mranDL.ir
مرکز تخصصی دانلود مهندسی عمران

۱۰ مثال کاربردی از طرح اختلاط بتن

مطابق روش ملّی طرح مخلوط بتن ایران

مهدی جوهری

mehdi.jouhari.1986@gmail.com

مثال هایی 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...)

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

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

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

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

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

جدول ٤- دانه‌بندی سنگدانه

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۷۰	٤۰	۱۵	۱	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۹	٦۰	۳۰	۱۵	٦	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؛ بنابر این از حاشیه امنیت پیشنهادی و توصیه شده آبا استفاده می کنیم.

$f_{cm}= f_c + (SM) = ۲۰ + ۸/۵ = ۲۸/۵$ 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 ۰/٦۷ انتخاب می شود. حداکثر اندازه سنگدانه ۲۵ میلی متر است. در حدس اول

سهم ماسه ٤٠ و سهم شن ٦٠ درصد منظور می گردد. لازم به ذکر است که ماسه موجود تقریباً درشت ترین دانه‌بندی را در ارتباط با استاندارد اجباری ایران دارا می‌باشد.

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
٦٠ درصد شن	٦٠	٤٢	۲٤	۹	۰/٦					
٤٠ درصد ماسه	٤٠	٤٠	٤٠	٤٠	۳۵/٦	۲٤	۱۲	٦	۲/٤	۰/۸
مخلوط سنگدانه	۱۰۰	۸۲	٦٤	٤۹	۳٦	۲٤	۱۲	٦	۲	۱
منحنی **B** (**n**=۰/۳۵)	۱۰۰	۸۹	۷۵	٦۷	٤۹	۳٦	۲۵	۱٦	۹	٤
منحنی **n**=۰/۵۵	۱۰۰	۸۵	٦۷	۵۷	۳۸	۲٤	۱۵	۹	۵	۲
منحنی **A** (**n**=۰/٦۷)	۱۰۰	۸۳	٦۲	۵۱	۳۲	۱۹	۱۱	٦	۳	۱
۵۵ درصد شن	۵۵	۳۸/۵	۲۲	۸/۲	۰/۵					
٤۵ درصد ماسه	٤۵	٤۵	٤۵	٤۵	٤۰	۲۷	۱۳/۵	٦/۸	۲/۷	۰/۹
مخلوط سنگدانه	۱۰۰	۸۳/۵	٦۷	۵۳	٤۰/۵	۲۷	۱۳/۵	۷	۳	۱

وضعیت فعلی باعث شده است منحنی مخلوط سنگدانه با سهم ٦٠ درصد شن و ٤٠ درصد ماسه تقریباً منطبق بر منحنی A باشد و خیلی درشت است. اگر سهم ماسه ٤٥ درصد و شن ٥٥ درصد باشد مخلوط حاصله (به ویژه در بخش‌های ریز) از وضعیت بهتری برخوردار خواهد شد. به هر حال در این طرح از همان سهم ٥٥ درصدی شن و ٤٥ درصدی ماسه بهره می گیریم. هرچند سهم ماسه ٤٢/٥ و سهم شن ٥٧/٥ درصد نیز قابل قبول بنظر می‌رسد.

گام ۳: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله

مجموع درصدهای تجمعی مانده روی الک‌های 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.

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

مدول‌ریزی منحنی A_{25}، منحنی n=۰/۵۵ و B_{25} به ترتیب ٥/٩٤، ٥/٦٣ و ٥/٠٥ می‌باشد و

جایگاه منحنی حاصله را در این رابطه نیز می توان حدس زد. اگر سهم ٤٠ درصد ماسه بکار می‌رفت، مدول ریزی حاصله ٥/٨٨ 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 ٤٥ درصدی ماسه و ٥٥ درصدی شن، چگالی متوسط عبارت است از:

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{۱}{\frac{۰/۵۵}{۲/۵۶۰} + \frac{۰/۴۵}{۲/۴۸۰}} = ۲/۵۲۳$$

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 ۳۲۵-۱ و فاقد نتیجه مقاومتی ملات ماسه سیمان استاندارد می‌باشدو شن گردگوشه استفاده شده است می توان از منحنی R-۳۲۵ 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 ۲۸/٥ عملاً نسبت آب به سیمان در حدود ۰/٥۲ بدست می آیدکه 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 سنگدانه‌ها از شکل ٤-٦ (نیاز به آب کم) استفاده می شود و با در نظر گرفتن مدول نرمی ٥/٧۲، مقدار آب آزاد در حدود ۱٥۲ 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.

$$C = \frac{۱٥۲}{۰/٥۲} = ۲۹۲/٥ \ kg/m^3$$

با توجه به این که حداقل سیمان ۳۰۰ کیلوگرم می‌باشد بنابر این باید عیار سیمان را ۳۰۰ کیلوگرم در نظر گرفت و عملاً مقدار آب را نیز می توان ۱٥٦ 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 می توان 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 ۳۲۵-۱ 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 می گردد.

$$A_{SSD} = ۲/۵۲۳\left(۱۰۰۰ - \frac{۳۰۰}{۳/۱} - \frac{۱۵۶}{۱} - ۱۰\right) = ۱۸۶۰ \quad Kg/m^3$$

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

G_{SSD} =۱۸۶۰×۰/۵۵=۱۰۲۳ Kg/m^3

S_{SSD}= ۸۳۷ Kg/m^3

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

V_{ASSD}= ۷۳۷/۲۳ lit

V_G= ٤۰۵/٤۷ lit , V_S= ۳۳۱/۷۵ lit , G_{SSD} =۱۰۳۸ Kg/m^3 , S_{SSD}= ۸۲۳ 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.

حالت اول:

$$\begin{cases} G_d = \frac{۱۰۲۳}{۱+۰/۰۲۳} = ۱۰۰۰ \ kg/m^3 \\ S_d = \frac{۸۳۷}{۱+۰/۰۳۷} = ۸۰۷ \ kg/m^3 \end{cases}$$

حالت دوم:

$$\begin{cases} G_d = \dfrac{۱۰۳۸}{۱+۰/۰۲۳} = ۱۰۱۴/۵ \ kg/m^3 \\ S_d = \dfrac{۸۲۳}{۱+۰/۰۳۷} = ۷۹۳/۵ \ kg/m^3 \end{cases}$$

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

$W_t = ۱۵۶+۲۳/۵+۲۹/۵= ۲۰۹ \ kg/m^3$

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:

$\rho_B = ۳۰۰+۱۵۶+۱۸۶۰ = ۲۳۱۶ \ kg/m^3$ یا $\rho_B = ۳۰۰+۲۰۹+۱۸۰۷= ۲۳۱۶ \ kg/m^3$

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 می شود که از نظر رتبه‌بندی در رده "ب" قرار دارد.

جدول ۱- اطلاعات و داده‌های مربوط به بتن آماده

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

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند۲	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	گردگوشه
درصد شکستگی	۵۰	-
درصد پولکی	۱۷	-
درصد کشیدگی	۱۹	-

جدول ٤- دانه‌بندی سنگدانه

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۹۰	٦۰	۲۰	۲	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	٦۵	٤۰	۲۵	۱۵	۷

راه‌حل

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 ٤/۵ منظور

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

f_{cm}= ۲۵+۱/۳٤×٤/٥+۱/٥=۳۲/٥ Mpa

f_{cm}= ۲۵+۲/۳۳×٤/٥ -٤=۳۱/٥ Mpa

بنابر این مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط برابر ۳۲/٥Mpa می شود.

در مرحله بعدی می توان 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 می کنیم و طبق حداقل‌های استاندارد ۳۸۹ ایران مقاومت ملات استاندارد سیمان نوع ۲ را ۳۱۵ منظور می کنیم و با توجه به موارد مندرج در این راهنما ضریب اصلاحی برای نسبت آب به سیمان بدست می آوریم.

از آن جا که شن موجود دارای ۵۰ درصد شکستگی است میانگین دو منحنی R-۳۲۵ و -۳۲۵C بکار می آید. با توجه به مقاومت هدف ۳۲/٥Mpa نسبت آب به سیمان از روی منحنی‌های مزبور تقریباً مقادیر ۰/٤۷ و ۰/۵۲ بدست می آید که میانگین آن ۰/٤۹۵ می گردد.

$$\frac{W}{C} = ۰/۴۹۵ \times \frac{۳۱۵}{۳۲۵} = ۰/۴۸ \quad Kg/m^3$$

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 می گذرد. بنابر این با توجه به پمپی بودن بتن سعی می شود منحنی دانه‌بندی بین $A_{۱۹}$ و $B_{۱۹}$ و نزدیک تر به $B_{۱۹}$ باشد. در این حالت n از ۰/٤ تا ۰/۵ مناسب بنظر می رسد.

در وهله اول سهم شن و ماسه ۵۰ درصد انتخاب می شود. مشاهده می گردد دانه‌بندی حاصله کمی درشت می گردد لذا به نظر می رسد سهم شن ٤۰ درصد و ماسه ٦۰ درصد مناسب می‌باشد. به هر حال اگر دانه‌بندی ماسه به ویژه در مورد ذرات ریزتر از ۰/٦ 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 دانه‌بندی ماسه همان دانه‌بندی مثال ۱ بود دستیابی به دانه‌بندی مطلوب غیر ممکن تلقی می شد.

به هر حال از آن جا که حداکثر اندازه واقعی سنگدانه ۲۵ میلی متر نمی‌باشد ممکن است در الک اول یعنی ۱۹ میلی متر تطابق خوبی حاصل نشود که منطقی است.

لازم به ذکر است مقادیر سهم شن می‌تواند بین ٤٥ تا٤٠ و سهم ماسه ٥٥ تا٦٠ باشد. برای شن ٤٥ درصد و ماسه ٥٥ درصد مخلوط حاصله به ویژه در بخش‌های فوقانی کمی درشت به نظر می رسد. بنابر این همان سهم شن ٤٠ درصد و ماسه ٦٠ درصد مطلوب تر می‌باشد با اینکه در برخی نقاط، ریزتر از محدوده موردنظر می‌باشد.

الک	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
۵۰ درصد شن	۵۰	٤۵	۳۰	۱۰	۱	۰				
۵۰ درصد ماسه	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	٤۵	۳۲/۵	۲۰	۱۲/۵	۷/۵	۳/۵
مخلوط سنگدانه۵۰-۵۰	۱۰۰	۹۵	۸۰	٦۰	٤۵	۳۲/۵	۲۰	۱۲/۵	۷/۵	۳/۵
منحنی B_{19}	۱۰۰	۱۰۰	۸٤	۷۵	۵۵	٤۰	۲۸	۱۸	۱۱	۵
منحنی n=۰/٤	۱۰۰	۱۰۰	۸۳	۷۳	۵۲	۳۷	۲۵	۱٦	۹	٤
منحنی n=۰/۵	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	٦۹	٤۷	۳۱	۲۰	۱۲	۷	۳
منحنی A_{19}	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	٦۲	۳۸	۲۳	۱٤	۸	٤	۲
٤۰ درصد شن	٤۰	۳٦	۲٤	۸	۰/۸	۰				
٦۰ درصد ماسه	٦۰	٦۰	٦۰	٦۰	۵٤	۳۹	۲٤	۱۵	۹	٤
مخلوط سنگدانه٤۰-٦۰	۱۰۰	۹٦	۸٤	٦۸	۵۵	۳۹	۲٤	۱۵	۹	٤
٤۵ درصد شن	٤۵	٤۰/۵	۲۷	۹	۰/۹	۰				
۵۵ درصد ماسه	۵۵	۵۵	۵۵	۵۵	٤۹/۵	۳۵/۸	۲۲	۱۳/۸	۸/۳	۳/۹
مخلوط سنگدانه٤۵-۵۵	۱۰۰	۹۵/۵	۸۲	٦٤	۵۰/۵	۳٦	۲۲	۱٤	۸/۵	٤

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 می آید.

$$F.M. = \frac{۴+۳۲+۴۵+۶۱+۷۶+۸۵+۹۱+۹۶}{۱۰۰} = ۴/۹۰$$

مدول نرمی برای $A_{۱۹}$ برابر ۵/۴۹ و برای $B_{۱۹}$ برابر۴/۶۸ و برای منحنی n=۰/٤ برابر ٤/۸۵ و برای n=۰/۵ برابر ۵/۱۲ می‌باشد که مطلوب به نظر می رسد.

