکان از چنین ذراتی استفاده ننمود و سنگدانه‌های درشت و ریزی که حاوی مقادیر قابل توجهی از این نوع ذرات غیرحجیم می‌باشد را بکار نبرد. در برخی استانداردها و آیین‌نامه‌ها محدودیت خاصی در این زمینه پیش‌بینی نشده است، اما در استاندارد ۳۰۲ ایران و آیین‌نامه بتن ایران محدودیت‌هایی برای سنگدانه‌های درشت از نظر وجود ذرات پولکی، کشیده و سوزنی وجود دارد که توجه به آن ضروری است.

سنگدانه‌های حجیم دارای شکل‌های تیزگوشه تا گردگوشه هستند. تیزگوشه بودن (گوشه‌دار بودن) و گردگوشه‌گی سنگدانه‌ها بر کارایی، مقاومت و تا حدودی دوام بتن مؤثر است. برخی تیزگوشه‌گی را با زبر بودن یا گردگوشه‌گی را با داشتن سطح صاف و شیشه‌ای یکی می‌دانند که نادرست است.

سنگدانه‌های تیزگوشه، مقدار آب مورد نیاز بتن را افزایش می‌دهد. چنانچه تیزگوشه‌گی مربوط به سنگدانه‌های ریز باشد این افزایش چشمگیرتر می‌باشد. تیزگوشه‌گی سنگدانه‌های درشت تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن دارد تا تیزگوشه‌گی سنگدانه‌های ریز بتن. معمولاً تأثیر تیزگوشه‌گی سنگدانه‌های ریز بر مقاومت فشاری بتن را ناچیز منظور می‌نمایند. برای تعیین میزان تیزگوشه‌گی و درصد شکستگی سطوح سنگدانه‌های ریز، روش استاندارد وجود ندارد. برای سنگدانه‌های درشت نیز دستورهای خاصی در مورد تعیین درصد شکستگی یک یا دو وجه ذرات وجود دارد اما دستور استاندارد برای تعیین درصد شکستگی و تیزگوشه‌گی کلیه سطوح ذرات موجود نیست، در حالی که در طرح مخلوط

بتن تعیین این ویژگی می‌تواند مفید واقع شود. به هر حال در پیوست این راهنما دستورالعملی برای تعیین درصد شکستگی سنگدانه‌های درشت آمده است. معمولاً مصرف سنگدانه‌های درشت تیزگوشه به همراه سنگدانه‌های ریز گردگوشه می‌تواند از نظر تأمین مقاومت، روانی، دوام، مصرف سیمان کمتر، جمع‌شدگی کمتر و جداسازی کمتر در بیشتر موارد مفید باشد، مگر این که در طرح مخلوط بتن، نسبت آب به سیمان متناظر با دوام تعیین کننده باشد (طرح دوام محور)، که در این حالت کاهش مصرف سیمان را شاهد نیستیم. با این حال بجز در موارد خاص، هیچ آیین‌نامه یا استاندارد به طور کلی الزام خاصی را از نظر گردگوشه‌گی یا تیزگوشه‌گی سنگدانه‌ها برای بتن‌ها ارائه نکرده است. اما در موارد خاصی مانند رویه بتنی راه، سرریز سدها و یا برخی پروژه‌های دیگر ممکن است محدودیتی در مورد شکل سنگدانه‌های درشت مطرح گردد.

۲-۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

هر چند دانه‌بندی سنگدانه‌های بتن بر مقاومت، دوام و کارایی بتن مؤثر است اما نباید از تأثیر آن بر جداسازی، آب انداختن و جمع‌شدگی بتن غافل شد. امروزه در مورد تأثیر دانه‌بندی سنگدانه بتن بر مقاومت آن چندان بزرگنمایی نمی‌شود در حالی که در گذشته این عامل بسیار مهمی محسوب می‌گردید. این تصور که بهتر است کمترین حجم فضای خالی را در بین سنگدانه‌ها داشت، امروزه طرفداران جدی ندارد زیرا ویژگی‌های بتن تازه مانند کارایی، جداسازی، آب انداختن و جمع‌شدگی از اهمیت زیادی برخوردار است و الزاماً دانه‌بندی‌هایی با کمترین فضای خالی را نمی‌توان بهترین دانه‌بندی دانست.

در متن اصلی روش ملی طرح مخلوط، با توجه به استفاده از رابطه اصلاح شده فولر-تامسون، منحنی‌هایی برای دانه‌بندی سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه ۹/۵، ۱۹، ۲۵ و ۳۷/۵ میلی متر ارائه شده است که در صورت نیاز می‌توان با قرار دادن سایر حداکثر اندازه‌های دلخواه، محدوده دانه‌بندی مطلوب را بدست آورد. در این روابط، تغییر توان n نیز به عنوان یک متغیر می‌تواند بافت دانه‌بندی را درشت یا ریز نماید. نباید انتظار داشت که منحنی‌های دانه‌بندی‌های ارائه شده، حداقل فضای خالی را بوجود آورند. اما می‌توان انتظار داشت با این دانه‌بندی‌ها در مجموع به بتن مطلوبی دست یافت. تغییر توان n و یا تغییر درشتی و ریزی بافت دانه‌بندی به نوع بتن مطلوب و نوع پروژه و قطعه و هم چنین نوع وسیله حمل و ریختن بستگی دارد و نمی‌توان توصیه کلی را برای همه موارد ارائه نمود.

در صورتی که منحنی دانه‌بندی سنگدانه درشت و ریز منطبق بر استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ باشد با سهولت بیشتر می‌توان سهم سنگدانه‌ها را چنان یافت که در محدوده مطلوب دانه‌بندی قرار گیرد، اما امکان بکارگیری سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی غیراستاندارد نیز در روش ملی طرح مخلوط بتن وجود دارد.

۲-۶- سیمان مصرفی

در ایران، سیمان‌های مختلف با مقاومت‌های متفاوت و خواص گوناگون تولید می‌شود. سیمان‌های پرتلند تولیدی در ایران عمدتاً به صورت نوع ۱، ۲ و ۵ می‌باشد. سیمان پرتلند نوع ۱ در استاندارد ایران به سه رده مقاومتی ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع تقسیم می‌شود که امروزه هر سه رده در ایران تولید می‌گردد. با این که در این روش، سه رده مقاومتی سیمان پرتلند نوع ۱ مد نظر قرار گرفته است، اما می‌توان نسبت آب به سیمان بتن‌های حاوی سایر سیمان‌های پرتلند و آمیخته را نیز بدست آورد.

سیمان‌های آمیخته پوزولانی تولیدی در ایران به دو صورت پرتلند پوزولانی و پرتلند پوزولانی ویژه وجود دارد. سیمان‌های آمیخته سرباره‌ای تولیدی ایران به دو صورت پرتلند سرباره‌ای و پرتلند سرباره‌ای ضدسولفات ارائه می‌گردد. یک نوع سیمان آمیخته حاوی پودر سنگ آهک به نام سیمان پرتلند آهکی نیز در ایران تولید می‌شود. هم چنین می‌توان از سیمان پرتلند سفید نیز در طرح مخلوط بتن استفاده نمود که در ایران نیز به مقدار قابل توجهی تولید می‌شود.

۲-۷- سن مقاومت مشخصه و شکل نمونه بتن

در ساختمان‌ها و سازه‌های متعارف، بویژه وقتی از سیمان‌های پرتلند با روند عادی کسب مقاومت مانند نوع ۱ استفاده می‌شود، معمولاً از سن مقاومت مشخصه ۲۸ روزه در مشخصات فنی و آیین‌نامه‌ها استفاده می‌گردد. در برخی سازه‌ها ممکن است سن مقاومت مشخصه کمتر یا بیشتر از ۲۸ روز باشد. در سال‌های اخیر با توجه به گسترده‌ی استفاده از سیمان‌های آمیخته (با درصدهای قابل توجهی از پوزولان‌های طبیعی یا مصنوعی و یا سرباره‌ها) و برای کاهش تولید و مصرف کلینکر سعی می‌شود در حد امکان سن مقاومت مشخصه بتن پروژه‌ها بیش از ۲۸ روز انتخاب شود تا از پتانسیل مقاومتی این نوع سیمان‌ها به نحو احسن استفاده گردد.

در روش ملی طرح مخلوط بتن سن مقاومت مشخصه ۲۸ روزه مد نظر قرار گرفته است اما در این راهنما امکان تغییر سن مقاومت مشخصه فراهم شده است. در این روش، شکل آزمون بتن، استوانه ای است و بتن‌ها در شرایط آزمایشگاهی استاندارد عمل‌آوری می‌شوند و سپس مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرند. بدیهی است نمونه‌ها باید کلاهی‌گذاری (کپینگ) شوند. در صورتی که آزمون مکعبی شکل مورد استفاده قرار گیرد لازم است مقاومت آن طبق جداول موجود در تفسیر بخش اول آبا، به مقاومت استوانه ای تبدیل شود.

۲-۸- دوام بتن

در این روش به طور مستقیم به مسئله دوام پرداخته نشده است. بدیهی است یکی از اهداف طرح مخلوط بتن، دستیابی به بتنی است که در شرایط محیطی پروژه از دوام مناسب و عمر مفید مطلوبی برخوردار باشد. در صورتی که در آیین‌نامه مورد استفاده (مانند آیین‌نامه بتن ایران)، هم چنین در مشخصات فنی پروژه و توصیه‌های مشاور، شرط خاصی برای تأمین دوام پیش بینی شده باشد باید مد نظر قرار گیرد. استفاده از این روش یا هر روش دیگر نمی‌تواند بهانه ای برای منظور نمودن محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای یا در نظر نگرفتن مشخصات فنی عمومی یا خصوصی پروژه باشد. آیین‌نامه‌های پایایی معمولاً توجه خاصی را به موضوع دوام نشان می‌دهند. در کشور ما به دلیل وضعیت و شرایط خاص حاکم بر بتن در مناطق حاشیه خلیج فارس و دریای عمان و جزایر آن‌ها، لازم است به آیین‌نامه پایایی بتن در این مناطق توجه ویژه‌ای مبذول گردد.

محدودیت‌هایی که برای تأمین دوام مطرح می‌باشد، ممکن است مربوط به کیفیت اجزاء بتن (سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی) باشد و یا برای تأمین پایایی، محدودیت‌هایی مانند حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان، حداقل یا حداکثر مجاز سیمان مصرفی و حتی محدود کردن حداکثر اندازه سنگدانه و یا توصیه‌هایی در مورد دانه‌بندی ممکن است ارائه شود که در طرح مخلوط بتن باید به دقت مورد توجه قرار گیرد.

برای مثال اگر حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان برای تأمین دوام، کمتر از نسبت آب به سیمان برای تأمین مقاومت باشد، باید نسبت آب به سیمان کمتر را منظور نمود که در این صورت چنین طرح مخلوطی، دوام محور نامیده می‌شود و گرنه مقاومت محور خواهد بود. به هر حال نمی‌توان بدون توجه به این محدودیت‌ها، طرح مخلوط بتن مطلوب را ارائه



کرد. بدیهی است در صورتی که ویژگی خاصی برای دوام مطرح باشد، پس از ساخت مخلوط آزمون باید آزمایش متناظر با این ویژگی را بر روی بتن سخت شده انجام داد و سپس در مورد تطابق بتن با خواسته مورد نظر اظهار نظر نمود و در صورت برآورده نشدن ضوابط و معیارهای پایایی، باید طرح مخلوط را در جهت دستیابی به ویژگی موردنظر تعدیل و اصلاح نمود.

بخش سوم

تعیین انحراف معیار و مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح

۳-۱- مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن

مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن یا مقاومت هدف طرح اختلاط، به طور معمول به کمک مقاومت مشخصه (مقاومت حداقل) و انحراف معیار مقاومت بتن ساخته شده در کارگاه بدست می‌آید. در آیین‌نامه‌ها با توجه به تئوری خطا و به کمک منحنی خطای نرمال و تعاریف مقاومت مشخصه و ضوابط پذیرش بتن در کارگاه مقاومت هدف طرح بدست می‌آید. در آیین‌نامه بتن ایران، بزرگترین مقدار بدست آمده از دو رابطه زیر همان مقاومت هدف طرح خواهد بود.

$$f_{cm} = f_c + 1.34 s + 1.5 \quad (۳-۱)$$

$$f_{cm} = f_c + 2.33 s - 4.0 \quad (۳-۲)$$

f_{cm} = مقاومت فشاری هدف طرح برای نمونه استوانه ای بتنی بر حسب N/mm^2 در سن مقاومت مشخصه

f_c = مقاومت فشاری مشخصه نمونه استوانه ای بتن بر حسب N/mm^2 در سن مقاومت مشخصه

s = انحراف معیار (استاندارد) مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بر حسب N/mm^2 در سن مقاومت مشخصه

در رابطه (۳-۲) برای مقاومت مشخصه مساوی یا کمتر از $20 N/mm^2$ می‌توان بجای عدد ثابت $4/0$ از مقدار $3/0$ استفاده نمود. در روابط فوق مقادیر اضافه شده به مقاومت مشخصه، همان حاشیه ایمنی (امنیت) مقاومت بتن در کارگاه است.

۲-۳- تعیین انحراف معیار (استاندارد) مقاومت بتن

برای تعیین انحراف معیار می‌توان به ترتیب به صورت زیر اقدام نمود. بدیهی است اگر نتوان انحراف معیار را بدست آورد یا حدس زد مطابق بند ۲-۲-۳ عمل می‌شود.

الف- انحراف معیار مقاومت بتن، در کارگاه فعال موجود که طرح مخلوط قرار است در آنجا ساخته شود، بر اساس نتایج آماری مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بدست می‌آید که در بند ۱-۲-۳ روش ملی بدان اشاره شده است. شرایط ذکر شده در بند ۲-۳ روش ملی نیز باید در نظر گرفته شود.

ب- انحراف معیار مقاومت بتن بر اساس نتایج آماری مقاومت فشاری نمونه استوانه ای پروژه مشابه (کارگاه مشابه) بدست می‌آید که در بند ۱-۲-۳ روش ملی آمده است و شرایط مذکور در بند ۲-۳ روش ملی نیز لازم است رعایت شود.

پ- انحراف معیار مقاومت بتن با توجه به رتبه‌بندی کارگاه بر اساس وضعیت تولید بتن (سطح کنترل کیفی و نظارت کارگاهی در امر تولید بتن) طبق جداول ۲-۳ و ۱-۳ روش ملی بدست می‌آید و یا در واقع حدس زده می‌شود.

ت- انحراف معیار مقاومت بتن با توجه به تجربیات شخصی طراح مخلوط و تشابه‌سازی کارگاه موجود یا کارگاهی که قرار است در آینده تجهیز و اداره گردد با یکی از رتبه‌بندی‌های ارائه شده در جدول ۲-۳ و انحراف معیار جدول ۱-۳ روش ملی بدست می‌آید یا تخمین زده می‌شود.

۱-۲-۳ محاسبه انحراف معیار بر اساس نتایج آماری پروژه موجود یا پروژه‌های قبلی

در این حالت مصالح مصرفی باید با پروژه موجود یا قبلی از نظر نوع و مشخصات فنی تشابه داشته باشد اما الزاماً مطابقت مد نظر نیست. هم چنین باید شرایط نظارت و کنترل کیفی با پروژه قبلی تشابه داشته باشد ولی مطابقت الزامی نیست. تفاوت مقاومت فشاری مشخصه بتن در دو پروژه نباید بیش از N/mm^2 ۵ باشد.

اگر از رابطه (۳-۳) روش ملی استفاده شود و حداقل ۳۰ نتیجه متوالی مقاومت در پروژه موجود یا پروژه مشابه قبلی در اختیار نباشد از رابطه (۳-۴) روش ملی به صورت یک ضریب اصلاح یا ضریب تصحیح استفاده می‌شود که در انحراف معیار بدست آمده از رابطه (۳-۳) روش ملی ضرب می‌گردد تا انحراف معیار تصحیح شده بدست آید.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - m)^2}{n - 1}} \quad (3-3)$$

که در آن :

x : مقاومت فشاری نمونه

m : میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها

n : تعداد نمونه‌ها

$$R = \left[0.75 + \left(\frac{2}{n} \right)^{1/2} \right] \quad (3-4)$$

که در آن :

n : تعداد نمونه‌ها

رابطه (3-5) روش ملی برای محاسبه انحراف معیار از دو گروه نتیجه متوالی با مجموع نتایج حداقل ۳۰ نتیجه بکار می‌رود در حالی که تعداد نتیجه‌های هر گروه کمتر از ۳۰ نتیجه باشد.

$$\bar{s} = \left[\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{1/2} \quad (3-5)$$

که در آن:

$\bar{s}$ = میانگین آماری انحراف معیار در گروه نمونه‌های متوالی

s_1, s_2 = انحراف معیار محاسبه شده از دو گروه نمونه‌های متوالی

n_1, n_2 = تعداد نمونه‌ها در دو گروه متوالی

حداقل مقدار انحراف معیار تحت هر شرایطی برای کارگاه نباید از $2/5 \text{ N/mm}^2$ کمتر انتخاب شود اما برای کارهای تحقیقاتی در آزمایشگاه می‌توان مقادیر کمتری را نیز منظور کرد.

۳-۲-۲- تعیین انحراف معیار در صورت عدم دسترسی به اطلاعات آماری

طبق جدول ۳-۲ روش ملی، کارگاه‌ها بر اساس وضعیت نظارتی و کنترل کیفی کارگاهی تولید بتن به سه دسته تقسیم‌بندی (رتبه‌بندی) می‌شوند. نحوه سنجش وزنی یا پیمانه کردن حجمی سیمان و سنگدانه و کنترل رطوبت سنگدانه از مهمترین عوامل در رتبه‌بندی کارگاه‌ها برای ساخت بتن می‌باشد. وجود نیروی متخصص در تولید بتن که در ارتباط با نظارت بر تولید و تداوم در آزمایش است نیز از جمله عوامل دیگر می‌باشد و وجود امکانات

آزمایشگاهی می‌تواند زمینه لازم برای تداوم در آزمایش را فراهم نماید. کنترل دانه‌بندی و درصد گذشته از الک ۷۵ میکرون و تغییر در سهم سنگدانه‌ها، حسب ضرورت باعث تغییر رتبه‌بندی می‌گردد.

وقتی رتبه‌بندی کارگاه مشخص شد، از جدول ۳-۱ روش ملی مقدار انحراف معیار با توجه به مقاومت مشخصه بتن تخمین زده می‌شود و سپس می‌توان مقاومت هدف طرح مخلوط بتن را بدست آورد.

به هر حال نتایج حاصله نباید از مقاومت هدف طرح مخلوط بتن که با استفاده از حاشیه امنیت مندرج در جدول ۳-۳ این راهنما بدست می‌آید، بیشتر گردد.

جدول ۳-۱- انحراف معیار بر اساس رتبه‌بندی کارگاه و مقاومت مشخصه بتن

مقاومت مشخصه بتن (N/mm^2)					رتبه‌بندی کارگاه
۱۶	۲۰	۲۵	۳۰ و ۳۵	۴۰ و بیشتر	
۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	الف
۳/۵	۴	۴/۵	۵	۵/۵	ب
۴/۵	۵	۵/۵	۶	۶/۵	ج

جدول ۳-۲- رتبه‌بندی کارگاه‌ها بر اساس وضعیت تولید بتن، نظارت و کنترل کیفیت

وضعیت کنترل کیفیت			شرایط تولید و کنترل
ج	ب	الف	
حجمی	وزنی	وزنی	توزین یا پیمانه کردن سیمان
حجمی	حجمی	وزنی	توزین یا پیمانه کردن سنگدانه
بدون کنترل	کنترل شده	کنترل شده	کنترل دانه‌بندی سنگدانه
بدون کنترل	کنترل شده	کنترل شده	کنترل رطوبت سنگدانه
در سطح ضعیف	در سطح خوب	در سطح عالی	نظارت بر تولید
در سطح محدود	موجود است	موجود است	امکانات آزمایشگاهی
در سطح محدود	گاهی اوقات	مداوم	تداوم در آزمایش
در سطح محدود	وجود دارد	وجود دارد	نیروی متخصص تولید بتن

اگر نتوان انحراف معیار را بدست آورد یا حدس زد و نتوان به هیچ گونه اطلاعات خاصی در این زمینه دست یافت، می‌توان با توجه به آیین‌نامه بتن ایران حاشیه امنیت (SM) زیر را منظور نمود و با مقاومت مشخصه جمع کرد تا مقاومت هدف طرح بدست آید. این مقادیر در جدول زیر آمده است.

$$f_{cm} = f_c + (SM) \quad (۲-۶)$$

جدول ۳-۳- حاشیه امنیت طرح مخلوط بتن بدون اطلاعات در مورد انحراف معیار و رتبه‌بندی کارگاه

f_c (N/mm ²)	۱۶ و کمتر	۲۰	۲۵	۳۰ و ۳۵	۴۰ تا ۵۰
SM (N/mm ²)	۷/۵	۸/۵	۹/۵	۱۰/۵	۱۱

وقتی اطلاعات خاصی در مورد کارگاه و انحراف معیار مقاومت بتن موجود نباشد، مقدار مقاومت هدف طرح افزایش خواهد یافت و نسبت آب به سیمان مورد نیاز کم می‌شود و مصرف سیمان افزایش یابد.

۳-۲-۳- تعدیل انحراف معیار یا مقاومت فشاری متوسط طرح مخلوط بتن

وقتی طرح مخلوط نهایی به کارگاه داده شد، پس از ساخت بتن در کارگاه و تهیه حداقل ۱۰ نتیجه متوالی مقاومتی، می‌توان انحراف معیار تصحیح شده را بدست آورد. در صورتی که تفاوت فاحشی بین انحراف معیار مفروض و انحراف معیار واقعی کارگاهی مشاهده گردد، لازم است مقاومت فشاری هدف طرح مخلوط مجدداً بدست آید و طرح مخلوط جدید مشخص و ارائه شود.

تلاش برای بهبود کیفیت ساخت بتن در کارگاه موجب کاهش مقاومت هدف طرح و افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش عیار سیمان مصرفی در طرح مخلوط بتن می‌گردد، مشروط بر این که طرح مخلوط بتن از نوع مقاومت محور باشد. کاهش عیار سیمان به کاهش قیمت مصالح مصرفی در بتن منجر می‌شود. هم چنین مصرف کمتر سیمان باعث تولید سیمان کمتر در سطح کلان می‌گردد و آلودگی زیست محیطی کمتری را به دنبال می‌آورد و منابع معدنی و سوخت کمتری مصرف می‌شود که می‌تواند بسیار با اهمیت تلقی گردد.

بخش چهارم

مراحل گام به گام روش ملی طرح مخلوط بتن

طرح مخلوط بتن با توجه به مشخصات و ویژگی‌های سنگدانه (دانه‌بندی، شکل و حداکثر اندازه سنگدانه) و سیمان و خواسته‌های پروژه از بتن مانند مقاومت، کارایی و دوام و هم چنین نوع و اثر مواد افزودنی، مقدار هوای موجود در بتن و توجه به سایر ویژگی‌های بتن تازه مانند جداسدگی و آب انداختن و جمع‌شدگی انجام می‌شود.

در روش ملی طرح مخلوط بتن، ابتدا می‌توان نسبت آب به سیمان را با توجه به مقاومت هدف طرح و نوع سیمان و شکل سنگدانه درشت بدست آورد و پس از آن با توجه به دوام بتن مقدار آن کنترل شود. سپس محدوده دانه‌بندی با توجه به نوع قطعه و وسایل حمل و ریختن و با عنایت به ویژگی‌های بتن تازه همچون کارایی، جداسدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی و هم چنین حداکثر اندازه سنگدانه موجود مشخص می‌گردد و به دنبال آن با در نظر گرفتن این محدوده، سهم سنگدانه‌ها در مخلوط سنگدانه تعیین می‌شود و در نتیجه، مخلوط حاصله با توجه به این سهم‌ها محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد مدول نرمی مخلوط سنگدانه تعیین می‌شود و در صورت لزوم چگالی متوسط مخلوط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک نیز می‌تواند بدست آید. همچنین درصد شکستگی معادل برای مخلوط سنگدانه تعیین می‌شود. تعیین مقدار آب آزاد با توجه به سطح کارایی و مدول نرمی مخلوط سنگدانه و شکل (درصد شکستگی معادل) سنگدانه‌ها به صورت تقریبی تعیین می‌شود. سپس مقدار سیمان محاسبه می‌گردد و با حداکثر و حداقل مجاز سیمان مقایسه می‌شود و در صورت عدم وجود مشکل، مقدار آب در صورت لزوم اصلاح و مجدداً مقدار سیمان محاسبه می‌گردد.

در نهایت با توجه به حجم هوای موجود در بتن و چگالی متوسط ذرات مواد سیمانی، مقدار کل حجم سنگدانه اشباع با سطح خشک طبق رابطه حجم مطلق بدست می‌آید. همچنین مقدار حجمی و وزنی هر یک از سنگدانه‌ها تعیین می‌شود. بدین ترتیب طرح مخلوط اولیه

حاصل می‌گردد و باید مخلوط آزمون آزمایشگاهی ساخته و تعدیل طرح مخلوط انجام شود تا طرح مخلوط نهایی بدست آید.

مشروح عملیات فوق به صورت گام‌های مشخص همراه با جزئیات و توضیحات لازم در این بخش از نظر می‌گذرد. برخی گام‌ها می‌تواند به ترتیب ذکر شده انجام نشود. بکارگیری افزودنی می‌تواند تغییراتی را بوجود آورد و بروز مشکل بویژه افزایش مقدار سیمان از سقف حداکثر مجاز عیار سیمان و یا مشخص نبودن درصد شکستگی متوسط چند شن نیمه شکسته مصرفی نیز باعث می‌شود تغییرات جدی در این مراحل حاصل گردد. در صورتیکه چند شن نیمه شکسته بکارگرفته شود، لازم است ابتدا سهم سنگدانه‌ها با مشخص کردن محدوده دانه‌بندی مطلوب بدست آید و درصد متوسط شکستگی شن تعیین گردد و به دنبال آن نسبت آب به سیمان مشخص شود و سایر گام‌ها دنبال گردد.

۴-۱- گام اول: تعیین نسبت آب به سیمان (نسبت آب آزاد به مواد سیمانی)

نسبت وزنی آب آزاد (آب مؤثر) به مواد سیمانی در صورت عدم بکارگیری افزودنی کاهنده آب (روان‌کننده) با توجه به مقاومت فشاری استوانه ای ۲۸ روزه هدف طرح مخلوط، نوع سیمان از نظر سطح مقاومتی و شکل سنگدانه درشت (گردگوشه یا تیزگوشه بودن شن) از شکل ۴-۱ بدست می‌آید. این منحنی‌ها با توجه به وجود ۱ تا ۲ درصد هوای غیر عمدی در بتن و بکارگیری سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه ۱۹ تا ۲۵ میلی متر ارائه شده است.

تغییر در نسبت آب به سیمان، به دلیل تغییر میزان هوای غیر عمدی و یا تغییر حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در طرح مخلوط اولیه چندان ضروری به نظر نمی‌رسد، اما طراح مخلوط در صورت نیاز می‌تواند اصلاحاتی جزئی در نسبت آب به سیمان به عمل آورد که معمولاً به ۰/۰۲ نمی‌رسد در حالی که دقت نسبت آب به سیمان حاصله از شکل مورد نظر نیز در همین حدود می‌باشد.

۴-۱-۱- در صورت استفاده از مواد حباب‌زا و ایجاد حباب عمدی لازم است در ازای هر یک درصد حباب هوای عمدی حدود ۴ تا ۵ درصد از نسبت آب به سیمان کاست، زیرا بتن حبابدار از مقاومت کمتری برخوردار می‌شود. برای مثال اگر ۳ درصد هوای عمدی در بتن ایجاد شود باید ۱۲ تا ۱۵ درصد از نسبت آب به سیمان کم نمود. یعنی اگر نسبت آب به سیمان اولیه برابر ۰/۵ باشد پس از کسر ۱۲ تا ۱۵ درصد، مقدار آن ۰/۴۴ تا ۰/۴۲۵ می‌گردد.

مسئلاً در صورتی که ۳ درصد هوای عمدی خواسته باشیم، با توجه به احتمال وجود هوای غیر عمدی، مجموع درصد هوای بتن قطعاً بیشتر از ۳ درصد خواهد بود. معمولاً درصد هوای مطلوب بصورت مجموع این دو نوع هوا ارائه می گردد.

۴-۱-۲- با توجه به درصد شکستگی متوسط (تیزگوشه‌گی) موجود در سنگدانه‌های درشت می‌توان از درون‌یابی بین منحنی‌های مربوط به سنگدانه گردگوشه (R) و تیز گوشه (C) استفاده نمود. درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های درشت را می‌توان با مشاهده حدس زد و مورد استفاده قرار داد و یا بر اساس آزمایش (پیوست ۱) این راهنما و با توجه به تعیین سهم سنگدانه‌های درشت مصرفی، درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های درشت را بدست آورد.

لازم به ذکر است که برای سهولت از تأثیر ناچیز تیزگوشه‌گی سنگدانه‌های ریز بر مقاومت بتن و نسبت آب به سیمان صرف‌نظر شده است.

۴-۱-۳- در صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات ماسه سیمان استاندارد که طبق روش استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ بدست آمده است، کمتر از ۳۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع باشد، از منحنی سیمان رده ۳۲۵ استفاده می‌شود و نسبت آب به سیمان بدست آمده از منحنی‌های سیمان رده ۳۲۵ در ضریب اصلاحی زیر ضرب می‌گردد تا نسبت آب به سیمان مورد نظر بدست آید.

$$۳۲۵ \div (\text{مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد } ۲۸ \text{ روزه}) = \text{ضریب اصلاحی نسبت آب به سیمان}$$

در صورتی که مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد ۲۸ روزه، بین ۳۲۵ تا ۵۲۵ باشد با درون‌یابی می‌توان یک منحنی فرضی را بدست آورد و از آن بهره برد. اما اگر مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد ۲۸ روزه به مراتب بیشتر از ۵۲۵ باشد، می‌توان از ضریب اصلاحی فوق استفاده نمود اما مخرج کسر را باید عدد ۵۲۵ قرار داد. توصیه می‌شود در صورت وجود اختلاف جزئی در مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد با اعداد ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ (اختلاف کمتر از ۵ درصد) می‌توان از منحنی‌های موجود استفاده نمود و نیاز به تغییر در این گام ضرورت ندارد.

۴-۱-۴- در صورتی که اطلاعاتی در مورد مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد

۲۸ روزه وجود نداشته باشد، حداقل مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد ۲۸ روزه طبق استاندارد سیمان پرتلند (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹) یا سیمان آمیخته پوزولانی (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۵۱۷)، یا سیمان پرتلند آهکی (استاندارد ملی ایران به شماره ۴۲۲۰) و یا سیمان پرتلند سفید (استاندارد ملی ایران به شماره ۲۹۳۱) می‌تواند بکار رود. در جدول ۴-۱ حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان‌های تولیدی در ایران به عنوان راهنما ارائه می‌شود.

جدول ۴-۱- حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان‌های تولیدی ایران طبق استانداردهای ملی

نوع سیمان پرتلند	حداقل مقاومت فشاری ملات ۲۸ روزه استاندارد (kg/cm^2)	نوع سیمان آمیخته	حداقل مقاومت فشاری ملات ۲۸ روزه استاندارد (kg/cm^2)
پرتلند ۳۲۵-۱	۳۲۵	پرتلند پوزولانی	۳۰۰
پرتلند ۴۲۵-۱	۴۲۵	پرتلند پوزولانی ویژه	۲۷۵
پرتلند ۵۲۵-۱	۵۲۵	پرتلند سرباره‌ای	۳۲۰
پرتلند نوع ۲	۳۱۵	پرتلند سرباره‌ای ضد سولفات	۳۰۰
پرتلند نوع ۵	۲۷۰	پرتلند آهکی	۳۳۰
پرتلند سفید	۳۱۵		

با استفاده از مقاومت جدول ۴-۱ و توضیحات مندرج در این گام برای اصلاح نسبت آب به سیمان می‌توان اقدام نمود. لازم به ذکر است بر اساس سیاست‌های جدید، کارخانه‌های تولید کننده سیمان پرتلند پوزولانی موظف شده اند حداقل مقاومت ۲۸ روزه ملات خود را به ۳۲۵ برسانند. اختلاف حداقل مقاومت‌های سیمان پرتلند نوع ۲ یا پرتلند سفید با سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱ در حدود ۳ درصد است که کمتر از ۵ درصد می‌باشد و می‌توان این اختلاف را نادیده گرفت.

۴-۱-۵- در صورتی که سن مقاومت مشخصه بتن برای سیمان‌هایی با روند کند

هیدراسیون مانند پرتلند نوع ۵ یا سیمان‌های آمیخته بالاتر از ۲۸ روزه باشد، می‌توان آن را با مقاومت ۲۸ روزه سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱ معادل دانست و از منحنی $R - ۳۲۵$ و $C - ۳۲۵$ با توجه به درصد شکستگی متوسط شن‌ها استفاده نمود. همچنین می‌توان از جداول ۲-۴ یا ۳-۴ استفاده کرد.

۴-۱-۶- در صورتی که سن مقاومت مشخصه برای برخی بتن‌های حاوی سیمان‌هایی با روند هیدراسیون کند بیش از ۲۸ روز باشد، نسبت آب به سیمان را می‌توان با عنایت به ضرایب مندرج در جدول ۲-۴ بدست آورد. هرچند جدول مزبور پایه علمی ندارد اما برای سهولت از آن استفاده می‌شود.

جدول ۲-۴- مقاومت ملات استاندارد سیمان‌ها در سنین مختلف بر حسب مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان پرتلند ۳۲۵-۱

نوع سیمان	۲۸ روزه	۴۲ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه
پرتلند نوع ۳۲۵-۱	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲
پرتلند نوع ۲	۰/۹۷	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲
پرتلند نوع ۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۱/۰۵	۱/۲
پرتلند پوزولانی	۰/۹۲	۰/۹۷	۱/۰۵	۱/۲
پرتلند پوزولانی ویژه	۰/۸۵	۰/۹۲	۱/۰۵	۱/۲
پرتلند سرباره ای	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲
پرتلند سرباره ای ضد سولفات	۰/۹۲	۰/۹۷	۱/۰۵	۱/۲
پرتلند سفید	۰/۹۷	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲

همچنین در جدول ۳-۴، مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد همه سیمان‌ها برابر ۱/۰۰ منظور شده است و ضرایب موجود نسبت به مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد همان سیمان ارائه گردیده است.

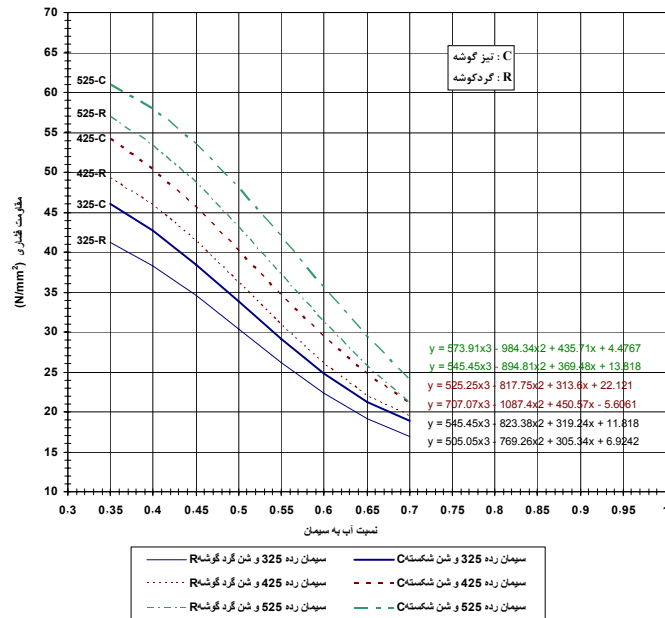
جدول ۴-۳- مقاومت سنین مختلف ملات استاندارد سیمان‌ها در مقایسه با مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد همان سیمان

نوع سیمان	۲۸ روزه	۴۲ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه
پرتلند نوع ۱-۳۲۵	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲
پرتلند نوع ۲	۱/۰۰	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۲۴
پرتلند نوع ۵	۱/۰۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۴۱
پرتلند پوزولانی	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱۴	۱/۳
پرتلند پوزولانی ویژه	۱/۰۰	۱/۰۸	۱/۲۴	۱/۴۱
پرتلند سرباره‌ای	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲
پرتلند سرباره‌ای ضد سولفات	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۱۴	۱/۳
پرتلند سفید	۱/۰۰	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۲۴

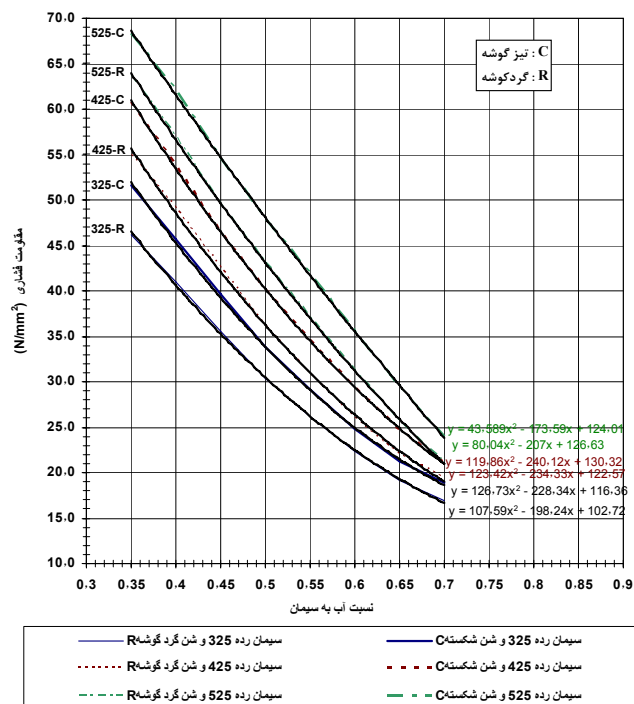
۴-۱-۷- در صورتی که از مواد افزودنی روان‌کننده (کاهنده آب) استفاده شود و نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۵ باشد، می‌توان از منحنی‌های شکل ۴-۲ این راهنما استفاده نمود. در شکل ۴-۱ روش ملی، بتن‌ها فاقد روان‌کننده است و برای بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۵ به تدریج بتن‌ها سفت‌تر شده و درصد هوای موجود در آن‌ها عملاً بیشتر از ۱ تا ۲ درصد می‌شود.

