Building and HousingResearchCenter

The National Method for Concrete Mix Design

BHRC Publication No.S-٤٧٩
٢٠٠٨

علامات اختصاری

f_{cm} = مقاومت فشاری متوسط (مقاومت هدف) برای طرح مخلوط بتن (استوانه‌ای)

f_c= مقاومت فشاری مشخصه بتن یا مقاومت مشخصه فشاری بتن (استوانه‌ای)

s= انحراف معیار (استاندارد) مقاومت فشاری نمونه‌ها (استوانه‌ای)

x_i = مقاومت فشاری هر نمونه در محاسبه انحراف معیار

x_m= میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در محاسبه انحراف معیار

n = تعداد نمونه‌ها در محاسبه انحراف معیار

R_s= ضریب اصلاحی انحراف معیار

n_1 و n_2= تعداد نمونه‌ها در دو گروه متوالی برای محاسبه انحراف معیار

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

(SM)= حاشیه ایمنی یا امنیت مقاومتی در طرح مخلوط بتن

a_1= درصد هوای غیرعمدی بتن (ناخواسته)

a_2= درصد هوای عمدی بتن (خواسته)

r_1= کاهش نسبت آب به سیمان بتن حبابدار به ازای ۱ درصد هوای عمدی

r_2= کاهش مقاومت بتن حبابدار به ازای ۱ درصد هوای عمدی

r'= درصد کاهش آب آزاد بتن حبابدار به ازای ۱ درصد هوای عمدی

a_t یا a= درصد هوای کل بتن

$(f_{cm})'$ = مقاومت فشاری متوسط اصلاح شده فرضی برای تعیین نسبت آب به سیمان بتن حبابدار

S_1, S_2, S_3, S_4 = رده‌های اسلامپ

F.M.= مدول ریزی مخلوط سنگدانه

W_f= آب آزاد بتن

W_t= آب کل بتن

C= جرم سیمان

W/C= نسبت آب به سیمان (نسبت آب آزاد به سیمان)

k= ضریب مؤثر جایگزینی سیمان برای مواد پودری معدنی فعال

F = جرم خاکستر بادی

M= جرم دوده سیلیسی (میکروسیلیس)

L= جرم سرباره

P= جرم پوزولان طبیعی

V_{ASSD}= حجم کل ذرات سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک

D= جرم مواد افزودنی شیمیایی و پودری معدنی جایگزین سیمان

V_a یا V_{at}= حجم هوای کل بتن (عمدی و غیرعمدی)

ρ_c= جرم مخصوص ذرات سیمان

ρ_w=جرم مخصوص آب

ρ_D= جرم مخصوص افزودنی

ρ_{ASSD}= جرم مخصوص ذرات سنگدانه اشباع با سطح خشک

G= جرم یک متر مکعب بتن تازه

A_{SSD}= جرم سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک

A_d= جرم سنگدانه‌های کاملاً خشک

a_c= ظرفیت جذب آب سنگدانه به صورت اعشاری

A= جرم سنگدانه مرطوب

m= رطوبت سنگدانه (بصورت اعشاری)

W_m= جرم آب مصرفی برای ساخت بتن

U= نشکسته

R= گردگوشه

C= شکسته

بخش اول

مقدمه

۱-۱کلیات

طرح مخلوط بتن، فرآیند تعیین نسبت ها و مقادیر اجزای بتن است، به نحوی که بتن تولید شده تا حد امکان مقرون به‌صرفه باشد و الزامات مورد نیاز را تأمین کند. این الزامات معمولاً، مقاومت فشاری، کارآیی و دوام می‌باشد.