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

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{۱}{\frac{۰/۴۰}{۲/۶۰۰} + \frac{۰/۶۰}{۲/۵۰۰}} = ۲/۵۳۹ \approx ۲/۵۴$$

البته می‌توان این مقدار را محاسبه نکرد.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد بتن

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

$$a_{ne} = \frac{۰/۴ \times ۵۰ + ۲ \times ۰/۶ \times ۰}{۰/۴ + ۲ \times ۰/۶} = \frac{۲۰}{۱/۶} = ۱۲/۵$$

درصد شکستگی معادل خیلی کم بدست آمده است. با توجه به مدول ریزی ٤/۹۰ 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 می آید، بنابراین مقدار آب را در حدود ۱۸۸ کیلوگرم در نظر می گیریم.

گام ۷: تعیین عیار سیمان

مقدار سیمان طرح برابر است با

$$C = \frac{۱۸۸}{۰/۴۸} = ۳۹۲ \ Kg/m^3$$

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

آب انجام شود. برای اصلاح آب مقدار ٦ کیلوگرم به آب اضـافه مـی شـود و مقـدار آب ١٩٤ می‌شود. پس سیمان مصرفی حدود ٤٠٤ 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 توجـه بـه چگـالی متوسط سنگدانه و چگالی سیمان داریم:

$$A_{SSD} = ۲/۵۴\left(۱۰۰۰ - \frac{۴۰۴}{۳/۱۵} - \frac{۱۹۴}{۱} - ۱۲/۵\right) = ۱۶۹۰ \ \mathrm{Kg/m^3}$$

با توجه به سهم هر یک از سنگدانه‌ها داریم:

$G_{SSD} = ٦٧٦ \ Kg/m^3$

$S_{SSD} = ١٠١٤ \ Kg/m^3$

می توان ابتدا حجم کل سنگدانه‌ها بدست آورد و سپس وزن آن‌ها را محاسبه نمود.

$V_{ASSD} = ٦٦٥/٢٥ \ lit$

$V_G = ٢٦٦/١ \ lit \ , V_S = ٣٩٩/١٥ \ lit \ , \ G_{SSD} = ٦٩٢ \ Kg/m^3 \ , \ S_{SSD} = ٩٩٨ \ Kg/m^3$

گام ۹: تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کل

مقدار سنگدانه خشک عبارت است از:

حالت اول:

$$\begin{cases} G_d = \frac{۶۷۶}{۱+۰/۰۲۶} \approx ۶۵۹ \ \mathrm{Kg/m^3} \\ S_d = \frac{۱۰۱۴}{۱+۰/۰۳۲} \approx ۹۸۲/۵ \ \mathrm{Kg/m^3} \end{cases}$$

حالت دوم:

$$\begin{cases} G_d = \frac{۶۹۲}{۱+۰/۰۲۶} \approx ۶۷۴/۵ \ \mathrm{Kg/m^3} \\ S_d = \frac{۹۹۸}{۱+۰/۰۳۲} \approx ۹۶۷ \ \mathrm{Kg/m^3} \end{cases}$$

$W_t = ١٩٤+١٧+٣٢ = ٢٤٣ \ kg/m^3$

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:

$\rho_B = ۴۰۴+۲۴۳+۶۵۹+۹۸۳ = ۲۲۸۹\ kg/m^3$ یا $\rho_B = ۴۰۴+۱۹۴+۱۶۹۰ = ۲۲۸۸\ kg/m^3$

اگر وزن سنگدانه‌ها ۱۶۹۰Kg 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 می‌تواند قابل قبول باشد اما بهتر است با مصرف روان‌کننده 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 اسکله‌ای در یک بندر با اطلاعات زیر مورد نظر است. لازم است مقادیر سیمان، آب آزاد و آب کل و سنگدانه‌های خشک و اشباع با سطح خشک به تفکیک بدست آید و با توجه به اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های مخلوط آزمون، تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه انجام گردد و طرح نهایی مشخص شود. بتن‌ریزی از طریق سطح شیبدار و تراک میکسر انجام می‌شود.

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

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

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	۲/٦۲٥	۲/٦۰۷	۲/٥۹۲	۲/٥٦٤
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۹	۲/۱	۲/۳	۲/۸
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	نیمه شکسته	نیمه شکسته
درصد شکستگی	٤٥	٥۰	٦۰	۳٥ (تقریبی)

جدول ٤- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

نوع سنگدانه	۳۸	۲٥	۱۹	۱۲/٥	۹/٥	٦/۳٥	٤/۷٥	۲/۳۸	۱/۱۸	۰/٦	۰/۳	۰/۱٥
شن درشت	۱۰۰	٥۰	۱۰	۱	۰							
شن متوسط	۱۰۰	۱۰۰	۹٥	۲۰	۲	۰						
شن ریز	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	٦٥	۱٥	۳	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹٥	۹۰	٦٥	٤۰	۲٥	۱۲	٥

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 ۳-۱ و ۳-۲ (منطبق با آبا) داریم:

$f_{cm} = f_c + ۱/۳٤s + ۱/٥ = ۲٥ + ۱/۳٤ \times ۳ + ۱/٥ = ۳۰/٥ \ N/mm^2$

$f_{cm} = f_c + ۲/۳۳s - ٤/۰ = ۲٥ \times ۲/۳۳ \times ۳ - ٤ - = ۲۸ \ N/mm^2$

بنابراین بزرگترین مقدار یعنی ۳۰/٥ به عنوان مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط منظور می‌شود.

گام ۲: تعیین سهم سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی مطلوب

حداکثر اندازهٔ اسمی این سنگدانه عملاً همان ۳۸ میلی متر است لذا با توجه به شکل ٤-٥ 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 گرمازایی 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 ودر 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 ۳٥ درصد، سهم شن متوسط ۱٥ درصد، سهم شن ریز ۲۰ درصد و سهم ماسه ٤۰ درصد.

بدیهی است این سهم‌ها ممکن است کمی بیشتر یا کمتر به دست آید و گاه تغییر ٥ 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 ۲/٥ 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_{38} و A_{38} 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	شن			ماسه ۳۰٪	مخلوط سنگدانه	منحنی		
(م.م.)	درشت ۴۰٪	متوسط ۱۰٪	ریز ۲۰٪			B_{38}	A_{38}	n=۰/۵۵
۳۸	۴۰	۱۰	۲۰	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۲۰	۱۰	۲۰	۳۰	۸۰	۸۵	۷۵	۷۹
۱۹	۴	۹/۵	۲۰	۳۰	۶۳/۵	۷۶	۶۲	۶۸
۱۲/۵	۰/۴	۲	۱۹/۶	۳۰	۵۲	۶۴	۴۷	۵۳
۹/۵	۰	۰/۲	۱۳	۳۰	۴۳	۵۷	۳۹	۴۵
۶/۳۵			۳	۲۸/۵	۳۱/۵	۴۸	۲۹	۳۶
۴/۷۵			۰/۶	۲۷	۲۷/۵	۴۲	۲۴	۳۰
۲/۳۸				۱۹/۵	۱۹/۵	۳۰	۱۴	۱۹
۱/۱۹				۱۲	۱۲	۲۱	۹	۱۲
۰/۶				۷/۵	۷/۵	۱۴	۵	۷
۰/۳				۳/۵	۳/۵	۸	۲	۴
۰/۱۵				۱/۵	۱/۵	۴	۱	۲

منحنی حاصله به نظرقابل قبول می رسد. حتی می توان 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 ۵/٤۸ که نشان می‌دهد بـه طـور متوسـط مخلـوط درشت‌تر از منحنی مزبور است. مدول ریزی منحنی $A_{۳۸}$ برابر است با ٦/٤٥ و مدول ریـزی منحنی n=۰/۵۵ برابر ٦/۱۳ می‌باشد و عملا مخلوط حاصله بین منحنی A و این منحنـی قـرار دارد که مناسب تلقی می شود.

گام ۴: تعیین چگالی (جرم مخصوص) متوسط اشباع با سطح خشک مخلوط سنگدانه

با توجه به سهم هر یک از مـصالح سـنگی و چگـالی آن‌هـا مـی‌تـوان طبـق ب-۱ چگـالی متوسط SSD مخلوط را بدست آورد.

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

می توان این چگالی متوسط را تعیین نکرد.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان بتن

با توجه به نزدیکی مقاومت ملات استاندارد سیمان نـوع ۲ مـصرفی بـه مقاومـت حـداقل سیمان نوع ۳۲۵-۱ می‌تـوان عمـلاً آن را از نـوع ۳۲۵-۱ از نظـر مقـاومتی منظـور نمـود. در صورتی که نتوان این انطباق را انجام داد می‌توان بین منحنی‌های موجود یک منحنی فرضـی را با درون یابی به دست آورد. حتی اگر مقاومـت مـلات مزبـور از مقاومـت سـیمان ۳۲۵-۱ کمتر باشد با برون یابی منحنی فرضی را در نظر گرفت. به هر حـال در ایـن حالـت مقاومـت 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 گوشـگی سـنگدانه‌هـای درشـت دانـه مـشخص شـود. عمـلاً شـکل 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 تعیـین شـده است می‌توان درصد شکستگی و تیز گوشگی متوسط معادل تمام جبهه‌ها را تعیین نمود کـه مسلماً سهم سنگدانه‌ها در آن مؤثر است. درصد شکستگی متوسط شن‌ها عبارت است از:

$$a_{nG} = \frac{۰/۴\times۴۵ + ۰/۱\times۵۰ + ۰/۲\times۶۰}{۰/۴ + ۰/۱ + ۰/۲} = ۵۰$$

با توجه به اطلاعات موجود تقریباً درصد شکستگی شن‌ها در حدود ۵۰ درصد است.

با توجه به شکل ٤-۱ و در نظر گرفتن منحنی فرضی در بین دو منحنی 325-C و 325-R مقدار W/C با منظور نمودن مقاومت فشاری متوسط ۳۰/۵ 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، درنظر 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 ٦/۲۲ و در نظر گرفتن اسلامپ ٦۰ mm (رده S2 اسلامپ) برای شکل ٤-٦ مقدار آب آزاد د در حدود ۱٤۰ کیلوگرم و برای شکل ٤-۷ 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 ۱٤۸ کیلوگرم در متر مکعب منظور نمود. زیرا مقدار معادل شکستگی متوسط سنگدانه‌ها عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{۰/۷ \times ۴۰ + ۲ \times ۰/۳ \times ۳۵}{۰/۷ + ۲ \times ۰/۳} \cong ۴۳$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان طرح

با توجه به رابطه (٤-١) در بخش ٤-٤ می‌توان عیار سیمان را به دست آورد.

$$C = \frac{۱۴۸}{۰/۵} = ۲۹۶ \frac{kg}{m^3}$$

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 می شود.

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

با استفاده از رابطه حجم مطلق یعنی رابطه (٤-٢) بند ٤-٥ 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 ٤-٣ 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.