در منحنی‌های شکل ۴-۲ فرض شده است با بکارگیری روان‌کننده، عملاً از سفتی بتن کاسته شده و درصد هوای آن نیز کم شده است. با استفاده از روان‌کننده، سیمان بتن به طور قابل توجهی در خمیر سیمان و بتن پخش و توزیع می‌شود و کیفیت بتن بهبود می‌یابد، لذا مشاهده می‌شود مقاومت بتن‌ها بهبود قابل توجهی بویژه در نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ خواهد یافت. بخشی از این افزایش مقاومت ممکن است به دلیل کاهش هوای باقیمانده در بتن باشد.

در صورتی که روان‌کننده از خاصیت حبابزایی برخوردار باشد و حدود ۲ درصد هوای اضافی در بتن بوجود آورد عملاً باید از منحنی‌های شکل ۴-۱ استفاده نمود و افزایش مقاومت چندان مشاهده نخواهد شد.



شکل ۴-۱- رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بدون مصرف روان کننده



شکل ۴-۲- رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری با توجه به مصرف روان کننده

۴-۱-۸- برای نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۵ در صورتی که نسبت آب به سیمان ثابت باشد و عیار سیمان افزایش یابد، حجم خمیر سیمان بالاتر می‌رود و با کاهش مقاومت و دوام روبرو خواهند شد. بنابراین توصیه می‌شود، وقتی نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ می‌باشد از روان کننده استفاده گردد تا عیار سیمان بتن به طور قابل توجهی بویژه برای تأمین روانی بیشتر افزایش نیابد. این موضوع به نوعی در شکل ۴-۱ ملحوظ شده است، اما در شکل ۴-۲ به دلیل وجود روان کننده (بویژه برای ایجاد کاهندگی در آب و سیمان) کاهش مقاومت منظور نشده است.

۴-۱-۹- در این راهنما مدل ریاضی منحنی‌های شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲ در کنار شکل‌های مربوطه برای علاقمندان ارائه شده است تا در صورت نیاز بتوانند نرم افزار رایانه ای مورد نظر را تهیه نمایند. در نرم افزار موجود نیز از این مدل‌ها بهره گرفته شده است.

۴-۱-۱۰- در صورتی که حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز برای ایجاد دوام و نفوذناپذیری، کمتر از نسبت آب به سیمان بدست آمده از طریق مقاومت باشد، باید نسبت آب به سیمان مساوی یا کمتر از حداکثر مقدار مجاز را بکار برد. معمولاً در این حالت مقاومت بدست آمده بیشتر از مقاومت مورد نظر (مقاومت هدف طرح) خواهد بود.

۴-۲- گام دوم: انتخاب محدوده منحنی مخلوط سنگدانه بتن

۴-۲-۱- مبانی ارائه منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب

دانه‌بندی مطلوب بتن در واقع بر اساس رابطه فولر - تامسون اصلاح شده بدست آمده است. در زیر رابطه فولر- تامسون مشاهده می‌گردد.

$$P = \left(\frac{d}{D} \right)^n \times 100\%$$

رابطه اصلاح شده فولر- تامسون، در صورتیکه مرز سنگدانه و مواد ریز دانه ۰/۰۷۵ میلیمتر فرض شود، عبارت است از:

$$P = \frac{100\%}{1 - \left(\frac{0.075}{D} \right)^n} \times \left[\left(\frac{d}{D} \right)^n - \left(\frac{0.075}{D} \right)^n \right]$$

که در آن P درصد گذشته تجمعی از الک d (به صورت درصد حجمی)، D حداکثر اندازه

سنگدانه و n توانی است که برای منحنی A برابر ۰/۶۷، برای منحنی B برابر ۰/۳۵ و برای منحنی C برابر ۰/۱ می باشد.

منحنی A درشت ترین و منحنی C ریزترین دانه بندی را دارد. ناحیه (۱) بین منحنی A و B و ناحیه (۲) بین منحنی B و C می باشد. تقسیم ناحیه (۱) به سه منطقه و ناحیه (۲) به دو منطقه می تواند مفید واقع شود. این تقسیم بندی ها را می توان در جدول ۴-۴ مشاهده نمود.

جدول ۴-۴- تقسیم بندی نواحی مطلوب دانه بندی مخلوط سنگدانه بتن و توان های متناظر با آن به همراه موارد کاربرد پیشنهادی

ناحیه	منطقه	توان منحنی بالایی	توان منحنی پایینی	موارد کاربرد پیشنهادی مناطق مختلف*
(۱)	۱-۱	۰/۵۵	۰/۶۷	شالوده و قطعات حجیم با روانی کم تا متوسط و رده اسلامپ S_1 و S_2 و غیر پمپی
	۱-۲	۰/۴۵	۰/۵۵	تیر و دال با روانی متوسط و رده اسلامپ S_2 و بتن پمپی درشت بافت و نسبتا سفت
	۱-۳	۰/۳۵	۰/۴۵	ستون و دیوار با روانی رده S_3 ، بتن پمپی ریز، بتن ترمی درشت بافت با رده اسلامپ S_4 و بتن تعمیری درشت بافت
(۲)	۲-۱	۰/۲۲۵	۰/۳۵	بتن ترمی ریز بافت، بتن های پاشیدنی با بافت دانه بندی متوسط، بتن خودتراکم درشت بافت و بتن تعمیری ریز بافت
	۲-۲	۰/۱	۰/۲۲۵	بتن پاشیدنی ریز بافت، بتن خودتراکم ریز بافت

* این پیشنهادها نمی تواند همواره بکار آید. وسائل حمل و ریختن، خطر جداشدگی، آب انداختن و جمع شدگی در کنار سطح روانی مطلوب و سلیقه های اجرایی می تواند از عوامل انتخاب نواحی مطلوب بحساب آید.

خروج از محدوده های مورد نظر به ویژه در الک های اول و الک های آخر قابل اغماض است. منحنی های دانه بندی مطلوب و روابط ارائه شده در واقع درصدهای تجمعی گذشته حجمی از هر الک می باشند و با فرض نزدیکی چگالی ذرات سنگدانه درشت و ریز عملا می توان درصد تجمعی گذشته وزنی از هر الک را جایگزین آن نمود. اگر چگالی ذرات سنگدانه بیش از ۵٪ با یکدیگر تفاوت داشته باشند لازم است درصدهای وزنی موجود در دانه بندی هر یک از سنگدانه ها، درصد حجمی منظور شود یا درصدهای حجمی منحنی

مخلوط سنگدانه به وزنی تبدیل شود. به هر حال می توان با توجه به درصدهای حجمی محاسبه شده برای سهم هر یک از سنگدانه ها حجم هر یک را محاسبه نمود و با توجه به چگالی هر سنگدانه، وزن هر نوع سنگدانه را مشخص کرد.

در جداول ۴-۵ تا ۴-۹، درصدهای گذشته از الک های مختلف برای منحنی های مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه های متفاوت ارائه شده است.

جدول ۴-۵- درصدهای گذشته از الک های مختلف برای منحنی های مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه

۳۷/۵ میلی متر*

n												الک (م.م)
۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۷	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳۷/۵
۹۱	۹۰	۸۹	۸۸	۸۶	۸۵	۸۴	۸۲	۸۱	۷۹	۷۸	۷۶	۲۵
۸۶	۸۴	۸۲	۸۰	۷۸	۷۶	۷۴	۷۲	۷۰	۶۸	۶۶	۶۳	۱۹
۷۸	۷۵	۷۲	۷۰	۶۷	۶۴	۶۱	۵۸	۵۶	۵۳	۵۱	۴۷	۱۲/۵
۷۲	۶۹	۶۶	۶۳	۶۰	۵۷	۵۴	۵۱	۴۸	۴۵	۴۲	۳۹	۹/۵
۶۵	۶۱	۵۸	۵۵	۵۱	۴۸	۴۵	۴۱	۳۸	۳۶	۳۳	۲۹	۶/۳۵
۶۰	۵۶	۵۲	۴۹	۴۵	۴۲	۳۹	۳۶	۳۳	۳۰	۲۷	۲۴	۴/۷۵
۴۸	۴۴	۴۰	۳۷	۳۳	۳۰	۲۷	۲۴	۲۲	۱۹	۱۷	۱۴	۲/۳۸
۳۷	۳۳	۳۰	۲۷	۲۴	۲۱	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۱/۱۹
۲۷	۲۴	۲۱	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۹	۷	۶	۵	۰/۶
۱۷	۱۵	۱۳	۱۱	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۰/۳
۸	۷	۶	۵	۴	۴	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۰/۱۵
۴/۴۵	۴/۶۸	۴/۹۰	۵/۱۰	۵/۳۱	۵/۴۸	۵/۶۶	۵/۸۳	۵/۹۷	۶/۱۳	۶/۲۸	۶/۴۴	مدول ریزی*

* دقت اعداد مندرج در جدول ± 1 درصد می باشد. در صورتی که الک های ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی متر در دانه بندی

سنگدانه ها بکار نرفته باشد، نیازی به رعایت مقادیر ارائه شده برای این الک ها وجود ندارد.

× دقت مدول ریزی ارائه شده ± 0.2 می باشد.

جدول ۴-۶- درصدهای گذشته از الک‌های مختلف برای منحنی‌های مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر*

الک (م.م)	n											
	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۷
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۹۴	۹۳	۹۲	۹۱	۹۰	۸۹	۸۸	۸۷	۸۶	۸۵	۸۴	۸۳
۱۲/۵	۸۵	۸۳	۸۱	۷۹	۷۷	۷۵	۷۳	۷۱	۶۹	۶۷	۶۵	۶۲
۹/۵	۷۹	۷۷	۷۴	۷۲	۶۹	۶۷	۶۴	۶۲	۵۹	۵۷	۵۵	۵۱
۶/۳۵	۷۱	۶۸	۶۵	۶۲	۵۹	۵۶	۵۳	۵۰	۴۸	۴۵	۴۲	۳۹
۴/۷۵	۶۵	۶۲	۵۹	۵۶	۵۲	۴۹	۴۶	۴۳	۴۰	۳۸	۳۵	۳۱
۲/۳۸	۵۲	۴۹	۴۵	۴۲	۳۹	۳۵	۳۲	۳۰	۲۷	۲۴	۲۲	۱۹
۱/۱۹	۴۰	۳۷	۳۴	۳۰	۲۷	۲۵	۲۲	۲۰	۱۷	۱۵	۱۳	۱۱
۰/۶	۲۹	۲۶	۲۳	۲۱	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۱	۹	۸	۶
۰/۳	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱۱	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳
۰/۱۵	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۳	۲	۲	۲	۱
مدول ریزی [×]	۴/۱۳	۴/۳۱	۴/۵۱	۴/۶۹	۴/۸۹	۵/۰۶	۵/۲۳	۵/۳۶	۵/۵۲	۵/۶۵	۵/۷۷	۵/۹۵

* دقت اعداد مندرج در جدول ± 1 درصد می‌باشد. در صورتی که الک‌های ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی‌متر در دانه‌بندی سنگدانه‌ها بکار نرفته باشد، نیازی به رعایت مقادیر ارائه شده برای این الک‌ها وجود ندارد.

× دقت مدول ریزی ارائه شده ± 0.02 می‌باشد.

جدول ۴-۷- درصدای گذشته از الکهای مختلف برای منحنیهای مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر*

n												الک (م.م)
۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۷	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۹۰	۸۹	۸۸	۸۷	۸۵	۸۴	۸۳	۸۱	۸۰	۷۸	۷۷	۷۵	۱۲/۵
۸۴	۸۲	۸۱	۷۹	۷۷	۷۵	۷۳	۷۱	۶۹	۶۷	۶۵	۶۲	۹/۵
۷۶	۷۳	۷۱	۶۸	۶۵	۶۳	۶۰	۵۸	۵۵	۵۲	۵۰	۴۷	۶/۳۵
۷۰	۶۷	۶۴	۶۱	۵۸	۵۵	۵۲	۴۹	۴۷	۴۴	۴۱	۳۸	۴/۷۵
۵۶	۵۳	۴۹	۴۶	۴۳	۴۰	۳۷	۳۴	۳۱	۲۸	۲۶	۲۳	۲/۳۸
۴۳	۴۰	۳۶	۳۳	۳۰	۲۷	۲۵	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱/۱۹
۳۱	۲۸	۲۵	۲۳	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۱	۹	۸	۰/۶
۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۱	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۰/۳
۱۰	۸	۷	۶	۵	۵	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۰/۱۵
۳/۸۶	۴/۰۴	۴/۲۲	۴/۳۸	۴/۵۵	۴/۶۹	۴/۸۴	۴/۹۹	۵/۱۱	۵/۲۴	۵/۳۶	۵/۵۰	مدول ریزی*

* دقت اعداد مندرج در جدول ± 1 درصد می باشد. در صورتی که الکهای ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی متر در دانه بندی

سنگدانه ها بکار نرفته باشد، نیازی به رعایت مقادیر ارائه شده برای این الکها وجود ندارد.

× دقت مدول ریزی ارائه شده ± 0.2 می باشد.

جدول ۴-۸- درصدهای گذشته از الک‌های مختلف برای منحنی‌های مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی متر*

n												الک (م.م)
۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۷	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲/۵
۹۳	۹۲	۹۲	۹۱	۹۰	۸۹	۸۸	۸۷	۸۶	۸۵	۸۴	۸۳	۹/۵
۸۴	۸۲	۸۰	۷۸	۷۷	۷۵	۷۳	۷۱	۶۹	۶۷	۶۵	۶۲	۶/۳۵
۷۷	۷۵	۷۳	۷۰	۶۸	۶۶	۶۳	۶۱	۵۸	۵۶	۵۴	۵۱	۴/۷۵
۶۲	۵۹	۵۶	۵۳	۵۰	۴۷	۴۴	۴۲	۳۹	۳۶	۳۴	۳۱	۲/۳۸
۴۸	۴۵	۴۱	۳۸	۳۵	۳۳	۳۰	۲۷	۲۵	۲۳	۲۱	۱۸	۱/۱۹
۳۵	۳۲	۲۹	۲۶	۲۴	۲۱	۱۹	۱۷	۱۵	۱۴	۱۲	۱۰	۰/۶
۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۳	۱۱	۱۰	۸	۷	۶	۵	۰/۳
۱۱	۹	۸	۷	۶	۵	۵	۴	۳	۳	۳	۲	۰/۱۵
۳/۵۲	۳/۶۸	۳/۸۳	۳/۹۹	۴/۱۳	۴/۲۶	۴/۴۰	۴/۵۲	۴/۶۶	۴/۷۶	۴/۸۶	۵/۰۰	مدول ریزی*

* دقت اعداد مندرج در جدول ± 1 درصد می‌باشد. در صورتی که الک‌های ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی متر در دانه‌بندی سنگدانه‌ها بکار نرفته باشد، نیازی به رعایت مقادیر ارائه شده برای این الک‌ها وجود ندارد.

× دقت مدول ریزی ارائه شده ± 0.2 می‌باشد.

جدول ۴-۹- درصد های گذشته از الک های مختلف برای منحنی های مطلوب مخلوط سنگدانه بتن با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی متر*

n												الک (م.م)
۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۷	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹/۵
۹۰	۸۹	۸۸	۸۶	۸۵	۸۴	۸۳	۸۱	۸۰	۷۹	۷۷	۷۵	۶/۳۵
۸۳	۸۱	۷۹	۷۷	۷۵	۷۴	۷۲	۷۰	۶۸	۶۶	۶۴	۶۱	۴/۷۵
۶۶	۶۴	۶۱	۵۸	۵۶	۵۳	۵۰	۴۸	۴۵	۴۳	۴۰	۳۷	۲/۳۸
۵۱	۴۸	۴۵	۴۲	۳۹	۳۷	۳۴	۳۲	۲۹	۲۷	۲۵	۲۲	۱/۱۹
۳۷	۳۴	۳۲	۲۹	۲۶	۲۴	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۰/۶
۲۴	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۶	۰/۳
۱۲	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۵	۴	۳	۳	۲	۰/۱۵
۳/۲۷	۳/۴۱	۳/۵۴	۳/۶۸	۳/۸۱	۳/۹۲	۴/۰۵	۴/۱۴	۴/۲۶	۴/۳۶	۴/۴۶	۴/۶۰	مدول ریزی*

* دقت اعداد مندرج در جدول ± 1 درصد می باشد. در صورتی که الک های ۱۲/۵ و ۶/۳۵ میلی متر در دانه بندی سنگدانه ها بکار نرفته باشد، نیازی به رعایت مقادیر ارائه شده برای این الک ها وجود ندارد.
 × دقت مدول ریزی ارائه شده ± 0.2 می باشد.

۴-۲-۲- انتخاب محدوده یا منحنی دانه بندی مطلوب بتن مورد نظر

برای انتخاب محدوده مطلوب با توجه به کاربرد و مشخصات اجرایی بتن، به جدول فوق مراجعه گردد.

برای مواردی که مدنظر است بافت بتن درشت دانه باشد، بتن های با کارآیی کم، بتن شالوده ها و موارد مشابه، قرارگیری در ناحیه (۱) و نزدیک به منحنی A (منطقه ۱-۱) توصیه می شود. آب انداختن و جداسدگی و جمع شدگی بیشتری را در این حالت انتظار داریم در حالی که مقدار آب آزاد مورد نیاز نیز کمتر خواهد بود.

در حالتی که ساخت بتن برای بتن‌ریزی در قطعاتی همچون تیر و دال با نمای معمولی در نظر می‌باشد قرارگیری در حد فاصل منحنی A و B در ناحیه (۱) و در بخش میانی (منطقه ۱-۲) مناسب است. در حالتی که ساخت بتن برای بتن‌ریزی در قطعاتی همچون ستون و دیوار مد نظر است قرارگیری منحنی دانه‌بندی در ناحیه (۱) و نزدیک تر به منحنی B (منطقه ۱-۳) توصیه می‌شود. آب انداختن و جداسدگی کمتر، جمع‌شدگی کمتر و نیاز به آب بیشتر از جمله خصوصیات نزدیکی به منحنی B می‌باشد. نمای این بتن کاملاً مطلوب است و بافت نسبتاً ریزتری را خواهیم داشت. برای بتن‌هایی که کارآیی نسبتاً زیادی دارند از جمله بتن‌های پمپی، قرارگیری در وسط ناحیه (۱) و نزدیک تر به منحنی B (n از ۰/۴ تا ۰/۵) ضرورت دارد. برای بتن ترمی نزدیکی به منحنی B لازم است زیرا بتن روان با دانه‌بندی ریز و استعداد جداسدگی کم و آب انداختن ناچیز مورد نیاز است (n از ۰/۳ تا ۰/۴).

در حالت‌های خاص مانند استفاده از بتن‌های خود تراکم (خودتران) یا برخی بتن‌های ترمی با روانی بسیار زیاد و برخی بتن‌های تعمیری، قرارگیری در ناحیه (۲) به ویژه منطقه ۲-۱ توصیه می‌شود؛ برای بتن خود تراکم خیلی ریز به همراه پودرسنگ یا بتن‌های تعمیری خاص، نزدیکتر بودن به منحنی C (منطقه ۲-۲) ضرورت پیدا می‌کند. نیاز به آب زیاد برای ایجاد روانی، مصرف سیمان بیشتر و مسلماً آب انداختن و جداسدگی کمتر از جمله ویژگی‌های قرارگیری در این ناحیه می‌باشد و مسلماً بافت بسیار ریز و نمای بسیار مطلوبی را بدست می‌دهد. در بیشتر اوقات برای ایجاد چنین دانه‌بندی ریزی نیاز به مصرف ماسه‌های ریز (ماسه بادی) و پودر سنگ احساس می‌شود.

اگر نسبت آب به سیمان کم و عیار سیمان زیاد شود، کمبود ماسه در مخلوط بتن مشکلاتی را از نظر جداسدگی و آب انداختن بوجود نمی‌آورد و علی‌القاعده می‌توان از مخلوط درشت‌تری نیز استفاده نمود (نزدیک تر شدن به منحنی A). در این حالت سهم ماسه کمتر و سهم شن بیشتر خواهد شد. ضمناً توصیه می‌شود به نکاتی که در پیوست ۷ ارائه شده است توجه گردد.

۳-۲-۴- تعیین سهم سنگدانه‌ها برای دستیابی به منحنی دانه‌بندی مورد نظر در محدوده مطلوب

قبل از ساخت بتن باید از تطابق دانه‌بندی سنگدانه‌های موجود با دانه‌بندی مورد نظر و یا استاندارد اطمینان حاصل کرد. در عمل چندین نوع سنگدانه با دانه‌بندی‌های مختلف موجود

هستند که باید ترکیب شوند و دانه‌بندی مطلوب حاصل گردد. در این بخش یک روش محاسباتی به صورت آزمون و خطا برای محاسبه نسبت‌های سنگدانه‌های موجود ارائه شده است. دلیل انتخاب این روش امکان بکارگیری رایانه و استفاده از نرم افزارهای موجود و یا برنامه‌های ساده است.

روش آزمون و خطای محاسباتی، امروزه با توجه به استفاده از ماشین‌های حسابگر و رایانه، جایگاه ویژه‌ای را یافته است. بنابراین توصیه می‌شود از این روش استفاده گردد. مثال‌هایی از این روش در بخش مثال‌های طرح مخلوط بتن آمده است؛ اما اصول این روش در این جا مطرح می‌گردد. در این روش محدودیتی برای تعداد انواع سنگدانه و نوع دانه‌بندی آن‌ها وجود ندارد. پس از این که محدوده دانه‌بندی مطلوب انتخاب شد می‌توان برای هر یک از انواع سنگدانه، سهمی به صورت اعشاری منظور نمود (مانند x, y, z و...). لازم است سهم هر یک از سنگدانه‌ها را در مقادیر درصد گذشته تجمعی از هر الک برای همان سنگدانه ضرب نماییم و نتایج حاصله برای هر الک را با هم جمع کنیم. در این حالت دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با توجه به سهم‌های مفروض بدست می‌آید. این دانه‌بندی با دانه‌بندی مطلوب مقایسه می‌گردد و در صورت عدم تطابق کامل، لازم است سهم‌ها را در جهتی تغییر داد که نتیجه موردنظر حاصل گردد.

بدیهی است نمی‌توان انتظار داشت که در کارهای اجرایی بطور کامل به دانه‌بندی مطلوب دست یافت مگر اینکه بتوان مصالحی را بکار گرفت که تک اندازه باشند. معمولاً سعی می‌شود با توجه به دانه‌بندی ماسه و بخش ریز منحنی دانه‌بندی مطلوب ابتدا سهم تقریبی ماسه را بدست آورد و سپس سهم‌های شن را فرض نمود تا سریع‌تر به نتیجه رسید.

ناپیوستگی در مخلوط حاصله یا قطع منحنی مطلوب با زوایای قابل توجه، مطلوب نیست. بدیهی است اگر نتوان به محدوده مورد نظر نزدیک شد و رعایت آن الزامی باشد، تعویض سنگدانه (به ویژه ماسه) ضرورت خواهد داشت و یا لازم است دانه‌بندی موجود با بکارگیری سنگدانه دیگری اصلاح شود.

۴-۲-۴- تعیین منحنی دانه‌بندی مخلوط حاصله با سهم‌های مورد نظر

با توجه به سهم‌های تعیین شده برای هر یک از سنگدانه‌های مورد استفاده، دانه‌بندی

مخلوط سنگدانه بتن بدست می‌آید. بدین منظور لازم است سهم مورد نظر برای هر یک از سنگدانه در مقادیر تجمعی درصد گذشته از هر الک ضرب گردد و برای هر الک این مقادیر با یکدیگر جمع شود تا در نهایت مقادیر تجمعی درصد گذشته از هر الک برای مخلوط سنگدانه بتن تعیین گردد. هنگامی که از روش آزمون و خطای محاسباتی استفاده می‌شود، به صورت خودکار دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با سهم‌های مورد نظر (سهم‌های فرضی) بدست می‌آید.

۴-۲-۵- تعیین مدول نرمی (ریزی) مخلوط سنگدانه بتن

مدول نرمی (ریزی) مخلوط سنگدانه بتن در روش ملی، مجموع درصد‌های تجمعی مانده بر روی الک‌های ۳۷/۵، ۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۸، ۱/۱۹، ۰/۶، ۰/۳، و ۰/۱۵ میلی متر تقسیم‌بر ۱۰۰ می‌باشد.

لازم است دقت شود که از الک ۲۵ میلی متر، ۱۲/۵، ۶/۳۵ و سایر الک‌هایی که از آن‌ها در تعریف مدول نرمی سنگدانه نام برده نشده است، نباید در محاسبه مدول نرمی استفاده نمود، هر چند در آزمایش دانه‌بندی یا محاسبه مخلوط سنگدانه بتن از این الک‌ها نیز استفاده شده باشد. افزایش مدول نرمی به معنای درشت بافت شدن دانه‌بندی مخلوط و کاهش آن به معنای ریز بافت شدن می‌باشد. درشت بافت شدن به معنای کاهش سطح ویژه و ریز بافت شدن معادل افزایش سطح جانبی سنگدانه‌ها خواهد بود. در آخرین ردیف جداول دانه‌بندی مطلوب، مدول نرمی (ریزی) منحنی‌های مطلوب سنگدانه‌های بتن برای حداکثر اندازه‌های مختلف دیده می‌شود. همان‌گونه که در جداول دانه‌بندی مطلوب دیده می‌شود، مدول نرمی منحنی A۱۹ عملاً معادل B۳۷/۵ می‌باشد و یا مدول ریزی A۹/۵ بیشتر از مدول ریزی C۳۷/۵ می‌باشد، بنابراین سطح ویژه مخلوط سنگدانه‌ها تنها به حداکثر اندازه سنگدانه مربوط نخواهد بود و بافت دانه‌بندی نیز نقش اساسی در تغییر سطح ویژه (سطح جانبی) مخلوط سنگدانه‌های بتن دارد. در بسیاری از روش‌های طرح اختلاط به موضوع دانه‌بندی مخلوط سنگدانه و نقش آن در تعیین مقدار آب مخلوط بتن توجهی نشده است.

۴-۲-۶- تعیین چگالی متوسط مخلوط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بتن

برای محاسبه مقدار کل سنگدانه در طرح مخلوط با استفاده از رابطه حجم مطلق، لازم

است وزن مخصوص (چگالی) متوسط سنگدانه‌های مصرفی بدست آید. برای محاسبه چگالی متوسط رابطه زیر بکار گرفته می‌شود.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}} + \dots + \frac{p_n}{\rho_{A_n}}}$$

که در آن:

$\rho_{A_{SSD}}$: چگالی متوسط ذرات سنگدانه‌ها به صورت اشباع با سطح خشک
 p_1 تا p_n : سهم وزنی هر یک از سنگدانه‌ها در کل مخلوط سنگدانه بتن به صورت اعشاری

ρ_{A_1} تا ρ_{A_n} : چگالی اشباع با سطح خشک هر یک از سنگدانه‌ها
 استفاده از روابط دیگر برای محاسبه چگالی متوسط باعث خطا در محاسبات می‌گردد.
 در صورتی که حجم کل سنگدانه محاسبه شود و با توجه به سهم حجمی هر یک، حجم هر یک از سنگدانه‌ها بدست آید نیازی به محاسبه چگالی متوسط سنگدانه‌ها وجود ندارد و محاسبات انجام شده حتی در صورت وجود تفاوت جدی در چگالی‌ها از دقت برخوردار خواهد بود.

۴-۲-۷- تعیین درصد شکستگی (تیزگوشگی) متوسط سنگدانه‌های درشت بتن برای تعیین نسبت آب به سیمان

$$a_{nG} = \frac{P_1 \cdot a_{n1} + P_2 \cdot a_{n2} + P_3 \cdot a_{n3}}{P_1 + P_2 + P_3}$$

که در آن:

a_{nG} = درصد شکستگی متوسط شن‌ها

a_{ni} = درصد شکستگی هر یک از شن‌ها

P_i = سهم هر یک از شن‌ها

مقدار a_{nG} برای تعیین نسبت آب به سیمان کاربرد دارد. هم چنین از این پارامتر برای تعیین معادل درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های بتن جهت مشخص کردن مقدار آب آزاد استفاده می‌شود.

۴-۲-۸- تعیین معادل درصد شکستگی (تیز گوشه‌گی) متوسط سنگدانه‌های بتن برای تعیین مقدار آب آزاد اولیه بتن

$$a_{ne} = \frac{P_G \cdot a_{nG} + 2P_s \cdot a_{ns}}{P_G + 2P_s}$$

که در آن:

a_{ne} = معادل درصد شکستگی متوسط مخلوط سنگدانه‌های بتن

a_{nG} = درصد شکستگی متوسط شن‌ها

a_{ns} = درصد شکستگی تقریبی ماسه

P_G = مجموع سهم شن‌ها

P_s = سهم ماسه

معادل درصد شکستگی متوسط مخلوط سنگدانه‌های بتن فقط برای تعیین مقدار آب آزاد اولیه بتن بکار می‌رود و درصد شکستگی متوسط مخلوط سنگدانه‌ها نمی‌باشد. لازم به ذکر است که درصد شکستگی تقریبی ماسه صرفاً به صورت نظری باید حدس زده شود و روشی برای تعیین آن وجود ندارد.

۴-۳- گام سوم: تعیین مقدار آب آزاد بتن

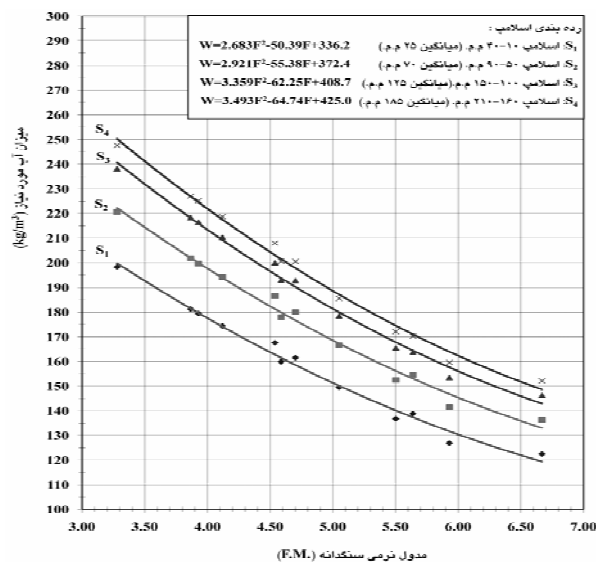
هر چند آب عامل مهمی در تغییر روانی بتن می‌باشد اما نباید از تأثیر حداکثر اندازه، دانه‌بندی، مدول نرمی، شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان بتن و عیار سیمان آن غافل شد. وجود افزودنی‌های پودری معدنی (نوع و مقدار آن) و افزودنی‌های شیمیایی نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روانی بتن دارد.

وقتی حدود روانی مطلوب با توجه به شرایط اجرایی، از قبیل وسایل حمل و ریختن و تراکم، نوع و اندازه قطعه و تراکم میلگردها و محدودیت‌های دیگر مانند عدم جداشدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی مشخص شده باشد، می‌توان در روش ملی طرح مخلوط با داشتن مدول نرمی سنگدانه‌ها و معادل درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های بتن، مقدار تقریبی آب آزاد را بدست آورد. شکل ۴-۶ مقدار تقریبی آب آزاد مورد نیاز بتن را برای سنگدانه‌هایی ارائه می‌دهد که به دلیل شکل گردگوشه، و بافت سطحی صاف خود به آب کمی نیاز دارند. شکل ۴-۷ مربوط به سنگدانه‌هایی است که به دلیل شکل تیزگوشه و بافت سطحی زبر به آب

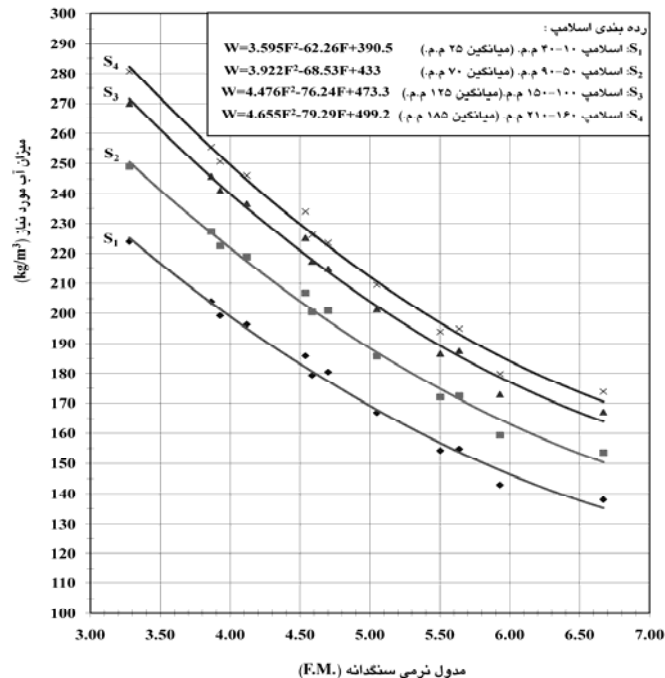
بیشتری احتیاج دارند. مسلماً هر چقدر مدول نرمی سنگدانه بیشتر شود به آب کمتری در طرح مخلوط بتن نیاز است. منحنی‌های موجود برای متوسط سطوح کارآیی موردنظر یعنی اسلامپ ۲۵، ۷۰، ۱۲۵ و ۱۸۵ میلی متر ارائه شده است. برای سایر اسلامپ‌ها می‌توان با درون یابی مقدار آب آزاد را بدست آورد.

مقدار تقریبی آب آزاد در شکل‌های ۶-۴ و ۷-۴ برای سطوح کارآیی S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 بلافاصله پس از اختلاط (حداکثر ۵ دقیقه پس از پایان اختلاط) از منحنی‌های مربوطه قابل تعیین است. برای کارآیی رده S_0 نمی‌توان توصیه خاصی را داشت، زیرا حد پایینی آن مشخص نیست. هم چنین برای رده S_5 توصیه‌ای وجود ندارد؛ اما افزایش آب آن نسبت به رده S_4 از ۳ درصد فراتر خواهد بود. همچنین در صورتی کارآیی موردنظر در فاصله زمانی خاصی از پایان اختلاط لازم باشد، باید متناسباً به مقدار کارآیی افزود تا کارآیی بتن با فاصله زمانی ۵ دقیقه از پایان اختلاط بدست آید و مورد استفاده قرار گیرد.

در ویرایش نخست روش ملی طرح مخلوط بتن رده S_4 وجود نداشت و مقدار آب رده S_1 بیش از ۱۰ درصد کمتر از ویرایش دوم بود. ضمناً منحنی‌ها برای محدوده هر سطح کارآیی ارائه شده بود و درون یابی بین منحنی‌ها ممکن نبود.



شکل ۶-۴- رابطه مقدار آب آزاد بتن و مدول نرمی سنگدانه هنگامی که به آب کم نیاز است (به دلیل گردگوشه‌گی سنگدانه‌ها)



شکل ۴-۷- رابطه مقدار آب آزاد بتن و مدول نرمی سنگدانه هنگامی که به آب زیاد نیاز است (به دلیل تیزگوشه گی سنگدانه‌ها)

۴-۳-۱- مقدار آب آزاد مورد نیاز بتن به عیار سیمان آن نیز بستگی دارد. منحنی‌های ارائه شده برای عیار سیمان 350 kg/m^3 تهیه شده است. در صورتی که عیار سیمان بتن به میزان 10 kg/m^3 بیشتر شود، مقدار آب آزاد مورد نیاز به میزان ۲ کیلوگرم باید افزایش یابد. هر چند مقدار آب تغییر یافته به دلیل افزایش ۱۰ کیلوگرم نسبت به ۳۵۰ کیلوگرم سیمان بتن در حدود ۱/۵ تا ۲/۵ کیلوگرم در همان جهت خواهد بود، اما به دلیل کاهش مقدار سنگدانه بهتر است این تغییر را به ۱ تا ۲ کیلوگرم با توجه به ریزی سیمان و مدول نرمی سنگدانه‌ها محدود نمود. بدیهی است این افزایش مقدار آب به روانی بتن و نوع سیمان بستگی دارد. اعمال این تغییرات مستلزم محاسبه عیار سیمان بتن است که در مرحله بعد انجام می‌شود و اصلاح مورد نظر فقط برای یک نوبت انجام می‌گردد و تکرار نمی‌شود.

۴-۳-۲- مقدار آب مورد نیاز بتن به نوع افزودنی پودری معدنی موجود در بتن نیز بستگی دارد. برای مثال به ازاء هر ۱ کیلوگرم دوده سیلیسی در بتن می‌توان ۱-۰/۷۵

کیلوگرم به آب مورد نیاز بتن افزود. این مقدار به ریزی دوده سیلیسی و سیمان مصرفی ارتباط دارد.