تعیین نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن بیشتر بر اساس روابط تجربی و به مقدار کمتری با استفاده از روابط ریاضی و نظری انجام می‌شود.سازوکار طرح مخلوط پیچیده است، زیرا با تغییر دادن یک متغیر ممکن است خواص بتن به صورت متضاد تحت تأثیر قرار بگیرد. برای مثال، افزودن آب به مخلوط بتن با کارآیی کم، ممکن است روانی را افزایش دهد، اما مقاومت را کم می‌کند. در حقیقت، کارایی از دو مؤلفه اصلی تشکیل یافته است، که شامل روانی (آسانی در جاری شدن) و چسبندگی (مقاومت در مقابل جداشدگی) می‌باشد که وقتی آب به مخلوط افزوده می‌شود، ممکن است این دو مشخصه،عملکردی مخالف یکدیگر نشان دهند. بنابراین، طرح مخلوط، هنر متعادل کردن این اثرهای متضاد است. بسیاری از مهندسان از اینکه نمی‌توان طرح مخلوط را بر اساس مجموعه‌ای از روابط و محاسبات عددی انجام داد، احساس ناخشنودی می‌کنند، اما با درک صحیح اصول و با کمی تجربه می‌توان به هنر طرح مخلوط دست یافت.

در طرح مخلوط، ممکن است معیارهای دیگری مانند کاهش جمع‌شدگی و خزش در نظر گرفته شود. هر چند تاکنون تلاش زیادی در خصوص جنبه‌های نظری طرح مخلوط انجام شده است، اما هنوز عمدتاً از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر، روش‌های طرح مخلوط برای انتخاب اولیه نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن مفید می‌باشند، اما برای تعیین نسبت‌های نهایی، نیاز به ساخت مخلوط‌های آزمایشی و تنظیم نسبت‌ها و مقادیر وجود دارد. روابط تجربی، به طور معمول به عنوان راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرند و مخلوط‌های آزمایشی بر اساس این روابط ساخته می‌شوند. در

صورت مغایر بودن ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده مخلوط‌های آزمایشی با مشخصات مورد نظر، باید در طرح مخلوط تجدید نظر به‌عمل آید.

در روش ارائه شده به‌عنوان روش ملی طرح مخلوط بتن، تطابق با استاندارد سنگدانه‌های بتن (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲) و ویژگی‌های سیمان پرتلند (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ و ۱۷۵۱۸ و هم‌چنین سایر استانداردهای ملی مربوط به سیمان)، در نظر گرفته شده است. همچنین حسب مورد، آیین‌نامه بتن ایران و مقررات ملی ساختمانی ایران (مبحث نهم) و مشخصات فنی عمومی و خصوصی پروژه باید رعایت گردد.

قابل ذکر است که روش ارائه شده به عنوان راهنمای اولیه طرح مخلوط به‌کار می‌رود و باید مخلوط‌های آزمایشی در آزمایشگاه و همچنین مطابق با شرایط کارگاه ساخته شوند و پس از بررسی نتایج مقاومت فشاری و دیگر الزامات طرح، نسبت‌ها و مقادیر اجزای مخلوط، نهایی گردند.

همچنین توصیه می‌شود، جهت توضیحات بیشتر و به منظور آشنایی کامل با جزئیات روش، به راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن مراجعه گردد.

این روش دارای نرم‌افزار محاسباتی نیز می‌باشد که می‌توان از آن استفاده نمود.

۱-۲ دامنه کاربرد

دامنه کاربرد این روش طرح مخلوط به شرح زیر است:

- تعیین نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن‌های معمولی مورد مصرف در ساختمان‌ها و سازه‌های بتنی مختلف تا رده C۵۰ با در نظر گرفتن مقاومت مشخصه فشاری، دوام، کارآیی، شرایط ساخت و کنترل کارگاهی و شرایط حمل و ریختن و سایر ضوابط مشخصات فنی، آیین‌نامه‌های معتبر و مقررات ملی ساختمانی
- این روش، برای طرح مخلوط بتن‌های ویژه مانند بتن‌های حجیم، بتن‌های سبک، بتن‌های سنگین، بتن الیافی، بتن خودتراکم، بتن پیش‌آکنده بتن غلتکی و بتن پاششی مستقیماً قابل کاربرد نمی‌باشد و برای برخی از این نوع بتن‌ها، این روش با اعمال تمهیدات خاص و تغییراتی مانند آنچه در راهنمای روش آمده است، قابل استفاده خواهد بود.