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left(۱۰۰۰ - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a \right) = ۲/۵۹۲ \left(۱۰۰۰ - \frac{۳۰۰}{۳/۱۷} - \frac{۱۵۰}{۱} - ۱۰ \right) = ۱۹۳۲ \frac{kg}{m^3}$$

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

مقدار شن درشت SSD $G_{1SSD} = ۷۷۳ \ Kg/m^3$

مقدار شن متوسط SSD $G_{2SSD} = ۱۹۳ \ Kg/m^3$

مقدار شن ریز SSD $G_{3SSD} = ۳۸٦/۵ \ Kg/m^3$

مقدار ماسه SSD $S_{SSD} = ۵۷۹/۵ \ Kg/m^3$

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}= ۷٤٥/۳٦ lit

V_{G1}= ۲۹۸/۱٤ lit , V_{G2}= ۷٤/٥٤ lit , V_{G3}= ۱٤۹/۰۷ lit , V_S= ۲۲۳/٦۱ lit

G_{1SSD} = ۷۸۲/٥ Kg/m^3, G_{2SSD} = ۱۹٤/٥ Kg/m^3, G_{3SSD}=۳۸٦/٥ Kg/m^3, S_{SSD}= ٥۷۳/٥ 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 سنگدانه‌ها بتوان مقدار سنگدانه مرطوب و آب لازم برای اختلاط (آب مصرفی) را به سهولت تعیین نمود.

a_c = ظرفیت جذب آب به صورت اعشاری است. $A_d = \frac{A_{SSD}}{۱+a_c}$

حالت اول:

مقدار شن درشت خشک $G_{۱d} = \frac{۷۷۳}{۱+۰/۰۱۹} = ۷٥۸/٥ \frac{kg}{m^3}$

مقدار شن متوسط خشک $G_{۲d} = \frac{۱۹۳}{۱+۰/۰۲۱} = ۱۸۹ \frac{kg}{m^3}$

مقدار شن ریز خشک $G_{۳d} = \frac{۳۸٦/٥}{۱+۰/۰۲۳} = ۳۷۸ \frac{kg}{m^3}$

مقدار ماسه خشک $S_d = \frac{٥۷۹/٥}{۱+۰/۰۲۸} = ٥٦۳/٥ \frac{kg}{m^3}$

حالت دوم:

مقدار شن درشت خشک $G_{۱d} = \frac{۷۸۲/٥}{۱+۰/۰۱۹} = ۷٦۸ \frac{kg}{m^3}$

مقدار شن متوسط خشک $G_{۲d} = \frac{۱۹٤/٥}{۱+۰/۰۲۱} = ۱۹۰/٥ \frac{kg}{m^3}$

مقدار شن ریز خشک $G_{۳d} = \frac{۳۸٦/٥}{۱+۰/۰۲۳} = ۳۷۸ \frac{kg}{m^3}$

مقدار ماسه خشک $S_d = \frac{٥۷۳/٥}{۱+۰/۰۲۸} = ٥٥۸ \frac{kg}{m^3}$

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

است.

$W_t = W_f + W_{ASSD} = ۱۵۰+۱٤/٥+٤+۸/٥+۱٦= ۱۹۳\ kg/m^3$

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:

$\rho_B = ۱۵۰+۳۰۰+۱۹۳۲= ۲۳۸۲\ kg/m^3$

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 ٤۰ میلی متر و مقاومت استوانه ای ۲۸ روزه برابر $۲۹N/mm^2$ به دست آمد. هم چنین درصد هوای بتن ۱/٥ درصد و جرم مخصوص بتن متراکم با ۱/٥ درصد هوا برابر $۲۳٦٤\ kg/m^3$ تعیین شده است. بتن از نظر آب انداختگی، جداشدگی 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، جداشدگی و خشن بودن در دانه‌بندی تغییری ایجاد نمی‌نماییم.

تغییر آب آزاد = $N.(S\alpha-So) = ۰/۳(٦۰-٤۰) = +\ ٦\ kg/m^3$

آب آزاد اصلاحی = $۱۵۰ + ٦ = ۱۵٦\ kg/m^3$

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

ج: تعدیل نسبت آب به سیمان

$$\left(\frac{W}{C}\right)_n = \left(\frac{W}{C}\right)_i + \left(\frac{W}{C}\right)_i \times \left(\frac{f_o - f_{cm}}{f_{cm}}\right) = ۰/۵ + ۰/۵\left(\frac{۲۹ - ۳۰/۵}{۳۰/۵}\right) = ۰/۴۷۵$$

د: تعدیل در عیار سیمان

$$C = \frac{۱۵۶}{۰/۴۷۵} = ۳۲۸\ \frac{kg}{m^3}$$

ه : تعدیل در مقادیر سنگدانه SSD و خشک و آب کل و جرم مخصوص بتن با توجه به ۱درصد هوا

$$A_{SSD} = ۲/۵۹۲\left(۱۰۰۰ - \frac{۳۲۸}{۳/۱۷} - \frac{۱۵۶}{۱} - ۱۰\right) = ۱۸۹۳/۵\ kg/m^3$$

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

$G_{1SSD} = ۷۵۷/۵\ Kg/m^3$, $G_{2SSD} = ۱۸۹/۵\ Kg/m^3$, $G_{3SSD} = ۳۷۹\ Kg/m^3$, $S_{SSD} = ۵۶۸\ Kg/m^3$

پس:

$\rho_B = ۲۳۷۷\ Kg/m^3$

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 می‌توان یک بار دیگر مخلوط آزمون را ساخت و نتایج را کنترل نمود.

مثال ۴-

طرح اختلاط اولیه بتنی را برای ساخت قطعات پیش‌ساخته پوشش تونل انتقال آب نیاز داریم که لازم است مقادیر سیمان، آب آزاد، آب کل، سنگدانه‌های خشک و اشباع با سطح خشک و وزن مخصوص بتن متراکم تازه را باتوجه به هوای ناخواسته موجود در آن با در دست داشتن اطلاعات و داده‌های زیر بدست آید. بتن مورد نیاز توسط یک بچینگ اتوماتیک ساخته و با کمک جام مخصوص حمل و درقالب ریخته می‌شود و متراکم می‌گردد. هم چنین لازم است تعدیل لازم در طرح مخلوط اولیه پس از ساخت مخلوط آزمون و آزمایش‌های مورد نظر، صورت گیرد و طرح مخلوط نهایی بدست آید.

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

مقاومت مشخصه استوانه‌ای ۲۸ روزه f_c	Mpa	٤٥
انحراف معیار بتن S	Mpa	۳/٥
اسلامپ متوسط پس از ٥ دقیقه	mm	۱٥۰
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤٥
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	٤۰۰
حداکثر سیمان مجاز	Kg/m^3	٤٥۰
نمای لازم		عالی

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm^2
پرتلند ٥۲٥-۱	۳/۱۰	٥۳۰

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	۱/٥-۰/٤	۱۲-۳٥

جدول ٤- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

	شن درشت	شن ریز	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/٦۷٥	۲/٦٥۲	۲/٥۸۹
درصد ظرفیت جذب آب	۰/۸	۱	۱/۸
شکل	تمام شکسته	تمام شکسته	تمام شکسته
درصد شکستگی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۵- دانه‌بندی (درصد گذشته تجمعی) سنگدانه‌ها

الک	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن درشت	۱۰۰	٤۰	۱۰	۲	۰					
شن ریز	۱۰۰	۱۰۰	۷۰	۲۵	۵	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰

جدول ٦- 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 ۰/٤۵).

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	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن بادامی ۲۵٪	۲۵	۱۰	۲/۵	۰/۵	۰					
شن نخودی ۲۰٪	۲۰	۲۰	۱٤	۵	۱	۰				
ماسه ۵۵٪	۵۵	۵۵	۵۵	۵۵	۵۲	۳۸/۵	۲۷/۵	۱٦/۵	۱۱	۵/۵
مخلوط حاصله	۱۰۰	۸۵	۷۱/۵	٦۰/۵	۵۳	۳۸/۵	۲۷/۵	۱٦/۵	۱۱	۵/۵
منحنی n=۰/٤۵	۱۰۰	۸۱	۷۱	۵۸	٤۹	۳٤	۲۲	۱٤	۸	۳
منحنی B_{19}	۱۰۰	۸٤	۷۵	٦۳	۵۵	٤۰	۲۸	۱۸	۱۰	۵

منحنی A_{19}	۱۰۰	۷۵	٦۲	٤۷	۳۸	۲۳	۱٤	۸	٤	۲

دانه‌بندی مخلوط سنگدانه در محدوده مورد نظر و نزدیکتر به منحنی B_{19} قرار دارد و کاملاً مطلوب است.

گام ۲: محاسبه مدول ریزی مخلوط سنگدانه

$$F.M. = \frac{۰ + ۲۸/۵ + ٤۷ + ٦۱/۵ + ۷۲/۵ + ۸۲/۵ + ۸۹ + ۹٤/۵}{۱۰۰} = ٤/۷۵$$

مدول ریزی منحنی B_{19} عبارت است از ٤/٦۸، که نشان دهنده نزدیکی آن به B_{19} می‌باشد. مدول ریزی منحنی n=۰/٤۵ برابر ٤/۹۹ می‌باشد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{۱}{\frac{۰/۲۵}{۲/۶۷۵} + \frac{۰/۲}{۲/۶۵۲} + \frac{۰/۵۵}{۲/۵۸۹}} = ۲/۶۲۳$$

می توان 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.

$f_{cm} = ٤۵ + ۱/۳٤ \times ۳/۵ + ۱/۵ = ۵۱/۲$ MPa

$f_{cm} = ٤۵ + ۲/۳۳ \times ۳/۵ - ٤ = ٤۹/۲$ 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 (۵۲۵-۱) 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 ۰/٤۷ حاصل می‌گردد، اما حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز ۰/٤۵ می‌باشد که بالاجبار از این مقدار یعنی ۰/٤۵ باید استفاده کرد.

توجه داشته باشید که اگر سیمان پرتلند ٤٢٥-١ و ٣٢٥-١ بکـار مـی‌رفـت، نـسبت آب بـه 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 پـیش 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 بـتن (رده S_3) و صـد در صـد شکـسته 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 ۰/٤٥ بدست می‌آید.

$$\text{سیمان} = \frac{۲۱۵}{۰/٤٥} = ٤٧٨$$

با توجه به زیاد بودن مقدار سیمان باید در مقـدار آب تجدیـدنظر کـرد و بـه ازاء هـر 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. سـقف مجـاز سـیمان ٤٥٠ کیلـوگرم می‌باشد لذا کاهش ۵۷ کیلوگرم سیمان یا بیشتر ضروری است.

با فرض کاهش ٦٧ کیلوگرم سیمان، عیار سـیمان ٤٤٠ کیلـوگرم مـی‌شـود و آب آزاد آن ۱۹۸ کیلوگرم خواهد بود.

گام ۸: مقدار تقریبی اولیه افزودنی

با توجه به ۱۳درصد کاهش آب و سیمان لازمست تقریباً از حدود ۰/٤٥ درصد افزودنـی استفاده نمائیم که مقدار آن ۲ کیلوگرم خواهد شد. بنـابراین حـدود ۲ کیلـوگرم از آب مـورد نیاز را کم می‌کنیم و آب آزاد ۱۹٦ خواهد شد. همـه افزودنـی مـصرفی آب نیـست امـا بـرای احتیاط ۲کیلوگرم از آب کسر شد.

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

$$A_{SSD} = ۲/۶۲۳\left(۱۰۰۰ - \frac{٤٤۰}{۳/۱۰} - \frac{۱۹٦}{۱} - ۱۰\right) = ۱۷۱۰\ kg/m^3$$

مقدار شن درشت و ریز اشباع به ترتیب ٤۲۷/٥ و ۳٤۲ کیلوگرم و مقدار ماسه اشباع ۹٤۰/٥ کیلوگرم محاسبه می‌شود.

اگر حجم کل سنگدانه برابر ٦٥۱/۹۳ لیتر باشد حجم شن درشت و ریز و ماسه به ترتیب ۱٦۲/۹۸، ۱۳۰/۳۹ و ۳٥۸/٥٦ لیتر و اوزان اشباع آنها به ترتیب ٤۳٦، ۳٤٦ و ۹۲۸ بدست می آید.