در مورد سرباره‌ها عملاً مقدار آب را تغییر نمی‌دهیم. پوزولان‌های طبیعی ایران در اغلب موارد نیاز به آب اضافی دارند، به ازای هر ۱۰ کیلوگرم پوزولان طبیعی جایگزین سیمان، ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم به آب بتن اضافه می‌شود. اما برای خاکستر بادی با ریزی معمولی می‌توان به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم خاکستر جایگزین سیمان، در حدود ۰/۵ کیلوگرم از آب بتن کم نمود. اگر خاکستر بادی با ریزی متوسط بکار رود عملاً کاهش در مقدار آب ضرورت ندارد و حتی ممکن است نیاز به افزایش نیز احساس گردد. برای خاکسترهای بادی با ریزی زیاد (بسیار ریز) عملاً نیاز به افزایش آب وجود دارد که به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم از این نوع خاکستر بادی حتی ممکن است ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم به آب افزود.

۳-۳-۴- مقدار آب آزاد مورد نیاز بتن در صورت استفاده از مواد حباب‌زا کاهش می‌یابد. به ازای هر یک درصد حباب هوای عمدی موجود در بتن عملاً در حدود ۳/۵ تا ۴ درصد از آب مورد نیاز کاسته می‌شود. برای مثال اگر ۳ درصد حباب هوای عمدی در بتن ایجاد نماییم در حدود ۱۰/۵ تا ۱۲ درصد از آب آزاد مورد نیاز بتن برای ایجاد روانی مطلوب کاسته می‌شود. باید دانست با توجه به لزوم کاهش نسبت آب به سیمان، عملاً با مصرف مواد حباب‌زا، کاهش عیار سیمان امکان‌پذیر نمی‌باشد، بلکه افزایش جزئی در عیار سیمان ایجاد خواهد شد.

۴-۳-۴- با مصرف افزودنی‌های روان‌کننده (کاهنده آب) و برخی کندگیرکننده‌ها می‌توان از مقدار آب آزاد مورد نیاز بتن کاست. در صورتی که هدف از مصرف این مواد کاهش آب آزاد بتن نباشد، بکارگیری آن‌ها منجر به افزایش روانی بتن خواهد شد. با مصرف روان‌کننده‌های معمولی می‌توان مقدار آب آزاد بتن را بین ۵ تا ۱۲ درصد (بسته به نوع ماده و میزان مصرف آن‌ها) کاهش داد. اگر از فوق‌روان‌کننده‌ها استفاده شود می‌توان با توجه به نوع ماده و میزان مصرف آن بین ۱۲ تا ۳۵ درصد از آب آزاد بتن کاست، بدون این که روانی آن‌ها دچار کاهش گردد.

بدیهی است با کاهش آب در این حالت، کاهش مصرف سیمان (مواد چسباننده) نیز می‌تواند حاصل گردد مشروط بر این که هدف ما کاهش نسبت آب به سیمان نباشد.

۵-۳-۴- تعیین مقدار آب مورد نیاز بتن می‌تواند به صورت مستقیم از جداول و روابط

پیوست شماره ۲ بدست آید. در این حالت نیاز به دانه‌بندی سنگدانه‌ها و چگالی هر بخش اندازه‌ای آن و هم چنین عیار سیمان و مواد افزودنی پودری معدنی وجود دارد و چگالی ذرات آن‌ها نیز ضروری است، درحالی که هنوز عیار مواد سیمانی تعیین نشده است. بنابراین می‌توان عیار مواد سیمانی را حدود ۳۵۰ کیلوگرم در نظر گرفت و مقدار آب تقریبی را بدست آورد و سپس با تعیین مقدار مواد سیمانی، مقدار آب آزاد را اصلاح کرد و مجدداً مواد سیمانی را تعیین کرد.

۴-۴- گام چهارم: تعیین مقدار سیمان بتن

با توجه به تعیین نسبت آب آزاد به مواد سیمانی و هم چنین مقدار آب آزاد، به سهولت مقدار مواد سیمانی بتن محاسبه می‌گردد (طبق رابطه ۴-۱ در متن اصلی روش ملی طرح مخلوط بتن).

$$C = \frac{W_f}{W/C}$$

۴-۴-۱- در صورتی که مقدار مواد سیمانی بیشتر از 350 kg/m^3 باشد، لازم است در مقدار آب آزاد اصلاحاتی را طبق بند ۴-۳-۱ و ۴-۳-۲ این راهنما بعمل آورد و مجدداً مقدار مواد سیمانی را تعیین کرد، اما به تکرار این عمل نیازی نیست.

۴-۴-۲- در صورتی که مقدار مواد سیمانی بدست آمده، کمتر از حداقل مجاز عیار سیمان بتن طبق مشخصات فنی یا آیین‌نامه باشد، لازم است مقدار حداقل مجاز عیار سیمان در طرح مخلوط بتن بکار رود. در صورت لزوم در این حالت می‌توان اندکی بر مقدار آب افزود و روانی را نیز بالاتر برد.

۴-۴-۳- در صورتی که مقدار مواد سیمانی حاصله از بندهای فوق از حداکثر مقدار مجاز عیار سیمان بتن بیشتر باشد لازم است مقدار عیار سیمان، مساوی یا اندکی کمتر از حداکثر مقدار مجاز سیمان انتخاب گردد. بدیهی است در این حالت نسبت آب به سیمان بیشتر از مقدار مورد نیاز می‌گردد که قابل قبول نیست. بنابراین در این حالت برای خروج از بن بست موجود باید به یکی از روش‌های زیر عمل نمود.

الف- کاهش روانی بتن در صورت امکان

ب- افزایش حداکثر اندازه سنگدانه بتن در صورت امکان

ج- درشت بافت کردن دانه بندی بتن در صورت امکان
 د- در صورت امکان بهبود کنترل کیفی و نظارت کارگاهی ساخت بتن برای کاهش مقاومت فشاری هدف و افزایش نسبت آب به سیمان در صورتی که نسبت آب به سیمان حاصله از مقاومت، تعیین کننده باشد (طرح مقاومت محور).
 ه- در صورت امکان مصرف ماسه گردگوشه به شرطی که قبلاً ماسه تیزگوشه بکار رفته باشد.

و- مصرف روان کننده یا کاهنده آب برای کاهش آب آزاد مورد نیاز در صورت امکان. بدیهی است ساده ترین و عملی ترین روش در بیشتر حالات، بکارگیری راه حل آخر است. در بند ۴-۳-۴ این راهنما در این مورد نکاتی ذکر شده است که می تواند مورد توجه قرار گیرد. به هر حال در صورتی که هر یک از روش های فوق بکار گرفته شود، لازم است با محدود کردن سیمان، مجدداً مقدار آب با توجه به نسبت آب به سیمان طرح، بدست آید.

۴-۴-۴- منظور کردن ضریب k در صورت مصرف دوده سیلیسی و خاکستر بادی

برای محاسبه نسبت آب به سیمان معادل و عدم نیاز به منظور نمودن اثر دوده سیلیسی و خاکستر بادی معمولی جایگزین سیمان در مقاومت، امروزه در برخی منابع اروپایی از ضریب k استفاده می شود. هم چنین در بسیاری موارد برای محاسبه حداقل مواد سیمانی از این ضریب استفاده می گردد.

$$\left(\frac{W}{C}\right)_e = \frac{W_f}{C + k.M}$$

که در آن:

$\left(\frac{W}{C}\right)_e$: نسبت آب به سیمان معادل

W_f : آب آزاد

M: مقدار افزودنی معدنی پودری فعال

برای خاکستر بادی ریز یا بسیار ریز، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن یا سرباره ضریب k در این رابطه ارائه نشده است و نیاز به تحقیقات احساس می شود. توجه به حداکثر مقدار مصرف خاکستر بادی معمولی و دوده سیلیسی و نکات مربوط به

مصرف مازاد بر آن در متن اصلی ضروری است. این ضریب در شرایط مختلف ممکن است تغییر کند که باید طبق روش ملی دقیقاً مورد توجه قرار گیرد.

در روش ملی حداکثر مقدار خاکستر بادی معمولی ۳۳ درصد وزن سیمان (۲۵ درصد مجموع مواد چسباننده سیمانی) منظور می شود و صرفاً در صورت افزایش خاکستر بادی از این حد، مقدار مازاد نباید در محاسبه فوق برای نسبت آب به سیمان معادل و محاسبه حداقل مقدار مواد سیمانی منظور شود و عملاً شبیه پودر سنگ خواهد بود. بدیهی است اگر به مخلوط مورد نظر آهک شکفته اضافه گردد، مقدار مازاد نیز می تواند در محاسبه نسبت آب به سیمان معادل و محاسبه حداقل مقدار مواد سیمانی به حساب آید.

مقدار k برای سیمان‌هایی با رده مقاومتی ۳۲۵ یا ۴۲۵ و بیشتر متفاوت خواهد بود و به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ منظور می گردد. هر چند در روش ملی برای خاکسترهای بادی ریز یا خیلی ریز ضرایب خاصی ذکر نشده است اما باید دانست در این حالت ضریب k می تواند بالاتر رفته و حتی به ۱ برسد.

در مورد دوده سیلیسی حداکثر مقدار آن باید ۱۱ درصد وزن سیمان (۱۰ درصد وزن مواد چسباننده) باشد و مازاد آن نباید در تعیین نسبت آب به سیمان معادل و حداقل مقدار مواد سیمانی منظور گردد. مقدار k به دلیل تأثیر قابل توجه دوده سیلیسی بر مقاومت بتن برابر ۲ منظور شده است؛ اما برای نسبت‌های آب به سیمان بزرگتر از ۰/۴۵ و رویارو با کربناته شدن، یخبندان و آبشدگی در حالت بدون مواد حباب‌زا مقدار k را مساوی ۱ در نظر می گیریم. اجازه داده شده است حداقل مقدار مواد سیمانی با در نظر گرفتن این ضریب کمتر شود؛ اما اگر حداقل سیمان 300 kg/m^3 باشد عملاً حداکثر دوده سیلیسی ۳۰ کیلوگرم و مقدار سیمان حداقل ۲۷۰ کیلوگرم خواهد بود.

۴-۵- گام پنجم- تعیین مقدار سنگدانه بتن

آخرین مجهول در طرح مخلوط، مقدار سنگدانه بتن می باشد. استفاده از رابطه حجم مطلق همواره برای یافتن آخرین جزء مجهول بتن ضروری است. مجموع احجام مطلق اجزاء بتن اعم از دانه ای، پودری یا مایع به همراه حجم هوا، مساوی حجم بتن خواهد بود و اساس رابطه حجم مطلق نیز همین است. حجم مطلق اجزاء بتن برابر حاصل تقسیم جرم آن‌ها بر چگالی آن‌ها می باشد.

بنابراین برای استفاده از رابطه حجم مطلق که در ویرایش نخست روش ملی به صورت رابطه (۲-۴) ارائه شده است، باید چگالی ذرات سیمان، چگالی مواد افزودنی پودری یا شیمیایی و چگالی متوسط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک را داشت. هم چنین لازم است حجم هوای موجود در بتن را در رابطه مورد نظر قرار داد.

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left(1000 - \frac{c}{\rho_c} - \frac{w_f}{\rho_w} - \frac{D}{\rho_D} - V_a \right) \quad (2-4)$$

که در آن:

A_{SSD} = جرم کل سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب kg/m^3

c = جرم سیمان بر حسب kg/m^3

w_f = جرم آب آزاد بر حسب kg/m^3

D = جرم مواد جایگزین سیمان بر حسب kg/m^3

V_a = حجم هوای موجود در بتن (عمدی و ناخواسته) بر حسب dm^3

$\rho_{A_{SSD}}$ = وزن مخصوص متوسط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب kg/dm^3

ρ_c = جرم مخصوص سیمان بر حسب kg/dm^3

ρ_w = جرم مخصوص آب بر حسب kg/dm^3 که معادل ۱ منظور می‌شود

ρ_D = جرم مخصوص افزودنی معدنی بر حسب kg/dm^3

در ویرایش تجدید نظر شده جدید رابطه حجم مطلق تغییر نمود که در نتیجه لازم است رابطه حجم مطلق را به صورت زیر نوشت و حجم کل سنگدانه را بدست آورد. در این حالت نیازی به استفاده از چگالی متوسط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک وجود ندارد.

$$V_{A_{SSD}} = \left(1000 - \frac{c}{\rho_c} - \frac{w_f}{\rho_w} - \frac{D}{\rho_D} - V_a \right)$$

۴-۵-۱- فرض مقدار درصد هوای غیرعمدی موجود در بتن با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه بتن و روانی آن طبق جدول ۳-۴ متن اصلی روش ملی (جدول ۴-۱۰) انجام می‌شود. برای حداکثر اندازه‌های ۹/۵ تا ۳۸ میلی متر، حداکثر و حداقل درصد حجم هوا ۳ تا ۰/۵ درصد منظور شده است. مسلماً با افزایش روانی بتن می‌توان درصد هوای غیرعمدی محبوس در بتن را کمتر در نظر گرفت. درصد هوا باید در ۱۰ ضرب شود و حجم هوا بر حسب دسی مترمکعب در رابطه حجم مطلق قرار گیرد.

جدول ۴-۱۰ مقدار درصد هوای ناخواسته در بتن (۷۸)

حد اکثر اندازه سنگدانه (mm)	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵	۳۸
درصد هوای ناخواسته	۱/۵-۳	۱/۲۵-۲/۵	۱-۲	۰/۷۵-۱/۵	۰/۵-۱

۴-۵-۲- در صورتی که قرار باشد درصد حباب هوای عمدی مورد نظر به کمک مواد حباب‌زا بوجود آید، لازم است حجم هوای مورد نظر را در این رابطه حجم مطلق قرار داد. در این حالت نیازی به منظور کردن حجم افزودنی حباب‌زا در رابطه مزبور نمی‌باشد. به هر حال حجم هوای مورد نظر مجموع حجم حباب هوای عمدی و غیر عمدی موجود در بتن خواهد بود.

۴-۵-۳- چگالی ذرات سیمان و افزودنی‌های پودری معدنی باید طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده در رابطه حجم مطلق قرار داده شود. در صورتی که این مقادیر به کمک آزمایش تعیین نشده باشد، می‌توان از حدود مقادیر تقریبی جدول ۴-۱۱ استفاده نمود و مقدار فرضی را در رابطه حجم مطلق قرار داد. در این صورت ممکن است تغییر ناچیزی در مقدار سنگدانه بتن حاصل شود که قابل اغماض است.

جدول ۴-۱۱- مقادیر تقریبی چگالی انواع سیمان و مواد پودری معدنی

نوع سیمان	محدوده چگالی فرضی kg/dm^3	نوع ماده پودری معدنی	محدوده چگالی فرضی kg/dm^3
پرتلند نوع ۱ (انواع رده‌ها)	۳/۰۵-۳/۱۰	پودر پوزولان طبیعی (توف)	۲/۵۰-۲/۶۰
پرتلند نوع ۲	۳/۱۰-۳/۱۵	پودر سرباره کوره آهنگدازی	۲/۷۰-۲/۸۰
پرتلند نوع ۳	۳/۰۵-۳/۱۰	پودر سرباره کوره فولاد سازی	۲/۸-۳/۲۰
پرتلند نوع ۴	۳/۱۵-۳/۲۰	پودر سرباره کوره مسگدازی	۳/۸۰-۴/۰۰
پرتلند نوع ۵	۳/۲۰-۳/۲۵	دوده سیلیسی	۲/۲۰-۲/۳۰
پرتلند سفید	۳/۰۰-۳/۰۵	خاکستر بادی	۲/۲۰-۲/۴۰
پرتلند پوزولانی	۳/۰۵-۳/۱۰	پودر سنگهای آهکی	۲/۵۰-۲/۷۰
پرتلند پوزولانی ویژه	۳/۰۰-۳/۰۵	پودر سنگهای سیلیسی (کوارتزی)	۲/۵۰-۲/۶۵
پرتلند سرباره‌ای	۳/۰۰-۳/۰۵	متاکائولن	۲/۲-۲/۴
پرتلند سرباره‌ای ضدسولفات	۲/۹۵-۳/۰۰	خاکستر پوسته برنج	۲/۲-۲/۴
پرتلند آهکی	۳/۰۵-۳/۱۰		

۴-۵-۴- در صورتی که قرار باشد مجموع وزن مواد سیمانی (چسباننده) در رابطه حجم مطلق بکار رود، لازم است میانگین وزنی چگالی ذرات سیمان و مواد پودری معدنی محاسبه گردد و در رابطه حجم مطلق قرار داده شود.

$$\rho_B = \frac{1}{\frac{P_C}{\rho_C} + \frac{P_P}{\rho_P} + \dots}$$

که در آن:

ρ_B : چگالی متوسط مواد چسباننده (سیمانی)

P_C و P_P : سهم هر یک از مواد چسباننده در کل مواد سیمانی (سیمان، ماده پودری معدنی)

ρ_C و ρ_P : چگالی ذرات سیمان و مواد پودری معدنی

اگر نسبت مواد پودری معدنی به سیمان داده شده باشد، لازم است سهم هر یک در کل مواد چسباننده (مواد سیمانی) بدست آید و سپس از این سهم‌ها در رابطه فوق استفاده گردد.

۴-۵-۵- معمولاً به دلیل مقدار و حجم کم مواد افزودنی شیمیایی مانند زودگیرکننده، دیرگیرکننده، روان‌کننده و غیره، حجم آن را در محاسبه مقدار سنگدانه منظور نمی‌کنند، اما می‌توان با داشتن مقدار و چگالی این مواد، حجم مطلق آن را بدست آورد. چگالی این مواد را با آزمایش بدست می‌آورند، اما با استفاده از اطلاعات موجود در راهنمای مصرف افزودنی می‌توان چگالی اظهار شده توسط سازنده را بکار برد.

۴-۵-۶- پس از تعیین مقدار کل جرم سنگدانه اشباع با سطح خشک بتن، با توجه به سهم هر یک از سنگدانه‌ها در مخلوط سنگدانه، مقدار هر سنگدانه به صورت اشباع با سطح خشک بدست می‌آید (A_{SSDi}).

در صورتیکه حجم کل سنگدانه بدست آمده باشد با توجه به سهم حجمی هر یک می‌توان حجم هر یک از سنگدانه‌ها را بدست آورد. سپس با ضرب چگالی هر یک از سنگدانه‌ها در حجم آن می‌توان جرم سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک را به تفکیک تعیین نمود.

۴-۵-۷- جرم یک مترمکعب بتن متراکم تازه با درصد هوای فرضی را می‌توان محاسبه نمود. بدیهی است جرم یک مترمکعب بتن، حاصل جمع مقادیر سیمان، مواد پودری معدنی، سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک، آب آزاد و مواد افزودنی شیمیایی آن می‌باشد.

$$C+P+A_{SSD}+W_f+D=G_B$$

در محاسبه فوق می توان بجای آب آزاد، آب کل را قرار داد که در این حالت بجای جرم سنگدانه های اشباع با سطح خشک، جرم سنگدانه کاملاً خشک بکار می رود.

۴-۵-۸- با داشتن مقدار هر یک از سنگدانه ها به صورت اشباع با سطح خشک و ظرفیت جذب آب آن ها می توان مقدار سنگدانه های کاملاً خشک و آب موجود در آن ها را برای رسیدن به حالت اشباع بدست آورد.

$$A_{di} = \frac{A_{SSDi}}{1 + a_{ci}}$$

که در آن:

A_{di} : وزن سنگدانه به صورت کاملاً خشک بر حسب kg/m^3

A_{SSDi} : وزن سنگدانه به صورت اشباع با سطح خشک

a_{ci} : ظرفیت جذب آب سنگدانه (به صورت اعشاری)

۴-۵-۹- مقدار آب کل بتن برابر است با مقدار آب آزاد به اضافه آب موجود در سنگدانه های اشباع با سطح خشک بتن. در مواردی که آب کل داده می شود سنگدانه ها به صورت کاملاً خشک مطرح می گردد.

$$W_t = W_f + (A_{SSD} - A_d)$$

۴-۵-۱۰- استفاده از آب آزاد و سنگدانه های اشباع با سطح خشک در کارگاه و آزمایشگاه عملاً مقدور نمی باشد زیرا لازم است سنگدانه ها به صورت اشباع با سطح خشک باشد که رسانیدن سنگدانه ها به این حالت در حجم زیاد امکان ناپذیر جلوه می کند. بنابر این سعی می شود مقادیر آب کل و مقادیر سنگدانه کاملاً خشک، ارائه شود تا بتوان با تعیین رطوبت سنگدانه در کارگاه یا آزمایشگاه به سهولت مقدار آب مصرفی و سنگدانه مرطوب مصرفی را بدست آورد. البته می توان با داشتن ظرفیت جذب آب نیز به همراه سنگدانه SSD و رطوبت سنگدانه در آزمایشگاه و کارگاه مقادیر آب مصرفی و سنگدانه مرطوب مصرفی را بدست آورد؛ اما احتمال اشتباه زیاد خواهد شد. در آزمایشگاه می توان سنگدانه ها را کاملاً خشک نمود که این کار نیز توصیه نمی شود اما در کارگاه امکان این عمل فراهم نیست.

۴-۵-۱۱- به هر حال مقادیر بدست آمده در پایان این مرحله منجر به تهیه طرح مخلوط اولیه می گردد و نمی تواند طرح مخلوط نهایی باشد مگر این که با ساخت مخلوط آزمون و اصلاح یا تعدیل طرح مخلوط اولیه به این نتیجه برسیم.

پیوست ۱: ساخت مخلوط آزمون و اصلاح طرح مخلوط اولیه

پ ۱-۱- محاسبات قبلی منجر به تهیه طرح مخلوط اولیه خواهد شد. برای دستیابی به طرح مخلوط نهایی لازم است مخلوط آزمایشی با رعایت کلیه نکات و با دقت کامل در آزمایشگاه ساخته شود. به این منظور باید با تعیین درصد رطوبت سنگدانه‌ها و تنظیم و تعدیل مقادیر آب و سنگدانه، یک مخلوط آزمایشی (آزمون) در آزمایشگاه به صورت وزنی ساخته شود و ویژگی‌های مورد نظر بررسی گردد.

پ ۱-۲- معمولاً بررسی کارآیی، آب انداختن، جداسازی، بافت دانه‌بندی و ظاهر بتن، وزن مخصوص بتن متراکم تازه توصیه می‌شود. هم چنین لازم است نمونه‌هایی برای کنترل مقاومت بتن در سن مورد نظر تهیه شود و مقاومت حداقل سه آزمون عمل آمده در آزمایشگاه در شرایط استاندارد در سن مورد نظر مقاومت مشخصه بدست آید. برای سنین دیگر انجام آزمایش بر سه آزمون الزامی نیست و می‌توان دو آزمون را مورد آزمایش قرار داد. ضمناً در صورت لزوم می‌توان آزمایش‌های پایایی را نیز به انجام رسانید تا در مورد عملکرد بتن اطمینان حاصل نمود. با بررسی نتایج بدست آمده، چنان چه همه خواسته‌ها برآورده شود، طرح مخلوط نهایی همان طرح اولیه است. اما معمولاً همه خواسته‌ها برآورده نمی‌شود و لازم است با تغییراتی در مقادیر اجزاء و نسبت‌ها و با رعایت همه نکات مطروحه و بکارگیری رابطه حجم مطلق، به طرح مخلوط نهایی دست یابیم. این تغییرات می‌تواند شامل موارد زیر باشد که به همراه توصیه‌های لازم ارائه شده است.

پ ۱-۲-۱- عدم دستیابی به روانی مورد نظر

اگر روانی مورد نظر حاصل نگردد ساده‌ترین راه حل تغییر مقدار آب آزاد طرح اولیه می‌باشد. بدیهی است راههای دیگری نیز وجود دارد که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شده است. در هر صورت با اعمال این تغییرات لازم است یکبار دیگر مراحل طرح مخلوط تکرار شود و با استفاده از رابطه حجم مطلق، مقدار سنگدانه‌ها مجدداً بدست آید. اگر آزمایش اسلامپ به عنوان آزمایش کنترل روانی بکار گرفته شود، مقدار تغییر آب آزاد با رابطه زیر قابل محاسبه است که صرفاً جنبه راهنمایی دارد.

$$\text{تغییر آب آزاد بتن} = N (S_a - S_0)$$

که در آن S_a مقدار روانی فرض شده و S_0 روانی بدست آمده بر حسب mm می‌باشد و N

بین ۰/۱ تا ۰/۳ خواهد بود. چنان چه اسلامپ (روانی) بدست آمده کمتر از ۴۰ میلی متر باشد مقدار N برابر ۰/۳ و اگر روانی حاصله بیشتر از ۱۶۰ میلی متر بدست آید مقدار N برابر ۰/۱ منظور می شود. در فاصله ۴۰ تا ۱۶۰ میلی متر مقدار N متناسباً بین ۰/۳ تا ۰/۱ انتخاب می گردد. در صورتی که اسلامپ بدست آمده بیش از ۲۱۰ میلی متر باشد مقدار N را می توان ۰/۰۵ فرض نمود مشروط به این که مقدار روانی مطلوب از ۱۶۰ میلی متر کمتر نباشد.

با توجه به ارائه منحنی های مقدار آب برای یک اسلامپ مشخص (متوسط سطح کارایی موردنظر) در ویرایش جدید، می توان با توجه به روانی بدست آمده منحنی های مقدار آب را برای طرح مزبور واسنجی کرد و مقدار جدید آب برای دستیابی به روانی مطلوب را بدست آورد.

پ ۱-۲-۲- آب انداختن بتن

برای کاهش آب انداختن، اقداماتی مانند کاهش کارایی، کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، افزایش ریزی در بافت دانه بندی (کاهش مدول نرمی مخلوط سنگدانه)، افزایش سیمان یا مواد چسباننده، بکارگیری سنگدانه شکسته، کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مواد پودری می تواند مؤثر واقع شود. طراح مخلوط می تواند با در نظر گرفتن خواسته های مورد نظر یکی از تغییرات یا ترکیبی از آن ها را به مرحله اجرا درآورد تا بتن دچار آب انداختن نگردد.

پ ۱-۲-۳- جداسدگی در بتن

اگر جداسدگی در بتن مشاهده شود می توان با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، افزایش ریزی بافت دانه بندی، افزایش سیمان یا مواد چسباننده، افزایش مواد پودری، کاهش کارایی و یا کاهش نسبت آب به سیمان و یا ترکیبی از موارد فوق آن را مهار نمود. استفاده از مواد افزودنی لزجت زا (VMA) از جمله اقداماتی است که معمولاً برای جلوگیری از جداسدگی بتن های خیلی روان یا خود تراکم بکار گرفته می شود. این کار وقتی انجام می شود که نتوان به خوبی از سایر راه حل های ذکر شده بهره گیری نمود.

پ ۱-۲-۴- خشن یا درشت بافت بودن بتن

اگر بافت دانه بندی، درشت به نظر آید می توان با تغییر در منحنی دانه بندی، سهم سنگدانه ریز (ماسه) را بیشتر نمود و یا از ماسه های ریزتری استفاده کرد. گاه خشن بودن یا پمپ نشدن مطلوب بتن با کاهش شن ریز (ذرات ۹/۵-۴/۷۵ میلی متر) اصلاح می شود.

پ ۱-۲-۵- عدم انطباق وزن مخصوص محاسباتی با وزن مخصوص واقعی

اگر وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه برای مخلوط آزمایشی بیش از یک درصد با مقدار محاسباتی اختلاف داشته باشد می‌توان با کنترل موارد زیر منشأ اختلاف را بررسی نمود.

- تعیین مجدد چگالی و ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها
 - تعیین چگالی سیمان و مواد چسباننده، افزودنی و مواد پودری در صورتی که قبلاً تعیین نشده باشد و یا کنترل مجدد آن‌ها
 - کنترل درصدهای بتن (در صورت عدم تعیین آن در ساخت مخلوط آزمایشی) و مقایسه با مقادیر فرض شده
 - کنترل ترازوها و باسکول‌ها و حجم پیمانه تعیین وزن مخصوص بتن
- به هر حال در روش طرح اختلاط بتن بر اساس رابطه حجم مطلق، وزن مخصوص بتن محاسباتی و بدست آمده باید از نزدیکی خوبی با یکدیگر برخوردار باشند.

پ ۱-۲-۶- درصد هوای بتن

- در صورتی که هوای بتن فرض شده اعم از عمدی یا ناخواسته حاصل نشود می‌توان با توجه به موارد زیر عمل نمود.
- اگر مواد افزودنی (بجز حباب ساز) بکار رفته باشد احتمال حباب سازی داده می‌شود. به ویژه برخی مواد روان‌کننده حباب‌زایی نیز دارند.
 - اگر مواد حباب‌ساز به کار رود، باید در مقدار آن تجدیدنظر نمود. به هر حال رواداری مجاز در آیین نامه‌ها باید رعایت شود.

پ ۱-۲-۷- اختلاف مقاومت فشاری مورد نظر و بدست آمده

اگر مقاومت فشاری متوسط مخلوط آزمایشی اختلافی بیش از ۵ درصد با مقاومت میانگین (هدف) طرح مخلوط داشته باشد لازم است تعدیل در طرح را پیش‌بینی نمود. مشروط بر اینکه طرح مزبور دوام محور نباشد و محدودیت نسبت آب به سیمان تعیین کننده وجود نداشته باشد.

کاهش مقاومت معمولاً با کاهش نسبت آب به سیمان جبران می‌شود و در درجه اول به سایر نسبت‌ها و مقادیر اجزاء توجهی معطوف نمی‌گردد، مگر این که اختلاف بسیار زیاد باشد و احساس نماییم این اختلاف می‌تواند به واسطه نوع سنگدانه‌ها و یا نوع سیمان

حاصل شده باشد و به سادگی اصلاح نشود. در این حالت مجبور به تغییر نوع سنگدانه یا سیمان هستیم. در صورت وجود اختلاف در مقاومت مورد نظر و مقاومت حاصله (بیش از ۵ درصد) اگر از منحنی یا رابطه خاصی برای تعیین نسبت آب به سیمان برای دستیابی به مقاومت مورد نظر در طرح استفاده کرده‌ایم لازم است با توجه به نسبت آب به سیمان موجود، نقطه متناظر با مقاومت حاصله را بدست آوریم و یک منحنی به موازات منحنی اولیه رسم نماییم. سپس با توجه به مقاومت هدف، نسبت آب به سیمان جدید طرح را تعیین می‌کنیم. بهتر است از ابتدا با سه نسبت آب به سیمان نزدیک به هم مخلوط‌های آزمایشی را ساخت تا در سن موردنظر بتوان طرح مناسب را برگزید.

در صورتی که نسبت آب به سیمان اولیه را فرض نموده‌ایم و مبنای تجربی دارد می‌توان برای دستیابی به مقاومت مورد نظر از رابطه زیر به عنوان راهنما استفاده نمود و نسبت آب به سیمان را تعدیل کرد.

$$\left(\frac{W}{C}\right)_n = \left(\frac{W}{C}\right)_i + \left(\frac{W}{C}\right)_i \times \left(\frac{f_o - f_{cm}}{f_{cm}}\right)$$

که در آن $\left(\frac{W}{C}\right)_n$ نسبت آب به سیمان جدید، $\left(\frac{W}{C}\right)_i$ نسبت آب به سیمان اولیه و f_o مقاومت فشاری متوسط مخلوط آزمایشی بدست آمده و f_{cm} مقاومت میانگین هدف می‌باشد. همچنین می‌توان نسبت آب به سیمان اصلاح شده (جدید) را با واسنجی منحنی‌های مقاومت - نسبت به آب به سیمان بدست آورد.

پ ۱-۲-۸- عدم دستیابی به دوام موردنظر (دوام مشخصه با حاشیه امنیت لازم)

اگر مشخصاتی در مورد دوام بتن یا سایر مقاومت‌ها (کششی، خمشی، ضربه‌ای، سایشی و ...) زمان گیرش، افت روانی و سایر ویژگی‌ها مانند خصوصیات ارتجاعی، تغییر حجم در طول زمان، کرنش، خستگی و غیره مطرح باشد لازم است نمونه‌های مخلوط آزمایشی تحت آزمایش مورد نظر قرار گیرد تا مطمئن شویم به اهداف طرح دست یافته‌ایم. به هر حال در صورت عدم دستیابی به خواسته‌های مورد نظر تعدیل در طرح مخلوط ضروری است. لازم به ذکر است که اگر طرح مخلوط دوام محور باشد و مقاومت حاصله به مراتب از مقاومت هدف بیشتر باشد، هیچ گونه تعدیل یا اصلاحی در نسبت آب به سیمان نباید ایجاد گردد.

از آن جا که اصلاح نسبت آب به سیمان عملاً در سنی بیشتر از ۲۸ روز انجام می گردد، ممکن است ارائه طرح مخلوط نهایی به طول انجامد. بنابر این توصیه می شود از ابتدا سه طرح مخلوط با سه نسبت آب به سیمان مختلف تهیه شود. اگر نسبت آب به سیمان طرح مخلوط اولیه را $\pm 0/02$ تغییر دهیم و مقادیر اجزاء این مخلوطها را بدست آوریم و مخلوط آزمون بسازیم، در سن مقرر می توان در صورت نیاز به اصلاح و تعدیل، نهایی کردن طرح را به سرعت به انجام رسانید.

در پایان باید مجدداً متذکر شد پس از اعمال تعدیلها و تغییرات مورد نظر، مخلوط نهایی حاصل می شود و بهتر است مجدداً مخلوط آزمایشی دیگری ساخته شود و ویژگیهای مطلوب کنترل گردد. این کار در پروژههای با اهمیت توصیه می شود.

پیوست ۲: راهنمای خواسته‌های بتن و داده‌های مورد نیاز طرح مخلوط بتن

در یک طرح مخلوط بتن، نیازهای پروژه در ارتباط با بتن باید مد نظر قرار گیرد. این نیازها و خواسته‌ها ممکن است محدود یا بسیار متنوع باشند. برخی از این نیازها بشرح زیر هستند که مسلماً باید در شروع کار طرح اختلاط فهرست گردند.

پ ۲-۱- خواسته‌ها

- مقاومت مشخصه بتن در سن معین و مقرر با توجه به شکل و اندازه نمونه
- انحراف معیار مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده در کارگاه (محاسبه شده بر اساس آزمایش‌های مقاومتی انجام شده یا فرضی با توجه به شرایط ساخت و نظارت موجود در کارگاه)
- کارآیی بتن در زمان مشخص پس از پایان اختلاط با توجه به نوع آزمایش کارآیی مورد نظر و همچنین بلافاصله پس از پایان اختلاط
- بافت دانه‌بندی و ظاهر و نمای بتن مطلوب
- ویژگی‌های دوام و پایایی بتن در شرایط محیطی موجود و رویارو با عوامل زیان‌آور شامل: جذب آب، نفوذپذیری در برابر آب و یون کلرید، مقاومت ویژه الکتریکی و ...
- ویژگی‌های خاص بتن تازه مانند آب انداختن، جدا شدگی، جمع‌شدگی و افت روانی، زمان گیرش اولیه و نهایی
- محدودیت‌های خاص در ارتباط با حداکثر اندازه سنگدانه مجاز، انواع سیمان مصرفی مجاز، انواع افزودنی مجاز، عیار سیمان مجاز و مواد چسباننده، زمان گیرش بتن، چگالی بتن تازه یا سخت شده، درصد حباب هوا و ...

پ ۲-۲- داده‌های مورد نیاز

با توجه به خواسته‌های پروژه در ارتباط با بتن، مشخص بودن داده‌های زیر ضرورت دارد که برخی از آنها با انجام آزمایش بر روی اجزاء بتن بدست می‌آید.

پ ۲-۲-۱- داده‌ها و اطلاعات مربوط به سنگدانه

- حداکثر اندازه اسمی سنگدانه درشت بکاررفته در بتن طبق تعریف آیین‌نامه بتن ایران (آبا) و ضوابط مورد نظر

- دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت دانه و ریزدانه مصرفی به تفکیک
- شکل و درصد شکستگی تقریبی سنگدانه‌ها (اختیاری) و ضریب تطویل و تورق (کشیدگی و پولکی بودن)
- چگالی اشباع با سطح خشک سنگدانه‌های درشت و ریزدانه
- ظرفیت جذب آب سنگدانه‌های درشت و ریز دانه

پ ۲-۲-۲- داده‌ها و اطلاعات مربوط به سیمان

- نوع سیمان مصرفی و مواد چسباننده بکار رفته
 - نوع افزودنی مصرفی
 - مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد (اختیاری)
 - ویژگی‌های افزودنی مورد نظر
 - چگالی دانه‌های سیمان یا مواد چسباننده (اختیاری)
 - چگالی افزودنی‌های پودری معدنی یا شیمیایی (اختیاری)
- اطلاعات و داده‌های فوق با توجه به انجام آزمایش و یا فرض آن‌ها باید در طرح مخلوط بتن بکار رود.

پیوست ۳: راهنمای ارائه طرح مخلوط بتن

برای ارائه یک طرح اختلاط بتن بایستی به موارد زیر اشاره شود تا یک طرح مخلوط را بتوان کامل محسوب کرد.