بخش دوم

مبانی طرح

۲-۱ حاشیه ایمنی (امنیت) مقاومت

به دلیل تغییرات مقاومت بتن، که ناشی از غیریکنواختی احتمالی در کیفیت اجزای بتن و تغییرات کمی مقادیر ونسبت‌های اجزا به دلیل عدم دقت در ساخت بتن می‌باشد، مخلوط بتن باید طوری طرح گردد یا نسبت‌ها و مقادیر اجزا بتن به گونه‌ای انتخاب شوند که از مقاومت بیشتری نسبت به مقاومت مشخصه مورد نظر برخوردار باشد. بنابراین، مقاومت مشخصه، که در واقع همان مقاومت مورد نظر در طراحی و ساخت سازه می‌باشد، باید به اندازه حاشیه ایمنی (امنیت) پیش‌بینی شده افزایش یابد تا به مقاومت فشاری متوسط (مقاومت هدف) برای طرح مخلوط دست یافت. حاشیه ایمنی مقاومت معمولاً بر اساس اطلاعات آماری تعیین می‌گردد. روش تعیین حاشیه ایمنی در بخش سوم شرح داده شده است.

۲-۲ روانی

در این روش طرح مخلوط، برای بیان و سنجش روانی بتن، از آزمایش اسلامپ استفاده شده است. جدول (۲-۱) طبقه‌بندی روانی بتن تازه در این روش طرح مخلوط می‌باشد که مطابق استاندارد ملی ایران به شماره۱۲۲۸۴، در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۱ طبقه‌بندی بتن تازه بر اساس مقدار اسلامپ

طبقه‌بندی		اسلامپ (میلی‌متر)
S۱	سفت	۱۰ تا ۴۰
S۲	خمیری	۵۰ تا۹۰
S۳	روان	۱۰۰ تا ۱۵۰
S٤	خیلی روان (سیال)	۱۶۰ تا ۲۱۰

در صورتیکه اسلامپ بتن تازه کمتر از ۱۰ میلی‌متر و یا بیشتر از ۲۱۰ میلی‌متر باشد، آزمایش اسلامپ دقت مناسبی ندارد و باید از روش‌های مناسب دیگر، برای اندازه‌گیری روانی استفاده نمود.

معمولاً روانی خواسته شده در پای کار از اهمیت برخوردار است اما برای تهیه طرح مخلوط بتن باید روانی اولیه بتن را پس از ساخت بتن (با فاصله زمانی ۵ دقیقه) منظور نمود. بر این اساس با توجه به حدس افت روانی، در فاصله زمانی ساخت بتن تا زمان ریختن در سازه، باید روانی اولیه را بدست آورد و بکار گرفت.

۲-۳ آب آزاد، آب کل، آب اختلاط (ساخت)

کل آب مخلوط بتن، شامل آب جذب شده توسط سنگدانه، برای رسیدن به شرایط اشباع با سطح خشک و همچنین آب آزاد برای ایجادخمیر سیمان لازم و تامین کارآیی می‌باشد.

چنانچه در شرایط واقعی، مقدار رطوبت سنگدانه‌ها در حدی کمتر از حالت اشباع با سطح خشک باشد، باید مقدار آب مورد نیاز برای رساندن سنگدانه به حالت اشباع با سطح خشک را تعیین نمود و به مقدار آب آزاد افزود و در صورتیکه مقدار رطوبت سنگدانه‌ها بیش از رطوبت سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک باشد، باید مقدار رطوبت اضافی را از آب آزاد کم کرد. درهر حالت آب اختلاط (ساخت) بتن با آب آزاد، متفاوت خواهد بود و صرفاً در حالتی که همه سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)[۱]باشند آب آزاد و آب اختلاط (ساخت) بتن یکسان می باشند. هم‌چنین در حالتی که همه سنگدانه‌ها کاملاً خشک باشند آب کل و آب اختلاط (ساخت) بتن برابر خواهند بود.