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:

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{۴۲۷/۵}{۱+۰/۰۰۸} = ٤۲٤$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{۳۴۲}{۱+۰/۰۱} = ۳۳۸/٥$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{۹۴۰/۵}{۱/۰۱۸} = ۹۲٤$$

حالت دوم:

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{۴۳۶}{۱+۰/۰۰۸} = ٤۳۲/٥$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{۳۴۶}{۱+۰/۰۱} = ۳٤۲/٥$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{۹۲۸}{۱/۰۱۸} = ۹۱۱/٥$$

$$\text{آب کل} = ۱۹٦ + ۳/٥ + ۳/٥ + ۱٦/٥ = ۲۱۹/٥\ kg/m^3$$

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

$\rho_B = ۱۷۱۰ + ۱۹٦ + ٤٤۰ + ۳ = ۲۳٤۹ \ kg/m^3$

تعدیل طرح اختلاط:

در صورتیکه پس از ساخت مخلوط آزمون با ۲ کیلوگرم افزودنی فوق روان کننده مقدار اسلامپ برابر ۱٦٥ میلی‌متر بدست آید و وزن مخصوص بتن ۲۳٦۰ و مقاومت ۲۸ روزه استوانه‌ای بتن ٤۸/٥ 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 ۱٥۰ میلی‌متر بدست آید. کاهش مقاومت هر چند در محدوده ٥ 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 ۰/٤۳٥ 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 ٤٤۰ منظور کنیم کاهش آب را به میزان ۱۹۲ (بجای ۱۹۸) داشته باشیم مقدار نسبت آب به سیمان به حدود ۰/٤۳٥ 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 ٤٤۰ 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 ٦ کیلوگرم کاهش داده شده است و این کاهش عملاً به کاهش حدود ٤ سانت در اسلامپ بتن منجر می‌شود و مقدار اسلامپ به کمتر از ۱۳۰ میلی‌متر 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:

$$A_{SSD} = ۲/۶۲۳ \left(۱۰۰۰ - \frac{٤٤٠}{۳/۱} - \frac{۱۹۰}{۱} - ۱۰ \right) = ۱۷۲٦$$

$$\text{شن درشت خشک} = \frac{۴۳۱/۵}{۱/۰۰۸} = ٤۲۸$$

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{۳۴۵}{۱/۰۱} = ۳٤۱/٥$$

$$\text{ماسه خشک} = \frac{۹۴۹}{۱/۰۱۸} = ۹۳۲$$

$$\text{آب کل} = ۱۹۰ + ۳/٥ + ۳/٥ + ۱۷ = ۲۱٤ \ kg/m^3$$

$$\text{وزن یک متر مکعب بتن} = ۱۷۲٦ + ۱۹۰ + ٤٤٠ + ۳ = ۲۳٥۹ \ kg/m^3$$

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: ۱٤٥ میلی‌متر

درصد هوای بتن: ۱/۱ درصد

وزن مخصوص بتن تازه متراکم: ۲۳٥۰ کیلوگرم بر متر مکعب

مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای: ٥۱/۸ 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

مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c	Mpa	۲۰
انحراف معیار بتن S	Mpa	نامشخص
اسلامپ متوسط پس از ۵ دقیقه	mm	۸۰
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤٥
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	۳۵۰
حداکثر سیمان مجاز	Kg/m^3	٤۰۰
نمای لازم		متوسط

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 ـ لیگنوسولفونات	۱/۲۰	۰/۳ تا ۱ درصد	۵ تا ۱۲ درصد

جدول ٤- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

	شن بادامی	شن نخودی	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۵۲	۲/۵۳	۲/۵٤
درصد ظرفیت جذب آب	۲/٦	۲/۸	۳/۱
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	مخلوط گردگوشه و تیزگوشه

درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	۵۵	٦۵	۲۵

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

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن بادامی	۱۰۰	۸۸	۱٦	۰							
شن نخودی	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	٦۳	۱	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۹۰	٦۳	٤۱	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 می بریم. این مشکل معمولا 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 $A_{۱۹}$ انتخاب می شود. سهم ماسه ٤۵ درصد، سهم نخودی ۲۷/۵ درصد و سهم بادامی ۲۷/۵ درصد و دانه‌بندی مخلوط حاصله عبارت است از:

جدول ٦- دانه‌بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه‌بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
مخلوط حاصله	۱۰۰	۹٦/۵	۷٦/۵	٦۲/۵	٤٤/۵	٤۰/۵	۲۸/۵	۱۸/۵	۱۰	۵	۱/۵
منحنی $B_{۱۹}$		۱۰۰	۸٤	۷٦	٦۳	۵۵	٤۰	۲۸	۱۸	۱۱	۵
منحنی n=۰/۵۵		۱۰۰	۷۸	٦۷	۵۲	٤٤	۲۸	۱۸	۱۱	٦	۲

منحنی $A_{۱۹}$		۱۰۰	۷۵	٦۲	٤٦	۳۸	۲۳	۱۳	۸	٤	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 می‌باشد.

گام ۲: محاسبه مدول نرمی مخلوط حاصله

مدول ریزی مخلوط حاصله از سنگدانه‌ها با سهم فوق برابر ۵/۳۷ بدست می آید در حالی که مدول ریزی منحنی $A_{۱۹}$ برابر ۵/۵۱ و مدول ریزی منحنی n=۰/۵۵ برابر ۵/۲٤ می باشد.

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

$\rho_{A_{SSD}} = ۲/۵۳۲$

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

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

$f_{cm} = ۲۰+۸/۵ = ۲۸/۵$ 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 ۰/٤۵ می‌باشد و لازم است از ۰/٤۵ استفاده شود. مقدار درصد شکستگی متوسط شن ٦۰ درصد می‌باشد و با توجه به سیمان پرتلند نوع ۲ می توان نسبت آب به سیمان را بدست آورداما در هر حال بیش از ۰/٤۵ 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 ۱٦۱ می باشد و تقریباً در حدود ۱٦۸ انتخاب می شود. زیرا درصد شکستگی متوسط معادل عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{۰/۵۵ \times ۶۰ + ۲ \times ۰/۴۵ \times ۲۵}{۰/۵۵ + ۲ \times ۰/۴۵} \cong ۳۸$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن

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

$$C = \frac{۱۶۸}{۰/۴۵} = ۳۷۳ \frac{kg}{m^3}$$

با توجه به این که از ۳۵۰ کیلوگرم بیشتر است اصلاح در مقدار آب به میزان ٤ 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 ٤۰۰ 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 می‌کنیم و با توجه به اطلاعات موجود داریم:

$$A_{SSD} = ۲/۵۳۲\left(۱۰۰۰ - \frac{۳۸۲}{۳/۱۲} - \frac{۱۷۲}{۱} - ۱۵\right) = ۱۷۴۸/۵ \frac{kg}{m^3}$$

بدین ترتیب با توجه به سهم سنگدانه‌ها در مخلوط، مقدار شن بادامی اشباع برابر ٤۸۰/۵، شن نخودی اشباع برابر ٤۸۱ 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 سنگدانه‌ها مقدار سنگدانه خشک و سپس آب کل بدست می‌آید.

شن بادامی خشک $G_{۱d} = \frac{۴۸۰/۵}{۱/۰۲۶} = ۴۶۸/۵ \frac{kg}{m^3}$

شن نخودی خشک $G_{۲d} = \frac{۴۸۱}{۱/۰۲۸} = ۴۶۸ \frac{kg}{m^3}$

ماسه خشک $S_d = \frac{۷۸۷}{۱/۰۳۱} = ۷۶۳/۵ \frac{kg}{m^3}$

$W_t =$ ۱۷۲+۱۲+۱۳+۲۳/۵= ۲۲۰/۵ kg/m^3

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

ρ_B = ۱۷٤۸/٥+۳۸۲+۱۷۲= ۲۳۰۲/٥ 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 ۳٥۰ کاهش دهیم، داریم:

مقدار آب آزاد =۳٥۰×۰/٤٥= ۱٥۷/٥ Kg

با توجه به آب موجود در افزودنی مقدار آب را در حدود ۱٥٦ درنظر 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 ۲/٥ کیلوگرم از نوع لیگنوسولفونات (روان کننده معمولی) درنظر 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 می گیریم.

$$A_{SSD} = ۲/٥۳۲\left(۱۰۰۰ - \frac{۳٥۰}{۳/۱۲} - \frac{۱٥۶}{۱} - ۳۰ - \frac{۲/٥}{۱/۲۰}\right) = ۱۷۷۲ \quad Kg/m^3$$

مقدارشن بادامی و نخودی SSD برابر ٤۸۷/٥ و مقدار ماسه اشباع برابر ۷۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود.

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

شن بادامی خشک $G_{۱d} = \frac{۴۸۷/٥}{۱/۰۲۶} \approx ۴۷٥ \ \frac{kg}{m^3}$

شن نخودی خشک $G_{۲d} = \frac{۴۸۷/٥}{۱/۰۲۸} \approx ۴۷۴ \ \frac{kg}{m^3}$

ماسه خشک

$$S_d = \frac{۷۹۷}{۱/۰۳۱} \approx ۷۷۳ \ \frac{kg}{m^3}$$

W_t = ۱۵٦+۱۲/٥+۱۳/٥+۲٤= ۲۰٦ kg/m^3

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

ρ_B = ۱۷۷۲+۱۵٦+۳٥۰+۲/٥= ۲۲۸۰/٥ 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

مقاومت مشخصه استوانه‌ای ۲۸ روزه f_c	Mpa	۲٥
انحراف معیار بتن S	Mpa	نامشخص
اسلامپ متوسط پس از ٥ دقیقه	mm	۱۳۰
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	۳٥۰
حداکثر سیمان مجاز (توصیه)	Kg/m^3	٤۲٥
نمای لازم		متوسط تا خوب

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	۳٥۰

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

نوع افزودنی	چگالی افزودنی	درصد مصرف	محدوده کاهش آب
فوق روان کننده کربوکسیلاتی	۱/۰۷	۰/٤ تا ۱/۲ درصد	۱۲ تا ۳۵ درصد

جدول ٤- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

	شن بادامی	شن نخودی	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۵۲	۲/۵۳	۲/۵٤
درصد ظرفیت جذب آب	۲/٦	۲/۸	۳/۱
شکل	نیمه شکسته	نیمه شکسته	مخلوط گردگوشه و تیزگوشه
درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	۵۵	٦۵	۲۵

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

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن بادامی	۱۰۰	۸۸	۱٦	۰							
شن نخودی	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	٦۳	۱	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	٦۳	٤۱	۲۲	۱۱	۳

راه‌حل

در اطلاعات مقاومتی این مثال مشکلی وجود دارد که عملاً در آیین نامه بتن ایران و سایر آیین نامه‌ها اجازه نمی دهند 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 می بریم. به هرحال محدودیت نسبت آب به سیمان مشکل موجود را حل می کند.

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

حداکثر اندازهٔ اسمی سنگدانه با توجه به درصد گذشته از الک ۱۹ میلی متر برای شن بادامی 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 (منحنی‌های n=۰/۵۵ و n=۰/٤۵).

با توجه به روش آزمون و خطا می توان سهم سنگدانه‌ها را بدست آورد. در ابتدا با توجه به محدوده مورد نظر سهم ماسه ۵۰ درصد، سهم نخودی ۲۵ درصد و بادامی ۲۵ درصد منظور می گردد. دانه‌بندی مخلوط حاصله با این سهم‌ها را محاسبه می کنیم و با محدوده مورد نظر مقایسه می نماییم.