پ ۳-۱- اطلاعات عمومی

- عنوان پروژه، کارفرما، مشاور، سازنده (در صورت مشخص بودن) و محل اجرای پروژه
- درخواست کننده طرح اختلاط و ارسال کننده نمونه‌های مصالح و اجزاء بتن به همراه نام فرد نمونه‌گیر
- نام کارگاه یا کارخانه تولید کننده اجزاء بتن (سنگدانه‌ها، سیمان، مواد چسباننده پودری، موادافزودنی و آب)

پ ۳-۲- اطلاعات مربوط به تولید کنندگان اجزاء بتن

- نام سازه و قطعه‌ای که بتن در آن ریخته می‌شود (نام سازه مانند سیلو، سد، تونل، برج، ساختمان به همراه نام قطعه شامل مواردی مانند شالوده، تیر، ستون، دیوار، دال سقف، دال کف و ...)
- نوع بتن (ساده یا غیر مسلح، مسلح، پیش تنیده، سبک، سنگین، معمولی، حباب‌دار، خودتراکم، پمپی، الیافی، پیش آکنده و ...)
- وسیله اختلاط بتن و نوع سنجش مقادیر اجزاء آن و سطح کنترل کیفی در ساخت بتن در کارگاه مورد نظر
- وسیله یا وسایل حمل و ریختن و تراکم بتن

پ ۳-۳- اطلاعات مربوط به ویژگی‌های بتن مورد نظر

- شرایط محیطی رویارو با بتن و یا تماس با مواد زیان‌آور (شرایط اقلیمی، مقدار سولفات و یون کلرید در آب و خاک و ...)
- ذکر نیازهای بتن از نظر دوام، نفوذپذیری، جذب آب، عبور جریان و مقاومت الکتریکی و غیره به همراه محدودیت‌ها و استانداردها و آیین‌نامه‌های موردنظر
- مقاومت مشخصه بتن (به همراه ذکر شکل و ابعاد نمونه و سن مورد نظر)

- انحراف معیار فرضی یا بدست آمده و مرجع آن و یا حاشیه امنیت فرض شده
- مقاومت هدف (میانگین طرح اختلاط) بتن با ذکر آیین‌نامه مورد نظر و روابط آن
- کارآیی مطلوب (با ذکر نحوه مشخص نمودن آن) به‌مراه فاصله زمانی آزمایش تا پایان اختلاط
- درصد هوای بتن به صورت فرضی (ناخواسته یا عمدی به‌مراه نوع آن)
- نوع بتن از نظر بافت دانه‌بندی، آب انداختن، جداشدگی، ظاهر و نمای بتن و ...
- حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان، حداقل و حداکثر عیار سیمان مجاز، حداقل و حداکثر مجاز هوای عمدی برای دستیابی به دوام مورد نظر به‌مراه مرجع تعیین آن
- حداکثر اندازه مجاز سنگدانه و نحوه تعیین آن با ذکر مرجع
- حداقل پوشش بتنی روی میلگردها در صورت مسلح بودن) با ذکر مرجع
- انواع سیمان مصرفی مجاز در پروژه
- ذکر محدودیت‌های مختلف موردنیاز شامل گیرش بتن، افت اسلامپ، چگالی یا وزن مخصوص بتن، شکل سنگدانه‌ها و ...

پ۳-۴- اطلاعات مربوط به سنگدانه

- کارگاه تولید کننده سنگدانه‌ها و در صورت امکان ذکر نام معدن سنگدانه‌ها به تفکیک
- حداکثر اندازه اسمی سنگدانه مصرفی و ذکر نوع سنگدانه مصرفی (طبیعی یا مصنوعی، سبک، معمولی یا سنگین معدنی یا آلی)
- ذکر شکل و درصد شکستگی تقریبی سنگدانه‌ها و ضریب تطویل و تورق آن‌ها به تفکیک اندازه
- ارائه دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی (به تفکیک) و ضریب نرمی آن‌ها و ذکر حداکثر اندازه آن
- درصد گذشته از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر برای سنگدانه‌های مختلف مصرفی
- چگالی اشباع با سطح خشک و ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها به تفکیک
- وزن مخصوص انبوهی سنگدانه‌های خشک و درصد افزایش حجم یا چگالی انبوهی خشک ماسه در رطوبت‌های مختلف (در صورت نیاز به ساخت بتن به صورت حجمی و یا پیمانه کردن اجزاء)
- ارائه نتایج مواد زیان آور سنگدانه‌ها (در صورت درخواست متقاضی)

پ ۳-۵- اطلاعات مربوط به سیمان

- نام کارخانه تولید کننده سیمان
- نوع سیمان مصرفی در طرح (در صورت تقاضا ذکر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان)
- چگالی دانه‌های سیمان (به صورت فرضی یا تعیین شده در آزمایشگاه)
- وزن مخصوص انبوهی سیمان به صورت لرزیده یا نلرزیده (در صورت ساخت بتن در کارگاه با روش پیمانانه کردن حجمی)
- مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد (در صورت تقاضا)

پ ۳-۶- اطلاعات مربوط به افزودنی‌ها

- نام تولید کننده و یا فروشنده مواد افزودنی
- نوع افزودنی‌های مصرفی (شیمیایی یا پودرهای معدنی چسباننده)
- ذکر مشخصات افزودنی بر اساس اظهارات تولید کننده
- چگالی افزودنی‌های مصرفی (به صورت فرضی یا تعیین شده در آزمایشگاه)
- وزن مخصوص انبوهی افزودنی پودری لرزیده یا نلرزیده (در صورت ساخت بتن در کارگاه با روش پیمانانه کردن حجمی)

پ ۳-۷- اطلاعات مربوط به آب

- محل تأمین آب
- ذکر ویژگی‌های آب در صورت غیر قابل شرب بودن (شامل PH، مواد معلق جامد، مواد جامد محلول در آب، مقدار یون سولفات SO_4 ، مقدار یون کلرید CL، مقدار معادل قلیایی، نسبت مقاومت فشاری ملات با آب مصرفی به ملات با آب مقطر، اختلاف زمان گیرش خمیر سیمان حاوی آب مصرفی و آب مقطر و اختلاف انبساط خمیر سیمان حاوی آب مصرفی با حد مجاز)

پ ۳-۸- اطلاعات نهایی مقادیر و نسبت اجزاء طرح مخلوط

- نسبت آب به سیمان یا نسبت آب به مواد چسباننده
- آب آزاد (وزنی یا حجمی)

- عیار سیمان بتن (به صورت وزنی و در صورت ساخت بتن با پیماننه کردن به صورت حجمی)
- عیار مواد افزودنی (به صورت وزنی و در صورت ساخت بتن با پیماننه کردن به صورت حجمی)
- سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک به تفکیک (به صورت وزنی)
- آب کل بتن (وزنی یا حجمی)
- سنگدانه‌های خشک به تفکیک (به صورت وزنی و در صورت نیاز به صورت حجمی با ارائه حجم ماسه در رطوبت‌های مختلف)
- وزن مخصوص محاسباتی بتن متراکم تازه
- درصد هوای فرضی (در صورت وجود حباب هوای عمدی، مقدار آن ذکر شود)
- دانه‌بندی مخلوط سنگدانه بتن و سهم هر یک از سنگدانه‌ها در مخلوط سنگدانه

پ ۳-۹- اطلاعات مربوط به ویژگی‌های بتن حاصله از ساخت طرح مخلوط

- اسلامپ حاصله در زمان‌های مورد نظر (در صورتی که آزمایش‌های کارایی دیگری مدنظر باشد لازم است نتایج آن‌ها نیز قید شود)
- وزن مخصوص بدست آمده بتن متراکم تازه
- درصد هوای بتن و روش اندازه‌گیری آن
- دمای بتن
- زمان گیرش اولیه و نهایی بتن در شرایط مورد نظر با ذکر روش اندازه‌گیری (در صورت نیاز متقاضی)
- تشریح وضعیت ظاهری بتن و همچنین مواردی از قبیل آب انداختن، جداسازی، و ...
- مقاومت فشاری بتن در سن مورد نظر (مانند ۲۸ روزه) یا سایر سنن با ذکر شکل و اندازه آزمون‌ها و روش استاندارد مورد استفاده
- نتایج سایر آزمایش‌های مقاومتی، دوام، ویژگی‌های ارتجاعی و ... در سنن مورد نظر (مانند ۲۸ روزه) با ذکر شکل و اندازه آزمون و روش مورد استفاده (در صورت درخواست)

پیوست ۴: دستور آزمایش تعیین درصد شکستگی سنگدانه‌های درشت بتن (شکستگی معادل کلیه وجوه)

پ ۴-۱- تعریف و دامنه کاربرد

در این آزمایش درصد شکستگی معادل کلیه وجوه سنگدانه‌های درشت بزرگتر از ۴/۷۵ میلی متر (شن) بدست می‌آید تا در تعیین نسبت آب به سیمان طرح مخلوط بتن و یا در تعیین مقدار آب آزاد آن بکار رود. سنگدانه‌ها در این آزمایش دارای چهار وجه منظور می‌شود و سطوح جانبی آن به چهار وجه فرضی تقسیم می‌گردد و میانگین درصد شکستگی هر مجموعه سنگدانه درشت به صورت تقریبی قابل محاسبه است. برای درصد شکستگی سنگدانه‌های ریز، دستورالعملی وجود ندارد و به صورت نظری درصد شکستگی و تیزگوشه‌گی آن تخمین زده می‌شود.

پ ۴-۲- وسایل آزمایش

پ ۴-۲-۱- ترازو با ظرفیت ۱۰ کیلوگرم و دقت ۱ گرم

پ ۴-۲-۲- سینی یا ظروف مناسب برای جداسازی ذرات سنگدانه‌ها بر حسب میزان درصد شکستگی (۷ ظرف یا سینی)

پ ۴-۳- شرح آزمایش

پ ۴-۳-۱- مقدار نمونه آزمایشی تابع حداکثر اندازه سنگدانه مورد نظر می‌باشد. نمونه باید روی الک ۴/۷۵ میلی متر مانده باشد. به هر حال حداقل تعداد دانه‌ها در یک نمونه آزمایشی نباید از ۲۰۰ دانه کمتر باشد (بویژه برای سبکدانه‌ها و سنگین‌دانه‌ها). مقدار جرم حداقل سنگدانه‌ها بر حسب حداکثر اندازه آن‌ها در جدول پ ۴-۱ مشاهده می‌شود. خشک کردن نمونه‌ها در آون ضرورت ندارد و می‌توان از سنگدانه‌های مرطوب یا خیس استفاده کرد، اما نباید آبچکان باشد.

جدول پ-۴-۱- جرم حداقل سنگدانه بر حسب حداکثر اندازه

حداکثر اندازه شن (mm)	۳۸	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵
حداقل وزن نمونه آزمایشی *kg	۴	۲	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۲۵

* این مقادیر برای سنگدانه با چگالی معمولی است. برای سنگدانه سنگین یا سبکدانه‌ها این مقادیر متناسباً زیاد یا کم می‌شود اما به هر حال حداقل تعداد دانه‌ها ۲۰۰ عدد خواهد بود.

پ ۳-۳-۲- پس از توزین نمونه آزمایشی با دقت ۱ گرم و ثبت آن (W) و اطمینان از داشتن حداقل ۲۰۰ عدد دانه سنگی درشت‌تر از ۴/۷۵ میلی متر و ریختن آن در یک ظرف یا روی سطح میز، هر یک از دانه‌ها مورد بررسی چشمی (نظری) قرار می‌گیرد. سنگدانه‌ها به شش دسته مختلف تقسیم می‌شود و برای هر یک از آن‌ها ظرف یا سینی خاصی منظور می‌گردد.

دسته اول دانه‌هایی هستند که هیچ نوع شکستگی مشخص در آن دیده نمی‌شود. دسته دوم دانه‌هایی با شکستگی در حد یک چهارم سطوح جانبی یا کمتر است. دسته سوم دارای شکستگی تا حد نیمی از وجوه دانه‌ها و بیش از ربع وجوه می‌باشد. دسته چهارم از شکستگی به میزان تا حد سه چهارم سطوح جانبی دانه‌ها و بیش از نیمی از وجوه برخوردار است و در ظرف پنجم دانه‌هایی قرار می‌گیرد که کمتر از صد در صد وجوه آن و بیش از سه چهارم سطوح جانبی مربوطه دارای شکستگی می‌باشد و در نهایت در ظرف ششم صرفاً دانه‌هایی ریخته می‌شود که صد در صد وجوه آن دارای شکستگی است.

پ ۳-۳-۴- وزن دانه‌های هر ظرف با دقت ۱ گرم توزین می‌شود و ثبت می‌گردد (W_i).

پ ۴-۴- محاسبه درصد شکستگی معادل کلیه وجوه

$$\alpha_n = \frac{\frac{1}{8}(W_2) + \frac{3}{8}(W_3) + \frac{5}{8}(W_4) + \frac{7}{8}(W_5) + W_6}{W} \times 100\%$$

α_n = درصد شکستگی سنگدانه درشت مورد آزمایش

W_2 تا W_6 = وزن دانه‌های موجود در ظروف دوم تا ششم (به ترتیب)

W = وزن کل نمونه سنگدانه درشت

W_1 = وزن دانه‌های موجود در ظرف اول می‌باشد که حاوی شکستگی نیست و کاملاً گردگوشه می‌باشد.

روش دیگر برای محاسبه درصد شکستگی معادل، در ابتدا محاسبه درصد وزنی دانه‌های هر ظرف و سپس ضرب آن‌ها در ضرایب مربوطه می‌باشد.

$$\%m_i = \frac{W_i}{W} \times 100\%$$

$$a_n = \frac{m_2}{8} + \frac{3m_3}{8} + \frac{5m_4}{8} + \frac{7m_5}{8} + m_6 = \frac{m_2 + 3m_3 + 5m_4 + 7m_5 + 8m_6}{8}$$

پ ۴-۵- گزارش نتیجه نهایی

نتیجه نهایی را با تقریب ۵ درصد گزارش کنید. برای مثال اگر نتیجه بدست آمده $۶۳/۴$ درصد بدست آمد نتیجه ۶۵ درصد را گزارش نمایید.

پیوست ۵: راهنمای تعیین مقدار تقریبی آب آزاد بتن به صورت مستقیم بر اساس روابط پایه

مقدار آب آزاد بتن متراکم تازه (W_f) به صورت زیر بدست می آید.

$$W_f = \sum_{i=1}^n W_{ai} \left(\frac{\text{حجم مطلق مصالح در یک مترمکعب بتن}}{100} \right) \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

W_{ai} مقدار آب آزاد برای هر محدوده اندازه سنگدانه یا مواد پودری و چسباننده ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$)

در جدول پ-۱ مقدار W_a به ازاء هر ۱۰۰ لیتر حجم مطلق سنگدانه یا مواد پودری و چسباننده بتن با کارایی متوسط ارائه شده است.

جدول پ-۲ مقدار W_a برحسب کیلوگرم به ازای هر ۱۰۰ لیتر حجم مطلق* سنگدانه یا مواد پودری و چسباننده بتن با کارایی متوسط (رده اسلامپ S_2)

نوع مصالح	سیمان**	دوده سیلیسی**	خاکستر بادی		پوزولان طبیعی	
			معمولی**	ریز**	معمولی**	ریز**
W_a	۸۵-۱۰۰	۱۷۵-۲۰۰	۵۵-۸۵	۸۵-۱۰۰	۸۵-۱۰۰	۱۰۰-۱۱۵

محدوده سنگدانه (م.م)	۷۶-۱۵۲	۳۸-۷۶	۱۹-۳۸	۹/۵-۱۹	۴/۷۵-۹/۵	۲/۳۸-۴/۷۵
W_a	۳	۴	۵	۶	۷	۸
محدوده سنگدانه (م.م)	۱/۱۹-۲/۳۸	۰/۶-۱/۱۹	۰/۳-۰/۶	۰/۱۵-۰/۳	۰/۰۷۵-۰/۱۵	< ۰/۰۷۵**
W_a	۱۰	۱۳	۱۷	۳۵	۵۵	۸۵-۱۰۰

* حجم مطلق مصالح معادل جرم آنها تقسیم بر چگالی ذرات آنهاست

** بستگی به میزان ریزی (سطح ویزه) و شکل آنها دارد

کارایی متوسط اسلامپ ۵۰ تا ۹۰ میلیمتر است. برای کارایی بیشتر، مقدار آب در ضریب ۱ تا ۱/۲ (بسته به کارایی) ضرب می شود. برای کارایی کمتر، مقدار آب در ضریب ۱ تا ۰/۸ ضرب می گردد. مقادیر مندرج جدول پ-۲ سنگدانه های گردگوشه داده شده است. برای سنگدانه های کاملاً تیزگوشه و شکسته مقادیر جدول بسته به اینکه مربوط به سنگدانه درشت یا ریز باشد به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد اضافه می گردد. بافت سطحی سنگدانه ها و پولکی و کشیده یا سوزنی بودن آنها نیز بر مقدار آب موثر است.

پیوست ۶: ملاحظات خاص در طرح مخلوط بتن‌های ویژه

بتن‌های ویژه انواع گوناگونی دارد که در این رابطه می‌توان بتن‌های پمپی، ترمی (بتن‌ریزی زیر آب)، پاشیدنی، حبابدار، سنگین و سبکدانه را نام برد. در راهنما و در متن اصلی به طرح مخلوط بتن حبابدار اشاره شده است. برای سایر بتن‌های ویژه در این پیوست مواردی مطرح می‌گردد تا بتوان طرح مخلوط این بتن‌ها را به انجام رساند.

پ ۶-۱- ملاحظات خاص در طرح مخلوط بتن‌های پمپی

برخی محدودیت‌ها برای بتن پمپی وجود دارد که در آیین‌نامه‌ها یا مشخصات فنی بدان اشاره می‌شود. این محدودیت‌ها شامل ارتباط هندسی حداکثر اندازه سنگدانه و قطر داخلی لوله پمپ، روانی بتن، حداقل و حداکثر عیار سیمان، بافت دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها می‌باشد.

حداکثر اندازه سنگدانه بتن پمپی نباید بیشتر از یک سوم قطر داخلی لوله پمپ باشد (با رعایت سایر محدودیت‌های هندسی معمول). اسلامپ بتن پمپی بهتر است بیشتر از ۹۰ میلی متر باشد، هرچند بتن‌هایی با اسلامپ کمتر نیز قابل پمپ کردن است.

حداقل عیار سیمان برای بتن پمپی رده C_{16} و بیشتر با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۲۵ میلی متر، 270 kg/m^3 و حداکثر عیار سیمان (مواد سیمانی) در این حالت 420 kg/m^3 توصیه می‌شود. در صورتی که حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر شود مقدار سیمان افزایش می‌یابد. (طبق پیوست ۷) برای حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر بهتر است مجموع ذرات کوچکتر از $0/3$ میلی متر در بتن (شامل ماسه، مواد ریزدانه، سیمان و مواد پودری معدنی) در حالت عادی کمتر از ۴۲۵ و بیشتر از 520 kg/m^3 نباشد. با کوچکتر شدن حداکثر اندازه سنگدانه و افزایش روانی، مقادیر ذکر شده افزایش می‌یابد (طبق جداول پیوست ۷). بهتر است سنگدانه‌های ریز، گردگوشه باشد. سنگدانه‌های درشت می‌تواند گردگوشه یا تیزگوشه باشد. هم چنین برای بهتر پمپ کردن بتن با حداکثر اندازه فوق توصیه می‌شود از مقدار ذرات با اندازه میانی ($12/5 - 4/75$ میلی متر) کاسته شود تا حدی که به جداسازی بتن منجر نگردد و در محدوده دانه‌بندی مطلوب نیز واقع شود.

در پمپ کردن، وجود ذرات ریز چسبنده مانند سیمان و دوده سیلیسی ضروری است، اما

افزایش بیش از حد آن‌ها پمپ کردن را مشکل می‌کند. اگر دوده سیلیسی در طرح مخلوط وجود دارد، بهتر است حداکثر مواد سیمانی به ۴۰۰ محدود شود (برای حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر). ذرات ریز غیرچسبنده مانند ماسه‌های ریز و پودر سنگ، کمک بزرگی به پمپ کردن بتن می‌نماید. بافت دانه‌بندی بتن پمپی نباید خیلی درشت یا خیلی ریز باشد. در روش ملی، چنان چه دانه‌بندی سنگدانه بتن در وسط ناحیه (۱) و تاحدی نزدیک تر به منحنی B (n از ۰/۴ تا ۰/۵) قرار گیرد بتن پمپی بهتری حاصل می‌شود. به هر حال می‌توان بتن‌هایی با بافت دانه‌بندی ریزتر یا درشت تر را نیز پمپ کرد. استفاده از مواد روان کننده برای بتن پمپی توصیه می‌گردد. بهتر است این مواد بتواند روانی را به مدت بیشتری حفظ نماید. به هر حال با رعایت این موارد طرح مخلوط بتن پمپی با سایر بتن‌های معمولی تفاوت عمده‌ای ندارد.

پ ۶-۲- ملاحظات طرح مخلوط بتن ترمی

برای بتن‌های ترمی نیز محدودیت‌هایی ذکر می‌شود. این محدودیت‌ها شامل ارتباط هندسی حداکثر اندازه سنگدانه و قطر داخلی لوله ترمی، روانی بتن، حداقل و حداکثر عیار سیمان، بافت دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها می‌باشد.

حداکثر اندازه سنگدانه بتن ترمی نباید بیشتر از یک هشتم قطر داخلی لوله ترمی باشد و بهتر است به ۲۵ میلی متر محدود شود. اسلامپ بتن ترمی نباید کمتر از ۱۷۰ میلی متر باشد. بکارگیری بتن‌هایی با روانی بیش از ۱۷۰ میلی متر و حتی بتن‌های خودتراکم در این مورد توصیه می‌شود. در صورت استفاده از بتن خودتراکم، توصیه‌های مربوط به این نوع بتن رعایت گردد.

حداقل عیار مواد سیمانی برای بتن ترمی با حداکثر اندازه سنگدانه حدود ۲۵ میلی متر، 350 kg/m^3 و حداکثر عیار مواد سیمانی 425 kg/m^3 توصیه می‌شود. بدیهی است با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه این بتن‌ها می‌توان حداقل عیار مواد سیمانی و حداکثر آن را بالاتر برد. مجموع ذرات کوچکتر از ۰/۳ میلی متر برای حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر نباید کمتر از ۵۲۵ و بیشتر از 625 kg/m^3 باشد (با رعایت موارد مندرج در پیوست ۷).

مقدار آب آزاد با توجه به رده S_4 (اسلامپ ۲۱۰-۱۶۰ میلی متر) بدست می‌آید. برای اسلامپ بیشتر، افزایش آب ضرورت خواهد داشت.

مصرف سنگدانه‌های ریز گردگوشه توصیه می‌شود. بهتر است از سنگدانه درشت تیزگوشه یا نیمه‌شکسته استفاده گردد. مصرف ذرات ریز چسبنده ضروری است، اما افراط

در مصرف آن‌ها می‌تواند به روانی بتن لطمه بزند. وجود ماسه‌های ریز و پودر سنگ در این بتن‌ها توصیه می‌شود تا جداسازی کنترل گردد.

بافت دانه‌بندی بتن ترمی، بهتر است نسبتاً ریز باشد و توصیه می‌شود منحنی دانه‌بندی در نزدیکی منحنی B (n از ۰/۳ تا ۰/۴) باشد تا جداسازی محدود گردد. هرچه روانی مورد نظر بتن کمتر باشد می‌توان از دانه‌بندی درشت تری استفاده نمود. وقتی بتن ترمی به بتن خودتراکم نزدیک شود، باید بافت دانه‌بندی ریزتری بکار رود.

استفاده از مواد فوق‌روان‌کننده کندگیر نگهدارنده اسلامپ در بتن ترمی ضروری است. بهتر است حداکثر نسبت آب به سیمان بتن ترمی سازه‌ای به ۰/۴۵ محدود شود، مگر اینکه از اهمیت زیادی برخوردار نباشد.

استفاده از مواد اصلاح‌کننده لزجت (VMA) در این بتن‌ها توصیه می‌شود، بویژه در مواردی که روانی بتن بسیار زیاد باشد و به دلیل کمبود مواد چسبنده و ریزدانه امکان جداسازی وجود داشته باشد. با رعایت موارد فوق، طرح مخلوط بتن ترمی امکان‌پذیر است و اختلاف خاصی با طرح مخلوط بتن معمولی نخواهد داشت.

پ ۶-۳- طرح مخلوط بتن پاشیدنی

مانند هر بتن ویژه، محدودیت‌هایی برای بتن پاشیدنی نیز وجود دارد که به آن‌ها اشاره می‌گردد. حداکثر اندازه سنگدانه بتن پاشیدنی بهتر است کمتر از ۱۹ میلی متر باشد و معمولاً سعی می‌شود به ۱۲/۵ میلی متر محدود گردد و اغلب اوقات مقدار کوچکتری نیز انتخاب می‌شود. رعایت سایر محدودیت‌های هندسی نیز ضروری است. اسلامپ بتن پاشیدنی بهتر است بین ۵۰ تا ۹۰ میلی متر باشد.

حداقل عیار سیمان برای حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی متر، 300 kg/m^3 و حداکثر آن به 550 kg/m^3 محدود می‌شود. با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه این مقادیر افزایش می‌یابد.

بهتر است مجموع ذرات کوچکتر از ۰/۳ میلی متر در بتن پاشیدنی کمتر از ۵۲۵ و بیشتر از 625 kg/m^3 نباشد (برای حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی متر) که با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه این مقادیر افزایش می‌یابد. رعایت موارد مندرج در پیوست ۷ ضروری بنظر می‌رسد.

سنگدانه ریز می‌تواند گردگوشه یا تیزگوشه باشد. مصرف سنگدانه درشت تیزگوشه یا نیمه شکسته توصیه می‌شود.

وجود ذرات چسبنده کافی مانند سیمان و مواد پودری معدنی چسبناک بسیار ضروری

است. هم چنین وجود ماسه‌های ریز و پودر سنگ بسیار مفید می‌باشد. بافت دانه‌بندی بتن پاشیدنی باید ریز باشد و همواره بالاتر از منحنی B و پایین‌تر از منحنی C خواهد بود (n از ۰/۱ تا ۰/۳۵). اگر حداکثر اندازه کوچکتر از ۹/۵ میلی متر استفاده شود، می‌توان با توجه به رابطه اصلاح شده فولر- تامسون مندرج در بند ۴-۲-۱، منحنی دانه بندی مطلوب را بدست آورد. معمولاً مواد زودگیرکننده در بتن پاشیدنی مصرف می‌شود. ضمن این که از مواد روان کننده نیز می‌توان استفاده کرد. بهتر است حداکثر نسبت آب به سیمان بتن پاشیدنی سازه‌ای به ۰/۵ محدود شود، مگر اینکه مصرف سازه‌ای نداشته باشد و دوام آن نیز زیاد مهم نباشد. با رعایت این موارد مشکلی برای طرح مخلوط بتن پاشیدنی طبق روش ملی طرح مخلوط بتن وجود ندارد.

پ ۴-۶- طرح مخلوط بتن سنگین

طرح مخلوط بتن‌های سنگین که به صورت معمول و سنتی ساخته و ریخته می‌شوند، تفاوت چندانی با طرح مخلوط بتن با وزن مخصوص معمولی ندارد. در صورتی که لازم باشد برای جلوگیری از جداسدگی، روش بتن‌ریزی با سنگدانه‌های پیش آکنده بکار رود، روش طرح مخلوط متفاوتی نیاز است.

بالا بردن وزن مخصوص بتن، صرفاً با بکارگیری سنگدانه‌هایی با چگالی زیاد امکان‌پذیر است. هنگامی که از روش‌های معمولی برای ساخت و ریختن بتن استفاده می‌شود، می‌توان از سنگدانه‌های درشت و ریز سنگین استفاده نمود. اختلاف شدید بین چگالی سنگدانه‌های درشت و ریز می‌تواند به جداسدگی منجر شود. در این حالت روانی بتن بشدت محدود می‌گردد و لازم است کمتر از ۴۰ میلی‌متر باشد، اما روش ملی طرح مخلوط می‌تواند برای این بتن‌ها با رعایت برخی نکات بکار رود.

اگر چگالی سنگدانه‌های ریز با چگالی سنگدانه‌های درشت بیش از ۵ درصد اختلاف داشته باشند، لازم است برای منحنی‌های دانه‌بندی و تعیین سهم سنگدانه‌های آن‌ها نکاتی را منظور نمود. منحنی‌های دانه‌بندی، اصولاً بر اساس درصد‌های حجمی هستند که با فرض داشتن چگالی یکسان برای دانه‌های مختلف می‌توان این منحنی‌ها را به صورت درصد وزنی منظور کرد. بنابراین با در نظر گرفتن این منحنی‌ها سهم آن‌ها به صورت درصد حجمی سنگدانه درشت و ریز بدست می‌آید. با اعمال این سهم‌ها دانه‌بندی مخلوط حاصله مشخص می‌گردد و مدول ریزی حجمی عیناً مانند

مدول ریزی وزنی تعیین می‌شود و به کمک آن آب آزاد بتن محاسبه می‌گردد. می‌توان با توجه به رابطه حجم مطلق، حجم کل سنگدانه‌ها را بدست آورد و با داشتن سهم حجمی هر یک از آن‌ها، حجم هر نوع سنگدانه را تعیین نمود. بدین ترتیب با توجه به چگالی هر سنگدانه می‌توان وزن آنها را تعیین کرد.

پ ۵-۶- طرح مخلوط بتن پیش‌آکنده

اگر روش بتن‌ریزی پیش‌آکنده بکار رود، روش ملی طرح مخلوط بتن نمی‌تواند به شکل موجود مورد استفاده قرار گیرد. برای تهیه طرح مخلوط این نوع بتن، ابتدا وزن واحد حجم انبوه شن ریخته شده در پیمانه (قالب) به روش شل یا متراکم (بسته به روش جایدگی شن در قالب در حین اجرا) بدست می‌آید که همان وزن شن بتن در هر متر مکعب بر حسب کیلوگرم خواهد بود (G). اگر شن به صورت خشک یا اشباع با سطح خشک مورد استفاده قرار گیرد وزن آن به همان صورت بدست می‌آید. به هر حال اگر وزن شن خشک تعیین شود باید آن را به صورت اشباع با سطح خشک درآورد که عبارتست از:

$$G_{SSD} = G_d (1 + a_G)$$

$$G_{SSD} = \text{وزن شن اشباع با سطح خشک}$$

$$G_d = \text{وزن شن کاملاً خشک}$$

$$a_G = \text{ظرفیت جذب آب شن (به صورت اعشاری)}$$

با توجه به چگالی ذرات اشباع با سطح خشک این شن می‌توان پوکی (n) آن را بدست آورد.

$$n = 1 - \frac{G_{SSD}}{\rho_{GSSD}}$$

$$G_{SSD} = \text{وزن واحد حجم انبوهی به صورت اشباع با سطح خشک بر حسب } kg/m^3$$

$$\rho_{GSSD} = \text{چگالی ذرات اشباع با سطح خشک شن } kg/m^3$$

حجم ملات تزریقی به درون شن ریخته شده در قالب در هر متر مکعب معادل پوکی شن بر حسب مترمکعب خواهد بود. حال باید طرح مخلوط ملات تزریقی را بدست آورد. حداکثر اندازه اسمی ماسه ملات باید کمتر از یکدهم حداقل اندازه اسمی شن باشد. بدین ترتیب حداکثر اندازه ماسه مصرفی که کمتر از مقدار مجاز فوق می‌باشد، مشخص می‌گردد. با توجه به حداکثر اندازه ماسه و طبق رابطه ارائه شده در این راهنما، محدوده دانه‌بندی ماسه می‌تواند تعیین گردد و در نتیجه دانه‌بندی ماسه موردنظر با توجه به مصالح موجود یا ترکیب مصالح سنگی ریزدانه مشخص شود.

مقدار آب آزاد ملات طبق روش ملی یا پیوست راهنمای روش ملی برای تعیین مقدار آب آزاد بتن به صورت مستقیم جهت ایجاد روانی مطلوب بدست می‌آید و با توجه به نسبت آب به سیمان لازم برای دستیابی به مقاومت و دوام مورد نظر مشخص می‌شود و مقدار سیمان طرح محاسبه می‌شود. در نهایت مقدار ماسه با توجه به رابطه حجم مطلق محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب طرح مخلوط اولیه ملات تزریقی حاصل می‌گردد که باید ساخته شود و روانی و مقاومت آن کنترل گردد. روانی این ملات با قیف مخصوص طبق ASTM C939 بدست می‌آید. روانی ملات مزبور 22 ± 4 ثانیه توصیه می‌شود.

ملات حاصله باید در قالب مخصوص به داخل شن تزریق شود و ویژگی‌های بتن حاصله کنترل شود و پس از اصلاحات لازم، طرح مخلوط نهایی بتن (با سنگدانه) پیش‌آکنده بدست می‌آید. با کاهش روانی ملات باید فشار تزریق افزایش یابد. افزایش روانی ملات موجب می‌شود بتوان با سهولت بیشتری تزریق را به انجام رسانید.

شن مصرفی به صورت تک اندازه خواهد بود و بهتر است نسبت حداکثر اندازه اسمی شن به حداقل اندازه اسمی آن از ۲ بیشتر نباشد و در نهایت به ۳ محدود گردد. بهتر است حداکثر اندازه شن از ۲۰ میلی متر و حداقل اندازه آن از ۱۰ میلی متر کمتر نباشد. هم چنین بهتر است شن مصرفی تیز گوشه (شکسته) یا نیمه شکسته باشد و ماسه گرد گوشه ارجحیت دارد. حداقل عیار سیمان برای ملات با حداکثر اندازه ۲/۲۸ میلی متر ۵۵۰ و حداکثر عیار سیمان ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب توصیه می‌گردد که با کاهش حداکثر اندازه ماسه عملاً این مقادیر افزایش می‌یابد. دانه‌بندی ماسه مصرفی را می‌توان از رابطه اصلاح شده فولر-تامسون در بند ۴-۲-۱ بدست آورد.

پ ۶-۶- طرح مخلوط بتن سبکدانه و نیمه سبکدانه

در طرح مخلوط بتن سبکدانه عملاً تغییراتی باید ایجاد گردد و مسلماً آن چه در روش ملی وجود دارد نمی‌تواند جوابگو باشد. مشکلاتی که بر سر راه طرح مخلوط بتن سبکدانه یا نیمه سبکدانه و اجرای آن وجود دارد عبارتند از:

- تغییرات شدید مقاومت با توجه به نوع سنگدانه سبک درشت و ریز با نسبت آب به سیمان ثابت
- تعریف نسبت آب به سیمان در بتن سبکدانه و کنترل آن با توجه به جذب آب قابل توجه سبکدانه‌ها در طول زمان برخلاف سنگدانه معمولی
- جداسازی و روزدن سبکدانه‌های درشت و غیرهمگن شدن بتن بویژه در بتن‌هایی با

کارآیی زیاد

- تغییر روند جذب آب با توجه به رطوبت اولیه سبکدانه‌ها و ایجاد مشکل برای تعیین مقدار آب لازم جهت اختلاط با بتن
 - تغییر شدید کارآیی در طول زمان و مشکل تأمین کارآیی مناسب در زمان مورد نظر
- برای تعیین نسبت آب به سیمان با توجه به تجربیات و چگالی سنگدانه‌ها و استحکام آن، مقداری تخمین زده می‌شود تا بتوان به مقاومت و دوام مورد نظر رسید. در صورتی که ماسه معمولی بکار رود مقاومت‌ها افزایش می‌یابد.
- به علت تفاوت در چگالی سنگدانه‌ها، بویژه در بتن نیمه سبکدانه لازم است درصد‌های حجمی با توجه به منحنی دانه بندی بدست آید. مقدار آب آزاد طبق آن چه در روش ملی آمده است تعیین می‌شود.
- فرض می‌شود زمان گیرش بتن به صورت متوسط ۲ ساعت باشد. اما ظرفیت جذب آب نیم ساعته سبکدانه‌ها در آب تعیین می‌شود (طبق روش EN) که معادل جذب آب ۲ ساعته در بتن فرض می‌گردد، با فرض این که سبکدانه در ابتدا کاملاً خشک باشد. چگالی سبکدانه‌ها نیز در چنین حالتی تعیین می‌شود و از آن در محاسبات استفاده می‌گردد.
- پس از محاسبه حجم کل سنگدانه‌ها با استفاده از رابطه حجم مطلق، حجم کل سنگدانه‌ها بدست می‌آید. با در دست داشتن سهم حجمی هر یک از سنگدانه‌ها می‌توان حجم آنها را محاسبه نمود. سپس با استفاده از چگالی هر نوع سنگدانه می‌توان وزن آنها را تعیین کرد.

پ ۶-۷- طرح مخلوط بتن حباب دار

هر چند در روش ملی طرح مخلوط بتن و این راهنما، به طرح مخلوط بتن حبابدار اشاره شده است، اما در این قسمت توضیح بیشتری ارائه می‌گردد.

برای طرح مخلوط بتن حبابدار، ابتدا درصد حباب هوای عمدی با توجه به شرایط محیطی بهره‌برداری و حداکثر اندازه سنگدانه و طبق توصیه‌های آیین‌نامه مورد نظر یا مشخصات فنی پروژه فرض می‌گردد، که باید در نهایت حاصل شود. مسلماً مقدار هوای کل بتن با احتمال وجود هوای غیر عمدی، از مقدار حباب هوای عمدی بیشتر خواهد بود.

مقدار آب آزاد مخلوط بتن حبابدار، از آب آزاد بتن فاقد حباب هوا به میزان ۳/۵ تا ۴ درصد به ازاء هر یک درصد حباب هوای عمدی کمتر می‌باشد. برای مثال اگر ۳ درصد حباب هوای عمدی وجود داشته باشد در حدود ۱۰/۵ تا ۱۲ درصد از مقدار آب آزاد کاسته می‌شود.