در روش ارائه شده، نسبت آب به سیمان، به‌صورت نسبت آب آزاد به سیمان یا مواد سیمانی در نظر گرفته می‌شود و مقدار آب آزاد نیز بر اساس فرض سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک منظور می‌گردد.

۲-٤ نوع سنگدانه‌ها

دو عامل بسیار مهم که از ویژگی‌های سنگدانه است و در مشخصه‌های بتن اثر می‌گذارد، شکل ذرات و بافت سطحی سنگدانه است. در روش ملی طرح مخلوط بتن، سنگدانه‌ها از نظر شکل[۲] به دو صورت، گردگوشه[۱] (رودخانه‌ای نشکسته)[۲] و تیزگوشه[۳] (شکسته)[٤] تقسیم شده است[۵].

---

[۱] - Saturated – Surface- Dry

[۲]- Shape

شکل ذرات و بافت سطحی[۶] آن‌ها عامل مهمی در تغییر کارآیی مخلوط است و بافت سطحی در پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه و مقاومت بتن مؤثر است. هر چند شکل ذرات درشت نیز بر مقاومت تاثیرگذار است. به طور کلی، سنگدانه شکسته شامل ذرات تیزگوشه است. با استفاده از این نوع سنگدانه‌ها، کارآیی مخلوط کاهش می‌یابد، اما معمولاً مقاومت بتن حاوی سنگدانه درشت تیزگوشه نسبت به مخلوط حاوی سنگدانه درشت گردگوشه بیشتر است. لذا انتخاب نوع سنگدانه برای بتن با مقاومت زیاد از اهمیت برخوردار می‌باشد و بهتر است که از سنگدانه‌های درشت شکسته (تیزگوشه) استفاده شود. شایان ذکر است، تأثیر شکل و بافت سطحی درشت‌دانه‌ها بر مقاومت بتن بیشتر از ریزدانه‌ها می‌باشد، در حالی که تأثیر شکل و بافت سطحی سنگدانه‌های ریز بر کارآیی و روانی بتن بیشتر از درشت‌دانه‌هاست.

۲-۵ دانه‌بندی سنگدانه

دانه‌بندی سنگدانه‌ها نیز عامل مهمی در خواص بتن است. معمولاً محدوده دانه‌بندی طوری در نظر گرفته می‌شود که از طرفی از حجم فضای خالی بین سنگدانه‌ها تا آنجا که امکان دارد، کاسته شود و از طرف دیگر، کارایی مناسبی برای بتن تأمین گردد. زیرا اگرچه می‌توان منحنی دانه‌بندی و محدوده آن را طوری ارائه کرد که حداقل فضای منافذ به دست آید، اما ممکن است چنین مخلوطی دارای کارآیی مناسبی نباشد. دانه‌بندی سنگدانه بتن هم‌چنین تأثیر زیادی بر جداشدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی دارد.

در روش ملی طرح مخلوط بتن،محدوده مطلوب منحنی‌های ترکیب (مخلوط) شن و ماسه با حداکثر اندازه سنگدانه‌های ۹/۵، ۱۲/۵، ۱۹، ۲۵ و ۳۸میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با انتخاب درصد مناسب

---

[۱] - Rounded

[۲]- Uncrushed (River Agg)

[۳] - Angular

[۴] -Crushed

[۵]– در این تعاریف با اغماض گردگوشه و نشکسته و هم‌چنین تیزگوشه و شکسته مشابه یکدیگر تلقی شده‌اند، در حالیکه در تعاریف دقیق شکل سنگدانه، این واژه‌ها الزاماً معادل یکدیگر نیستند.

[۶] - Surface Texture

سنگدانه ریز و درشت،دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها باید در محدوده مورد نظر منحنی‌های ارائه شده، واقع گردد.