جدول ٦- دانه‌بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه‌بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک (م.م.)	شن		ماسه ۵۰٪	مخلوط حاصله	منحنی			
	بادامی ۲۵٪	نخودی ۲۵٪			B_{19}	A_{19}	n=۰/۵۵	n=۰/٤۵
۲۵	۲۵	۲۵	۵۰	۱۰۰				
۱۹	۲۲	۲۵	۵۰	۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	٤	۲٤/۵	۵۰	۷۸/۵	۸٤	۷۵	۷۸	۸۱
۹/۵	۰/۵	۱۵/۵	۵۰	٦٦	۷۵	٦۲	٦۷	۷۱
٦/۳۵	۰	۲/۵	۵۰	۵۲/۵	٦۳	٤٦/۵	۵۲	۵۸
٤/۷۵		۰	٤۵	٤۵	۵۵	۳۸	٤٤	٤۹
۲/۳۸			۳۱/۵	۳۱/۵	٤۰	۲۳	۲۸	۳٤
۱/۱۹			۲۰/۵	۲۰/۵	۲۸	۱۳	۱۸	۲۲
۰/٦			۱۱	۱۱	۱۸	۸	۱۱	۱٤
۰/۳			۵/۵	۵/۵	۱۱	٤	٦	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 می شود. به هر حال به نظر می رسد 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:

$$F.M. = \frac{۳ + ۳۴ + ۵۵ + ۶۸/۵ + ۷۹/۵ + ۸۹ + ۹۴/۵ + ۹۸/۵}{۱۰۰} = ۵/۲۲$$

مدول ریزی منحنی‌های $B_{۱۹}$ و $A_{۱۹}$ به ترتیب عبارت است از ٤/٦٩ و ۵/۵۰ و مدول ریزی محدوده مطلوب به ترتیب ۵/۲٤ و ٤/۹۹ می‌باشد که نشان می‌دهد مدول ریزی منحنی مخلوط حاصله در بین مدول ریزی منحنی‌های مطلوب قرار دارد و همچنین می توان 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.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{۱}{\frac{۰/۵}{۲/۵۴} + \frac{۰/۲۵}{۲/۵۳} + \frac{۰/۲۵}{۲/۵۲}} = ۲/۵۳$$

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

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

$f_{cm} = ۲۵+۹/۵ = ۳٤/۵$ 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 می آید که خواهیم داشت.

$f_{cm} = ۲۵+۱/۳٤ \times ۵/۵ +۱/۵ = ۳۳/۸$ Mpa

$f_{cm} = ۲۵+۲/۳۳ \times ۵/۵ -٤/۰ = ۳۳/۸$ Mpa

به نظر می‌رسد مقادیر حاصله کمتر است و بکارگیری مقدار مقاومت هدف ۳٤/٥ منطقی است.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

با توجه به وجود سیمان پرتلند نوع ۲ و مشابهت آن با سیمان پرتلند ۳۲۵-۱ و درصد شکستگی تقریبی ٦۰ درصد برای شن‌ها، نسبت آب به سیمان ۰/٤۸ از شکل رابطه مقاومت ـ نسبت آب به سیمان بدست می آید اما حداکثر مجاز ۰/٤ 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 می شود. 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:

$$a_{ne} = \frac{۰/۵\times۶۰+۲\times۰/۵\times۲۵}{۰/۵+۲\times۰/۵} \cong ۳۷$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن

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

$$C = \frac{۱۸۳}{۰/۴} = ۴۵۷/۵ \ \frac{kg}{m^3}$$

عملاً با توجه به این که مقدار سیمان از ۳۵۰ کیلوگرم بیشتر است به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم سیمان مازاد، حدود ۱/۵ کیلوگرم به آب افزوده می شود لذا آب لازم در حدود ۱۷ کیلوگرم بیشتر می گردد یعنی ۲۰۰ کیلوگرم بدست می آید و مقدار سیمان در حدود ۵۰۰ حاصل می شود.

این مقدار حدود ۷۵ کیلوگرم بیشتر از مقدار مجاز (توصیه شده در آیین نامه پایایی بتن در حاشیه خلیج‌فارس) 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 ٤۲۵ 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 ۰/۵۵درصد 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:

$$A_{SSD}=\rho_{A_{SSD}}\left(1000-\frac{C}{\rho_c}-\frac{W_f}{\rho_w}-V_a-\frac{A_d}{\rho_{A_d}}\right)=2/5\left(1000-\frac{425}{3/12}-\frac{169}{1}-10-\frac{2/30}{1/07}\right)=1727\ kg/m^3$$

بدین ترتیب شن بادامی اشباع حدود ٤٣٢، شن نخودی اشباع ٤٣٢ و ماسه اشباع ٨٦٣ 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

شن بادامی خشک $G_{1d}=\frac{432}{1/026}\approx 421\ \frac{kg}{m^3}$

شن نخودی خشک $G_{2d}=\frac{432}{1/028}\approx 420\ \frac{kg}{m^3}$

ماسه خشک $S_d=\frac{863}{1/031}\approx 837\ \frac{kg}{m^3}$

$W_t = ۱۶۸+(٤۳۲-٤۲۱)+(٤۳۲-٤۲۰)+(۸٦۳-۸۳۷)= ۲۱۷ kg/m^3$

گام ۱۱: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

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

$\rho_B = ۱۷۲۷+٤۲٥+۱۷۰+۲/۰= ۲۳۲۲ kg/m^3$

در این مثال مانند سایر مثال‌ها می توان 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

مقاومت مشخصه مکعبی ۲۸ روزه f_c	Mpa	۲٥
انحراف معیار بتن s	Mpa	نامشخص
اسلامپ متوسط پس از ٥ دقیقه	mm	٤۰
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤٥
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	۳۰۰
حداکثر سیمان مجاز (توصیه)	Kg/m^3	۳٥۰
نمای لازم		خوب
درصد تقریبی هوای عمدی		٤/٥
درصد تقریبی هوای کل		٦

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد
پرتلند ۵	نامشخص	۳۱۰ Kg/cm^2

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های مربوط به افزودنی

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

جدول ٤- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

	شن مخلوط	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۵۸۰	۲/۵۱٤
درصد ظرفیت جذب آب	۲/۵	۳/۰
شکل	کاملاً تیزگوشه	کاملاً گردگوشه
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	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن مخلوط	۱۰۰	۷۰	٤۰	۱۷	۳	۰	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۲	۸۵	٦۵	٤۸	۲۷	۱۰	۳

راه‌حل

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 اندازهٔ اسمی سنگدانه همان ۲۵ میلی متر منظور می‌شود. با توجه به نمای خوب محدوده مورد نظر بین منحنی $B_{۲۵}$ و $A_{۲۵}$ (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 ٦- محاسبه دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با توجه به سهم هر یک و ارائه منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب

الک (م.م.)	شن مخلوط ۵۰٪	ماسه ۵۰٪	مخلوط سنگدانه	منحنی			
				$A_{۲۵}$	$B_{۲۵}$	n=۰/۵۵	n=۰/٤۵
۲۵	۵۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۳۵	۵۰	۸۵	۸۳	۸۹	۸۵	۸۷
۱۲/۵	۲۰	۵۰	۷۰	٦۲	۷۵	٦۷	۷۱
۹/۵	۸/۵	۵۰	۵۸/۵	۵۱	٦۷	۵۷	٦۲
٦/۳۵	۱/۵	٤٦	٤۷/۵	۳۹	۵٦	٤۵	۵۰
٤/۷۵	۰	٤۲/۵	٤۲/۵	۳۲	٤۹	۳۸	٤۳
۲/۳۸		۳۲/۵	۳۲/۵	۱۹	۳٦	۲٤	۳۰
۱/۱۹		۲٤	۲٤	۱۱	۲۵	۱۵	۲۰
۰/٦		۱۳/۵	۱۳/۵	٦	۱٦	۹	۱۲
۰/۳		۵	۵	۳	۹	۵	۷
۰/۱۵		۱/۵	۱/۵	۱	٤	۲	۳

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 می توان 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:

$$F.M. = \frac{۱۵ + ۴۱/۵ + ۵۷/۵ + ۶۷/۵ + ۷۶ + ۸۶/۵ + ۹۵ + ۹۸/۵}{۱۰۰} = ۵/۳۸$$

مدول ریزی منحنی $B_{۲۰}$ و $A_{۲۰}$ به ترتیب ۵/۰۶ و ۵/۹۵ و مدول ریزی برای منحنی‌های n=۰/۵۵ و n=۰/٤٥ به ترتیب ۵/٦٥ و ۵/۳٦ 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.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{۱}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}}} = \frac{۱}{\frac{۰/۵}{۲/۵۸} + \frac{۰/۵}{۲/۵۱۴}} = ۲/۵۴۷$$

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 ۳-۱ و ۳-۲ 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 استوانه ای مندرج در فصل ششم تفسیر آبا مقاومت استوانه‌ای برابر $۲۰N/mm^2$ بدست می‌آید.

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

$f_{cm} = f_c + ۸/۵ = ۲۰ + ۸/۵ = ۲۸/۵ \ N/mm^2$

اگر از روش موجود بهره بگیریم با توجه به ساخت بتن به روش سنجش حجمی برای ساخت بتن با بتونیر از جدول ۳-۲ رتبه کارگاه از نظر کنترل کیفیت "ج" به دست می‌آید و از جدول ۳-۱ برای مقاومت مشخصه $۲۰N/mm^2$ مقدار انحراف معیار N/mm^2 ۵ حاصل می‌شود و با توجه به روابط (۳-۱) داریم:

$f_{cm} = f_c + ۱/۳٤s + ۱/۵ = ۲۰ + ۱/۳٤ \times ۵ + ۱/۵ = ۲۸/۲ \ N/mm^2$

$f_{cm} = f_c + ۲/۳۳s - ٤/۰ = ۲۰ \times ۲/۳۳ \times ۵ - ٤ \approx ۲۷/۷ \ N/mm^2$

که مقاومت متوسط لازم برای طرح $۲۸/۲ \ N/mm^2$ 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 می شود. در اینجا مقاومت هدف $۲۸/۵ \ N/mm^2$ را بکار می‌بریم.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

مقاومت‌های شکل ٤-۱ مربوط به بتن معمولی است و برای بتن حباب‌دار با ٤/۵ درصد حباب هوای عمدی حدود ۱۸ تا ۲۲ درصد از مقاومت کاسته می‌شود. می‌توان با درنظر گرفتن مقاومت ۲۸/۵، 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 $۲۷۰ \ kg/cm^2$ 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 تیزگوشه است و بنابراین منحنی فرضی C-۳۱۰ به جای C-۳۲۵ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مقدار نسبت آب به سیمان تقریباً ۰/٤۲ (با نوجه به کاهش ۲۰ درصدی به دلیل وجود حباب هوای عمدی) به دست می‌آید که از ۰/٤۵ 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 ٤۰ میلی متر از شکل ٤-٦ برابر $۱٤۵ \ kg/m^3$ حاصل می‌شود. از شکل ٤-۷ مقدار آب آزاد $۱٦۵kg/m^3$ خواهد بود اما به خاطر

شکل سنگدانه‌های ریز و درشت مقدار $۱۵۲\ kg/m^3$ منظور می‌شود. در این حالت حدود ۱۶ تا ۱۸ درصد از آب بتن باید کاست زیرا ٤/٥درصد حباب عمدی وجود دارد و بنابراین آب بتن در این حالت را حدود $۱۲٦\ kg/m^3$ در نظر می‌گیریم. درصد شکستگی متوسط معادل در مخلوط سنگدانه عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{۰/۵\times۱۰۰+۰/۵\times۰}{۰/۵+۲\times۰/۵} \cong ۳۳$$

گام ۷: تعیین مقدار سیمان بتن طرح

با توجه به نسبت آب به سیمان طرح یعنی ۰/٤۲ و مقدار آب آزاد $۱۲٦\ kg/m^3$ داریم:

$$\text{مقدار سیمان} = \frac{۱۲۶}{۰/۴۲} \approx ۳۰۰\ kg/m^3$$

بنابراین سیمان $۳۰۰\ kg/m^3$ 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 ۳/۲۰ فرض می‌شود. درصد هوای بتن ٦ درصد می‌باشد و در رابطه مورد نظر مقدار ٦۰ لیتر هوای کل به کار می‌رود که ۱۵ درصد آن هوای غیر عمدی می با شد.