نسبت آب به سیمان بتن حبابدار به ازاء هر یک درصد حباب عمدی در حدود ۴ تا ۵ درصد کمتر از نسبت آب به سیمان بتن بدون حباب هوا (معمولی) خواهد بود. برای مثال با توجه به وجود ۳ درصد حباب هوای عمدی در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از نسبت آب به سیمان بتن معمولی برای ایجاد مقاومت مورد نظر کاسته می‌شود. برای مثال اگر برای دستیابی به یک مقاومت معین، نسبت آب به سیمان ۰/۵ در بتن معمولی لازم باشد برای بتن حبابدار فوق این نسبت حدود ۰/۴۴ تا ۰/۴۲۵ خواهد بود.

همانگونه که در این راهنما آمده است با منظور نمودن حجم هوای موجود در بتن اعم از عمدی و غیر عمدی، مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک بدست می‌آید. توصیه می‌شود در بتن حبابدار از ماسه کمتری استفاده نماییم، بویژه اگر ماسه ریز بکار گرفته شود. در واقع بافت منحنی دانه‌بندی مخلوط سنگدانه کمی درشت‌تر خواهد شد. پس از تهیه طرح اختلاط اولیه و ساخت مخلوط آزمون، لازم است حباب هوای موجود در بتن، وزن مخصوص بتن متراکم تازه و روانی بدست آید و آزمون‌هایی برای تعیین مقاومت و در صورت لزوم دوام و نفوذپذیری تهیه گردد. در صورتی که خواسته‌ها برآورده نشود، در مقدار مواد حباب‌زا یا مقدار آب آزاد، نسبت آب به سیمان و سهم سنگدانه‌ها باید تجدید نظر صورت گیرد.

پ ۶-۸- ملاحظات خاص در طرح مخلوط بتن‌های الیافی

طرح مخلوط بتن‌های الیافی تفاوت چندانی با بتن معمولی ندارد. بتن‌هایی که با الیاف پلیمری یا سلولزی و یا شیشه‌ای ساخته می‌شود معمولاً دارای حجم الیافی بین ۰/۱ تا ۰/۳ درصد حجم بتن می‌باشد. برای مثال اگر از الیاف پروپیلن استفاده شود ۱ تا ۳ لیتر الیاف در هر متر مکعب بتن بکار می‌رود که با در نظر گرفتن چگالی ۰/۹ برای این الیاف، مقدار آن ۰/۹ تا ۲/۷ کیلوگرم خواهد بود. در مورد بتن‌های حاوی الیاف فولادی، حجم الیاف بین ۰/۵ تا ۱ درصد می‌باشد که تقریباً در هر متر مکعب بین ۴۰ تا ۸۰ کیلوگرم الیاف فولادی بکار می‌رود. مقدار آب لازم برای ایجاد روانی در بتن مورد نظر (اما بدون الیاف) تفاوت خاصی با بتن معمولی ندارد؛ اما روانی بتن حاوی الیاف به مراتب کمتر از بتن بدون الیاف می‌باشد. در نظر گرفتن حجم الیاف پلیمری، سلولزی و یا شیشه‌ای (به دلیل ناچیز بودن آن) در رابطه حجم مطلق ضرورت ندارد؛ اما برای بتن حاوی الیاف فولادی منظور نمودن حجم آن ضرورت دارد.

پ ۶-۹- ملاحظات خاص در طرح مخلوط بتن خود تراکم

بتن خود تراکم، بتنی است که قابلیت جریان و پر کردن درون قالب و لا به لای میلگردها را به راحتی و سهولت دارا می باشد، ضمن این که همگنی آن حفظ می شود و جداسدگی و آب انداختن آن ناچیز می باشد. این بتن نیاز به تراکم و لرزاندن ندارد. معمولاً افزایش روانی و جریان بتن و کاهش گرانیروی با عدم جداسدگی و آب انداختن و انسجام و چسبندگی درونی آن ظاهراً سازگاری ندارد.

با افزایش آب آزاد و افزایش روانی بتن، پایداری و همگنی بتن از بین می رود و برای حفظ آن لازم است ذرات ریز به ویژه ذرات چسبنده سیمانی افزایش یابد؛ اما افزایش این مواد می تواند با جریان بتن (جاری شدن) و کاهش گرانیروی آن منافات داشته باشد. با استفاده از فوق روان کننده های قوی می توان مانع افزایش مقدار آب و در نتیجه مواد سیمانی شد و روانی لازم را تأمین نمود. به هر حال در این مورد نیز گرانیروی کم شده و امکان جداسدگی و حتی آب انداختن وجود دارد و توصیه می شود ذرات ریز مانند پودر سنگ (خاک سنگ) سرباره و برخی پوزولان های طبیعی و مصنوعی (دوده سیلیسی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولان و خاکستر بادی) و حتی ماسه های بسیار ریز با اندازه کوچکتر از ۰/۱۵ میلی متر و حتی کوچکتر از ۰/۳ میلی متر به قدر کافی بکار رود و بافت دانه بندی ریزتر شود. در بین این مواد، پودر سنگ یا ماسه های خیلی ریز از چسبندگی و چسبناکی کمتری برخوردارند و مصرف آنها ترجیح دارد.

امروزه از فوق روان کننده هایی بر پایه پلی کربوکسیلات و حتی انواع نفتالینی و ملائینی استفاده می شود. گاه می توان برای بالا بردن گرانیروی از مواد اصلاح کننده گرانیروی VMA (Viscosity Modifying Admixture) بهره گرفت به ویژه اگر نتوان از مقدار کافی پودر سنگ و سایر مواد و ذرات ریز استفاده نمود.

بتن خود تراکم معمولاً دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴ تا ۰/۵۵ می باشد. مقدار آب آزاد در مخلوط بتن خود تراکم معمولاً بین ۱۴۰ تا ۲۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. معمولاً مقدار مناسب سیمان بین ۳۰۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود. مجموع سیمان و مواد افزودنی پودری و هم چنین پودر سنگ بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. مجموع مواد پودری معدنی و پودر سنگ می تواند بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب باشد. بدیهی است مقاومت و دوام مورد نظر باید در هر حال تأمین گردد. بهتر است مقدار C_3A سیمان کمتر از ۱۰ درصد باشد زیرا افزایش C_3A می تواند مشکل افت اسلامپ و

عملکرد ضعیف فوق روان کننده را بوجود آورد.

حداکثر اندازه سنگدانه بهتر است از ۲۰ میلی متر تجاوز نکند. معمولاً حداکثر اندازه‌های بزرگتر می‌تواند منجر به جداسدگی شود؛ اما اگر ایجاد مشکل نکند بکارگیری سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه بزرگتر در صورت عدم مغایرت با ضوابط هندسی قطعه موجود امکان پذیر است. هرچند شن گردگوشه برای ایجاد روانی و جریان بتن بهتر است؛ اما احتمال جداسدگی و آب انداختن را نیز افزایش می‌دهد و مصرف سنگدانه درشت تیزگوشه یا نیمه تیزگوشه توصیه می‌گردد. ماسه گردگوشه و تیزگوشه را می‌توان بکار برد؛ اما برای بتن خود تراکم، مصرف ماسه گردگوشه ارجحیت دارد مگر این که بخواهیم از پودر سنگ موجود در ماسه شکسته بهره بگیریم. در بتن خود تراکم اهمیت ذرات کوچکتر از $0/3$ میلی متر به ویژه کوچکتر از $0/15$ میلی متر به عنوان ماسه خیلی ریز و پودر سنگ از نظر رئولوژی بسیار قابل توجه است.

بتن خود تراکم به مقدار شن (سنگدانه درشت) نیز حساس است. وقتی مقدار شن از حد معینی بیشتر باشد اتصال بین ذرات سنگدانه بیشتر می‌شود و خطر انسداد و عدم جریان و عبور بتن از بین میلگردها افزایش می‌یابد.

دانه‌بندی مناسب بتن خود تراکم بدون احتساب مواد ریز پودری در بخش تحتانی محدوده ناحیه (۲) منحنی‌های دانه‌بندی‌های مطلوب روش ملی طرح مخلوط می‌باشد که اگر مواد ریز پودری (بجز سیمان) را نیز به حساب آوریم در بخش فوقانی ناحیه (۲) و نزدیک به منحنی C واقع می‌شود. توان n در این حالت بین $0/225$ تا $0/35$ (بدون مواد ریز پودری) و بین $0/1$ تا $0/225$ (با مواد ریز پودری) خواهد بود. برای دستیابی به این محدوده در منحنی‌های مطلوب سهم ماسه معمولاً به مراتب بیش از سهم ماسه در سایر بتن‌ها خواهد شد؛ ضمن این که باید از ماسه ریزتری بهره گرفت.

حجم خمیر سیمان (حجم مطلق آب، سیمان، مواد افزودنی پودری معدنی و پودر سنگ) بهتر است در حدود $1/5$ برابر حجم فضای خالی مخلوط سنگدانه باشد. لزومی ندارد دانه‌بندی مخلوط به نحوی باشد که بیشترین تراکم و کمترین فضای خالی را بوجود آورد و معمولاً این نوع دانه‌بندی، مطلوب نیست.

در رابطه با کارآئی بتن خودتراکم معیارها و ضوابط متفاوتی در منابع مختلف ارائه شده است. پیشنهاد می‌شود محدودیت‌هائی در آزمایشهای مختلف طبق جدول پ-۶ در نظر گرفته

شود.

جدول پ-۶- معیارهایی برای قبول کارآئی بتن خودتراکم

محدوده مقادیر قابل قبول		واحد	روش آزمایش*
حداکثر	حداقل		
۸۰۰	۶۰۰ ⁺	میلی متر	جریان اسلامپ با مخروط ناقص آبرام
۵	۲	ثانیه	جریان اسلامپ در ۵۰ سانتی متر زمان
۱۰	۰	میلی متر (اختلاف ارتفاع)	حلقه J
۱۲	۶	ثانیه	قیف روانی V (مرحله اول)
۳	۰	ثانیه	افزایش زمان پس از ۵ دقیقه با قیف روانی V (مرحله دوم)
۱/۰	۰/۸	$\frac{h_2}{h_1}$	جعبه L (با میلگرد)
۳۰	۰	میلی متر (اختلاف ارتفاع)	جعبه U
۱۵	۰	درصد	پایداری شبکه الک GTM
۵	۰	ثانیه	سنجش روزانه orimet
۱۰۰	۹۰	درصد	جعبه پرکردن

* می توان به نشریات مؤسسه EFNARC و توصیه های EN در مورد بتن خودتراکم و آزمایشهای آن مراجعه نمود. بدیهی است آزمایش اسلامپ در مورد بتن خودتراکم کاربردی ندارد و نتیجه آن بی ارزش است.

⁺ حداقل مزبور در اغلب موارد ۶۵۰ میلی متر توصیه شده است.

پیوست ۷: توصیه‌هایی برای حداقل و حداکثر عیار سیمان ودانه‌های ریز بتن

علاوه بر آن چه در آیین‌نامه‌های مورد استفاده برای حداقل و حداکثر عیار سیمان قید شده است توصیه می‌شود حداقل سیمان از مقادیر جدول پ-۳ کمتر نباشد. دانه‌بندی بتن با بافت متوسط منظور شده است.

جدول پ-۳- حداقل عیار سیمان برای سیمان‌های پرتلند یا غیرپرتلند با رده مقاومتی معمول

حداکثر اندازه سنگدانه (م.م)					رده بتن
۳۷/۵	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	
۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰	C ₂₀ یا بیشتر

اگر سیمان با رده مقاومت بیشتر استفاده شود یا روان‌کننده و پوزولان‌ها مصرف گردد حداقل مقدار فوق را می‌توان کاهش داد. اگر بافت دانه‌بندی ریزتر گردد حداقل عیار سیمان افزایش می‌یابد. روانی بتن اگر از ۴۰ میلی متر بیشتر شود این مقادیر افزایش خواهد یافت. حداقل مقدار ذرات ریزتر از ۰/۳ میلی متر (شامل سیمان، ماسه ریز، مواد ریزدانه و مواد پودری معدنی) بهتر است بویژه در صورت بکارگیری بتن به عنوان بتن نفوذناپذیر و مقاوم در برابر عوامل شیمیایی، بتن‌نما و بتن پمپی از مقادیر جدول پ-۴ کمتر نباشد.

جدول پ-۴- حداقل و حداکثر مواد ریزتر از ۰/۳ میلی‌متر

حداکثر اندازه سنگدانه (م.م)					حداقل ریزتر از ۰/۳ میلی متر (kg/m ³)
۳۷/۵	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	
۴۰۰	۴۲۵	۴۵۰	۴۷۵	۵۰۰	حداقل ریزتر از ۰/۱۵
۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰	۳۷۵	۴۰۰	

حداکثر عیار سیمان بهتر است در بتن‌هایی با روانی حداکثر ۴۰ mm با بافت دانه‌بندی متوسط و سیمان با رده مقاومتی معمولی از مقادیر زیر تجاوز نکند. به هر حال با افزایش روانی و ریزتر شدن بافت دانه‌بندی این مقدار افزایش می‌یابد.

جدول پ-۵- حداکثر عیار سیمان در قیف با روانی حداکثر ۴۰mm

حداکثر اندازه سنگدانه (م.م)					حداکثر عیار سیمان (kg/m ³)
۳۷/۵	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	
۴۰۰	۴۲۵	۴۵۰	۴۷۵	۵۰۰	

رعایت حداکثر مقدار سیمان طبق آیین‌نامه‌های مورد استفاده و مشخصات فنی پروژه برای بتن مورد نظر ضروری است.

حداکثر ذرات ریزتر از ۰/۳ و ۰/۱۵ میلی متر، بهتر است از مقادیر جدول پ-۶- تجاوز نکند. برای روانی بیش از ۴۰ میلی متر و یا بکارگیری پوزولان‌ها و سرباره‌ها این مقادیر می‌تواند تا 50 kg/m^3 افزایش یابد. مقادیر زیر برای عیار سیمان ۳۰۰ و 350 kg/m^3 داده شده است. در صورتی که بیش از ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب بتن مصرف شود، می‌توان حداکثر مقادیر زیر را افزایش داد، مشروط بر این که این افزایش‌ها بیش از 50 kg/m^3 نباشد. هم چنین اگر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها از ۱۹ میلی متر کمتر باشد (تا ۹/۵ میلی متر) حداکثر می‌توان 50 kg/m^3 به مقادیر زیر اضافه نمود که مجموعاً با توجه به تغییر عیار سیمان و افزایش روانی یا بکارگیری پوزولان‌ها و سرباره‌ها این افزایش به 100 kg/m^3 محدود می‌شود (به جز در مورد بتن‌های خودتراکم)

جدول پ-۶- حداکثر ذرات ریز یا خیلی ریز برای حداکثر اندازه ۱۹ تا ۳۸ میلی متر

عیار سیمان	ذرات ریزتر از ۰/۳ میلی متر kg/m^3	ذرات ریزتر از ۰/۱۵ میلی متر kg/m^3
۳۰۰ یا کمتر	۴۷۵	۳۷۵
۳۵۰	۵۲۵	۴۲۵

پیوست ۸: مثال‌هایی از طرح مخلوط بتن

مثال ۱-

مطلوب است طراحی مخلوط اولیه بتنی برای ساخت شالوده بتنی مسلح یک ساختمان و تعیین مقادیر، سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه ریز و درشت اشباع با سطح خشک و خشک و وزن یک متر مکعب بتن تازه با توجه به اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح مصرفی در حالی که بتن ریزی با جرثقیل و ناوه کامیون مخلوط کن، انجام گردد. اطلاعاتی در مورد نحوه ساخت بتن و کنترل و نظارت آن وجود ندارد.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن مورد نظر (مقاومت، دوام و...)

۲۰	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c
-	Mpa	انحراف معیار بتن S
۵۰ و ۷۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ و ۳۰ دقیقه
۰/۵۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۰۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۳۵۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
متوسط تا درشت بافت		نمای مورد نیاز

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند ۱-۳۲۵	-	-

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

شن	ماسه	
۲/۵۶۰	۲/۴۸۰	چگالی ذرات SSD
۲/۳	۳/۷	درصد ظرفیت جذب آب
گردگوشه	گردگوشه	شکل
-	-	درصد شکستگی
۲۰	-	درصد پولکی
۲۳	-	درصد کشیدگی

جدول ۴- دانه‌بندی سنگدانه

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۷۰	۴۰	۱۵	۱	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۹	۶۰	۳۰	۱۵	۶	۲

راه‌حل

گام ۱: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن (مقاومت هدف)
از آن جا که هیچ گونه اطلاعاتی در مورد کارگاه و نحوه ساخت بتن و کنترل و نظارت آن وجود ندارد و سطح طبقه بندی کارگاه مشخص نیست؛ بنابراین این از حاشیه امنیت پیشنهادی و توصیه شده آبا استفاده می کنیم.

$$f_{cm} = f_c + (SM) = 20 + 8/5 = 28/5 \text{ Mpa}$$

گام ۲: تعیین سهم سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی مطلوب

دانه‌بندی مطلوب بین منحنی A و B و نزدیک تر به منحنی A می‌باشد زیرا بافت دانه‌بندی ریز یا متوسط مد نظر نمی‌باشد و می توان از دانه‌بندی درشت تری استفاده نمود. بنابراین n از ۰/۵۵ تا ۰/۶۷ انتخاب می شود. حداکثر اندازه سنگدانه ۲۵ میلی متر است. در حدس اول

سهام ماسه ۴۰ و سهم شن ۶۰ درصد منظور می گردد. لازم به ذکر است که ماسه موجود تقریباً درشت ترین دانه بندی را در ارتباط با استاندارد اجباری ایران دارا می باشد.

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
۶۰ درصد شن	۶۰	۴۲	۲۴	۹	۰/۶					
۴۰ درصد ماسه	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۵/۶	۲۴	۱۲	۶	۲/۴	۰/۸
مخلوط سنگدانه	۱۰۰	۸۲	۶۴	۴۹	۳۶	۲۴	۱۲	۶	۲	۱
منحنی B (n=۰/۳۵)	۱۰۰	۸۹	۷۵	۶۷	۴۹	۳۶	۲۵	۱۶	۹	۴
منحنی n=۰/۵۵	۱۰۰	۸۵	۶۷	۵۷	۳۸	۲۴	۱۵	۹	۵	۲
منحنی A (n=۰/۶۷)	۱۰۰	۸۳	۶۲	۵۱	۳۲	۱۹	۱۱	۶	۳	۱
۵۵ درصد شن	۵۵	۳۸/۵	۲۲	۸/۲	۰/۵					
۴۵ درصد ماسه	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۰	۲۷	۱۳/۵	۶/۸	۲/۷	۰/۹
مخلوط سنگدانه	۱۰۰	۸۳/۵	۶۷	۵۳	۴۰/۵	۲۷	۱۳/۵	۷	۳	۱

وضعیت فعلی باعث شده است منحنی مخلوط سنگدانه با سهم ۶۰ درصد شن و ۴۰ درصد ماسه تقریباً منطبق بر منحنی A باشد و خیلی درشت است. اگر سهم ماسه ۴۵ درصد و شن ۵۵ درصد باشد مخلوط حاصله (به ویژه در بخش های ریز) از وضعیت بهتری برخوردار خواهد شد. به هر حال در این طرح از همان سهم ۵۵ درصدی شن و ۴۵ درصدی ماسه بهره می گیریم. هرچند سهم ماسه ۴۲/۵ و سهم شن ۵۷/۵ درصد نیز قابل قبول بنظر می رسد.

گام ۳: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله

مجموع درصد های تجمعی مانده روی الک های مورد نظر تقسیم بر ۱۰۰ همان مدول نرمی مخلوط سنگدانه بدست آمده است. باید دقت داشت در تعریف مورد نظر الک ۲۵ و ۱۲/۵ میلی متر وجود ندارد.

$$F.M. = \frac{۱۶/۵ + ۴۷ + ۵۹/۵ + ۷۳ + ۸۶/۵ + ۹۳ + ۹۷ + ۹۹}{۱۰۰} = ۵/۷۲$$

مدول ریزی منحنی A₂₅، منحنی n=۰/۵۵ و B₂₅ به ترتیب ۵/۹۴، ۵/۶۳ و ۵/۰۵ می باشد و

جایگاه منحنی حاصله را در این رابطه نیز می توان حدس زد. اگر سهم ۴۰ درصد ماسه بکار می رفت، مدول ریزی حاصله ۵/۸۸ بود که به مدول ریزی A_{25} بسیار نزدیک بود.

گام ۴: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

با توجه به سهم ۴۵ درصدی ماسه و ۵۵ درصدی شن، چگالی متوسط عبارت است از:

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{0/55}{2/560} + \frac{0/45}{2/480}} = 2/523$$

در صورت تعیین حجم سنگدانه، نیازی به محاسبه این مقدار نیست.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان

با توجه به این که سیمان از نوع پرتلند ۱-۳۲۵ و فاقد نتیجه مقاومتی ملات ماسه سیمان استاندارد می باشد و شن گردگوشه استفاده شده است می توان از منحنی $R-325$ استفاده نمود درحالی که هیچ گونه مصرف روان کننده ای نیز در دستور کار نیست. بنابر این با داشتن مقاومت هدف استوانه ای ۲۸ روزه برابر ۲۸/۵ عملاً نسبت آب به سیمان در حدود ۰/۵۲ بدست می آید که کمتر از حداکثر مجاز است.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

با توجه به این که می توان بتن را در رده S_2 منظور نمود و با توجه به گردگوشگی سنگدانه ها از شکل ۴-۶ (نیاز به آب کم) استفاده می شود و با در نظر گرفتن مدول نرمی ۵/۷۲، مقدار آب آزاد در حدود ۱۵۲ کیلوگرم بدست می آید.

گام ۷: تعیین مقدار سیمان طرح مخلوط

با توجه به نسبت آب به سیمان و آب آزاد بدست آمده می توان عیار سیمان را تعیین کرد.

$$C = \frac{152}{0/52} = 292/5 \text{ kg/m}^3$$

با توجه به این که حداقل سیمان ۳۰۰ کیلوگرم می باشد بنابر این باید عیار سیمان را ۳۰۰ کیلوگرم در نظر گرفت و عملاً مقدار آب را نیز می توان ۱۵۶ کیلوگرم منظور نمود زیرا

نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵۲ بیشتر شود.
در این طرح عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم و آب ۱۵۶ کیلوگرم می‌تواند بکار رود و ممکن است اسلامپ بتن بیشتر از ۷۰ میلی متر گردد.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک

با استفاده از رابطه حجم مطلق می‌توان مقدار کل سنگدانه بتن را با فرض ۱ درصد هوا در بتن (معادل ۱۰ لیتر) بدست آورد اما نیاز به چگالی ذرات سیمان وجود دارد. طبق این راهنما چگالی ذرات سیمان نوع ۱-۳۲۵ بین ۳/۰۵ تا ۳/۱۰ می‌تواند فرض شود زیرا نتیجه آزمایشی برای تعیین این مقدار وجود ندارد.
چگالی ذرات سیمان در این مثال ۳/۱۰ فرض می‌گردد.

$$A_{SSD} = 2/523 \left(1000 - \frac{300}{3/1} - \frac{156}{1} - 10 \right) = 1860 \text{ Kg/m}^3$$

با توجه به سهم هر یک از سنگدانه‌ها مقدار سنگدانه درشت و ریز اشباع با سطح خشک عبارتند از:

$$G_{SSD} = 1860 \times 0/55 = 1023 \text{ Kg/m}^3$$

$$S_{SSD} = 837 \text{ Kg/m}^3$$

بهترست ابتدا حجم کل سنگدانه بدست آید و سپس حجم هر یک و وزن آن‌ها محاسبه شود.

$$V_{ASSD} = 737/23 \text{ lit}$$

$$V_G = 405/47 \text{ lit}, V_S = 331/75 \text{ lit}, G_{SSD} = 1028 \text{ Kg/m}^3, S_{SSD} = 822 \text{ Kg/m}^3$$

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل

برای این که بتوان مخلوط آزمون را ساخت بهتر است از مقادیر سنگدانه خشک و آب کل بهره بگیریم.

$$\begin{cases} G_d = \frac{1023}{1+0/023} = 1000 \text{ kg/m}^3 \\ S_d = \frac{837}{1+0/037} = 807 \text{ kg/m}^3 \end{cases} \quad \text{حالت اول:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_d = \frac{1038}{1+0.023} = 1014/5 \text{ kg/m}^3 \\ S_d = \frac{823}{1+0.037} = 793/5 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right. \quad \text{حالت دوم:}$$

آب کل مجموع آب آزاد و آب موجود در سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک است.

$$W_t = 106 + 23/5 + 29/5 = 20.9 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

وزن یک متر مکعب بتن تازه با ۱ درصد هوا در این مثال برابر است با:

$$\rho_B = 300 + 106 + 1860 = 2316 \text{ kg/m}^3 \quad \text{یا} \quad \rho_B = 300 + 20.9 + 18.7 = 2316 \text{ kg/m}^3$$

به هر حال مخلوط آزمون باید ساخته شود و بر اساس نتایج حاصله از آزمایش‌های مختلف، طرح مخلوط اولیه تعدیل و اصلاح گردد.

مثال ۲-

طرح مخلوط اولیه بتنی برای ساخت تیر، ستون، دال و دیوار یک ساختمان بتنی مسلح مورد نیاز است. مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه درشت و ریز خشک و اشباع با سطح خشک و وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه را با توجه به اطاعات زیر بدست آورید. ضمناً بتن بوسیله تراک میکسر حمل و به کمک پمپ و لوله به درون قطعات منتقل و ریخته می‌شود. بتن در یک کارخانه بتن آماده ساخته می‌شود که از نظر رتبه‌بندی در رده "ب" قرار دارد.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن آماده

۳۰	Mpa	مقاومت مشخصه مکعبی ۲۸ روزه f_c
-	Mpa	انحراف معیار بتن S
۱۱۰ و ۱۴۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ و ۳۰ دقیقه
-	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۲۵	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۴۲۵	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
متوسط		نمای لازم

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند ۲	۳/۱۵	-

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

شن	ماسه	
چگالی ذرات SSD	۲/۶۰۰	۲/۵۰۰
درصد ظرفیت جذب آب	۲/۶	۳/۲
شکل	نیمه شکسته	گرد گوشه
درصد شکستگی	۵۰	-
درصد پولکی	۱۷	-
درصد کشیدگی	۱۹	-

جدول ۴- دانه‌بندی سنگدانه

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۹۰	۶۰	۲۰	۲	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۶۵	۴۰	۲۵	۱۵	۷

راه حل

گام ۱: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم

مقاومت مشخصه به صورت مکعبی داده شده است. چون این مقدار بیش از ۲۵Mpa می‌باشد کافی است طبق تفسیر آبا ۵Mpa از آن کم نماییم تا مقاومت مشخصه استوانه ای حاصل گردد. بنابر این مقدار مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۵Mpa خواهد شد. به دلیل رتبه کارگاه طبق جدول ۳-۱ روش ملی طرح مخلوط بتن، مقدار انحراف معیار معادل ۴/۵ منظور

می‌شود و مقاومت هدف بزرگترین مقدار حاصله از روابط ۳-۱ و ۳-۲ خواهد بود.

$$f_{cm} = 25 + 1/3 \times 4/5 + 1/5 = 32/5 \text{ Mpa}$$

$$f_{cm} = 25 + 2/3 \times 4/5 - 4/5 = 31/5 \text{ Mpa}$$

بنابر این مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط برابر ۳۲/۵ Mpa می‌شود.
در مرحله بعدی می‌توان به سراغ تعیین سهم شن و ماسه رفت و یا نسبت آب به سیمان را بدست آورد.

گام ۲: تعیین نسبت آب به سیمان

با توجه به عدم مصرف روان کننده و با توجه به این که مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد ۲۸ روزه سیمان پرتلند نوع ۲ داده نشده است آن را مانند سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱ فرض می‌کنیم و طبق حداقل‌های استاندارد ۳۸۹ ایران مقاومت ملات استاندارد سیمان نوع ۲ را ۳۱۵ منظور می‌کنیم و با توجه به موارد مندرج در این راهنما ضریب اصلاحی برای نسبت آب به سیمان بدست می‌آوریم.

از آن جا که شن موجود دارای ۵۰ درصد شکستگی است میانگین دو منحنی R-۳۲۵ و ۳۲۵C بکار می‌آید. با توجه به مقاومت هدف ۳۲/۵ Mpa نسبت آب به سیمان از روی منحنی‌های مزبور تقریباً مقادیر ۰/۴۷ و ۰/۵۲ بدست می‌آید که میانگین آن ۰/۴۹۵ می‌گردد.

$$\frac{W}{C} = 0.495 \times \frac{315}{325} = 0.48 \text{ Kg/m}^3$$

گام ۳: تعیین سهم سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی مطلوب

مشخص است که حداکثر اندازه اسمی مخلوط سنگدانه ۱۹ میلی متر می‌باشد زیرا بیش از ۹۰ درصد آن از الک ۱۹ میلی متر می‌گذرد. بنابر این با توجه به پمپی بودن بتن سعی می‌شود منحنی دانه‌بندی بین A_{۱۹} و B_{۱۹} و نزدیک تر به B_{۱۹} باشد. در این حالت n از ۰/۴ تا ۰/۵ مناسب بنظر می‌رسد.

در وهله اول سهم شن و ماسه ۵۰ درصد انتخاب می‌شود. مشاهده می‌گردد دانه‌بندی حاصله کمی درشت می‌گردد لذا به نظر می‌رسد سهم شن ۴۰ درصد و ماسه ۶۰ درصد مناسب می‌باشد. به هر حال اگر دانه‌بندی ماسه به ویژه در مورد ذرات ریزتر از ۰/۶ میلی متر درشت بود ممکن بود نتوانیم به دانه‌بندی مناسبی دست یابیم. باید گفت ماسه‌های

موجود در ایران غالباً به دلیل شست و شوی غلط و مکرر، ذرات ریز خود را از دست می دهد که با افزایش سهم ماسه نیز مشکل حل نخواهد شد. برای مثال اگر دانه بندی ماسه همان دانه بندی مثال ۱ بود دستیابی به دانه بندی مطلوب غیر ممکن تلقی می شد. به هر حال از آن جا که حداکثر اندازه واقعی سنگدانه ۲۵ میلی متر نمی باشد ممکن است در الک اول یعنی ۱۹ میلی متر تطابق خوبی حاصل نشود که منطقی است. لازم به ذکر است مقادیر سهم شن می تواند بین ۴۵ تا ۴۰ و سهم ماسه ۵۵ تا ۶۰ باشد. برای شن ۴۵ درصد و ماسه ۵۵ درصد مخلوط حاصله به ویژه در بخش های فوقانی کمی درشت به نظر می رسد. بنابر این همان سهم شن ۴۰ درصد و ماسه ۶۰ درصد مطلوب تر می باشد با اینکه در برخی نقاط، ریزتر از محدوده مورد نظر می باشد.

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
۵۰ درصد شن	۵۰	۴۵	۳۰	۱۰	۱	۰				
۵۰ درصد ماسه	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۴۵	۳۲/۵	۲۰	۱۲/۵	۷/۵	۳/۵
مخلوط سنگدانه ۵۰-۵۰	۱۰۰	۹۵	۸۰	۶۰	۴۵	۳۲/۵	۲۰	۱۲/۵	۷/۵	۳/۵
منحنی B_{19}	۱۰۰	۱۰۰	۸۴	۷۵	۵۵	۴۰	۲۸	۱۸	۱۱	۵
منحنی $n=0.4$	۱۰۰	۱۰۰	۸۳	۷۳	۵۲	۳۷	۲۵	۱۶	۹	۴
منحنی $n=0.5$	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	۶۹	۴۷	۳۱	۲۰	۱۲	۷	۳
منحنی A_{19}	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	۶۲	۳۸	۲۳	۱۴	۸	۴	۲
۴۰ درصد شن	۴۰	۳۶	۲۴	۸	۰/۸	۰				
۶۰ درصد ماسه	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۵۴	۳۹	۲۴	۱۵	۹	۴
مخلوط سنگدانه ۶۰-۴۰	۱۰۰	۹۶	۸۴	۶۸	۵۵	۳۹	۲۴	۱۵	۹	۴
۴۵ درصد شن	۴۵	۴۰/۵	۲۷	۹	۰/۹	۰				
۵۵ درصد ماسه	۵۵	۵۵	۵۵	۵۵	۴۹/۵	۳۵/۸	۲۲	۱۳/۸	۸/۳	۳/۹
مخلوط سنگدانه ۵۵-۴۵	۱۰۰	۹۵/۵	۸۲	۶۴	۵۰/۵	۳۶	۲۲	۱۴	۸/۵	۴

گام ۴: تعیین مدول نرمی مخلوط سنگدانه

مدول نرمی با توجه به درصد تجمعی مانده روی الک‌های مختلف (به جز ۱۲/۵ میلی متر) بدست می‌آید.

$$F.M. = \frac{4 + 32 + 45 + 61 + 76 + 85 + 91 + 96}{100} = 4/90$$

مدول نرمی برای A_{19} برابر ۵/۴۹ و برای B_{19} برابر ۴/۶۸ و برای منحنی $n=0/4$ برابر ۴/۸۵ و برای $n=0/5$ برابر ۵/۱۲ می‌باشد که مطلوب به نظر می‌رسد.

گام ۵: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{0/40}{2/600} + \frac{0/60}{2/500}} = 2/539 \approx 2/54$$

البته می‌توان این مقدار را محاسبه نکرد.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد بتن

ابتدا با توجه به سهم شن و ماسه، مقدار متوسط درصد شکستگی معادل را بدست می‌آوریم.

$$a_{ne} = \frac{0/4 \times 50 + 2 \times 0/6 \times 0}{0/4 + 2 \times 0/6} = \frac{20}{1/6} = 12/5$$

درصد شکستگی معادل خیلی کم بدست آمده است. با توجه به مدول ریزی ۴/۹۰ و روانی مورد نظر (رده S_3) برای مقدار آب کم حدود ۱۸۰ و برای آب زیاد حدود ۲۰۸ می‌باشد که مقدار آب با توجه به درصد شکستگی معادل، حدود ۱۸۸ بدست می‌آید، بنابراین مقدار آب را در حدود ۱۸۸ کیلوگرم در نظر می‌گیریم.

گام ۷: تعیین عیار سیمان

مقدار سیمان طرح برابر است با

$$C = \frac{188}{0/48} = 392 \text{ Kg/m}^3$$

از آن جا که مقدار سیمان از ۳۵۰ کیلوگرم بیشتر می‌باشد لازم است اصلاحی بر روی

آب انجام شود. برای اصلاح آب مقدار ۶ کیلوگرم به آب اضافه می شود و مقدار آب ۱۹۴ می شود. پس سیمان مصرفی حدود ۴۰۴ کیلوگرم خواهد بود.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک

مقدار هوای بتن در این بتن در حدود ۱/۲۵ درصد فرض می شود و با توجه به چگالی متوسط سنگدانه و چگالی سیمان داریم:

$$A_{SSD} = 2/54 \left(1000 - \frac{404}{3/15} - \frac{194}{1} - 12/5 \right) = 1690 \text{ Kg/m}^3$$

با توجه به سهم هر یک از سنگدانه ها داریم:

$$G_{SSD} = 176 \text{ Kg/m}^3$$

$$S_{SSD} = 1014 \text{ Kg/m}^3$$

می توان ابتدا حجم کل سنگدانه ها بدست آورد و سپس وزن آن ها را محاسبه نمود.

$$V_{ASSD} = 660/20 \text{ lit}$$

$$V_G = 266/1 \text{ lit}, V_S = 399/10 \text{ lit}, G_{SSD} = 1692 \text{ Kg/m}^3, S_{SSD} = 998 \text{ Kg/m}^3$$

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل

مقدار سنگدانه خشک عبارت است از:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_d = \frac{676}{1+0/0.26} \approx 659 \text{ Kg/m}^3 \\ S_d = \frac{1014}{1+0/0.32} \approx 982/5 \text{ Kg/m}^3 \end{array} \right. \quad \text{حالت اول:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_d = \frac{692}{1+0/0.26} \approx 674/5 \text{ Kg/m}^3 \\ S_d = \frac{998}{1+0/0.32} \approx 967 \text{ Kg/m}^3 \end{array} \right. \quad \text{حالت دوم:}$$

$$W_t = 194+17+32 = 243 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعب بتن تازه

وزن یک متر مکعب بتن تازه با ۱ درصد هوا در این مثال برابر است با:

$\rho_B = 404 + 194 + 1690 = 2288 \text{ kg/m}^3$ یا $\rho_B = 404 + 243 + 1659 + 983 = 2289 \text{ kg/m}^3$
 اگر وزن سنگدانه‌ها ۱۶۹۰ Kg باشد و درصد گذشته از الک ۰/۳ میلی متر و ۰/۱۵ میلی متر به ترتیب برابر حدود ۱۵۲ و ۶۸ کیلوگرم خواهد بود و اگر آن را با مقدار سیمان یعنی ۴۰۴ کیلوگرم جمع کنیم مقادیر ۵۵۶ و ۴۷۲ می شود که با توجه به توضیحات مربوط به بتن پمپی و مطالب مندرج در پیوست شماره ۴ این راهنما می تواند قابل قبول باشد اما بهتر است با مصرف روان کننده مقدار سیمان و مجموع ذرات ریز را که به دلیل بالا بودن سیمان، افزایش یافته است کاهش داد.

مثال ۳-

طرح اختلاط بتنی برای ساخت قطعات پیش ساخته غیر مسلح برای یک دیواره وزنی اسکله ای در یک بندر با اطلاعات زیر مورد نظر است. لازم است مقادیر سیمان، آب آزاد و آب کل و سنگدانه های خشک و اشباع با سطح خشک به تفکیک بدست آید و با توجه به اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش های مخلوط آزمون، تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه انجام گردد و طرح نهایی مشخص شود. بتن ریزی از طریق سطح شیب دار و تراک میکسر انجام می شود.