۲-٦ سیمان مصرفی

انواع مختلف سیمان و رده مقاومتی سیمان در آهنگ کسب مقاومت بتن و خواص بتن اثر مستقیم دارد. در این روش طرح مخلوط، نوع سیمان مصرفی با رده‌های مقاومتی ۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۵۲/۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع (طبق استاندارد ۳۸۹ ایران) در نظر گرفته شده است. در صورتیکه از انواع دیگر سیمان استفاده شود، باید روند کسب مقاومت و مقدار مقاومت آن بر اساس آزمایش‌های مربوطه تعیین و با رده‌بندی انتخاب شده در این طرح مطابقت داده شود. چنانچه مقاومت ملات استاندارد ۲۸ روزه سیمان مصرفی دقیقاً همان رده‌های مقاومت ذکر شده در بالا نباشد می‌توان از نتیجه مقاومت بدست آمده ملات استاندارد در آزمایشگاه برای تعیین نسبت آب به سیمان استفاده نمود.

بهرحال اگر نتیجه آزمایش ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان مصرفی در دست نباشد حداقل مقدار ذکر شده مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد در ویژگی‌های استاندارد آن نوع سیمان در نظر گرفته می‌شود.

۲-۷ شرایط عمل آوری و سن آزمایش

معمولاً مقاومت بتن با افزایش سن آن، افزایش می‌یابد، اما در بسیاری از مشخصات فنی، مقاومت ۲۸ روزه، به‌عنوان معیار برای سنجش مقاومت، ذکر می‌گردد. بر همین اساس، در روش ملی طرح مخلوط، هدف مقاومت استوانه‌ای ۲۸ روزه عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد، در روابط و نمودارها در نظر گرفته شده است. چنانچه رابطه‌ای تایید شده بین مقاومت ۲۸ روزه بتن و مقاومت سنین دیگر موجود باشد می‌توان مقاومت سنین دیگر را به مقاومت ۲۸ روزه بتن تبدیل نمود و در این روش بکار گرفت.

۲-۸ دوام

دوام بتن، عملکرد بتن در شرایط محیطی رویارو با آن می‌باشد و در افزایش عمر مفید پیش‌بینی شده آن، بسیار حایز اهمیت است. بنابراین مقادیر ونسبت‌های اجزای مخلوط که در این روش به دست می‌آید، باید با مقادیر و نسبت‌های مجاز در مشخصات فنی خصوصی و همچنین آیین‌نامه بتن ایران، مبحث نهم

مقررات ملی ساختمانی ایران و سایر مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی، راه، آبیاری و زهکشی و غیره حسب مورد مقایسه گردد.

معمولاً، دوام مورد نظر با محدود کردن حداکثر نسبت آب به سیمان، تعیین حدود حداقل و یا حداکثر مقدار سیمان، ایجاد محدودیت در نوع سیمان و یا مواد افزودنی معدنی و هم‌چنین درصد هوا در طرح مخلوط بتن، بصورت تجویزی مطرح می‌گردد.

امروزه معیارهایی را برای دوام و عملکرد بتن در نظر می‌گیرند و با انجام آزمایش‌های مناسب باید نشان داد که این خواسته‌ها برآورده می‌شود. اما هنوز ضابطه‌های تجویزی در بیشتر مشخصات فنی عمومی و خصوصی و بیشتر آیین‌نامه‌ها و مقررات ملی کاربرد جدی دارد.

در صورتی که این ضوابط تجویزی و یا ضوابط و معیارهای دوام و عملکرد بتن، تعیین کننده نسبت‌ها یا مقادیر طرح مخلوط باشند، این طرح مخلوط را "دوام محور" می‌نامند. در غیر اینصورت، طرح مخلوط بتن، "مقاومت محور" خواهد بود.