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}}\left(۱۰۰۰ - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a\right) = ۲/۵۴۷\left(۱۰۰۰ - \frac{۳۰۰}{۳/۲۰} - \frac{۱۲۶}{۱} - ۶۰\right) \approx ۱۸۳۴\frac{kg}{m^3}$$

مقدار شن SSD برابر ۹۱۷ و مقدار ماسه SSD برابر ۹۱۷ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود.

می توان حجم سنگدانه‌ها را بدست آورد و در مرحله بعد حجم هر یک را با توجه به سهم‌ها بدست آورد و درنهایت 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:

شن خشک $G_d = \frac{۹۱۷}{۱/۰۲۵} \approx ۸۹۴/۵ \ \frac{kg}{m^3}$

ماسه خشک $S_d = \frac{۹۱۷}{۱/۰۳۰} \approx ۸۹۰/۵ \ \frac{kg}{m^3}$

$W_t = ۱۲۰ + ۲۲/۵ + ۲۶/۵ = ۱۷۵ \ kg/m^3$

گام ۱۰: تعیین جرم مخصوص بتن متراکم تازه

با توجه به هوای موجود ٦ درصدی مفروض در بتن جرم مخصوص بتن تازه متراکم عبارت است از:

$\rho_B = ۱۸۳٤ + ۳۰۰ + ۱۲٦ = ۲۲٦۰ \ kg/m^3$

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 مثلا 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 ٤/۵ درصد، چگالی بتن متراکم تازه $۲۳۰۰ kg/m^3$ و مقاومت بتن (استوانه ای) ۲۸ روزه $۳۲ N/mm^2$ حاصل شده است. جداشدگی و آب انداختن مشاهده نشده است و ظاهر بتن از نظر دانه‌بندی، نما و تراکم‌پذیری نسبتاً خوب است.

الف: مشکل خاصی در مورد دانه‌بندی، آب انداختن و جداشدگی وجود ندارد. بنابراین دانه‌بندی و برخی ویژگی‌های 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. دراین 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 ٤۰ میلی متر برسد نیاز به تغییر آب به میزان زیر داریم:

$۰/۳ \ (٤۰ - ۱۰) = ۹ \ kg/m^3 \Rightarrow$ تغییر آب آزاد $= ۱۲٦ + ۹ = ۱۳۵ \ kg/m^3$ آب آزاد

با این حال اگر ۱/۵ درصد هوا در بتن بالاتر می رفت و به ٦ درصد می رسید نیاز به آب ۵ تا ٦ درصد کاهش می یافت و این مقدار در این مثال بین ٦/۵ 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 $۳۲N/mm^2$ حاصل شده که با $۲۸/۵\ N/mm^2$ فاصله دارد. علاوه بر این، کمبود ۱/۵ درصد هوا در مقایسه با ٦درصد هوای مورد نیاز احتمالاً در حدود ٦ تا ۷/۵ درصد افزایش مقاومت ایجاد کرده است (حدود $۲N/mm^2$).

بنابراین اگر این موارد را در نظر بگیریم مقاومت مورد نظر یعنی $۳۰\ N/mm^2$ باید حاصل می گردید (با نسبت آب به سیمان ۰/٤۲). اگر به واسطه افزایش مقاومت بخواهیم نسبت آب به سیمان را تصحیح کنیم:

$$\left(\frac{W}{C}\right)_n = ۰/۴۲ + ۰/۴۲\left(\frac{۳۰ - ۲۸/۵}{۲۸/۵}\right) = ۰/۴۴$$

در حالی که مجبوریم حداقل سیمان $۳۰۰kg/m^3$ را به کار ببریم و نسبت آب به سیمان موجود ۰/٤٤ و حداکثر مجاز ۰/٤۵ منظور شود، عملاً نسبت آب به سیمان ۰/٤٤ در نظر گرفته می‌شود. در ضمن بحث قبلی یعنی امکان افزایش مقدار آب و روانی می‌تواند 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 $۳۰۰kg/m^3$ بکار رود.

ه : تعدیل در مقدار سنگدانه SSD ، سنگدانه خشک: با فرض همان ٦درصد هوای لازم در بتن و تغییر در مقدار آب و رسانیدن آن به میزان $۱۳۲kg/m^3$ می توان مقدار سنگدانه را محاسبه نمود.

$$A_{SSD} = ۲/۵۴۷\left(۱۰۰۰ - \frac{۳۰۰}{۳/۲} - \frac{۱۳۲}{۱} - ۶۰\right) = ۱۸۰۴ kg/m^3$$

$G_{SSD} = ۹۰۲\ Kg/m^3$ و $S_{SSD} = ۹۰۲\ Kg/m^3$

پس

$\rho_B = ۲۲۳٦\ kg/m^3$

و: تعدیل در مقدار هوای موجود: به جای ٦ درصد هوا، ٤/٥ درصد حاصل شده است. عملا بجای ٤/٥درصد هوای عمدی، ۳درصد 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 ۱/٥ درصد در هوای این بتن معمولاً در حدود ۳۵ کیلوگرم افزایش در چگالی بتن منطقی به نظر می‌رسد. جرم مخصوص بتن به جای ۲۲٦۰ برابر Kg/m^3 ۲۳۰۰ 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). هم چنین با افزایش درصد حباب هوای عمدی در بتن نیز در مجموع کارآیی و روانی بهبود می‌یابد.

بطورکلی می توان گفت تعدیل بتن حبابدار امری دشوار می باشد.

مثال ۸-

مطلوب است طرح اختلاط بتنی برای ساخت دیواره و پایه پل بر روی یک رودخانه آب شوردر 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.

هم چنین 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

مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c	Mpa	۳۰
انحراف معیار بتن S	Mpa	٥
اسلامپ متوسط پس از ٥ دقیقه	mm	۱۲٥
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان برای دوام	W/C	۰/٤٥
حداقل مواد سیمانی مجاز	Kg/m^3	۳٥۰
حداکثر مواد سیمانی مجاز	Kg/m^3	٤٥۰
نمای لازم		نسبتاً خوب

جدول ۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به سیمان مصرفی

نوع سیمان	چگالی ذرات سیمان	مقاومت فشاری ملات استاندارد kg/cm^2
پرتلند ۱-۴۲۵	۳/۰۷	٤٤٠

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	٦

جدول ٤- 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	۱۲-۲٤	۱/۲-۰/٤

جدول ٥- اطلاعات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی

	شن بادامی	شن نخودی	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/۷۰٥	۲/٦۹٥	۲/۷٤٥
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۱	۱/۲	۱/٤
شکل	کاملاً تیز گوشه	کاملاً تیز گوشه	کاملاً گرد گوشه
درصد شکستگی معادل تمام جبهه‌ها	۱۰۰	۱۰۰	-
درصد پولکی	۱۷	۱٤	-
درصد کشیدگی	۱۳	۱٥	-

جدول ٦- دانه‌بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی گذشته از الک‌های مورد نظر به صورت تجمعی)

الک / نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن درشت	۱۰۰	۹۵	٤۰	۱۵	۵	۰					
شن متوسط	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	٦۵	۱۰	٤	۰				
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۷۰	٤۵	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 اندازهٔ 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 ٤-۳ می‌رویم. منحنی مطلوب و محدوده مطلوب دانه‌بندی با توجه به نما و پمپی بودن بتن در بین $A_{۱۹}$ و $B_{۱۹}$ قرار دارد اما در بتن پمپی ریز دانه کردن زیاد و نزدیکی به منحنی $B_{۱۹}$ نیز توصیه نمی‌شود؛ اما بهتر است در نیمه فوقانی ناحیه (۱) و بین منحنی‌های متناظر با n برابر ۰/۵ و ۰/٤ واقع گردد.

وجود سیمان نسبتاً زیاد در این بتن به همراه دودهٔ 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 یاعث جمع‌شدگی‌های شدیدتری (به ویژه با وجود دوده سیلیسی) می‌شود. لذا دانه‌بندی مطلوب بهتر است زیاد به $B_{۱۹}$ 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 می کنیم. با این سهم‌ها دانه‌بندی مخلوط حاصله را با محدوده مورد نظر

یعنی بین دو منحنی $B_{۱۹}$ و $A_{۱۹}$ و منحنی‌های n=۰/۵ و n=۰/٤ مقایسه می‌کنیم.

جدول ۷- محاسبه دانه‌بندی مخلوط سنگدانه با توجه به سهم هر یک و منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب

الک (م.م.)	شن		ماسه ۵۰٪	مخلوط سنگدانه	منحنی			
	بادامی ۳۰٪	نخودی ۲۰٪			$A_{۱۹}$	$B_{۱۹}$	n=۰/۵	n=۰/٤
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	۸٤	۸۰	۸۳
۹/۵	٤/۵	۱۳	۵۰	٦۷/۵	٦۲	۷۵	٦۹	۷۳
٦/۳۵	۱/۵	۲	۵۰	۵۳/۵	٤۷	٦۳	۵۵	٦۰
٤/۷۵	۰	۰/۸	٤۵	٤٦	۳۸	۵۵	٤۷	۵۲
۲/۳۸		۰	۳۵	۳۵	۲۳	٤۰	۳۱	۳۷
۱/۱۹			۲۲/۵	۲۲/۵	۱٤	۲۸	۲۰	۲۵
۰/٦			۱۲/۵	۱۲/۵	۸	۱۸	۱۲	۱٦
۰/۳			۷/۵	۷/۵	٤	۱۱	۷	۹
۰/۱۵			۳/۵	۳/۵	۲	۵	۳	٤

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 ٤/۷۵ نیز منحنی مخلوط اندکی پایین تر از منحنی n=۰/۵ 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:

$$F.M. = \frac{۱/۵ + ۳۲/۵ + ۵۴ + ۶۵ + ۷۷/۵ + ۸۷/۵ + ۹۲/۵ + ۹۶/۵}{۱۰۰} = ۵/۰۷$$

مدول ریزی منحنی B_{19} و A_{19} به ترتیب ٤/٦٩ و ٥/٥٠ و مدول ریزی دو منحنی مطلوب دیگر به ترتیب ٥/١١ و ٤/٨٤ می‌باشد و مدول ریزی منحنی دانه‌بندی حاصله می‌تواند 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 سنگدانه‌ها می‌توان طبق رابطه ب-۱ جرم مخصوص متوسط SSD مخلوط را به دست آورد.

$$\rho_{A_{SSD}} = \frac{1}{\frac{p_1}{\rho_{A_1}} + \frac{p_2}{\rho_{A_2}} + \frac{p_3}{\rho_{A_3}} + \frac{p_4}{\rho_{A_4}}} = \frac{1}{\frac{٠/٣}{٢/٧٠٥} + \frac{٠/٢}{٢/٦٩٥} + \frac{٠/٥}{٢/٧٤٥}} = ٢/٧٢٣$$

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

با توجه به مشخص بودن انحراف معیار از روابط (۳-۱) و (۳-۲) مقاومت فشاری متوسط به دست می‌آید. در صورتی که انحراف معیار مشخص نشده باشد و نتوان آن را با اطلاعات موجود در پروژه و یا سایر پروژه‌های مشابه به دست آورد می‌توان از جدول ۳-۱ و ۳-۲ بهره گرفت.

$f_{cm} = f_c + ١/٣٤s + ١/٥ = ٣٠ + ١/٣٤ \times ٥ + ١/٥ = ٣٨/٢ \ N/mm^2$

$f_{cm} = f_c + ٢/٣٣s - ٤/٠ = ٣٠ \times ٢/٣٣ \times ٥ - ٤/٠ - = ٣٧/٦٥ \ N/mm^2$

بنابراین بزرگترین مقدار همان مقاومت هدف طرح مخلوط خواهد بود یعنی ۳۸/۲ را در مرحله بعدی بکار می‌بریم.