جدول ۱- اطلاعات و داده های مربوط به بتن مورد نظر (مقاومت، دوام و...)

۲۵	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c
۳	Mpa	انحراف معیار بتن S
۶۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۰۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۳۷۵	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
متوسط		نمای لازم

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی (نوع، چگالی و مقاومت)

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm^2
پرتلند ۲	۳/۱۷	۳۵۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه	شن درشت	شن متوسط	شن ریز	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۶۲۵	۲/۶۰۷	۲/۵۹۲	۲/۵۶۴
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۹	۲/۱	۲/۳	۲/۸
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	نیمه شکسته	نیمه شکسته
درصد شکستگی	۴۵	۵۰	۶۰	۳۵ (تقریبی)

جدول ۴- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	۳۸	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن درشت	۱۰۰	۵۰	۱۰	۱	۰							
شن متوسط	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۲۰	۲	۰						
شن ریز	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۶۵	۱۵	۳	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۰	۶۵	۴۰	۲۵	۱۲	۵

راه‌حل

می‌توان ابتدا به سراغ تعیین مقاومت فشاری متوسط رفت و یا از تعیین دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها شروع نمود.

گام ۱: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط (مقاومت هدف)
با توجه به این که مقدار انحراف معیار در این کارگاه مشخص است با استفاده از روابط

موجود ۱-۳ و ۲-۳ (منطبق با آبا) داریم:

$$f_{cm} = f_c + 1/3 \times S + 1/5 = 25 + 1/3 \times 3 + 1/5 = 30/5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cm} = f_c + 2/3 \times S - 4/5 = 25 \times 2/3 \times 3 - 4/5 = 28 \text{ N/mm}^2$$

بنابراین بزرگترین مقدار یعنی ۳۰/۵ به عنوان مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط منظور می‌شود.

گام ۲: تعیین سهم سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی مطلوب

حداکثر اندازه اسمی این سنگدانه عملاً همان ۳۸ میلی متر است لذا با توجه به شکل ۴-۵ برای این حداکثر اندازه و خواسته‌های بتن یعنی نمای لازم و عدم نیاز به دانه‌بندی ریز و نحوه بتن‌ریزی اگر ناحیه تحتانی (۱) را هدف قرار دهیم مناسب‌تر خواهد بود بنابراین سعی می‌کنیم در این حدود باشیم و یا حتی اگر کمی بالاتر از آن قرار گیریم نیز مشکلی وجود نخواهد داشت. در یک بتن غیر مسلح بویژه اگر حجیم باشد کم بودن عیار سیمان باعث کاهش تنش‌های حرارتی و جمع‌شدگی ناشی از گیرش بتن خمیری و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی خواهد شد. هر چند بافت درشت‌تر نیاز به آب را کمتر می‌کند ولی علیرغم کاهش عیار سیمان لازم، ممکن است جمع‌شدگی بیشتر شود، با ریز بافت‌تر شدن سنگدانه به آب بیشتری نیاز داریم و عیار سیمان لازم افزایش می‌یابد اما ممکن است جمع‌شدگی افزایش نیابد. باید دانست مسئله گرمایی و حبس گرما و تنش‌های حرارتی به عیار سیمان ارتباط تنگاتنگی دارد بنابراین بافت دانه‌بندی متوسط تا کمی درشت می‌تواند عملاً مناسب‌تر باشد. برای تعیین سهم سنگدانه‌ها به روش آزمون و خطای محاسباتی عمل می‌کنیم. این روش با استفاده از ماشین حسابگر و رایانه بسیار سریع و دقیق‌تر خواهد شد و در هر مرحله دانه‌بندی حاصله بدست می‌آید که می‌تواند با محدوده مطلوب یا منحنی مورد نظر مقایسه شود. در این مثال سهم سنگدانه‌ها به صورت زیر بدست آمد.

سهم شن درشت ۳۵ درصد، سهم شن متوسط ۱۵ درصد، سهم شن ریز ۲۰ درصد و سهم ماسه ۴۰ درصد.

بدیهی است این سهم‌ها ممکن است کمی بیشتر یا کمتر به دست آید و گاه تغییر ۵ درصد در سهم برخی سنگدانه‌ها ممکن است حساسیت زیادی را ایجاد نکند. در مورد سنگدانه ریز عملاً حساسیت بیشتری وجود دارد و ممکن است بیش از ۲/۵ درصد نتوان تغییر ایجاد نمود

در حالی که در مورد سنگدانه‌های درشت که تفکیک شده هستند حساسیت زیاد نیست. دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با سهم‌های فوق در مقایسه با منحنی $B_{۳۸}$ و $A_{۳۸}$ و منحنی $n=۰/۵۵$ به صورت زیر است.

جدول ۵- دانه‌بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه‌بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م)	شن			ماسه ۳۰٪	مخلوط سنگدانه	منحنی		
	درشت ۴۰٪	متوسط ۱۰٪	ریز ۲۰٪			$n=۰/۵۵$	$A_{۳۸}$	$B_{۳۸}$
۳۸	۴۰	۱۰	۲۰	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۲۰	۱۰	۲۰	۳۰	۸۰	۷۹	۷۵	۸۵
۱۹	۴	۹/۵	۲۰	۳۰	۶۳/۵	۶۸	۶۲	۷۶
۱۲/۵	۰/۴	۲	۱۹/۶	۳۰	۵۲	۵۳	۴۷	۶۴
۹/۵	۰	۰/۲	۱۳	۳۰	۴۳	۴۵	۳۹	۵۷
۶/۳۵			۳	۲۸/۵	۳۱/۵	۳۶	۲۹	۴۸
۴/۷۵			۰/۶	۲۷	۲۷/۵	۳۰	۲۴	۴۲
۲/۳۸				۱۹/۵	۱۹/۵	۱۹	۱۴	۳۰
۱/۱۹				۱۲	۱۲	۱۲	۹	۲۱
۰/۶				۷/۵	۷/۵	۷	۵	۱۴
۰/۳				۳/۵	۳/۵	۴	۲	۸
۰/۱۵				۱/۵	۱/۵	۲	۱	۴

منحنی حاصله به نظرقابل قبول می‌رسد. حتی می‌توان مخلوط درشت تری را نیز بکاربرد.

گام ۳: محاسبه مدول نرمی مخلوط به دست آمده

مجموع درصد‌های تجمعی مانده روی الک‌های ۳۸، ۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۸، ۱/۱۹، ۰/۶،

۰/۳، ۰/۱۵ تقسیم بر ۱۰۰ برای مخلوط به دست آمده سنگدانه برابر است با:

$$F.M. = \frac{۰ + ۳۶/۵ + ۵۷ + ۷۲/۵ + ۸۰/۵ + ۸۸ + ۹۲/۵ + ۹۶/۵ + ۹۸/۵}{۱۰۰} = ۶/۲۲$$

مدول ریزی منحنی $B_{۳۸}$ برابر است با $۵/۴۸$ که نشان می‌دهد به طور متوسط مخلوط درشت‌تر از منحنی مزبور است. مدول ریزی منحنی $A_{۳۸}$ برابر است با $۶/۴۵$ و مدول ریزی منحنی $n=۰/۵۵$ برابر $۶/۱۳$ می‌باشد و عملاً مخلوط حاصله بین منحنی A و این منحنی قرار دارد که مناسب تلقی می‌شود.

گام ۴: تعیین چگالی (جرم مخصوص) متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه
با توجه به سهم هر یک از مصالح سنگی و چگالی آن‌ها می‌توان طبق ب-۱ چگالی متوسط SSD مخلوط را بدست آورد.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}} + \frac{p_3}{\rho_{A_3}} + \frac{p_4}{\rho_{A_4}}} = \frac{1}{\frac{۰/۴}{۲/۶۲۵} + \frac{۰/۱}{۲/۶۰۷} + \frac{۰/۲۰}{۲/۵۹۲} + \frac{۰/۳۰}{۲/۵۶۴}} = ۲/۵۹۲$$

می‌توان این چگالی متوسط را تعیین نکرد.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان بتن

با توجه به نزدیکی مقاومت ملات استاندارد سیمان نوع ۲ مصرفی به مقاومت حداقل سیمان نوع ۱-۳۲۵ می‌توان عملاً آن را از نوع ۱-۳۲۵ از نظر مقاومتی منظور نمود. در صورتی که نتوان این انطباق را انجام داد می‌توان بین منحنی‌های موجود یک منحنی فرضی را با درون یابی به دست آورد. حتی اگر مقاومت ملات مزبور از مقاومت سیمان ۱-۳۲۵ کمتر باشد با برون یابی منحنی فرضی را در نظر گرفت. به هر حال در این حالت مقاومت موجود بیش از ۳۲۵ است.

با توجه به این که دو منحنی برای سنگدانه گرد گوشه و تیز گوشه وجود دارد لازم است میزان تیز گوشگی و گرد گوشگی سنگدانه‌های درشت دانه مشخص شود. عملاً شکل سنگدانه‌های ریز در تعیین نسبت آب به سیمان با در نظر گرفتن مقاومت معین تأثیری ندارد. در مثال موجود با توجه به این که درصد شکستگی‌های معادل تمام جبهه‌ها تعیین شده است می‌توان درصد شکستگی و تیز گوشگی متوسط معادل تمام جبهه‌ها را تعیین نمود که مسلماً سهم سنگدانه‌ها در آن مؤثر است. درصد شکستگی متوسط شن‌ها عبارت است از:

$$a_{nG} = \frac{۰/۴ \times ۴۵ + ۰/۱ \times ۵۰ + ۰/۲ \times ۶۰}{۰/۴ + ۰/۱ + ۰/۲} = ۵۰$$

با توجه به اطلاعات موجود تقریباً درصد شکستگی شن‌ها در حدود ۵۰ درصد است. با توجه به شکل ۴-۱ و در نظر گرفتن منحنی فرضی در بین دو منحنی 325-C و 325-R مقدار W/C با منظور نمودن مقاومت فشاری متوسط $30/5 \text{ N/mm}^2$ برابر ۰/۵۰۵ به دست می‌آید. پس از تعیین W/C حاصله از مقاومت، بلافاصله باید به ضوابط مطرح شده توسط مشاور و طراح پروژه، مشخصات فنی عمومی و یا خصوصی و آیین‌نامه‌های مربوطه و شرایط محیطی توجه نمود و چنان چه حداکثر نسبت آب به سیمان کمتری مطرح شده است، در نظر گرفته شود.

در این مثال حداکثر نسبت آب به سیمان برای ایجاد دوام کافی برای بتن غیر مسلح در این شرایط ۰/۵ داده شده است. بنابراین W/C برای این مورد نباید از ۰/۵ تجاوز نماید و می‌توان آن را ۰/۵ یا کمی کمتر منظور نمود.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط بتن

برای تعیین آب آزاد به مدول ریزی مخلوط سنگدانه، حدود اسلامپ و یا رده‌بندی آن باید توجه نمود هم چنین شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها (به طور متوسط) باید در نظر گرفته شود. شکل سنگدانه‌های ریز در تعیین مقدار آب اهمیت بیشتری نسبت به شکل سنگدانه‌های درشت دارد. پولکی بودن و کشیده بودن در کنار تیزگوشگی و گردگوشگی نقش عمده‌ای دارد. بافت سطحی زیر و صاف (شیشه‌ای) نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد اما چون تعیین مقدار کمی آن به صورت استاندارد میسر نیست صرفاً با حدس و قضاوت مهندسی در طرح مخلوط اولیه آن را در نظر می‌گیریم. اگر این امر برای ما ممکن نباشد و حتی درصد شکستگی و پولکی بودن و غیره نیز تعیین نشود در طرح مخلوط اولیه می‌توان با فرض یک حالت معین فرضی مقدار آب آزاد را به دست آورد و در مرحله ساخت مخلوط آزمون و تعدیل نتایج طرح می‌توان تأثیر این عوامل را دید.

با توجه به مدول ریزی ۶/۲۲ و در نظر گرفتن اسلامپ ۶۰ mm (رده S2 اسلامپ) برای شکل ۴-۶ مقدار آب آزاد در حدود ۱۴۰ کیلوگرم و برای شکل ۴-۷ برابر حدود ۱۵۷ به دست می‌آید. با در نظر گرفتن شکل و درصد شکستگی شن‌ها و تیزگوشگی ماسه می‌توان مقدار آب آزاد را در حدود ۱۴۸ کیلوگرم در متر مکعب منظور نمود. زیرا مقدار معادل شکستگی متوسط سنگدانه‌ها عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0.7 \times 40 + 2 \times 0.3 \times 35}{0.7 + 2 \times 0.3} \cong 43$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان طرح

با توجه به رابطه (۱-۴) در بخش ۴-۴ می‌توان عیار سیمان را به دست آورد.

$$C = \frac{148}{0.5} = 296 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

اگر این عیار سیمان کمتر از حداقل مجاز باشد عملاً باید حداقل سیمان مجاز را به عنوان عیار سیمان منظور نمود. با توجه به این که این عیار سیمان کمتر از حداقل مجاز است، عیار سیمان برابر ۳۰۰ و مقدار آب برابر ۱۵۰ کیلوگرم منظور می‌شود.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک در بتن

با استفاده از رابطه حجم مطلق یعنی رابطه (۲-۴) بند ۴-۵ می‌توان مقدار سنگدانه را به دست آورد.

درصد هوای بتن و جرم مخصوص سیمان و جرم مخصوص متوسط SSD سنگدانه‌ها در این مرحله مورد نیاز است.

در رابطه با تعیین درصد هوا، با توجه به جدول ۴-۳ و میزان اسلامپ بتن و حداکثر اندازه سنگدانه می‌توان از درصد هوای ۱ تا ۰/۵ درصد استفاده نمود. در این مثال فعلاً این مقدار را در یک درصد منظور می‌نماییم.

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left(1.0 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a \right) = 2.592 \left(1.0 - \frac{300}{3.12} - \frac{150}{1} - 1.0 \right) = 1932 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

با توجه به سهم هر بخش اندازه سنگدانه می‌توان به تفکیک مقدار هر سنگدانه در حالت SSD را مشخص نمود.

$$G_{1SSD} = 772 \text{ Kg/m}^3$$

مقدار شن درشت SSD

$$G_{2SSD} = 193 \text{ Kg/m}^3$$

مقدار شن متوسط SSD

$$G_{3SSD} = 386.5 \text{ Kg/m}^3$$

مقدار شن ریز SSD

$$S_{SSD} = 579.5 \text{ Kg/m}^3$$

مقدار ماسه SSD

می‌توان حجم کل سنگدانه‌ها را بدست آورد و سپس حجم و وزن آن‌ها را تعیین کرد.

حجم هر یک در چگالی SSD آنها ضرب می شود تا وزن اشباع بدست آید.

$$V_{ASSD} = 745/36 \text{ lit}$$

$$V_{G1} = 298/14 \text{ lit}, V_{G2} = 74/54 \text{ lit}, V_{G3} = 149/07 \text{ lit}, V_S = 223/61 \text{ lit}$$

$$G_{1SSD} = 782/5 \text{ Kg/m}^3, G_{2SSD} = 194/5 \text{ Kg/m}^3, G_{3SSD} = 386/5 \text{ Kg/m}^3, S_{SSD} = 573/5 \text{ Kg/m}^3$$

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل

برای ساخت مخلوط آزمون در آزمایشگاه و یا در کارگاه معمولاً لازم است مقادیر سنگدانه خشک و آب کل به دست آید تا عملاً با تعیین درصد رطوبت سنگدانه ها بتوان مقدار سنگدانه مرطوب و آب لازم برای اختلاط (آب مصرفی) را به سهولت تعیین نمود.

$$A_d = \frac{A_{SSD}}{1 + a_c} \quad a_c = \text{ظرفیت جذب آب به صورت اعشاری است.}$$

حالت اول:

$$G_{1d} = \frac{773}{1 + 0/019} = 758/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن درشت خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{193}{1 + 0/021} = 189 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن متوسط خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{386/5}{1 + 0/023} = 378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن ریز خشک}$$

$$S_d = \frac{579/5}{1 + 0/028} = 563/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار ماسه خشک}$$

حالت دوم:

$$G_{1d} = \frac{782/5}{1 + 0/019} = 768 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن درشت خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{194/5}{1 + 0/021} = 190/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن متوسط خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{386/5}{1 + 0/023} = 378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار شن ریز خشک}$$

$$S_d = \frac{573/5}{1 + 0/028} = 558 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{مقدار ماسه خشک}$$

آب کل در واقع برابر مجموع آب آزاد و آب موجود در سنگدانه اشباع با سطح خشک

است.

$$W_t = W_f + W_{SSD} = 100 + 14/5 + 8/5 + 16 = 193 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین جرم مخصوص بتن متراکم تازه

از جمع نمودن جرم‌های آب آزاد، سیمان، سنگدانه SSD و افزودنی می‌توان جرم مخصوص بتن متراکم تازه با درصد هوای فرضی را به دست آورد. این مقدار می‌تواند در کنترل مخلوط و تعدیل طرح احتمالاً مورد استفاده قرار گیرد.
در این مثال داریم:

$$\rho_B = 100 + 300 + 193 = 2382 \text{ kg/m}^3$$

هم چنین می‌توان این مقدار را از جمع کردن جرم‌های آب کل، مواد سیمانی، سنگدانه خشک و افزودنی به دست آورد.

گام ۱۱: تعدیل طرح مخلوط اولیه با ساخت مخلوط آزمون

با توجه به ساخت مخلوط آزمون طرح مخلوط اولیه، روانی بتن ۴۰ میلی متر و مقاومت استوانه ای ۲۸ روزه برابر 29 N/mm^2 به دست آمد. هم چنین درصد هوای بتن ۱/۵ درصد و جرم مخصوص بتن متراکم با ۱/۵ درصد هوا برابر 2364 kg/m^3 تعیین شده است. بتن از نظر آب انداختگی، جداسازی و خشن بودن بدون مشکل به نظر رسید. بنابراین طبق پیوست ۱ لازم است و اصلاح لازم در طرح مخلوط اولیه صورت گیرد، تا به مخلوط نهایی نزدیک شویم.
الف: با توجه به عدم مشکل آب انداختگی، جداسازی و خشن بودن در دانه‌بندی تغییری ایجاد نمی‌نماییم.

$$\text{تغییر آب آزاد} = N.(S\alpha - S_o) = 0/3(60 - 40) = +6 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{آب آزاد اصلاحی} = 100 + 6 = 106 \text{ kg/m}^3$$

ب: از ضریب ۰/۳ به دلیل روانی کم بتن استفاده شد.

ج: تعدیل نسبت آب به سیمان

$$\left(\frac{W}{C}\right)_n = \left(\frac{W}{C}\right)_i + \left(\frac{W}{C}\right)_i \times \left(\frac{f_o - f_{cm}}{f_{cm}}\right) = 0/5 + 0/5 \left(\frac{29 - 30/5}{30/5}\right) = 0/475$$

د: تعدیل در عیار سیمان

$$C = \frac{106}{0/475} = 328 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ه: تعدیل در مقادیر سنگدانه SSD و خشک و آب کل و جرم مخصوص بتن با توجه به درصد هوا

$$A_{SSD} = 2/592 \left(1000 - \frac{328}{3/17} - \frac{156}{1} - 10 \right) = 1893/5 \text{ kg/m}^3$$

می توان حجم سنگدانه را بدست آورد و از این طریق مقادیر را بدست آورد.

$$G_{1SSD} = 757/5 \text{ Kg/m}^3, G_{2SSD} = 189/5 \text{ Kg/m}^3, G_{3SSD} = 279 \text{ Kg/m}^3, S_{SSD} = 568 \text{ Kg/m}^3$$

پس:

$$\rho_B = 2377 \text{ Kg/m}^3$$

و: مقدار هوای حاصله ۱/۵ درصد بوده است و این تغییر مختصر کاملاً طبیعی است (رواداری در حد یک درصد). هم چنین جرم مخصوص بتن متراکم تازه با ۱/۵ درصد هوا کاملاً به نتیجه طرح مخلوط اولیه اصلاح شده با ۱ درصد هوا نزدیک است و انطباق خوبی دارد. بنابراین هیچ اقدام خاصی ضرورت ندارد (به پیوست ۱ مراجعه شود). بنابراین طرح مخلوط نهایی آماده است و برای اطمینان می توان یک بار دیگر مخلوط آزمون را ساخت و نتایج را کنترل نمود.

مثال ۴-

طرح اختلاط اولیه بتنی را برای ساخت قطعات پیش ساخته پوشش تونل انتقال آب نیاز داریم که لازم است مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه های خشک و اشباع با سطح خشک و وزن مخصوص بتن متراکم تازه را با توجه به هوای ناخواسته موجود در آن با در دست داشتن اطلاعات و داده های زیر بدست آید. بتن مورد نیاز توسط یک بچینگ اتوماتیک ساخته و با کمک جام مخصوص حمل و در قالب ریخته می شود و متراکم می گردد. هم چنین لازم است تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه پس از ساخت مخلوط آزمون و آزمایش های مورد نظر، صورت گیرد و طرح مخلوط نهایی بدست آید.



جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۴۵	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه‌ای ۲۸ روزه f_c
۳/۵	Mpa	انحراف معیار بتن S
۱۵۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۴۰۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۴۵۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
عالی		نمای لازم

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm ²
پرتلند ۱-۵۲۵	۳/۱۰	۵۳۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع افزودنی	چگالی افزودنی	حدود مصرف مجاز (درصد وزن سیمان)	حداقل و حداکثر کاهش آب (درصد)
فوق روان‌کننده پلی کربوکسیلات	۱/۰۸	۱/۵-۰/۴	۱۲-۳۵

جدول ۴- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

چگالی ذرات SSD	شن درشت	شن ریز	ماسه
۲/۶۷۵	۲/۶۵۲	۲/۵۸۹	
۰/۸	۱	۱/۸	
تمام شکسته	تمام شکسته	تمام شکسته	تمام شکسته
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۵- دانه‌بندی (درصد گذشته تجمعی) سنگدانه‌ها

الک	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن درشت	۱۰۰	۴۰	۱۰	۲	۰					
شن ریز	۱۰۰	۱۰۰	۷۰	۲۵	۵	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰

جدول ۶- میزان سولفات و کلر موجود در خاک و آب زیرزمینی

نوع مواد	یون SO_4 آب	یون کلرید آب	یون SO_4 خاک	یون کلرید خاک
مقدار	۱۲۰PPM	۸۰PPM	۰/۱۵ درصد	۰/۰۰۸ درصد

راه‌حل

گام ۱: تعیین سهم سنگدانه‌ها با توجه به محدوده دانه‌بندی مطلوب

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه این بتن همان ۱۹ میلی متر است و با توجه به نمای خواسته شده و اسلامپ بالا عملاً از منحنی دانه‌بندی مطلوب نزدیک به B_{19} استفاده می‌کنیم (بین منحنی‌های n برابر ۰/۳۵ و ۰/۴۵).

با استفاده از روش آزمون و خطا می‌توان سهم سنگدانه‌ها را بدست آورد. در ابتدا سهم ماسه ۵۵ درصد سهم نخودی ۲۰ درصد و بادامی را نیز ۲۵ درصد می‌گیریم و دانه‌بندی مخلوط حاصله را با توجه به این فرض بدست می‌آوریم تا مشخص شود که در محدوده مورد نظر قرار دارد یا خیر.

جدول ۷- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

الک	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن بادامی ۲۵٪	۲۵	۱۰	۲/۵	۰/۵	۰					
شن نخودی ۲۰٪	۲۰	۲۰	۱۴	۵	۱	۰				
ماسه ۵۵٪	۵۵	۵۵	۵۵	۵۵	۵۲	۳۸/۵	۲۷/۵	۱۶/۵	۱۱	۵/۵
مخلوط حاصله	۱۰۰	۸۵	۷۱/۵	۶۰/۵	۵۳	۳۸/۵	۲۷/۵	۱۶/۵	۱۱	۵/۵
منحنی $n=۰/۴۵$	۱۰۰	۸۱	۷۱	۵۸	۴۹	۳۴	۲۲	۱۴	۸	۳
منحنی B_{19}	۱۰۰	۸۴	۷۵	۶۳	۵۵	۴۰	۲۸	۱۸	۱۰	۵

منحنی A _{۱۹}	۱۰۰	۷۵	۶۲	۴۷	۳۸	۲۳	۱۴	۸	۴	۲
-----------------------	-----	----	----	----	----	----	----	---	---	---

دانه‌بندی مخلوط سنگدانه در محدوده مورد نظر و نزدیکتر به منحنی B_{۱۹} قرار دارد و کاملاً مطلوب است.

گام ۲: محاسبه مدول ریزی مخلوط سنگدانه

$$F.M. = \frac{0 + 28/5 + 47 + 61/5 + 72/5 + 82/5 + 89 + 94/5}{100} = 4/75$$

مدول ریزی منحنی B_{۱۹} عبارت است از ۴/۶۸، که نشان دهنده نزدیکی آن به B_{۱۹} می‌باشد. مدول ریزی منحنی n=۰/۴۵ برابر ۴/۹۹ می‌باشد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{0.25}{2.675} + \frac{0.2}{2.652} + \frac{0.55}{2.589}} = 2.623$$

می‌توان این مقدار را محاسبه نکرد.

گام ۴: تعیین مقاومت فشاری هدف طرح اختلاط

باتوجه به انحراف معیار موجود در کارگاه مقاومت میانگین فشاری لازم برای طرح مخلوط بصورت زیر بدست می‌آید.

$$f_{cm} = 45 + 1/34 \times 3/5 + 1/5 = 51/2 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 45 + 2/33 \times 3/5 - 4 = 49/2 \text{ MPa}$$

در این مثال مقاومت هدف در حدود ۵۱ Mpa می‌باشد.

گام ۵: تعیین نسبت آب ازاد به سیمان طرح

با توجه به نوع سیمان مصرفی (۱-۵۲۵) و صد درصد شکسته بودن شن و وجود روان کننده، اگر از منحنی اصلاح شده مقاومت-نسبت آب به سیمان (525-C) استفاده نمائیم، نسبت آب به سیمان ۰/۴۷ حاصل می‌گردد، اما حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز ۰/۴۵ می‌باشد که بالاجبار از این مقدار یعنی ۰/۴۵ باید استفاده کرد.

توجه داشته باشید که اگر سیمان پرتلند ۱-۴۲۵ و ۱-۳۲۵ بکار می‌رفت، نسبت آب به سیمان به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۳۲ (با فرض استفاده از روان کننده و منحنی اصلاح شده) بدست می‌آید. با توجه به میزان یون سولفات و کلرید موجود در آب و خاک برای مقاطع بتنی پیش ساخته تدابیر خاصی لازم نیست. برای بتن پیش ساخته با فرض وجود آب در مجاورت بتن حداقل عیار ۳۵۰ و حداکثر نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ می‌باشد.

گام ۶: تعیین آب آزاد

با توجه به مدول ریزی مخلوط سنگدانه و روانی بتن (رده S₃) و صد در صد شکسته بودن مصالح سنگی عملاً از منحنی‌های مربوط به آب زیاد استفاده می‌شود. مقدار آب آزاد ۲۱۵ خواهد بود (با توجه به اسلامپ ۱۵۰ میلی متر).

گام ۷: تعیین مقدار سیمان

سیمان با توجه به مقدار آب آزاد ۲۱۵ و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بدست می‌آید.

$$\text{سیمان} = \frac{215}{0.45} = 478$$

با توجه به زیاد بودن مقدار سیمان باید در مقدار آب تجدیدنظر کرد و به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم سیمان مازاد بر ۳۵۰ کیلوگرم ۱ کیلوگرم به آب اضافه نمود. بنابراین مقدار آب آزاد ۲۲۸ و مقدار سیمان در حدود ۵۰۷ کیلوگرم خواهد شد. سقف مجاز سیمان ۴۵۰ کیلوگرم می‌باشد لذا کاهش ۵۷ کیلوگرم سیمان یا بیشتر ضروری است. با فرض کاهش ۶۷ کیلوگرم سیمان، عیار سیمان ۴۴۰ کیلوگرم می‌شود و آب آزاد آن ۱۹۸ کیلوگرم خواهد بود.

گام ۸: مقدار تقریبی اولیه افزودنی

با توجه به ۱۳ درصد کاهش آب و سیمان لازمست تقریباً از حدود ۰/۴۵ درصد افزودنی استفاده نمائیم که مقدار آن ۲ کیلوگرم خواهد شد. بنابراین حدود ۲ کیلوگرم از آب مورد نیاز را کم می‌کنیم و آب آزاد ۱۹۶ خواهد شد. همه افزودنی مصرفی آب نیست اما برای احتیاط ۲ کیلوگرم از آب کسر شد.

در این حالت امکان مصرف فوق روان کننده‌های ضعیف تری وجود دارد زیرا فقط به ۱۳ درصد کاهش آب نیازمند هستیم.

گام ۹: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک بتن

درصد هوای موجود در بتن با توجه به روانی بتن و حداکثر اندازه سنگدانه در حدود ۱ درصد منظور می‌شود.

$$A_{SSD} = 2/623 \left(1000 - \frac{440}{3/10} - \frac{196}{1} - 10 \right) = 1710 \text{ kg/m}^3$$

مقدار شن درشت و ریز اشباع به ترتیب ۴۲۷/۵ و ۳۴۲ کیلوگرم و مقدار ماسه اشباع ۹۴۰/۵ کیلوگرم محاسبه می‌شود.

اگر حجم کل سنگدانه برابر ۶۵۱/۹۳ لیتر باشد حجم شن درشت و ریز و ماسه به ترتیب ۱۶۲/۹۸، ۱۳۰/۳۹ و ۳۵۸/۵۶ لیتر و اوزان اشباع آنها به ترتیب ۴۳۶، ۳۴۶ و ۹۲۸ بدست می‌آید.

گام ۱۰: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل بتن:

مقدار سنگدانه خشک با توجه به درصد ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود.

حالت اول:

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{427.5}{1 + 0.008} = 424$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{342}{1 + 0.01} = 338.5$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{940.5}{1.018} = 924$$

حالت دوم:

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{436}{1 + 0.008} = 432.5$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{346}{1 + 0.01} = 342.5$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{928}{1.018} = 911.5$$

$$\text{آب کل} = 196 + 3/5 + 3/5 + 16/5 = 219/5 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۱: تعیین وزن یک متر مکعب بتن تازه و متراکم

$$\rho_B = 1710 + 196 + 440 + 3 = 2349 \text{ kg/m}^3$$

تعدیل طرح اختلاط:

در صورتیکه پس از ساخت مخلوط آزمون با ۲ کیلوگرم افزودنی فوق روان کننده مقدار اسلامپ برابر ۱۶۵ میلی متر بدست آید و وزن مخصوص بتن ۲۳۶۰ و مقاومت ۲۸ روزه استوانه‌ای بتن ۴۸/۵ بدست آید مطلوبست تعدیل طرح اختلاط مشروط بر اینکه دانه‌بندی و بافت بتن مناسب باشد.

گام ۱۲:

با توجه به افزایش اسلامپ علی‌القاعده می‌توان روان کننده را کمتر نمود. مثلاً آن را به ۱/۹ کیلوگرم برسانیم تا اسلامپ در حدود ۱۵۰ میلی متر بدست آید. کاهش مقاومت هر چند در محدوده ۵ درصدی مقاومت هدف می‌باشد اما به دلیل نزدیکی زیاد به مقاومت مشخصه می‌توان آن را نگران کننده دانست لذا بهتر است نسبت آب به سیمان به حدود ۰/۴۳۵ برسد. در این رابطه می‌توان به چند گونه عمل کرد که افزایش مقدار سیمان، کاهش مقدار آب و یا هر دو از جمله این اقدامات است. در مورد مثال مزبور اگر سیمان را همان ۴۴۰ منظور کنیم کاهش آب را به میزان ۱۹۲ (بجای ۱۹۸) داشته باشیم مقدار نسبت آب به سیمان به حدود ۰/۴۳۵ می‌رسد و مناسب خواهد بود.

بدیهی است در این حالت با کاهش حدود ۲ کیلوگرم از آب به دلیل آب موجود در افزودنی مقدار آب آزاد ۱۹۰ منظور می‌شود و سیمان ۴۴۰ می‌باشد.

در این حالت با توجه به کاهش آب مجدداً افزودنی را باید تا میزان ۲/۲ کیلوگرم افزایش دهیم زیرا آب آزاد طرح به میزان ۶ کیلوگرم کاهش داده شده است و این کاهش عملاً به کاهش حدود ۴ سانت در اسلامپ بتن منجر می‌شود و مقدار اسلامپ به کمتر از ۱۳۰ میلی متر می‌رسد و افزایش روان کننده لازم است.

افزایش ۱۱ کیلوگرم در وزن مخصوص بتن عملاً کمتر از ۱ درصد وزن مخصوص است و این امر می‌تواند ناشی از خطاهای موجود، کاهش هوای بتن و خطاهای مربوط به تعیین چگالی سنگدانه‌ها و سیمان باشد. بنظر می‌رسد بهتر است هوای بتن اندازه‌گیری شود و کنترل لازم صورت گیرد.

اگر درصد هوای بتن اندازه‌گیری شده حدود ۱ درصد باشد مشکلی نداریم.

گام ۱۳: محاسبات مجدد بتن:

$$A_{SSD} = 2/623 \left(1000 - \frac{440}{3/1} - \frac{190}{1} - 10 \right) = 1726$$

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{431/5}{1/0.08} = 428$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{345}{1/0.1} = 345/5$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{949}{1/0.18} = 932$$

$$\text{آب کل} = 190 + 3/5 + 3/5 + 17 = 214 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{وزن یک متر مکعب بتن} = 1726 + 190 + 440 + 3 = 2359 \text{ kg/m}^3$$

می‌توان بجای روش فوق از روش حجمی برای محاسبه مقادیر سنگدانه استفاده نمود.

گام ۱۴: ساخت مجدد بتن و تعیین ویژگی‌های آن

با ساخت مجدد و دقیق بتن در آزمایشگاه نتایج زیر حاصل می‌شود.

اسلامپ بتن: ۱۴۵ میلی‌متر

درصد هوای بتن: ۱/۱ درصد

وزن مخصوص بتن تازه متراکم: ۲۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب

مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای: ۵۱/۸ مگاپاسکال

لذا بنظر می‌رسد مخلوط مناسبی حاصل شده است و مشکلی ندارد.

مثال ۵-

مطلوب است طرح اختلاط اولیه بتنی برای یک شالوده مسلح در منطقه حاشیه خلیج فارس و در نزدیکی ساحل و محاسبه مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک و وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه با توجه به درصد هوای ناخواسته در بتن و با عنایت به اطلاعات و داده‌های زیر.

ضمناً بتن مورد نظر با بتونیر ساخته و با شوت (ناوه)، فرغون و جام و جرثقیل حمل

ریخته می‌شود.

هم چنین یک روان کننده معمولی در دسترس است و در صورت لزوم برای کاهش سیمان مصرفی از آن استفاده نمایید.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده

۲۰	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c
نامشخص	Mpa	انحراف معیار بتن S
۸۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۵۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۴۰۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
متوسط		نمای لازم

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند ۲	۳/۱۲	نامشخص

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع روان کننده	چگالی افزودنی	درصد مصرف وزنی	محدوده کاهش آب
معمولی - لیگنوسولفونات	۱/۲۰	۰/۳ تا ۱ درصد	۵ تا ۱۲ درصد

جدول ۴- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

چگالی ذرات SSD	شن بادی	شن نخودی	ماسه
۲/۵۲	۲/۵۳	۲/۵۴	
درصد ظرفیت جذب آب	۲/۶	۲/۸	۳/۱
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	مخلوط گردگوشه و تیزگوشه

درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	۵۵	۶۵	۲۵
-------------------------------	----	----	----

جدول ۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن بادی	۱۰۰	۸۸	۱۶	۰							
شن نخودی	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۶۳	۱	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۹۰	۶۳	۴۱	۲۲	۱۱	۳

راه‌حل

در اطلاعات مقاومتی این مثال مشکلی وجود دارد که عملاً در آیین نامه بتن ایران و سایر آیین‌نامه‌ها اجازه نمی‌دهند رده بتن C_{20} در این شرایط مصرف شود و رده C_{30} یا C_{35} برای این کار لازم است. به هر حال فعلاً با همان رده C_{20} مسئله را به پیش می‌بریم. این مشکل معمولاً در حاشیه خلیج فارس وجود دارد به ویژه اگر حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان منظور نگردد.

گام ۱: مشخص نمودن محدوده دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه

دانه‌بندی مطلوب در نزدیکی منحنی A_{19} انتخاب می‌شود. سهم ماسه ۴۵ درصد، سهم نخودی ۲۷/۵ درصد و سهم بادی ۲۷/۵ درصد و دانه‌بندی مخلوط حاصله عبارت است از:

جدول ۶- دانه‌بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه‌بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
مخلوط حاصله	۱۰۰	۹۶/۵	۷۶/۵	۶۲/۵	۴۴/۵	۴۰/۵	۲۸/۵	۱۸/۵	۱۰	۵	۱/۵
منحنی B_{19}		۱۰۰	۸۴	۷۶	۶۳	۵۵	۴۰	۲۸	۱۸	۱۱	۵
منحنی $n=۰/۵۵$		۱۰۰	۷۸	۶۷	۵۲	۴۴	۲۸	۱۸	۱۱	۶	۲

منحنی A_{19}		۱۰۰	۷۵	۶۲	۴۶	۳۸	۲۳	۱۳	۸	۴	۱
----------------	--	-----	----	----	----	----	----	----	---	---	---

منحنی خوب و قابل قبولی برای یک بتن شالوده به حساب می آید. لازم به ذکر است به دلیل این که بیش از ۹۰ درصد از الک ۱۹ میلی متر گذشته است عملاً حداکثر اندازه سنگدانه معادل ۱۹ میلی متر می باشد.