بخش سوم

تعیین انحراف معیار و مقاومت فشاری متوسط لازم برای طراحی مخلوط بتن

۳-۱ مقاومت فشاری متوسط (مقاومت هدف) برای طرح مخلوط بتن

مقاومت فشاری متوسط برای طرح مخلوط بتن مطابق با آیین‌نامه بتن ایران، یا مبحث نهم مقررات ملی و سایر مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی و راه، باید برابر با بزرگترین مقدار به دست آمده از دو رابطه زیر در نظر گرفته شود:

$f_{cm} = f_c + ۱.۳۴s + ۱.۵ \ N/mm^۲$ رابطه (۳-۱)

$f_{cm} = f_c + ۲.۳۳s - ۴ \ N/mm^۲$ رابطه (۳-۲)

که در آن‌ها:

f_{cm} = مقاومت فشاری متوسط (مقاومت هدف) برای طرح مخلوط بتن، $N/mm^۲$

f_c = مقاومت فشاری مشخصه بتن، $N/mm^۲$

s = انحراف استاندارد (معیار) مقاومت فشاری نمونه‌ها، $N/mm^۲$

۳-۲ تعیین انحراف معیار

برای تعیین انحراف معیار می‌توان از دو روش استفاده کرد:

اگر از نتایج آماری قبلی یا پروژه‌های مشابه استفاده می‌گردد، باید طبق بند ۳-۲-۱ انحراف معیار محاسبه گردد.

- منظور از پروژه‌های مشابه، پروژه‌هایی است که:

- مصالح مصرفی به کار رفته در آن و پروژه موجود از نظر نوع و مشخصات فنی تشابه داشته باشند.
- شرایط نظارت وکنترل کیفیت آن‌ها و پروژه موجود تشابه داشته باشند.
- مقاومت فشاری مشخصه بتن آن‌ها و پروژه موجود بیش از $5 N/mm^2$ اختلاف نداشته باشد.

در غیر اینصورت برای مواردی که اطلاعات آماری وجود ندارد، از روش ارائه شده در بند ۳-۲-۲ استفاده می‌شود. هم‌چنین در صورتی که هیچگونه اطلاعاتی وجود نداشته باشد، مقاومت هدف طرح مخلوط طبق بند ۳-۲-۳ بدست می‌آید.

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

در این روش باید بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های پروژه قبلی یا پروژه‌های مشابه، انحراف معیار (S)را با استفاده از رابطه ۳-۳ محاسبه کرد.

رابطه (۳-۳)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{n-1}}$$

که در آن:

x_i= مقاومت فشاری هر یک از نمونه‌ها

x_m= میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها

n= تعداد نمونه‌ها

لازم به ذکر است که نتیجه هر نمونه، میانگین حداقل دو آزمونه است که از یک نوبت ساخت بتن، نمونه گیری شده است.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری حداقل ۳۰ نمونه متوالی برای پروژه مشابه یا قبلی، باید موجود باشد. اگر کمتر از ۳۰ نتیجه آزمایش موجود باشد، باید بر اساس رابطه ۳-۴، ضریب اصلاحی برای انحراف معیار محاسبه گردد و در انحراف معیار بدست آمده ضرب شود.

$$R_S = [0.75 + (\frac{2}{n})^{\frac{1}{2}}] \quad (۴-۳)$$

که در آن:

R_S= ضریب اصلاحی انحراف معیار

n= تعداد نمونه‌ها

چنانچه نتایج آزمایش حداقل ۳۰ نمونه متوالی موجود نباشد، می‌توان از دو گروه نمونه‌های متوالی با مجموع حداقل ۳۰ نتیجه آزمایش استفاده کرد. در چنین حالتی باید انحراف معیار دو گروه بر اساس رابطه (۳-۵) به صورت میانگین آماری محاسبه گردد:

رابطه (۳-۵)

$$S = \left[\frac{(n_1 - 1)\, s_1^2 + (n_2 - 1)\, s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن:

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

اگر از روش "محاسبه انحراف معیار بر اساس نتایج پروژه قبلی یا مشابه" استفاده گردد، باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

- مقدار انحراف معیار منظور شده باید پس از کسب اطلاعات کافی در حین اجرای پروژه، بر اساس انحراف معیار واقعی اصلاح گردد.
- در هیچ شرایطی نباید انحراف معیار کارگاهی کمتر از $۲/۵ N/mm^۲$ در نظر گرفته شود.