گام ۵: تعیین نسبت آب به سیمان بتن

از آن جا که مصرف دوده سیلیسی بدون مصرف فوق روان کننده جایز نیست لذا از منحنی‌های مربوط به شکل ٤-۲ این راهنما استفاده می کنیم.

با توجه به نزدیکی مقاومت ملات استاندارد سیمان موجود به حداقل مقاومت ملات استاندارد سیمان نوع ٤٢٥-١ از منحنی‌های ٤٢٥ استفاده می‌کنیم. سنگدانه درشت موجود کاملاً تیز گوشه و صد درصد شکسته است بنابراین از منحنی ٤٢٥-C باید استفاده کرد. با توجه به شکل ٤-۲ و در نظر گرفتن مقاومت هدف ۳۸/۲ N/mm^2 نسبت آب به سیمان در

حدود ۰/۵۱۵ به دست می‌آید. داده‌های موجود حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان ۰/٤٥ منظور شده است لذا نمی‌توان از این مقدار تجاوز نمود و لازم است نسبت آب به سیمان ۰/٤٥ یا کمتر بکار رود. ضمناً همان طور که دیده می شود در این مورد نتایج حاصله از منحنی‌های ٤-۱ و ٤-۲ 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 ٤-٦ و ٤-۷ به دست آورد و سپس با توجه به شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها مقدار آب آزاد طرح را حدس زد.

از شکل ٤-٦ با داشتن مدول ریزی ۵/۰۷ و رده اسلامپ S_3 (روانی ۱۲۵ میلی متر) مقدار آب آزاد ۱۸۰ به دست می‌آید. از شکل ٤-۷ مقدار آب ازاد ۲۰۰ تعیین می‌شود.

معادل درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌ها عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{۰/۵\times۱۰۰+۲\times۰/۵\times۰}{۰/۵+۲\times۰/۵} \cong ۲۹$$

بنابراین فعلاً بدون این که مصرف روان کننده و دوده سیلیسی را در نظر بگیریم مقدار آب آزاد در حدود ۱۸۷ بدست می آید 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.

$$\text{مقدار مواد سیمانی معادل} = \frac{۱۸۷}{۰/۴۵} = ۴۱۵$$

این مقدار از Kg/m^3 ٤٥۰ مجاز کمتر است. به هر حال جمع مقدار سیمان و دوده سیلیس باید کمتر از ٤٥۰ 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 ٤-۲ روش ملی طرح مخلوط k=۱ منظور می شود. اگر این شرایط حاکم نبود ضریب دوده سیلیسی یعنی k برابر ۲ منظور می شد.

$$k.M+C= ٤۱۵$$

مقدار دوده سیلیسی جایگزین ٦ درصد می‌باشد. درصد دوده سیلیسی به مقدار سیمان

M/C به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = ۱۰۰ - ۶ = ۹۴ \quad \Rightarrow \quad \frac{M}{C} = \frac{۶}{۹۴} = ٪۶/۳۸$$

$$C + ٪\,۶/۳۸\,C = ٤۱٥ \quad \Rightarrow \quad C = ۳۹۰\ Kg/m^3 \quad و \quad M = ۲٥\ Kg/m^3$$

در نتیجه جمع مواد سیمانی از $٤٥۰\ Kg/m^3$ 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 ۳٥۰ بیشتر و حاوی دوده سیلیسی است باید به ترتیب ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم آب را بدان افزود؛ بنابر این مقدار آب ۲۱۷ کیلوگرم می شود و مقدار مواد سیمانی معادل ٤۸۲ خواهد شد و اگر محاسبات فوق تکرار گردد مقدار سیمان ٤٥۳ 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 دربتن پمپی این مقدار مواد سیمانی حاوی دوده سیلیس، زیاد و بیش از حد می‌باشد و بهتر است آن را به $٤۰۰\ Kg/m^3$ (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 ٤۰۰ باشد مقدار سیمان ۳۷٦ و دوده سیلیسی ۲٤ کیلوگرم خواهد بود. در واقع ما نیاز به حدود ۱۷ درصد کاهش آب داریم و فعلاً مقدار ۰/۷٥ درصد فوق روان کننده (معادل ۳ کیلو) را در نظر می گیریم. مقدار آب آزاد با توجه به موارد فوق ۱۸۰ کیلوگرم می شود.

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 ۱/۲٥ درصد (۱۲/٥ لیتر در متر مکعب) در نظر می‌گیریم و اگر حجم روان کننده نیز ۲/٥ لیتر باشد داریم:

$$A_{SSD}=\rho_{A_{SSD}}\left(۱۰۰-\frac{C}{\rho_c}-\frac{W_f}{\rho_w}-V_a\right)=۲/۷۲۳\left(۱۰۰-\frac{۳۷۶}{۳/۰۷}-\frac{۲۴}{۲/۲۷}-\frac{۱۸۰}{۱}-۱۵\right)\approx ۱۸۳۰$$

مقدار شن بادامی SSD $G_{1SSD} = ٥٤٩\ Kg/m^3$

مقدار شن متوسط SSD $G_{2SSD} = ٣٦٦\ Kg/m^3$

مقدار ماسه SSD $S_{SSD} = ٩١٥\ Kg/m^3$

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:

شن بادامی خشک $G_{۱d}=\frac{۵۴۹}{۱+۰/۰۱۱}\approx ۵۴۳\,kg/m^3$

شن نخودی خشک $G_{۲d}=\frac{۳۶۶}{۱+۰/۰۱۲}=۳۶۱/۵\,kg/m^3$

ماسه خشک $S_d=\frac{۹۱۵}{۱+۰/۰۱۴}\approx ۹۰۲/۵\,kg/m^3$

$W_t = ۱۸۰+ ٦+ ۳/٥ + ۱۲/٥= ۲۰۳\ kg/m^3$

این آب حاوی آب افزودنی می‌باشد و بهتر است در حدود ۲ کیلوگرم از آن کسر شود.

گام ۱۰: تعیین جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه

$\rho_B = ۱۸۳۰+٤۰۰+۱۸۰+۲= ۲٤۱۲\ kg/m^3$

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 ۲٤۳۰ 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 می‌رسد. مقاومت ۲۸ روزه استوانه ای بتن $٤٧/٥\ N/mm^2$ 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 دانه‌بندی 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 اسلامپ ۱۲۵ میلی متر داریم. نمی توانیم آب را زیاد کنیم زیرا مواد سیمانی محدود به ٤۰۰ است و باید روان کننده را اضافه نماییم و آن را به سطح ۱ درصد (٤ کیلو) می رسانیم.

تغییر آب آزاد = ۰/۲ (۱۲۵-۹۰) = ۷ kg/m^3 $\Rightarrow$ آب آزاد = ۱۸۰ + ۷ = ۱۸۷ kg/m^3

ج: تعدیل W/C : در این مثال نمی‌توان 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 ۰/۸درصد گرفتیم ضمن این که می‌توانستیم 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 Kg/m^3 G_{2SSD} =۳۷۱ Kg/m^3 S_{SSD} = ۹۲۸ Kg/m^3

پس

G_{1d} =۵۵۱ kg/m^3 G_{2d} = ۳٦٦/۵ kg/m^3 S_d = ۹۱۵ kg/m^3

W_t = ۱۸۰+٦+٤/۵+۱۳ = ۲۰۳/۵Kg/m^3

ρ_B = ۱۸۵٦+٤۰۰+۲+۱۸۰ = ۲٤۳۸ 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 می‌تواند 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 کـه سـیمان و دوده سیلیـسی و چگـالی ذرات آن‌هـا را جداگانه در رابطه با حجم مطلق برای تعیین مقدار سنگدانه SSD قـرار دهـیم، مقـدار مجمـوع 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 مـواد سیمانی داریم (طبق بند ٤-٥-٤ این راهنما):

$$\rho_B = \frac{۱}{\frac{p_C}{\rho_C} + \frac{p_M}{\rho_M}} = \frac{۱}{\frac{۰/۹۴}{۳/۰۷} + \frac{۰/۰۶}{۲/۲۷}} = ۳/۰۰۶ \approx ۳/۰۱$$

بنابراین با بکار بردن مقدار ۳/۰۱ عملاً تغییر چنـدانی در حـل مثـال حاصـل نمـی‌شـود 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 اسیب دیده بـا روش بتن‌پاشی در یک منطقه معتدل مورد نیـاز اسـت و محاسـبه مقـادیر سـیمان، آب آزاد، آب کـل، سنگدانه خشک و اشباع با سطح خشک وزن یک متر مکعب بتن تازه متراکم با توجه به حـداکثر 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 بتـونیر مخـصوص بـا کنتـرل 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

مقاومت مشخصه استوانه ای ۲۸ روزه f_c	Mpa	۳۰
انحراف معیار بتن S	Mpa	٤
اسلامپ پس از ٥ دقیقه	mm	۷۰
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤٥
حداکثر اندازه مجاز سنگدانه	mm	۹/٥
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	۳۷٥
حداکثر سیمان مجاز	Kg/m^3	٥٥۰

نمای لازم	نسبتاً خوب

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	۳٤۰

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	۲/٦۸	۱/۱	نیمه شکسته	۷۵	۱۰	۱۲	۲۳
ماسه درشت	۲/۵۵	۲/۰	گردگوشه	-	-	-	-
ماسه ریز	۲/۵۸	۳/۲	گردگوشه	-	-	-	-

جدول ٤- دانه‌بندی (درصد گذشته تجمعی) سنگدانه‌ها

الک	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن ریز	۱۰۰	٤۰	۵	۰				
ماسه درشت	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	٦۵	٤۵	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 $B_{۹/۰}$ و

$C_{۹۰}$ 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 ٦۰ درصد و سهم شن ریز را نیز ۱۵ درصد درنظر 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	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن ریز ۲۵٪	۲۵	۱۰	۱	۰				
ماسه درشت ٦۰٪	٦۰	٦۰	۵۷	۳۹	۲۷	۱۸	۹	۳
ماسه ریز ۱۵٪	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۳	۱۰/۵	۷/۵	۳
مخلوط حاصله	۱۰۰	۸۵	۷۳	۵٤	٤۰	۲۸/۵	۱٦/۵	٦
منحنی $B_{۹۰}$	۱۰۰	۸٤	۷٤	۵۳	۳۷	۲٤	۱٤	٦

با اینکه در الک ٤/۷۵ منحنی کمی پایین تر 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 سهم‌هاق فوق برابر است با:

$$F.M. = \frac{۲۷ + ٤٦ + ٦۰ + ۷۱/۵ + ۸۳/۵ + ۹٤}{۱۰۰} = ۳/۸۲$$

در حالیکه مدول نرمی منحنی‌های $B_{۹۰}$ و $C_{۹۰}$ به ترتیب برابر ۳/۹۲ و ۳/۲۷ می‌باشد و دیده می‌شود منحنی مخلوط حاصله نزدیکی خوبی با $B_{۹۰}$ دارد.

گام ۳: تعیین چگالی متوسط اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها

$$\rho_{ASSD} = \frac{۱}{\frac{۰/۲۵}{۲/۶۸} + \frac{۰/۶}{۲/۵۵} + \frac{۰/۱۵}{۲/۵۸}} = ۲/۵۸۶$$

درصورت 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 خواهدبود که در حدود ۳۷ MPa می‌باشد.