گام ۲: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله

مدول ریزی مخلوط حاصله از سنگدانه ها با سهم فوق برابر ۵/۳۷ بدست می آید در حالی که مدول ریزی منحنی A_{19} برابر ۵/۵۱ و مدول ریزی منحنی $n=۰/۵۵$ برابر ۵/۲۴ می باشد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

$$\rho_{A_{SSD}} = 2/532$$

گام ۴: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح اختلاط (مقاومت هدف طرح)

با توجه به مقاومت مشخصه ۲۰ Mpa و نامشخص بودن انحراف معیار طبق آبا حاشیه امنیت ۸/۵ فرض می شود.

$$f_{cm} = 20 + 8/5 = 28/5 \text{ Mpa}$$

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

نسبت آب به سیمان برای دستیابی به مقاومت برابر ۰/۵۳۵ بدست می آید که حداکثر آن ۰/۴۵ می باشد و لازم است از ۰/۴۵ استفاده شود. مقدار درصد شکستگی متوسط شن ۶۰ درصد می باشد و با توجه به سیمان پرتلند نوع ۲ می توان نسبت آب به سیمان را بدست آورد اما در هر حال بیش از ۰/۴۵ خواهد بود و تعیین کننده نیست.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

با توجه به مدول ریزی ۵/۳۷ و رده اسلامپ S_2 و روانی ۸۰ میلی متر، مقدار آب مورد نیاز بین ۱۸۱ و ۱۶۱ می باشد و تقریباً در حدود ۱۶۸ انتخاب می شود. زیرا درصد شکستگی متوسط معادل عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0/55 \times 60 + 2 \times 0/45 \times 25}{0/55 + 2 \times 0/45} \cong 38$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن

با توجه به مقدار آب و نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان به صورت زیر بدست می آید.

$$C = \frac{168}{0/45} = 373 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

با توجه به این که از ۳۵۰ کیلوگرم بیشتر است اصلاح در مقدار آب به میزان ۴ کیلوگرم ضروری است لذا مقدار آب آزاد را به ۱۷۲ کیلوگرم می رسانیم و مقدار سیمان معادل ۳۸۲ کیلوگرم بدست می آید. این مقدار از حداقل ۳۵۰ بیشتر و از حداکثر ۴۰۰ کمتر است و مشکلی وجود ندارد.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک در بتن

مقدار هوا در این بتن را با توجه به حداکثر اندازه و روانی آن معادل ۱/۵ درصد منظور می کنیم و با توجه به اطلاعات موجود داریم:

$$A_{SSD} = 2/532 \left(1000 - \frac{382}{3/12} - \frac{172}{1} - 15 \right) = 1748/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

بدین ترتیب با توجه به سهم سنگدانه ها در مخلوط، مقدار شن بادامی اشباع برابر ۴۸۰/۵، شن نخودی اشباع برابر ۴۸۱ و ماسه اشباع برابر ۷۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود.

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک بتن و آب کل

با توجه به ظرفیت جذب آب سنگدانه ها مقدار سنگدانه خشک و سپس آب کل بدست می آید.

$$G_{1d} = \frac{480/5}{1/026} = 468/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن بادامی خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{481}{1/028} = 468 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن نخودی خشک}$$

$$S_d = \frac{787}{1/031} = 763/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{ماسه خشک}$$

$$W_t = 172 + 12 + 13 + 23/5 = 220/5 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

$$\rho_B = 1748/5 + 382 + 172 = 230.2/5 \text{ kg/m}^3$$

در این مثال احجام سنگدانه محاسبه نگردیده است.

گام ۱۱: استفاده از افزودنی و روان کننده

در صورتی که در این مثال بخواهیم صرفاً روانی را زیاد کنیم می‌توانیم یک افزودنی روان کننده مصرف نماییم و اسلامپ موجود را افزایش دهیم و در حل مثال و اعداد آن تغییری ایجاد نخواهد شد. اما اگر بخواهیم با مصرف افزودنی کاهش سیمان داشته باشیم، اعداد مثال تغییر می‌کند. مثلاً اگر بخواهیم مقدار سیمان را تا حداقل مجاز آن یعنی ۳۵۰ کاهش دهیم، داریم:

$$\text{مقدار آب آزاد} = 350 \times 0.45 = 157.5 \text{ Kg}$$

با توجه به آب موجود در افزودنی مقدار آب را در حدود ۱۵۶ در نظر می‌گیریم.
در ابتدا مقدار افزودنی را با توجه به کاهش مقدار آب و سیمان (حدود ۸ درصد) در حدود ۰/۷ درصد وزن سیمان و به میزان ۲/۵ کیلوگرم از نوع لیگنوسولفونات (روان کننده معمولی) در نظر می‌گیریم.

گام ۱۲: تعیین مقدار سنگدانه SSD بتن با توجه به مصرف افزودنی

مقدار درصد هوای موجود در بتن استفاده شود. مقدار هوا با توجه به نوع افزودنی و حبابزایی آن در حدود ۳ درصد می‌گیریم.

$$A_{SSD} = 2/532 \left(1000 - \frac{350}{3/12} - \frac{156}{1} - 30 - \frac{2/5}{1/20} \right) = 1772 \text{ Kg/m}^3$$

مقدار شن بادی و نخودی SSD برابر ۴۸۷/۵ و مقدار ماسه اشباع برابر ۷۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود.

گام ۱۳: تعیین مقدار سنگدانه خشک و آب کل با مصرف روان کننده

$$G_{sd} = \frac{487/5}{1/0.26} \approx 475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن بادی خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{487/5}{1/0.28} \approx 474 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن نخودی خشک}$$

$$S_d = \frac{797}{1/0.31} \approx 773 \frac{kg}{m^3} \quad \text{ماسه خشک}$$

$$W_t = 156 + 12/5 + 13/5 + 24 = 206 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۴: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه با روان کننده

$$\rho_B = 1772 + 156 + 350 + 2/5 = 2280/5 \text{ kg/m}^3$$

مثال ۶-

مطلوب است طرح اختلاط اولیه بتنی برای یک سازه بتن مسلح (تیر و دال) در منطقه حاشیه خلیج فارس و در نزدیکی ساحل و محاسبه مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک و چگالی بتن متراکم تازه با توجه به درصد هوای ناخواسته مفروض در بتن و در دست داشتن اطلاعات و داده‌های زیر.

بتن مورد نظر قرار است با بتونیر ساخته و با باکت و با فرغون ریخته شود.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۲۵	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه‌ای ۲۸ روزه f_c
نامشخص	Mpa	انحراف معیار بتن S
۱۳۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۴	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۵۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۴۲۵	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز (توصیه)
متوسط تا خوب		نمای لازم

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm ²
پرتلند ۲	۳/۱۲	۳۵۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع افزودنی	چگالی افزودنی	درصد مصرف	محدوده کاهش آب
فوق روان کننده کربوکسیلاتی	۱/۰۷	۰/۴ تا ۱/۲ درصد	۱۲ تا ۳۵ درصد

جدول ۴- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

چگالی ذرات SSD	شن بادامی	شن نخودی	ماسه
۲/۵۲	۲/۵۳	۲/۵۴	
درصد ظرفیت جذب آب	۲/۶	۲/۸	۳/۱
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	مخلوط گردگوشه و تیز گوشه
درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	۵۵	۶۵	۲۵

جدول ۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن بادامی	۱۰۰	۸۸	۱۶	۰							
شن نخودی	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۶۳	۱	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۶۳	۴۱	۲۲	۱۱	۳

راه حل

در اطلاعات مقاومتی این مثال مشکلی وجود دارد که عملاً در آیین نامه بتن ایران و سایر آیین نامه‌ها اجازه نمی‌دهند رده بتن C_{25} در این شرایط مصرف شود و رده C_{30} یا C_{35} برای این کار لازم است. به هر حال فعلاً با همان رده C_{25} مسئله را به پیش می‌بریم. به هرحال محدودیت نسبت آب به سیمان مشکل موجود را حل می‌کند.

گام ۱: مشخص نمودن محدوده دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه با توجه به درصد گذشته از الک ۱۹ میلی متر برای شن بادیامی معادل ۸۸ درصد، در مخلوط سنگدانه عملاً برابر ۱۹ میلی متر منظور می شود. با توجه به نمای متوسط خواسته شده و نوع وسایل حمل و ریختن عملاً منحنی دانه بندی بین منحنی A_{19} و B_{19} مطلوب به نظر می رسد (منحنی های $n=0/55$ و $n=0/45$). با توجه به روش آزمون و خطا می توان سهم سنگدانه ها را بدست آورد. در ابتدا با توجه به محدوده مورد نظر سهم ماسه ۵۰ درصد، سهم نخودی ۲۵ درصد و بادیامی ۲۵ درصد منظور می گردد. دانه بندی مخلوط حاصله با این سهم ها را محاسبه می کنیم و با محدوده مورد نظر مقایسه می نماییم.

جدول ۶- دانه بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م)	شن		ماسه ۵۰٪	مخلوط حاصله	منحنی			
	بادیامی ۲۵٪	نخودی ۲۵٪			B_{19}	A_{19}	$n=0/55$	$n=0/45$
۲۵	۲۵	۲۵	۵۰	۱۰۰				
۱۹	۲۲	۲۵	۵۰	۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۴	۲۴/۵	۵۰	۷۸/۵	۸۴	۷۵	۷۸	۸۱
۹/۵	۰/۵	۱۵/۵	۵۰	۶۶	۷۵	۶۲	۶۷	۷۱
۶/۳۵	۰	۲/۵	۵۰	۵۲/۵	۶۳	۴۶/۵	۵۲	۵۸
۴/۷۵		۰	۴۵	۴۵	۵۵	۳۸	۴۴	۴۹
۲/۳۸			۳۱/۵	۳۱/۵	۴۰	۲۳	۲۸	۳۴
۱/۱۹			۲۰/۵	۲۰/۵	۲۸	۱۳	۱۸	۲۲
۰/۶			۱۱	۱۱	۱۸	۸	۱۱	۱۴
۰/۳			۵/۵	۵/۵	۱۱	۴	۶	۸
۰/۱۵			۱/۵	۱/۵	۵	۱	۲	۳



مشاهده می‌شود دانه بندی مخلوط عملاً در وضعیت مناسبی قرار دارد، ولی اگر بخواهیم سهم ماسه را بیشتر کنیم امکان آن وجود دارد که بتوانیم سهم ماسه را ۵۲/۵ نماییم که مسلماً از سهم شن‌ها کسر می‌شود. به هر حال به نظر می‌رسد حالت موجود نیز قابل قبول است.

گام ۲: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله

با توجه به تعریف مدول ریزی برای مخلوط موجود، مدول ریزی برابر است با:

$$F.M. = \frac{3 + 34 + 55 + 68/5 + 79/5 + 89 + 94/5 + 98/5}{100} = 5/22$$

مدول ریزی منحنی‌های A_{19} و B_{19} به ترتیب عبارت است از ۴/۶۹ و ۵/۵۰ و مدول ریزی محدوده مطلوب به ترتیب ۵/۲۴ و ۴/۹۹ می‌باشد که نشان می‌دهد مدول ریزی منحنی مخلوط حاصله در بین مدول ریزی منحنی‌های مطلوب قرار دارد و همچنین می‌توان آن را کمی ریزتر نمود.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

چگالی متوسط مخلوط سنگدانه SSD را با توجه به چگالی هر یک از سنگدانه‌ها و سهم آن‌ها می‌توان به صورت زیر بدست آورد.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{0/5}{2/54} + \frac{0/25}{2/53} + \frac{0/25}{2/52}} = 2/53$$

گام ۴: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح اختلاط (مقاومت هدف طرح)

با توجه به نامشخص بودن انحراف معیار بتن می‌توان با توجه به آیین نامه بتن ایران بر اساس مقاومت مشخصه موجود، مقاومت هدف عبارتست از:

$$f_{cm} = 25 + 9/5 = 34/5 \text{ Mpa}$$

اگر از روش طرح اختلاط ملی برای ساخت بتن به روش حجمی (با بتونیر) و رتبه کارگاه "ج"، انحراف معیار ۵/۵ مگاپاسکال بدست می‌آید که خواهیم داشت.

$$f_{cm} = 25 + 1/34 \times 5/5 + 1/5 = 33/8 \text{ Mpa}$$

$$f_{cm} = 25 + 2/33 \times 5/5 - 4/0 = 33/8 \text{ Mpa}$$

به نظر می‌رسد مقادیر حاصله کمتر است و بکارگیری مقدار مقاومت هدف ۳۴/۵ منطقی است.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

با توجه به وجود سیمان پرتلند نوع ۲ و مشابهت آن با سیمان پرتلند ۱-۳۲۵ و درصد شکستگی تقریبی ۶۰ درصد برای شن‌ها، نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ از شکل رابطه مقاومت - نسبت آب به سیمان بدست می‌آید اما حداکثر مجاز ۰/۴ باید بکار رود.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

با توجه به مدول ریزی ۵/۲۲ و رده اسلامپ S_3 و روانی ۱۳۰ میلی متر از شکل مربوطه، مقدار آب با توجه به شکل مربوط به نیاز به آب کم ۱۷۵ کیلوگرم و برای نیاز به آب زیاد حدود ۲۰۰ کیلوگرم می‌شود. با توجه به میزان شکستگی در شن و ماسه و شکل شن‌ها از نظر پولکی و کشیده بودن عملاً مقدار آب ۱۸۳ کیلوگرم منطقی است. زیرا درصد شکستگی متوسط معادل در سنگدانه‌ها عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0/5 \times 60 + 2 \times 0/5 \times 25}{0/5 + 2 \times 0/5} \cong 37$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن

با توجه به مقدار آب و نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان به صورت زیر بدست می‌آید.

$$C = \frac{183}{0/4} = 457/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

عملاً با توجه به این که مقدار سیمان از ۲۵۰ کیلوگرم بیشتر است به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم سیمان مازاد، حدود ۱/۵ کیلوگرم به آب افزوده می‌شود لذا آب لازم در حدود ۱۷ کیلوگرم بیشتر می‌گردد یعنی ۲۰۰ کیلوگرم بدست می‌آید و مقدار سیمان در حدود ۵۰۰ حاصل می‌شود. این مقدار حدود ۷۵ کیلوگرم بیشتر از مقدار مجاز (توصیه شده در آیین نامه پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس) است لذا برای کاهش مقدار سیمان عملاً باید حداقل در حدود ۱۵ درصد از آب و سیمان مزبور را کاست یعنی سیمان را به حدود ۴۲۵ کیلوگرم و آب را به ۱۷۰ کیلوگرم برسانیم.

گام ۸: انتخاب نوع افزودنی

یک روان کننده معمولی از نوع لیگنوسولفونات حداکثر ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش آب را بوجود می آورد لذا در این مورد نمی تواند بکار رود. یک فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی حداکثر ۳۵ درصد کاهش آب را می تواند ایجاد کند. لذا بکارگیری آن برای منظور فوق کاملاً منطقی است و احساس می شود در وهله اول می توان از حدود ۵۰/۵۵ درصد فوق روان کننده مزبور استفاده کرد و در صورت عدم کفایت باید آن را افزایش داد. مقدار افزودنی فوق روان کننده مصرفی در حدود ۲/۳۰ کیلوگرم خواهد بود که عملاً در حدود ۱ کیلوگرم از آن را آب تشکیل می دهد و لازم است معادل آن از آب کم نمود.

گام ۹: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک بتن

برای تعیین مقدار سنگدانه، لازم است از چگالی سیمان، مقدار سیمان، مقدار آب آزاد، چگالی سنگدانه و درصد هوای موجود در بتن استفاده شود. مقدار هوای موجود در بتن با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه و روانی آن معادل ۱ درصد منظور می گردد. با توجه به رابطه حجم مطلق داریم:

$$A_{SSD} = \rho_{SSD} \left(100 + \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a - \frac{A_d}{\rho_{A_d}} \right) = 2/5 \left(100 + \frac{425}{3/12} - 1 - \frac{2/30}{1/0.7} \right) = 1727 \text{ kg/m}^3$$

بدین ترتیب شن بادامی اشباع حدود ۴۳۲، شن نخودی اشباع ۴۳۲ و ماسه اشباع ۸۶۳ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود.

در رابطه حجم مطلق می توان از حجم ناچیز افزودنی صرف نظر کرد.

گام ۱۰: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل بتن

$$G_{1d} = \frac{432}{1/0.26} \approx 421 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن بادامی خشک}$$

$$G_{rd} = \frac{432}{1/0.28} \approx 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن نخودی خشک}$$

$$S_d = \frac{863}{1/0.31} \approx 837 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{ماسه خشک}$$

$$W_t = 168 + (432 - 421) + (432 - 420) + (863 - 837) = 217 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۱: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه با یک درصد هوا عبارت است از:

$$\rho_B = 1727 + 425 + 170 + 2/0 = 2322 \text{ kg/m}^3$$

در این مثال مانند سایر مثال‌ها می‌توان حجم سنگدانه‌ها را بدست آورد و سپس به کمک چگالی آن‌ها جرم هر یک را تعیین نمود.

مثال ۷-

طرح مخلوط بتنی برای ساخت جداول بتنی پیش ساخته غیر مسلح با بتن حباب‌دار در یک منطقه کاملاً سردسیر مورد نظر است و لازم است مقادیر اجزاء آن شامل سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک را به تفکیک بیابیم و مقدار چگالی بتن متراکم تازه را با توجه به درصد هوای خواسته و ناخواسته موجود در بتن با توجه به اطلاعات و داده‌های ارائه شده در ذیل را به دست آوریم. بتن مورد نظر با بتونیر ساخته می‌شود و با فرغون یا دامپر حمل و در قالب ریخته و متراکم می‌گردد. لازم است تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه پس از ساخت مخلوط آزمون انجام شود و مخلوط نهایی به دست آید.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۲۵	Mpa	مقاومت مشخصه مکعبی ۲۸ روزه f_c
نامشخص	Mpa	انحراف معیار بتن s
۴۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۰۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۳۵۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز (توصیه)
خوب		نمای لازم
۴/۵		درصد تقریبی هوای عمده
۶		درصد تقریبی هوای کل

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند ۵	نامشخص	310 Kg/cm^2

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع افزودنی	چگالی افزودنی	درصد وزنی مصرف افزودنی نسبت به سیمان
جبابزای مایع	۱/۰۱	۰/۲ تا ۰/۱ درصد

جدول ۴- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

چگالی ذرات SSD	شن مخلوط	ماسه
۲/۵۸۰	۲/۵۱۴	
درصد ظرفیت جذب آب	۲/۵	۳/۰
شکل	کاملاً تیز گوشه	کاملاً گرد گوشه
درصد شکستگی معادل	۱۰۰	۰

جدول ۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

الک م.م	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن مخلوط	۱۰۰	۷۰	۴۰	۱۷	۳	۰	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۲	۸۵	۶۵	۴۸	۲۷	۱۰	۳

راه حل

در این مثال نیز ابتدا قبل از تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم به تعیین محدوده دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها برای دستیابی به مخلوط مورد نظر می‌پردازیم.

گام ۱: مشخص نمودن محدوده دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه همان ۲۵ میلی متر منظور می‌شود. با توجه به نمای خوب محدوده مورد نظر بین منحنی B_{20} و A_{20} (در ناحیه n بین ۰/۵۵ و ۰/۴۵) در نظر گرفته خواهد شد. با این حال باید دانست که در بتن حبابدار با وجود حباب‌های ریز انتهای منحنی دانه‌بندی (الک‌های ۰/۳ و ۰/۱۵ میلی متر) می‌تواند کمی پایین‌تر نیز واقع شود. برای اسلامپ‌های کم نیز ریز بودن بیش از حد می‌تواند مشکل‌زا باشد. با توجه به روش محاسباتی (آزمون و خطا) و یا روش‌های ترسیمی می‌توان سهم سنگدانه‌ها را به دست آورد. در این مثال با توجه به دانه‌بندی مطلوب و دانه‌بندی مصالح موجود سهم ماسه ۵۰ درصد و سهم شن ۵۰ درصد منظور می‌شود و دانه‌بندی مخلوط حاصله را مشخص می‌کنیم و با محدوده مطلوب مقایسه می‌نماییم.

جدول ۶- محاسبه دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با توجه به سهم هر یک و ارائه منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب

منحنی				مخلوط سنگدانه	ماسه ۵۰٪	شن مخلوط ۵۰٪	الک (م.م)
$n=0/45$	$n=0/55$	B_{20}	A_{20}				
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۲۵
۸۷	۸۵	۸۹	۸۳	۸۵	۵۰	۳۵	۱۹
۷۱	۶۷	۷۵	۶۲	۷۰	۵۰	۲۰	۱۲/۵
۶۲	۵۷	۶۷	۵۱	۵۸/۵	۵۰	۸/۵	۹/۵
۵۰	۴۵	۵۶	۳۹	۴۷/۵	۴۶	۱/۵	۶/۳۵
۴۳	۳۸	۴۹	۳۲	۴۲/۵	۴۲/۵	۰	۴/۷۵
۳۰	۲۴	۳۶	۱۹	۳۲/۵	۳۲/۵		۲/۳۸
۲۰	۱۵	۲۵	۱۱	۲۴	۲۴		۱/۱۹
۱۲	۹	۱۶	۶	۱۳/۵	۱۳/۵		۰/۶
۷	۵	۹	۳	۵	۵		۰/۳
۳	۲	۴	۱	۱/۵	۱/۵		۰/۱۵

مشاهده می‌شود منحنی مخلوط سنگدانه مناسب می‌باشد و عملاً می‌تواند قابل قبول باشد. در این مثال می‌توان مقدار ماسه را کمی بیشتر در نظر گرفت. کاهش جزئی در مقدار ماسه مانعی ندارد، اما کاهش زیاد به خشن شدن مخلوط کمک جدی می‌کند. به هر حال با وجود مواد حبابزا می‌توان این مخلوط را مناسب تلقی کرد.

گام ۲: محاسبه مدول ریزی مخلوط حاصله

با توجه به تعریف مدول ریزی، برای مخلوط حاصله، مدول ریزی برابر است با:

$$F.M. = \frac{15 + 41/5 + 57/5 + 67/5 + 76 + 86/5 + 95 + 98/5}{100} = 5/38$$

مدول ریزی منحنی B_{20} و A_{20} به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۹۵ و مدول ریزی برای منحنی‌های $n=0/50$ و $n=0/40$ به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۳۶ می‌باشد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

طبق رابطه ب-۱ می‌توان چگالی متوسط SSD سنگدانه‌های مخلوط را با توجه به سهم و چگالی SSD هر یک بدست آورد.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}}} = \frac{1}{\frac{0/5}{2/58} + \frac{0/5}{2/514}} = 2/547$$

تعیین چگالی متوسط ضرورت ندارد.

گام ۴: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط (مقاومت هدف یا نشانه طرح)

با توجه به نامشخص بودن انحراف معیار بتن می‌توان با توجه به آیین‌نامه بتن ایران حاشیه امنیت مورد نظر را بر اساس مقاومت مشخصه موجود منظور نمود و یا با توجه به جداول ۱-۳ و ۲-۳ مندرج در روش طرح مخلوط موجود انحراف معیار را مشخص کرد. در این مثال مقاومت مشخصه به صورت مکعبی مطرح شده است بنابراین با توجه به جدول تبدیل مقاومت مکعبی به استوانه‌ای مندرج در فصل ششم تفسیر آبا مقاومت استوانه‌ای برابر 20 N/mm^2 بدست می‌آید.

اگر از فصل ششم آبا مقدار حاشیه امنیت بدست آید داریم:

$$f_{cm} = f_c + 8/5 = 20 + 8/5 = 28/5 \text{ N/mm}^2$$

اگر از روش موجود بهره بگیریم با توجه به ساخت بتن به روش سنجش حجمی برای ساخت بتن با بتونیر از جدول ۲-۳ رتبه کارگاه از نظر کنترل کیفیت "ج" به دست می‌آید و از جدول ۱-۳ برای مقاومت مشخصه 20 N/mm^2 مقدار انحراف معیار 5 N/mm^2 حاصل می‌شود و با توجه به روابط (۱-۳) داریم:

$$f_{cm} = f_c + 1/345 + 1/5 = 20 + 1/34 \times 5 + 1/5 = 28/2 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cm} = f_c + 2/335 - 4/10 = 20 \times 2/33 \times 5 - 4 \approx 27/7 \text{ N/mm}^2$$

که مقاومت متوسط لازم برای طرح $28/2 \text{ N/mm}^2$ خواهد بود.

اگر مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح بیشتر از مقادیر مندرج در آبا به دست آید همان مقدار توصیه شده در آبا به کار گرفته می‌شود. در اینجا مقاومت هدف $28/5 \text{ N/mm}^2$ را بکار می‌بریم.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

مقاومت‌های شکل ۱-۴ مربوط به بتن معمولی است و برای بتن حباب‌دار با ۴/۵ درصد حباب هوای عمده حدود ۱۸ تا ۲۲ درصد از مقاومت کاسته می‌شود. می‌توان با در نظر گرفتن مقاومت $28/5$ ، نسبت آب به سیمان را بدست آورد و ۱۸ تا ۲۲ درصد از آن کاست. سیمان مورد نظر پرتلند نوع ۵ است که طبق استاندارد ایران حداقل مقاومت ملات استاندارد ۲۸ روزه آن 270 kg/cm^2 می‌باشد. اما با توجه به مشخص بودن سطح مقاومتی سیمان، همان مقاومت ملات را در نظر می‌گیریم بنابراین منحنی فرضی ۳۱۰ را به جای ۳۲۵ منظور می‌کنیم. سنگدانه درشت موجود تیز گوشه است و بنابراین منحنی فرضی C-۳۱۰ به جای C-۳۲۵ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مقدار نسبت آب به سیمان تقریباً ۰/۴۲ (با توجه به کاهش ۲۰ درصدی به دلیل وجود حباب هوای عمده) به دست می‌آید که از ۰/۴۵ کمتر است و بکار می‌رود.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط بتن

با توجه به مدول ریزی ۵/۳۸ و رده اسلامپ S_1 و روانی ۴۰ میلی متر از شکل ۶-۴ برابر 145 kg/m^3 حاصل می‌شود. از شکل ۶-۷ مقدار آب آزاد 165 kg/m^3 خواهد بود اما به خاطر



شکل سنگدانه‌های ریز و درشت مقدار 102 kg/m^3 منظور می‌شود. در این حالت حدود ۱۶ تا ۱۸ درصد از آب بتن باید کاست زیرا $4/5$ درصد حباب عمدی وجود دارد و بنابراین آب بتن در این حالت را حدود 126 kg/m^3 در نظر می‌گیریم. درصد شکستگی متوسط معادل در مخلوط سنگدانه عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0/5 \times 100 + 0/5 \times 0}{0/5 + 2 \times 0/5} \cong 33$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن طرح

با توجه به نسبت آب به سیمان طرح یعنی $0/42$ و مقدار آب آزاد 126 kg/m^3 داریم:

$$\text{مقدار سیمان} = \frac{126}{0/42} \approx 300 \text{ kg/m}^3$$

بنابراین سیمان 300 kg/m^3 را در نظر می‌گیریم.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک موجود در بتن

برای تعیین مقدار سنگدانه علاوه بر مشخص بودن مقادیر سیمان و آب آزاد لازم است چگالی آن‌ها مشخص باشد. چگالی ذرات سیمان در این مثال داده نشده است بنابراین با توجه به پیوست "پ" چگالی ذرات سیمان پرتلند نوع ۵ برابر $3/20$ فرض می‌شود. درصد هوای بتن ۶ درصد می‌باشد و در رابطه مورد نظر مقدار ۶۰ لیتر هوای کل به کار می‌رود که ۱۵ درصد آن هوای غیر عمدی می‌باشد.

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left(100 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a \right) = 2/547 \left(100 - \frac{300}{3/20} - \frac{126}{1} - 60 \right) \approx 1834 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

مقدار شن SSD برابر ۹۱۷ و مقدار ماسه SSD برابر ۹۱۷ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود. می‌توان حجم سنگدانه‌ها را بدست آورد و در مرحله بعد حجم هر یک را با توجه به سهم‌ها بدست آورد و در نهایت جرم آنها را مشخص نمود.

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل بتن

مقادیر سنگدانه خشک و آب کل که برای ساخت بتن مخلوط آزمون ضرورت دارد به صورت زیر خواهد بود:

$$G_d = \frac{917}{1/0.25} \approx 894/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن خشک}$$

$$S_d = \frac{917}{1/0.30} \approx 890/5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{ماسه خشک}$$

$$W_t = 120 + 22/5 + 26/5 = 170 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین جرم مخصوص بتن متراکم تازه

با توجه به هوای موجود ۶ درصدی مفروض در بتن جرم مخصوص بتن تازه متراکم عبارت است از:

$$\rho_B = 1834 + 300 + 126 = 2260 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۱: تعدیل طرح مخلوط پس از ساخت مخلوط آزمون

پس از ساخت مخلوط آزمون با مقادیر مصالح به دست آمده و با کنترل رطوبتی و به کارگیری مقدار معینی از ماده حبابزا مثلاً ۰/۱۵ درصد وزن سیمان برای دستیابی به درصد هوای مورد نظر، نتایج زیر حاصل شده است.

اسلامپ بتن پس از ۵ دقیقه ۱۰ میلی متر، درصد هوای کل بتن ۴/۵ درصد، چگالی بتن متراکم تازه 2300 kg/m^3 و مقاومت بتن (استوانه ای) ۲۸ روزه 32 N/mm^2 حاصل شده است. جداسدگی و آب انداختن مشاهده نشده است و ظاهر بتن از نظر دانه بندی، نما و تراکم پذیری نسبتاً خوب است.

الف: مشکل خاصی در مورد دانه بندی، آب انداختن و جداسدگی وجود ندارد. بنابراین دانه بندی و برخی ویژگی های وابسته به آن مناسب است.

ب: تعدیل مقدار آب آزاد: برخلاف سایر موارد، در بتن حبابدار وقتی میزان درصد حباب هوا در حد مورد نیاز نباشد نمی توان به سادگی تعدیل در مقدار آب آزاد را با توجه به روانی موجود انجام داد. در این رابطه باید فرض نمود که اگر درصد هوا به حد مطلوب برسد آیا نیازی به تغییر و تعدیل در مقدار آب آزاد وجود دارد یا خیر؟

در این مثال اگر بخواهیم روانی به ۴۰ میلی متر برسد نیاز به تغییر آب به میزان زیر داریم:

$$135 \text{ kg/m}^3 = 126 + 9 \Rightarrow 9 \text{ kg/m}^3 = (10-40) \times 0.3 = \text{تغییر آب آزاد}$$

با این حال اگر ۱/۵ درصد هوا در بتن بالاتر می رفت و به ۶ درصد می رسید نیاز به آب ۵ تا ۶ درصد کاهش می یافت و این مقدار در این مثال بین ۶/۵ تا ۸ لیتر می گردید. بنابراین به نظر می رسد اگر مقدار آب تا حدود ۱۲۷ تا ۱۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب بالا رود، مطلوب خواهد بود.

ج: تعدیل در نسبت آب به سیمان: در بتن حبابدار نیز نمی توان بدون توجه به درصد هوای بتن موجود، تعدیلی را در W/C به انجام رسانید. مقاومت موجود بتن بالاتر از نیاز ما یعنی 32 N/mm^2 حاصل شده که با $28/5 \text{ N/mm}^2$ فاصله دارد. علاوه بر این، کمبود ۱/۵ درصد هوا در مقایسه با ۶ درصد هوای مورد نیاز احتمالاً در حدود ۶ تا ۷/۵ درصد افزایش مقاومت ایجاد کرده است (حدود 2 N/mm^2).

بنابراین اگر این موارد را در نظر بگیریم مقاومت مورد نظر یعنی 30 N/mm^2 باید حاصل می گردید (با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲). اگر به واسطه افزایش مقاومت بخواهیم نسبت آب به سیمان را تصحیح کنیم:

$$\left(\frac{W}{C}\right)_n = 0.42 + 0.42 \left(\frac{30 - 28/5}{28/5} \right) = 0.44$$

در حالی که مجبوریم حداقل سیمان 300 kg/m^3 را به کار ببریم و نسبت آب به سیمان موجود ۰/۴۴ و حداکثر مجاز ۰/۴۵ منظور شود، عملاً نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ در نظر گرفته می شود. در ضمن بحث قبلی یعنی امکان افزایش مقدار آب و روانی می تواند به قوت خود باقی باشد. یعنی آب به حد ۱۳۲ کیلوگرم می رسد.

د: تعدیل در مقدار عیار سیمان: در این مثال جایی برای تعدیل عیار سیمان وجود ندارد و باید همان 300 kg/m^3 بکار رود.

ه: تعدیل در مقدار سنگدانه SSD، سنگدانه خشک: با فرض همان ۶ درصد هوای لازم در بتن و تغییر در مقدار آب و رسانیدن آن به میزان 132 kg/m^3 می توان مقدار سنگدانه را محاسبه نمود.

$$A_{SSD} = 2/547 \left(1000 - \frac{300}{3/2} - \frac{132}{1} - 60 \right) = 180.4 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{SSD} = 90.2 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{و} \quad S_{SSD} = 90.2 \text{ Kg/m}^3$$

پس

$$\rho_B = 2236 \text{ kg/m}^3$$

و: تعدیل در مقدار هوای موجود: به جای ۶ درصد هوا، ۴/۵ درصد حاصل شده است. عملاً بجای ۴/۵ درصد هوای عمدی، ۳ درصد هوای عمدی حاصل شده است. بنابراین باید با افزایش میزان مصرف افزودنی حباب‌زا سعی نمود مشکل را حل کرد. شاید نیاز باشد تا نزدیک به ۳۵ درصد بر مصرف این افزودنی بیافزاییم. با کاهش ۱/۵ درصد در هوای این بتن معمولاً در حدود ۳۵ کیلوگرم افزایش در چگالی بتن منطقی به نظر می‌رسد. جرم مخصوص بتن به جای ۲۲۶۰ برابر 2300 Kg/m^3 به دست آمده است که غیر عادی به نظر نمی‌رسد. بنابراین احتمال می‌رود با افزایش درصد هوا، جرم مخصوص بتن تصحیح گردد. لازم به ذکر است معمولاً با افزایش روانی، درصد هوا نیز بالاتر می‌رود (صرفاً در بتن حباب‌دار). هم‌چنین با افزایش درصد حباب هوای عمدی در بتن نیز در مجموع کارایی و روانی بهبود می‌یابد. بطور کلی می‌توان گفت تعدیل بتن حباب‌دار امری دشوار می‌باشد.

مثال ۸-

مطلوب است طرح اختلاط بتنی برای ساخت دیواره و پایه پل بر روی یک رودخانه آب شور در یک منطقه نسبتاً سردسیر و تعیین مقادیر اجزاء آن شامل سیمان، دوده سیلیسی، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک به تفکیک و تعیین جرم مخصوص بتن متراکم تازه و با درصد هوای ناخواسته (غیر عمدی) معمول با توجه به اطلاعات داده‌های ارائه شده در این مثال. بتن مورد نظر در اجرا با تراک میکسر به محل حمل و سپس با پمپ ریخته می‌شود. هم‌چنین لازم است با توجه به نتایج ساخت مخلوط آزمون، تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه انجام گردد و مخلوط نهایی ارائه شود.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۳۰	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c
۵	Mpa	انحراف معیار بتن S
۱۲۵	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان برای دوام
۳۵۰	Kg/m^3	حداقل مواد سیمانی مجاز
۴۵۰	Kg/m^3	حداکثر مواد سیمانی مجاز
نسبتاً خوب		نمای لازم



جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm^2
پرتلند ۴۲۵-۱	۳/۰۷	۴۴۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به مواد سیمانی مصرفی

نوع ماده جایگزین سیمان	چگالی ذرات ماده افزودنی معدنی	درصد جایگزینی دوده سیلیسی
دوده سیلیسی	۲/۲۷	۶

جدول ۴- اطلاعات افزودنی فوق روان کننده

نوع افزودنی	چگالی مایع	قدرت کاهندگی آب (%)	درصد توصیه شده نسبت به وزن سیمان
فرم آلدئید نفتالین سولفوناته	۱/۱۸	۱۲-۲۴	۱/۲-۰/۴

جدول ۵- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

	شن بادی	شن نخودی	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۷۰۵	۲/۶۹۵	۲/۷۴۵
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۱	۱/۲	۱/۴
شکل	کاملاً تیز گوشه	کاملاً تیز گوشه	کاملاً گرد گوشه
درصد شکستگی معادل تمام جبهه‌ها	۱۰۰	۱۰۰	-
درصد پولکی	۱۷	۱۴	-
درصد کشیدگی	۱۳	۱۵	-

جدول ۶- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن درشت		۱۰۰	۹۵	۴۰	۱۵	۵	۰					
شن متوسط		۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۶۵	۱۰	۴	۰				
ماسه		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۷۰	۴۵	۲۵	۱۵	۷

راه‌حل

در این مثال ابتدا به سراغ تعیین دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها می‌رویم.