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

در مواردی که نتایج مقاومت فشاری نمونه در پروژه قبلی یا پروژه‌های مشابه، در دسترس نباشد و نتوان انحراف معیار را محاسبه نمود، می‌توان بر اساس سطح نظارت و کنترل کیفیت کارگاه و مقاومت مشخصه بتن، مقدار انحراف معیار (مربوط به مقاومت استوانه‌ای) را از جدول ۳-۱ تخمین زد.

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

رتبه‌بندی کارگاه	مقاومت مشخصه بتن (N/mm^2)					
	۱۲ و کمتر	۱۶	۲۰	۲۵	۳۰ و ۳۵	۴۰ و ۴۵ و ۵۰
الف	۲/۵	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵
ب	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵	۵/۵
ج	۴	۴/۵	۵	۵/۵	۶	۶/۵

رتبه‌بندی کارگاه به شرایط تولید، نظارت و کنترل کیفیت بستگی دارد. به طور کلی کارگاه‌ها به سه رتبه الف، ب و ج تقسیم می‌شوند. برای تعیین رتبه کارگاه باید از اطلاعات داده شده در جدول ۳-۲ استفاده کرد.

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

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

** بدیهی است می‌توان کارگاهی را در بین رتبه‌های سه گانه فوق و یا خارج از آن‌ها فرض نمود.*

۳-۲-۳ تعیین مقاومت هدف طرح بدون داشتن هرگونه اطلاعات

در صورتی که هیچ اطلاعاتی در موردشرایط ساخت و کنترل کارگاهی بتن وجود نداشته باشد، می‌توان مانند آنچه در آیین‌نامه بتن ایران، مبحث نهم مقررات ملی ساختمانی ایران و مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی و راه آمده است یک حاشیه ایمنی یا امنیت (SM) [۱] را به مقاومت مشخصه بتن اضافه نمود.

$$f_{cm}= f_c+(SM)$$ رابطه (۳-۶)

جدول ۳-۳ مقدار حاشیه امنیت مقاومتی بتن در شرایطی که هیچ اطلاعاتی در دست نیست

مقاومت مشخصه (N/mm^2)	۱۲ و کمتر	۱۶	۲۰	۲۵	۳۰ و ۳۵	۴۰و۴۵و۵۰
حاشیه امنیت مقاومتی (N/mm^2)	۶	۷/۵	۸/۵	۹/۵	۱۰/۵	۱۱

به هرحال مقاومت هدف طرح حاصله از بند ۳-۱ نباید بیشتر از مقادیر حاصله از بند ۳-۲-۳ باشد.

بدیهی است پس از شروع ساخت بتن در کارگاه، در اولین فرصت، باید انحراف معیار بصورت آماری محاسبه گردد و در صورت لزوم، مقاومت هدف طرح و در نتیجه مخلوط بتن اصلاح شود.