$f_{cm} = ۳۰ + ۱/۳٤ \times ٤/۰ + ۱/۵ = ۳٦/۹$ MPa

$f_{cm} = ۳۰ + ۲/۳۳ \times ٤ - ٤ = ۳۵/۳$ MPa

گام ۵: تعیین نسبت آب آزاد به سیمان طرح

با توجه به مقاومت فشاری ملات سیمان مزبور، منحنی سیمان ۳۲۵ بکار می‌رود و به علت ۷۵ درصد شکستگی شن از میانگین وزنی دو منحنی (325-C) و (325-R) مقدار نسبت آب به سیمان بدست می‌آید.

مقدار نسبت آب به سیمان ۰/٤٦ از منحنی‌های مزبور بدست آمد، اما وقتی حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان ۰/٤۵ می‌باشد این مقدار تعیین کننده است.

گام ۶: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

مدول ریزی مخلوط ۳/۸۲ و رده اسلامپ S_2 با روانی ۷۰ میلی متر می‌باشد. درصد شکستگی متوسط سنگدانه عبارتست از:

$$a_n = \frac{۰/۲۵ \times ۰/۷۵ + ۲ \times ۰/۷۵ \times ۰}{۰/۲۵ + ۲ \times ۰/۷۵} \approx ۱۱$$

عملاً شکستگی در مصالح سنگی بسیار کم است. مقدار آب برای صد درصد گردگوشه ۲۰۲ و برای کاملا تیزگوشه ۲۲۷ است.

مقدار آب آزاد عملاً در حدود ۲۰۵ کیلوگرم می‌باشد.

گام ۷: تعیین مقدار سیمان طرح مخلوط

سیمان با توجه به مقدار آب آزاد ۲۰۵ و نسبت آب به سیمان ۰/٤۵ بدست می‌آید.

$$\text{مقدار سیمان} = \frac{۲۰۵}{۰/٤٥} = ٤٥٥\,kg$$

با توجه به اینکه مقدار سیمان از ۳۵۰ بیشتر است، عملاً حدود ۱۵ کیلوگرم آب به آب فوق اضافه می‌شود. که ۲۲۰kg خواهد بود و سیمان آن تقریبا ٤۹۰ kg/m^3 می‌شود.

مقدار سیمان از حداکثر سیمان مجاز کمتر و از حداقل مجاز بیشتر است بنابراین مشکلی ندارد. به هرحال 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:

حالت اول: $$A_{SSD} = ۲/٥٨٦\left(۱۰۰۰ - \frac{٤۹۰}{۳/۰۰} - \frac{۲۲۰}{۱} - ۳۰\right) = ۱٥۱۷\ kg/m^3$$

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 ٥۸٦/٦٥ 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 ۲۲٦ خواهد بود.

گام ۹ : تعیین مقادیر سنگدانه خشک و آب کلّ بتن:

مقدار سنگدانه خشک با توجه به ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها در حالت دوم عبارتست از:

$$\text{شن ریز خشک} = \frac{۳۹۳}{۱+۰/۰۱۱} = ۳۸۸/٥$$

$$\text{ماسه درشت خشک} = \frac{۸۹۸}{۱+۰/۰۲} = ۸۸۰/٥$$

$$\text{ماسه ریز خشک} = \frac{۲۲٦}{۱+۰/۰۳۲} = ۲۲۰$$

$$\text{آب کل} = ۲۲۰ + ٤/٥ + ۱۷/٥ + ٦ = ۲٤۸\ kg/m^3$$

گام ۱۰: تعیین وزن یک متر مکعّب بتن تازه متراکم

$\rho_B = ۱۵۱۷ + ٤۹۰ + ۲۲۰ = ۲۲۲۷ \ kg/m^3$

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 می شود. سطح کیفی، کنترل و نظارت در ساخت بتن را می توان از نوع "ب" منظور نمود.

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

مقاومت مشخصه مکعبی ٤٢ روزه	Mpa	۳۰
انحراف معیار بتن s	Mpa	-
اسلامپ متوسط پس از ۵ و ٦٠دقیقه	mm	۲۱۰ و ١٦٠
حداکثر مجاز نسبت آب به سیمان	W/C	۰/٤٥
حداقل سیمان مجاز	Kg/m^3	۳۵۰
حداکثر سیمان مجاز	Kg/m^3	٤٥٠
بافت دانه‌بندی		ریز

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	۰/٤ تا ۱/۲ درصد	۱۲ تا ٢٤ درصد

جدول ٤- اطلاعات و داده‌های مربوط به سنگدانه‌ها

	شن	ماسه
چگالی ذرات SSD	۲/٦۲	۲/٥۱۲
درصد ظرفیت جذب آب	۱/۷	۲/۸
شکل	نیمه شکسته	گردگوشه
درصد شکستگی (تمام جبهه‌ها)	٦٥	۰

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

نوع سنگدانه	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	٦/۳۵	٤/۷۵	۲/۳۸	۱/۱۹	۰/٦	۰/۳	۰/۱۵
شن	۱۰۰	۹۸	٦٥	۳۵	۵	۰					
ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۵	٦٥	٤٥	۲۵	۱۵	۵

راه‌حل

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

حداکثر اندازهٔ 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، دانه‌بندی بتن باید نسبتا ریز باشد تا با وجود روانی زیاد، جداشدگی و آب انداختن و جمع شدگی نداشته باشیم. با توجه به خواسته‌ها و نوع وسایل حمل و ریختن عملاً منحنی دانه بندی در اطراف $B_{۱۹}$ مطلوب به نظر می رسد (منحنی‌های n=۰/٤ و n=۰/۳).

با توجه به روش آزمون و خطا می توان سهم سنگدانه‌ها را بدست آورد. در ابتدا با توجه به محدوده مورد نظر سهم ماسه ٦۲/۵ درصد، سهم شن ۳۷/۵ درصد منظور می گردد. دانه‌بندی مخلوط حاصله با این سهم‌ها را محاسبه می کنیم و با محدوده مورد نظر مقایسه می نماییم.

جدول ٦- دانه‌بندی مخصوص سنگدانه با توجه به سهم هر یک و دانه‌بندی (درصد وزنی گذشته) مطلوب

الک(م.م.)	شن ۳۷/۵٪	ماسه ٦۲/۵٪	مخلوط حاصله	منحنی		
				$B_{۱۹}$	n=۰/٤	n=۰/۳
۲۵	۳۷/۵	٦۲/۵	۱۰۰			
۱۹	۳٦/۷	٦۲/۵	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۲٤/٤	٦۲/۵	۸۷	۸٤	۸۳	۸۵
۹/۵	۱۳/۱	٦۲/۵	۷۵/۵	۷۵	۷۳	۷۷
٦/۳۵	۱/۹	٦۲/۵	٦٤/۵	٦۳	٦۰	٦۵
٤/۷۵	۰	۵۳/۱	۵۳/۱	۵۵	۵۲	۵۸
۲/۳۸		٤۰/٦	٤۰/٦	٤۰	۳۷	٤۳
۱/۱۹		۲۸/۱	۲۸/۱	۲۸	۲۵	۳۰
۰/٦		۱۵/٦	۱۵/٦	۱۸	۱٦	۲۰
۰/۳		۹/٤	۹/٤	۱۱	۹	۱۲
۰/۱۵		۳/۱	۳/۱	۵	٤	۵

مشاهده می‌شود 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:

$$F.M. = \frac{۱+۲۴/۵+۴۷+۵۲/۵+۷۲+۸۴/۵+۹۰/۵+۹۷}{۱۰۰} = ۴/۷۶$$

مدول ریزی منحنی‌های $B_{۱۹}$ برابر ٤/٦٩ و مدول ریزی محدوده مطلوب به ترتیب ٤/٨٤ و ٤/٥٥ 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 ٤٢ روزه بتن برابر ۲۵مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به رتبه بندی کارگاه و مقاومت مشخصه موجود انحراف معیار طبق روش ملی طرح مخلوط برابر ٤/٥ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به آیین نامه بتن ایران بر اساس مقاومت مشخصه موجود، مقاومت هدف عبارتست از:

$f_{cm} =$ ۲۵+۱/۳٤ ×٤/٥ +۱/٥ = ۲۹/٥ Mpa

$f_{cm} =$ ۲۵+۲/۳۳ ×٤/٥ −٤/۰ = ۳۱/٥ Mpa

بنابراین مقاومت هدف ٤٢ روزه طرح برابر ۳۱/٥ مگاپاسکال است. با توجه به جدول مقاومت سیمان‌ها در سنین مختلف می توان مقاومت هدف ۲۸ روزه سیمان پرتلند پوزولانی را $\frac{۳۱/۵}{۱/۰۵} = ۳۰$ مگاپاسکال درنظر گرفت.

گام ۴: تعیین نسبت آب به سیمان طرح

با توجه به وجود سیمان پرتلند پوزولانی و با استفاده از منحنی‌های سیمان ۳۲۵ و درصد شکستگی شن موجود، با استفاده از شکل ٤-۲ (دارای روان کننده)، نسبت آب به سیمان ۰/۵۳ بدست می آید.

با توجه به مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان پرتلند پوزولانی مصرفی داریم:

$$\frac{W}{C} = ۰/۵۳ \times \frac{۳۱۰}{۳۲۵} = ۰/۵۰۵$$

اما حداکثر مجاز ۰/٤٥ تعیین کننده است و باید بکار رود.

گام ۵: تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط

درصد شکستگی معادل مخلوط سنگدانه عبارت است از:

$$a_{ne} = \frac{۰/۳۷۵ \times ۶۵ + ۲ \times ۰/۶۲۵ \times ۰}{۰/۳۷۵ + ۲ \times ۰/۶۲۵} \cong ۱۵$$

با توجه به مدول ریزی ٤/٧٦ 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 ۲۰٤ 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.

$$C = \frac{۲۰۴}{۰/۴۵} = ۴۵۳ \ \frac{kg}{m^3}$$

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 ۲۱٤ کیلوگرم بدست می آید و مقدار سیمان در حدود ٤۷۵ حاصل می شود. اما سیمان پرتلند پوزولانی به واسطه داشتن حدود ٦۲ کیلوگرم پوزولان طبیعی موجب می‌گردد تا مجددا حدود ٦کیلوگرم به آب اضافه شود. در نتیجه مقدار آب به ۲۲۰ کیلوگرم بالغ می‌گردد و مقدار جدید سیمان نیز ٤۹۰ کیلوگرم خواهد شد.

می‌توان 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 ٤۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشتر است. در این مثال اگر قصد ما مصرف ٤۰۰ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب باشد، باید حدود ۱۸درصد از آب و سیمان کم نمود که مقدار آب برابر ۱۸۰ کیلوگرم می شود و نیاز به مصرف فوق روان کننده به میزان تقریبی ۰/۸درصد وزن سیمان یعنی ۳/۲ کیلوگرم داریم که ۲/۱ کیلوگرم آن آب می‌باشد 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:

$$V_{A_{SSD}} = ۱۰۰۰ - \frac{C}{\rho_c} - \frac{W_f}{\rho_w} - V_a = ۱۰۰۰ - \frac{۴۰۰}{۳/۰۵} - \frac{۱۷۸}{۱} - ۱۰ = ۶۸۰/۸۵ \ dm^3$$

شن خشک

$$G_d = \frac{۲۵۵/۳۲ \times ۲/۶۲}{۱/۰۱۷} = ۶۵۸ \ \frac{kg}{m^3}$$

ماسه خشک

$$S_d = \frac{۴۲۵/۵۳ \times ۲/۵۱۲}{۱/۰۲۸} = ۱۰۴۰ \ \frac{kg}{m^3}$$

گام ۸: تعیین آب کل بتن

$$W_t = ۱۷۸ + (۶۶۹ - ۶۵۸) + (۱۰۶۹ - ۱۰۴۰) = ۲۱۸ \ kg/m^3$$

گام ۹: تعیین وزن یک متر مکعب بتن متراکم تازه

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

$$\rho_B = ۴۰۰ + ۱۷۸ + ۶۶۹ + ۱۰۶۹ + ۳/۰ = ۲۳۱۹ \ kg/m^3$$