گام ۱: مشخص نمودن دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها برای دستیابی به

مخلوط دلخواه

حداکثر اندازه اسمی این سنگدانه عملاً ۱۹ میلی متر است. مقدار ناچیز سنگدانه بر روی الک ۱۹ میلی متر نشانه آن است که هر چند حداکثر اندازه واقعی ۲۵ میلی متر می‌باشد اما حداکثر اندازه اسمی کاربردی در بتن همان ۱۹ میلی متر است. بنابراین به سراغ شکل ۴-۳ می‌رویم. منحنی مطلوب و محدوده مطلوب دانه‌بندی با توجه به نما و پمپی بودن بتن در بین A_{19} و B_{19} قرار دارد اما در بتن پمپی ریز دانه کردن زیاد و نزدیکی به منحنی B_{19} نیز توصیه نمی‌شود؛ اما بهتر است در نیمه فوقانی ناحیه (۱) و بین منحنی‌های متناظر با n برابر ۰/۵ و ۰/۴ واقع گردد.

وجود سیمان نسبتاً زیاد در این بتن به همراه دوده سیلیسی می‌تواند بافت خمیری‌تری را به وجود آورد و ریز کردن بیش از حد می‌تواند مزاحمت‌هایی را در پمپ کردن به وجود آورد ضمن این که به افزایش آب مورد نیاز برای تأمین روانی و افزایش عیار مواد سیمانی منجر می‌گردد که باعث جمع‌شدگی‌های شدیدتری (به ویژه با وجود دوده سیلیسی) می‌شود. لذا دانه‌بندی مطلوب بهتر است زیاد به B_{19} نزدیک نباشد. هم چنین بهتر است سهم شن نخودی در حداقل ممکن نگهداشته شود.

با توجه به محدوده مورد نظر و روش آزمون و خطای محاسباتی سهم‌های اولیه را به قرار ذیل انتخاب می‌کنیم. با این سهم‌ها دانه‌بندی مخلوط حاصله را با محدوده مورد نظر

یعنی بین دو منحنی B_{19} و A_{19} و منحنی‌های $n=0/5$ و $n=0/4$ مقایسه می‌کنیم.

جدول ۷- محاسبه دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با توجه به سهم هر یک و منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب

الک (م.م)	شن		ماسه ۰.۵٪	مخلوط سنگدانه	منحنی			
	بادامی ۳۰٪	نخودی ۲۰٪			A_{19}	B_{19}	$n=0/5$	$n=0/4$
۲۵	۳۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۲۸/۵	۲۰	۵۰	۹۸/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۱۲	۱۹	۵۰	۸۱	۷۵	۸۴	۸۰	۸۳
۹/۵	۴/۵	۱۳	۵۰	۶۷/۵	۶۲	۷۵	۶۹	۷۳
۶/۳۵	۱/۵	۲	۵۰	۵۳/۵	۴۷	۶۳	۵۵	۶۰
۴/۷۵	۰	۰/۸	۴۵	۴۶	۳۸	۵۵	۴۷	۵۲
۲/۳۸		۰	۳۵	۳۵	۲۳	۴۰	۳۱	۳۷
۱/۱۹			۲۲/۵	۲۲/۵	۱۴	۲۸	۲۰	۲۵
۰/۶			۱۲/۵	۱۲/۵	۸	۱۸	۱۲	۱۶
۰/۳			۷/۵	۷/۵	۴	۱۱	۷	۹
۰/۱۵			۳/۵	۳/۵	۲	۵	۳	۴

مشاهده می‌شود که منحنی دانه‌بندی مطلوب سنگدانه در نیمه فوقانی ناحیه (۱) می‌باشد. مسلماً به دلیل این که حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی متر و حداکثر اندازه واقعی ۲۵ میلی متر بود در مورد الک ۱۹ میلی متر عدد ۱۰۰ درصد به دست نمی‌آید و از این نظر مشکلی نخواهیم داشت. در مورد الک‌های ۹/۵ و ۴/۷۵ نیز منحنی مخلوط اندکی پایین تر از منحنی $n=0/5$ قرار دارد که اهمیت زیادی ندارد، به ویژه اینکه بتن پمپی داریم.

گام ۲: محاسبه مدول ریزی مخلوط حاصله

با توجه به تعریف مدول ریزی، این مدول برای مخلوط به دست آمده با سهم‌های فوق برابر است با:

$$F.M. = \frac{1/5 + 32/5 + 54 + 65 + 77/5 + 87/5 + 92/5 + 96/5}{100} = 5/07$$

مدول ریزی منحنی B_{19} و A_{19} به ترتیب $4/69$ و $5/50$ و مدول ریزی دو منحنی مطلوب دیگر به ترتیب $5/11$ و $4/84$ می باشد و مدول ریزی منحنی دانه بندی حاصله می تواند منطقی و قابل قبول باشد.

گام ۳: تعیین جرم مخصوص متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه
با توجه به چگالی (جرم مخصوص) و سهم هر یک از سنگدانه ها می توان طبق رابطه ب-۱ جرم مخصوص متوسط SSD مخلوط را به دست آورد.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}} + \frac{p_3}{\rho_{A_3}} + \frac{p_4}{\rho_{A_4}}} = \frac{1}{\frac{0.3}{2.705} + \frac{0.2}{2.695} + \frac{0.5}{2.745}} = 2.723$$

گام ۴: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط (مقاومت هدف طرح)
با توجه به مشخص بودن انحراف معیار از روابط (۱-۳) و (۲-۳) مقاومت فشاری متوسط به دست می آید. در صورتی که انحراف معیار مشخص نشده باشد و نتوان آن را با اطلاعات موجود در پروژه و یا سایر پروژه های مشابه به دست آورد می توان از جدول ۳-۱ و ۳-۲ بهره گرفت.

$$f_{cm} = f_c + 1/3 \varepsilon_s + 1/5 = 30 + 1/3 \times 4 \times 5 + 1/5 = 38/2 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cm} = f_c + 2/3 \varepsilon_s - 4/10 = 30 + 2/3 \times 3 \times 5 - 4/10 = 37/6 \text{ N/mm}^2$$

بنابراین بزرگترین مقدار همان مقاومت هدف طرح مخلوط خواهد بود یعنی $38/2$ را در مرحله بعدی بکار می بریم.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان بتن

از آن جا که مصرف دوده سیلیسی بدون مصرف فوق روان کننده جایز نیست لذا از منحنی های مربوط به شکل ۲-۴ این راهنما استفاده می کنیم.

با توجه به نزدیکی مقاومت ملات استاندارد سیمان موجود به حداقل مقاومت ملات استاندارد سیمان نوع ۴۲۵-۱ از منحنی های ۴۲۵ استفاده می کنیم. سنگدانه درشت موجود کاملاً تیز گوشه و صد درصد شکسته است بنابراین از منحنی C-۴۲۵ باید استفاده کرد. با توجه به شکل ۲-۴ و در نظر گرفتن مقاومت هدف $38/2 \text{ N/mm}^2$ نسبت آب به سیمان در

حدود ۰/۵۱۵ به دست می‌آید. داده‌های موجود حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ منظور شده است لذا نمی‌توان از این مقدار تجاوز نمود و لازم است نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ یا کمتر بکار رود. ضمناً همان طور که دیده می‌شود در این مورد نتایج حاصله از منحنی‌های ۱-۴ و ۲-۴ تفاوتی ندارد.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

با داشتن مدول ریزی، حدود اسلامپ و رده‌بندی آن می‌توان مقدار آب آزاد را از دو شکل ۶-۴ و ۷-۴ به دست آورد و سپس با توجه به شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها مقدار آب آزاد طرح را حدس زد.

از شکل ۶-۴ با داشتن مدول ریزی ۵/۰۷ و رده اسلامپ S_3 (روانی ۱۲۵ میلی متر) مقدار آب آزاد ۱۸۰ به دست می‌آید. از شکل ۷-۴ مقدار آب آزاد ۲۰۰ تعیین می‌شود. معادل درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌ها عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0.5 \times 100 + 2 \times 0.5 \times 0}{0.5 + 2 \times 0.5} \cong 29$$

بنابراین فعلاً بدون این که مصرف روان کننده و دوده سیلیسی را در نظر بگیریم مقدار آب آزاد در حدود ۱۸۷ بدست می‌آید که بعداً اصلاح خواهد شد.

گام ۷: تعیین مقدار مواد سیمانی (سیمان و دوده سیلیسی)

با توجه به مقدار آب آزاد و نسبت آب به سیمان مقدار مواد سیمانی به دست می‌آید.

$$\text{مقدار مواد سیمانی معادل} = \frac{187}{0.45} = 415$$

این مقدار از 450 Kg/m^3 مجاز کمتر است. به هر حال جمع مقدار سیمان و دوده سیلیس باید کمتر از ۴۵۰ باشد. با توجه به رابطه مواد سیمانی معادل و از آن جا که در واقع نسبت آب به سیمان برای کسب مقاومت ۰/۵۱۵ بود و بدون حباب‌زا در منطقه سردسیر هستیم؛ پس طبق جدول ۲-۴ روش ملی طرح مخلوط $k=1$ منظور می‌شود. اگر این شرایط حاکم نبود ضریب دوده سیلیسی یعنی k برابر ۲ منظور می‌شد.

$$k.M+C=415$$

مقدار دوده سیلیسی جایگزین ۶ درصد می‌باشد. درصد دوده سیلیسی به مقدار سیمان

M/C به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = 100 - 6 = 94 \Rightarrow \frac{M}{C} = \frac{6}{94} = 6/38$$

$$C + 6/38 C = 415 \Rightarrow C = 390 \text{ Kg/m}^3 \text{ و } M = 25 \text{ Kg/m}^3$$

در نتیجه جمع مواد سیمانی از 450 Kg/m^3 کمتر است. لازم به ذکر است در تعیین و محاسبه حداکثر مقدار مواد سیمانی از تأثیر فاکتور k استفاده نمی‌شود و تأثیر این فاکتور مربوط به تعیین آب به مواد سیمانی و محاسبه حداقل مقدار مواد سیمانی است. از آن جا که این مقدار از ۳۵۰ بیشتر و حاوی دوده سیلیسی است باید به ترتیب ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم آب را بدان افزود؛ بنابر این مقدار آب ۲۱۷ کیلوگرم می‌شود و مقدار مواد سیمانی معادل ۴۸۲ خواهد شد و اگر محاسبات فوق تکرار گردد مقدار سیمان ۴۵۳ و مقدار دوده سیلیسی ۲۹ کیلوگرم خواهد شد. لازم است مواد سیمانی را کاهش داد ضمن این که از سقف مجاز بیشتر است، همچنین برای پمپ نیز زیاد است.

لازم به ذکر است در بتن پمپی این مقدار مواد سیمانی حاوی دوده سیلیس، زیاد و بیش از حد می‌باشد و بهتر است آن را به 400 Kg/m^3 (با دوده سیلیس) محدود نمود. در این حالت مصرف کاهنده آب ضرورت دارد تا بتوان آب آزاد مورد نیاز و مواد سیمانی را کاهش داد.

در این حالت اگر جمع مواد سیمانی ۴۰۰ باشد مقدار سیمان ۳۷۶ و دوده سیلیسی ۲۴ کیلوگرم خواهد بود. در واقع ما نیاز به حدود ۱۷ درصد کاهش آب داریم و فعلاً مقدار ۰/۷۵ درصد فوق روان کننده (معادل ۳ کیلو) را در نظر می‌گیریم. مقدار آب آزاد با توجه به موارد فوق ۱۸۰ کیلوگرم می‌شود.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه در بتن

با توجه به عیار مواد سیمانی و آب آزاد و جرم مخصوص هر یک از آن‌ها می‌توان مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک را بدست آورد. مسلماً در این رابطه نیاز به میزان هوای بتن (عمدی یا غیر عمدی) داریم. درصد هوای غیر عمدی (ناخواسته) را در بتن نسبتاً روان فعلاً ۱/۲۵ درصد (۱۲/۵ لیتر در متر مکعب) در نظر می‌گیریم و اگر حجم روان کننده نیز ۲/۵ لیتر باشد داریم:

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left(100 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a \right) = 2/722 \left(100 - \frac{376}{3/07} - \frac{24}{2/27} - \frac{180}{1} - 15 \right) \approx 1830$$

$$G_{1SSD} = 549 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{مقدار شن بادامی SSD}$$

$$G_{2SSD} = 366 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{مقدار شن متوسط SSD}$$

$$S_{SSD} = 915 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{مقدار ماسه SSD}$$

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل

مقادیر سنگدانه خشک و آب کل که برای ساخت بتن مخلوط آزمون ضرورت دارد به صورت زیر خواهد بود:

$$G_{1d} = \frac{549}{1+0/011} \approx 543 \text{ kg/m}^3 \quad \text{شن بادامی خشک}$$

$$G_{2d} = \frac{366}{1+0/012} = 361/5 \text{ kg/m}^3 \quad \text{شن نخودی خشک}$$

$$S_d = \frac{915}{1+0/014} \approx 902/5 \text{ kg/m}^3 \quad \text{ماسه خشک}$$

$$W_t = 180 + 6 + 3/5 + 12/5 = 203 \text{ kg/m}^3$$

این آب حاوی آب افزودنی می باشد و بهتر است در حدود ۲ کیلوگرم از آن کسر شود.

گام ۱۰: تعیین جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه

$$\rho_B = 1830 + 400 + 180 + 2 = 2412 \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۱: تعدیل طرح مخلوط اولیه با توجه به نتایج مخلوط آزمون

پس از ساخت مخلوط آزمون با نتایج حاصله از طرح مخلوط اولیه، اسلامپ بتن پس از ۳۰ دقیقه برابر ۹۰ میلی متر و درصد هوای بتن ۰/۸ درصد و وزن یک متر مکعب بتن تازه ۲۴۳۰ کیلوگرم به دست آمد. هم چنین بتن از انسجام و خمیری بودن کافی برخوردار بود و آب انداختگی مشاهده نشد ولی چسبندگی آن برای پمپ کردن کمی زیاد به نظر می رسد. مقاومت ۲۸ روزه استوانه ای بتن $47/5 \text{ N/mm}^2$ به دست آمده است. بنابراین طبق پیوست شماره ۱ باید تعدیل لازم انجام شود تا طرح مخلوط نهایی به دست آید.

الف: با توجه به عدم مشکل آب انداختگی، جداشدگی و خشن بودن تغییری در دانه بندی نیاز نداریم. مشکل جزئی چسبناکی به دلیل عیار نسبتاً زیاد مواد سیمانی و وجود دوده سیلیسی به وجود آمده است.

ب: تعدیل مقدار آب آزاد

نیاز به حداقل اسلایپ ۱۲۵ میلی متر داریم. نمی توانیم آب را زیاد کنیم زیرا مواد سیمانی محدود به ۴۰۰ است و باید روان کننده را اضافه نماییم و آن را به سطح ۱ درصد (۴ کیلو) می رسانیم.

$$W/C = ۱۸۰ + ۷ = ۱۸۷ \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \text{آب آزاد} = ۷ \text{ kg/m}^3 = (۱۲۵ - ۹۰) \times ۰/۲ = \text{تغییر آب آزاد}$$

ج: تعدیل W/C: در این مثال نمی توان در W/C تعدیل کرد زیرا تعیین کننده W/C طرح، دوام بوده است و چون مقاومت حاصله بیشتر شده، تعدیل میسر نیست.

د: تعدیل مقدار سیمان و دوده سیلیسی: چون آب تغییر نداشته و نسبت آب به سیمان تغییر نکرده است، مقدار سیمان و دوده سیلیسی تغییر نمی کند.

ه: تعدیل در مقادیر سنگدانه SSD و خشک و آب کل و جرم مخصوص بتن:

هوای بتن را همان ۰/۸ درصد گرفتیم ضمن این که می توانستیم آن را در حدود ۰/۷۵ درصد منظور نماییم که با منظور نمودن حجم فوق روان کننده عملاً همان ۱۰ لیتر می شود.

$$A_{SSD} = ۲/۷۲۳ \left(۱۰۰۰ - \frac{۳۷۶}{۳/۰۷} - \frac{۲۴}{۲/۲۷} - \frac{۱۸۰}{۱} - ۱۰ \right) = ۱۸۵۶ \text{ kg/m}^3$$

$$G_{1SSD} = ۵۵۷ \text{ Kg/m}^3 \quad G_{2SSD} = ۳۷۱ \text{ Kg/m}^3 \quad S_{SSD} = ۹۲۸ \text{ Kg/m}^3$$

پس

$$G_{1d} = ۵۵۱ \text{ kg/m}^3 \quad G_{2d} = ۳۶۶/۵ \text{ kg/m}^3 \quad S_d = ۹۱۵ \text{ kg/m}^3$$

$$W_t = ۱۸۰ + ۶ + ۴/۵ + ۱۳ = ۲۰۳/۵ \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_B = ۱۸۵۶ + ۴۰۰ + ۲ + ۱۸۰ = ۲۴۳۸ \text{ kg/m}^3$$

از آب کل حدود ۲/۵ کیلوگرم به دلیل وجود آب در فوق روان کننده باید کسر نمود.

و: مقدار هوای حاصله ۰/۸ درصد بوده است. تفاوت موجود می تواند قابل قبول باشد.

جرم یک متر مکعب بتن هر چند بیشتر از محاسبه به دست آمده است اما کاملاً طبیعی است زیرا هوای بتن کمتر بوده است حتی افزایش یا کاهش جرم مخصوص بتن تا حد ۱ درصد مقدار محاسباتی نگران کننده نیست. بنابراین طرح مخلوط نهایی آماده است.

در مثال فوق می‌توان به جای این که سیمان و دوده سیلیسی و چگالی ذرات آن‌ها را جداگانه در رابطه با حجم مطلق برای تعیین مقدار سنگدانه SSD قرار دهیم، مقدار مجموع مواد سیمانی را به همراه چگالی متوسط ذرات آن‌ها (با توجه به ثابت بودن نسبت این دو در مواد سیمانی) در رابطه مورد نظر قرار دهیم. بنابراین برای یافتن چگالی متوسط ذرات مواد سیمانی داریم (طبق بند ۴-۵-۴ این راهنما):

$$\rho_B = \frac{1}{\frac{p_C}{\rho_C} + \frac{p_M}{\rho_M}} = \frac{1}{\frac{0.94}{3.07} + \frac{0.06}{2.27}} = 3.006 \approx 3.01$$

بنابراین با بکار بردن مقدار ۳/۰۱ عملاً تغییر چندانی در حل مثال حاصل نمی‌شود و تغییرات موجود به تقریب و گرد کردن اعداد برمی‌گردد.

مثال ۹-

طرح مخلوط بتنی برای تعمیر یک پایه و دیواره و سقف عرشه یک پل آسیب دیده با روش بتن‌پاشی در یک منطقه معتدل مورد نیاز است و محاسبه مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک وزن یک متر مکعب بتن تازه متراکم با توجه به حداکثر درصد هوای ناخواسته ممکن در بتن و در نظر گرفتن اطلاعات و داده‌های زیر لازم است. روش بتن‌پاشی از نوع تر (مرطوب) می‌باشد و بتن در یک بتونیر مخصوص با کنترل وزنی ساخته می‌شود و سریعاً در فاصله زمانی کوتاهی پاشیده می‌شود.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۳۰	Mpa	مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c
۴	Mpa	انحراف معیار بتن S
۷۰	mm	اسلامپ پس از ۵ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۹/۵	mm	حداکثر اندازه مجاز سنگدانه
۳۷۵	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۵۵۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز



نسبتاً خوب	نمای لازم
------------	-----------

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد ۲۸ روزه kg/cm^2
پرتلند سرباره‌ای ضد سولفات	۳/۰۰	۳۴۰

جدول ۳- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

نوع سنگدانه	چگالی ذرات (SSD)	ظرفیت جذب آب (درصد)	شکل	درصد شکستگی معادل	درصد پولکی	درصد کشیدگی	عدد سایش
شن ریز	۲/۶۸	۱/۱	نیمه شکسته	۷۵	۱۰	۱۲	۲۳
ماسه درشت	۲/۵۵	۲/۰	گردگوشه	-	-	-	-
ماسه ریز	۲/۵۸	۳/۲	گردگوشه	-	-	-	-

جدول ۴- دانه‌بندی (درصد گذشته تجمعی) سنگدانه‌ها

الک	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن ریز	۱۰۰	۴۰	۵	۰				
ماسه درشت	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۶۵	۴۵	۳۰	۱۵	۵
ماسه ریز	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۷۰	۵۰	۲۰

راه‌حل

گام ۱: مشخص نمودن محدوده دانه‌بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه‌ها

با توجه به حداکثر اندازه مجاز ۹/۵ میلی‌متر و دانه‌بندی موجود سنگدانه‌ها می‌توان از شن موجود استفاده نمود. محدوده دانه‌بندی مطلوب برای پاشیدن بتن بین منحنی $B_{9/5}$ و

$C_{9/5}$ و نزدیک‌تر به منحنی تحتانی می‌باشد تا پس‌زدگی (برگشت و کمانه کردن) کمتری بوجود آورد. در مواردی که دیده می‌شود که حتی اگر صد در صد سنگدانه‌ها از ماسه درشت موجود باشد نمی‌توان به هر دانه‌بندی مطلوب دست یافت و مصرف شن ریز نیز توجیهی ندارد بنابراین مجبور به استفاده از یک ماسه ریز برای بهبود دانه‌بندی و بکارگیری شن ریز هستیم. در ابتدا سهم ماسه ریز را ۲۵ درصد، سهم ماسه درشت را ۶۰ درصد و سهم شن ریز را نیز ۱۵ درصد در نظر می‌گیریم و دانه‌بندی مخلوط را بدست می‌آوریم و آن را با محدوده مورد نظر مقایسه می‌کنیم.

جدول ۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

الک (م.م)	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن ریز ۲۵٪	۲۵	۱۰	۱	۰				
ماسه درشت ۶۰٪	۶۰	۶۰	۵۷	۳۹	۲۷	۱۸	۹	۳
ماسه ریز ۱۵٪	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۳	۱۰/۵	۷/۵	۳
مخلوط حاصله	۱۰۰	۸۵	۷۳	۵۴	۴۰	۲۸/۵	۱۶/۵	۶
منحنی $B_{9/5}$	۱۰۰	۸۴	۷۴	۵۳	۳۷	۲۴	۱۴	۶

با اینکه در الک ۴/۷۵ منحنی کمی پایین‌تر از منحنی مطلوب است، اما دانه‌بندی مناسبی را داریم و در صورت نیاز می‌توان سهم ماسه ریز را ۲/۵ درصد کم نمود و در عوض به سهم ماسه درشت بیافزاییم اما همان سهم منظور شده را نیز می‌توان بکار گرفت.

گام ۲: مدول ریزی مخلوط حاصله

مدول نرمی مخلوط حاصله با سهم‌ها ق فوق برابر است با:

$$F.M. = \frac{27 + 46 + 60 + 71/5 + 83/5 + 94}{100} = 3/82$$

در حالیکه مدول نرمی منحنی‌های $B_{9/5}$ و $C_{9/5}$ به ترتیب برابر ۳/۹۲ و ۳/۲۷ می‌باشد و دیده می‌شود منحنی مخلوط حاصله نزدیکی خوبی با $B_{9/5}$ دارد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها

$$\rho_{ASSD} = \frac{1}{\frac{0.25}{2.68} + \frac{0.6}{2.55} + \frac{0.15}{2.58}} = 2.586$$

در صورت استفاده از تعیین حجم سنگدانه، نیازی به چگالی متوسط سنگدانه وجود ندارد.

گام ۴: مقاومت هدف طرح مخلوط با توجه به انحراف معیار بزرگترین مقدار روابط زیر خواهد بود که در حدود ۲۷ MPa می باشد.

$$f_{cm} = 30 + 1/34 \times 4/0 + 1/5 = 36.9 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 30 + 2/33 \times 4 - 4 = 35.3 \text{ MPa}$$

گام ۵: تعیین نسبت آب آزاد به سیمان طرح

با توجه به مقاومت فشاری ملات سیمان مزبور، منحنی سیمان ۳۲۵ بکار می رود و به علت ۷۵ درصد شکستگی شن از میانگین وزنی دو منحنی (325-C) و (325-R) مقدار نسبت آب به سیمان بدست می آید.

مقدار نسبت آب به سیمان ۰/۴۶ از منحنی های مزبور بدست آمد، اما وقتی حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ می باشد این مقدار تعیین کننده است.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

مدول ریزی مخلوط ۲/۸۲ و رده اسلایپ S₂ با روانی ۷۰ میلی متر می باشد. درصد شکستگی متوسط سنگدانه عبارتست از:

$$a_n = \frac{0.25 \times 0.75 + 2 \times 0.75 \times 0.}{0.25 + 2 \times 0.75} \approx 11$$

عملاً شکستگی در مصالح سنگی بسیار کم است. مقدار آب برای صد درصد گردگوشه ۲۰۲ و برای کاملاً تیزگوشه ۲۲۷ است.

مقدار آب آزاد عملاً در حدود ۲۰۵ کیلوگرم می باشد.

گام ۷: تعیین مقدار سیمان طرح مخلوط

سیمان با توجه به مقدار آب آزاد ۲۰۵ و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بدست می آید.



$$\text{مقدار سیمان} = \frac{۲۰۵}{۰/۴۵} = ۴۵۵ \text{ kg}$$

با توجه به اینکه مقدار سیمان از ۳۵۰ بیشتر است، عملاً حدود ۱۵ کیلوگرم آب به آب فوق اضافه می‌شود. که ۲۲۰ kg خواهد بود و سیمان آن تقریباً ۴۹۰ kg/m³ می‌شود. مقدار سیمان از حداکثر سیمان مجاز کمتر و از حداقل مجاز بیشتر است بنابراین مشکلی ندارد. به هر حال برای کاهش جمع شدگی بهتر است با روان کننده مقدار سیمان را کمتر کرد.

گام ۸: تعیین مقدار سنگدانه اشباع با سطح خشک بتن

درصد هوای موجود در بتن (ناخواسته) در حدود ۳ درصد منظور می‌شود و مقدار مخلوط سنگدانه SSD عبارتست از:

$$A_{SSD} = ۲/۵۸۶ \left(۱۰۰۰ - \frac{۴۹۰}{۳/۰۰} - \frac{۲۲۰}{۱} - ۳۰ \right) = ۱۵۱۷ \text{ kg/m}^3 \quad \text{حالت اول:}$$

بدین ترتیب مقدار شن ریز برابر ۳۷۹ و مقدار ماسه درشت ۹۱۰ و ماسه ریز ۲۲۸ کیلوگرم (بصورت SSD) بدست می‌آید.

حالت دوم: اگر رابطه حجمی بکار رود، مقدار حجم سنگدانه ۵۸۶/۶۵ لیتر و جرم اشباع با سطح خشک هر یک از سنگدانه‌ها با توجه به سهم حجمی هر یک و چگالی آن‌ها به ترتیب ۳۹۳، ۸۹۸ و ۲۲۶ خواهد بود.

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل بتن:

مقدار سنگدانه خشک با توجه به ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها در حالت دوم عبارتست از:

$$\text{شن ریز} = \frac{۳۹۳}{۱+۰/۰۱۱} = ۳۸۸/۵$$

خشک

$$\text{ماسه درشت خشک} = \frac{۸۹۸}{۱+۰/۰۲} = ۸۸۰/۵$$

$$\text{ماسه ریز خشک} = \frac{۲۲۶}{۱+۰/۰۳۲} = ۲۲۰$$

$$\text{آب کل} = ۲۲۰ + ۴/۵ + ۱۷/۵ + ۶ = ۲۴۸ \text{ kg/m}^3$$

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعب بتن تازه متراکم

$$\rho_B = 1517 + 490 + 220 = 2227 \text{ kg/m}^3$$

بهرحال مقادیر فوق مربوط به طرح مخلوط اولیه است و باید پس از ساخت مخلوط آزمون و تعیین ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده، تعدیل طرح انجام گردد و مخلوط نهایی بدست آید. در این مثال به دلیل استفاده از بتن پاشیدنی، ساخت مخلوط آزمون کارگاهی برای پاشیدن نیز ضروری است زیرا در عمل باید بتوان با موفقیت و با کمترین پس‌زدگی، این بتن را به سطح مورد نظر پاشید و تراکم موردنظر را بدست آورد.

مثال ۱۰-

مطلوب است طرح اختلاط اولیه بتنی برای بتن ریزی در شمع و سپر با لوله ناودان (ترمی) در منطقه آبدار با توجه به اطلاعات زیر و محاسبه مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک و چگالی بتن متراکم تازه با توجه به درصد هوای ناخواسته مفروض در بتن. بتن در کارگاه به کمک یک دستگاه بتن ساز مرکزی ساخته و با پمپ و لوله به قیف لوله ترمی منتقل و از طریق این لوله ریخته می‌شود. سطح کیفی، کنترل و نظارت در ساخت بتن را می‌توان از نوع "ب" منظور نمود.



جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن تازه و سخت شده مورد نظر

۳۰	Mpa	مقاومت مشخصه مکعبی ۴۲ روزه
-	Mpa	انحراف معیار بتن S
۱۶۰ و ۲۱۰	mm	اسلامپ متوسط پس از ۵ و ۶۰ دقیقه
۰/۴۵	W/C	حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان
۳۵۰	Kg/m ³	حداقل سیمان مجاز
۴۵۰	Kg/m ³	حداکثر سیمان مجاز
ریز		بافت دانه‌بندی

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	درصد پوزولان طبیعی در سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm ²
پرتلند پوزولانی	۳/۰۵	۱۳	۳۱۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع افزودنی	چگالی افزودنی	درصد مصرف	محدوده کاهش آب
فوق روان کننده نفتالینی کندگیر	۱/۲۰	۰/۴ تا ۱/۲ درصد	۱۲ تا ۲۴ درصد

جدول ۴- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

چگالی ذرات SSD	شن	ماسه
۲/۶۲	۲/۵۱۲	
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۷	۲/۸
شکل	نیمه شکسته	گرد گوشه
درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	۶۵	۰

جدول ۵- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۶/۳۵	۴/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۹۸	۶۵	۳۵	۵	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۶۵	۴۵	۲۵	۱۵	۵

راه حل

گام ۱: مشخص نمودن محدوده دانه بندی مطلوب و تعیین سهم سنگدانه

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه با توجه به درصد گذشته از الک ۱۹ میلی متر برای شن معادل ۹۸ درصد، در مخلوط سنگدانه عملاً برابر ۱۹ میلی متر منظور می شود. استفاده از پمپ و لوله ناودان و روانی، دانه بندی بتن باید نسبتاً ریز باشد تا با وجود روانی زیاد، جداسازی و آب انداختن و جمع شدگی نداشته باشیم. با توجه به خواسته ها و نوع وسایل حمل و ریختن عملاً منحنی دانه بندی در اطراف B_{19} مطلوب به نظر می رسد (منحنی های $n=0/3$ و $n=0/4$).

با توجه به روش آزمون و خطا می توان سهم سنگدانه ها را بدست آورد. در ابتدا با توجه به محدوده مورد نظر سهم ماسه ۶۲/۵ درصد، سهم شن ۳۷/۵ درصد منظور می گردد. دانه بندی مخلوط حاصله با این سهم ها را محاسبه می کنیم و با محدوده مورد نظر مقایسه می نماییم.

جدول ۶- دانه بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م)	شن ۳۷/۵٪	ماسه ۶۲/۵٪	مخلوط حاصله	منحنی		
				$n=0/3$	$n=0/4$	B_{19}
۲۵	۳۷/۵	۶۲/۵	۱۰۰			
۱۹	۳۶/۷	۶۲/۵	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۲۴/۴	۶۲/۵	۸۷	۸۵	۸۳	۸۴
۹/۵	۱۳/۱	۶۲/۵	۷۵/۵	۷۷	۷۳	۷۵
۶/۳۵	۱/۹	۶۲/۵	۶۴/۵	۶۵	۶۰	۶۳
۴/۷۵	۰	۵۳/۱	۵۳/۱	۵۸	۵۲	۵۵
۲/۳۸		۴۰/۶	۴۰/۶	۴۳	۳۷	۴۰
۱/۱۹		۲۸/۱	۲۸/۱	۳۰	۲۵	۲۸
۰/۶		۱۵/۶	۱۵/۶	۲۰	۱۶	۱۸
۰/۳		۹/۴	۹/۴	۱۲	۹	۱۱
۰/۱۵		۳/۱	۳/۱	۵	۴	۵

مشاهده می شود دانه بندی مخلوط عملاً در وضعیت مناسبی قرار دارد.

**گام ۲: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله**

با توجه به تعریف مدول ریزی برای مخلوط موجود، مدول ریزی برابر است با:

$$F.M. = \frac{1 + 24/5 + 47 + 52/5 + 72 + 84/5 + 90/5 + 97}{100} = 4/76$$

مدول ریزی منحنی‌های B_{19} برابر $4/69$ و مدول ریزی محدوده مطلوب به ترتیب $4/84$ و $4/55$ می‌باشد که نشان می‌دهد مدول ریزی منحنی مخلوط حاصله در بین مدول ریزی منحنی‌های مطلوب قرار دارد.

گام ۳: تعیین مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح اختلاط (مقاومت هدف طرح)

مقاومت مشخصه استوانه ای 42 روزه بتن برابر 25 مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به رتبه بندی کارگاه و مقاومت مشخصه موجود انحراف معیار طبق روش ملی طرح مخلوط برابر $4/5$ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به آیین نامه بتن ایران بر اساس مقاومت مشخصه موجود، مقاومت هدف عبارتست از:

$$f_{cm} = 25 + 1/34 \times 4/5 + 1/5 = 29/5 \text{ Mpa}$$

$$f_{cm} = 25 + 2/33 \times 4/5 - 4/0 = 31/5 \text{ Mpa}$$

بنابراین مقاومت هدف 42 روزه طرح برابر $31/5$ مگاپاسکال است. با توجه به جدول مقاومت سیمان‌ها در سنین مختلف می‌توان مقاومت هدف 28 روزه سیمان پرتلند پوزولانی را 30 مگاپاسکال در نظر گرفت.

گام ۴: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

با توجه به وجود سیمان پرتلند پوزولانی و با استفاده از منحنی‌های سیمان 325 درصد شکستگی شن موجود، با استفاده از شکل $4-2$ (دارای روان کننده)، نسبت آب به سیمان $0/53$ بدست می‌آید.

با توجه به مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان پرتلند پوزولانی مصرفی داریم:

$$\frac{W}{C} = 0/53 \times \frac{310}{325} = 0/505$$

اما حداکثر مجاز $0/45$ تعیین کننده است و باید بکار رود.

گام ۵: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

درصد شکستگی معادل مخلوط سنگدانه عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{0.375 \times 65 + 2 \times 0.625 \times 0}{0.375 + 2 \times 0.625} \cong 15$$

با توجه به مدول ریزی ۴/۷۶ و رده اسلامپ S_4 و روانی ۲۱۰ میلی متر از نمودار مربوطه، مقدار آب با توجه به شکل گردگوشه و نیاز به آب کم برابر ۲۰۰ کیلوگرم و برای نیاز به آب زیاد حدود ۲۲۵ کیلوگرم می شود. با توجه به میزان شکستگی در شن و ماسه مقدار آب ۲۰۴ کیلوگرم تعیین می گردد.

گام ۶: تعیین مقدار سیمان بتن

با توجه به مقدار آب و نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان به صورت زیر بدست می آید.

$$C = \frac{204}{0.45} = 453 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

با توجه به این که مقدار سیمان از ۳۵۰ کیلوگرم بیشتر است به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم سیمان مازاد، حدود ۱ کیلوگرم به آب افزوده می شود لذا آب لازم در حدود ۱۰ کیلوگرم بیشتر می گردد یعنی ۲۱۴ کیلوگرم بدست می آید و مقدار سیمان در حدود ۴۷۵ حاصل می شود. اما سیمان پرتلند پوزولانی به واسطه داشتن حدود ۶۲ کیلوگرم پوزولان طبیعی موجب می گردد تا مجدداً حدود ۶ کیلوگرم به آب اضافه شود. در نتیجه مقدار آب به ۲۲۰ کیلوگرم بالغ می گردد و مقدار جدید سیمان نیز ۴۹۰ کیلوگرم خواهد شد.

می توان اصلاح آب به علت وجود پوزولان را قبل از اصلاح آب به علت وجود سیمان مازاد بر ۳۵۰ کیلوگرم انجام داد. اما در نتیجه حاصله تفاوت چندانی ایجاد نمی شود.

مقدار سیمان از حداکثر مجاز ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشتر است. در این مثال اگر قصد ما مصرف ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب باشد، باید حدود ۱۸ درصد از آب و سیمان کم نمود که مقدار آب برابر ۱۸۰ کیلوگرم می شود و نیاز به مصرف فوق روان کننده به میزان تقریبی ۰/۸ درصد وزن سیمان یعنی ۳/۲ کیلوگرم داریم که ۲/۱ کیلوگرم آن آب می باشد و بهتر است این مقدار از آب آزاد کسر گردد.

**گام ۷: تعیین مقدار سنگدانه بتن**

برای تعیین مقدار سنگدانه، لازم است از چگالی سیمان، مقدار سیمان، مقدار آب آزاد، چگالی سنگدانه و درصد هوای موجود در بتن استفاده شود. مقدار هوای موجود در بتن با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه و روانی آن معادل ۱ درصد منظور می گردد. با توجه به رابطه حجم مطلق داریم:

$$V_{A_{SSD}} = 1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a = 1000 - \frac{400}{3/0.5} - \frac{178}{1} - 10 = 680/85 \text{ dm}^3$$

$$G_d = \frac{255/32 \times 2/62}{1/0.17} = 658 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{شن خشک}$$

$$S_d = \frac{425/53 \times 2/512}{1/0.28} = 1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{ماسه خشک}$$

گام ۸: تعیین آب کل بتن

$$W_t = 178 + (669 - 658) + (1069 - 1040) = 218 \text{ kg/m}^3$$

گام ۹: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه با یک درصد هوا عبارت است از:

$$\rho_B = 400 + 178 + 669 + 1069 + 2/0 = 2319 \text{ kg/m}^3$$