---

[۱] - Safety Margin

بخش چهارم

روش طرح مخلوط

٤-١ مقدمه

برای طرح مخلوط بتن، ابتدا باید خواسته‌ها و مشخصات فنی بتن مطلوب را شامل مقاومت فشاری مشخصه، روانی و کارآیی بتن در پای کار و دوام بتن (ضوابط تجویزی مانند نسبت آب به سیمان یا مواد سیمانی، حداقل یا حداکثر عیار سیمان یا مواد سیمانی، نوع سیمان و ضوابط عملکردی) را فهرست نمود. هم‌چنین باید نیازهای اجرایی و اطلاعات آماری و غیرآماری مربوط به ساخت و کنترل بتن را منظور نمود. انحراف معیار مقاومتی ساخت بتن و یا شرایط ساخت و رتبه‌بندی کارگاه باید مشخص گردد تا امکان محاسبه مقاومت فشاری متوسط (هدف) طرح مخلوط فراهم آید. هم‌چنین با توجه به فاصله زمانی ساخت تا مصرف بتن، روانی بتن در هنگام ساخت با منظور نمودن افت روانی بعنوان یک نیاز اجرایی در نظر گرفته می‌شود. نیاز اجرایی دیگر شرایط و وسایل حمل و ریختن بتن است که می‌تواند علاوه بر تأثیر آن بر انتخاب روانی لازم، بر انتخاب دانه‌بندی و گاه حداکثر اندازه سنگدانه نیز مؤثر باشد.

مشخص کردن ویژگی‌های سنگدانه و سیمان و گاه افزودنی‌های شیمیایی و پودری معدنی جایگزین سیمان در مراحل بعد ضرورت پیدا می‌کند. دانه‌بندی، چگالی ذرات اشباع با سطح خشک، ظرفیت جذب آب و درصد شکستگی سنگدانه‌ها و رده مقاومتی سیمان باید مشخص گردد و هم‌چنین می‌توان مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان مصرفی را طبق استاندارد ایران بدست آورد.

شروع گام اول با انتخاب محدوده دانه‌بندی مطلوب با توجه به روانی، نوع قطعه و شرایط حمل و ریختن، آب انداختن و خطر جداشدگی صورت می‌گیرد. سپس با عنایت به دانه بندی هر یک از سنگدانه‌ها، سهم آنها برای دستیابی به دانه‌بندی مطلوب مخلوط سنگدانه بدست می‌آید. بدین ترتیب دانه‌بندی مخلوط سنگدانه طرح مخلوط مشخص می‌شود و مدول ریزی آن محاسبه می‌گردد. هم‌چنین با داشتن درصد شکستگی شن‌ها و ماسه، درصد شکستگی متوسط شن‌ها برای تعیین نسبت آب به

سیمان و شکستگی متوسط معادل سنگدانه‌ها با توجه به اهمیت بیشتر شکل ماسه برای تعیین مقدار آب آزاد طرح مخلوط بتن محاسبه می‌گردد.

در گام دوم نسبت آب به سیمان با توجه به رده مقاومتی سیمان یا مقاومت ملات استاندارد آن و درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های درشت بر اساس مقاومت فشاری متوسط (هدف) طرح مخلوط بدست می‌آید. در صورتی که این نسبت از حداکثر نسبت آب به سیمان لازم برای تأمین دوام کمتر باشد در طرح بکار می‌رود و گرنه نسبت آب به سیمان تأمین کننده و ارضاکننده دوام کاربرد دارد.

در گام سوم مقدار آب آزاد طرح مخلوط با منظور نمودن اسلامپ لازم در هنگام ساخت و مدول ریزی مخلوط سنگدانه و درصد شکستگی متوسط آنها حاصل می‌گردد. هم‌چنین ممکن است در گام چهارم پس از تعیین عیار سیمان به دلیل زیادی سیمان نیاز به تغییر مقدار آب آزاد احساس گردد.

در گام چهارم با داشتن نسبت آب به سیمان و مقدار آب آزاد، عیار سیمان محاسبه می‌گردد. ممکن است به دلیل زیادی سیمان نیاز به اصلاح آب و در نتیجه تغییر عیار سیمان احساس گردد. در این مرحله لازم است در صورتی که حداقل و حداکثر عیار سیمان در مشخصات فنی یا آیین‌نامه و مقررات ملی دارای محدودیت باشد، کنترل صورت گیرد و عیار سیمان در این محدوده قرار داشته باشد. بویژه در صورت نیاز به کاهش عیار سیمان و آب، باید تدابیر لازم برای این کاهش اتخاذ گردد. برای این منظور لازم است آب آزاد با بکارگیری افزودنی‌های کاهنده آب، افزایش حداکثر اندازه سنگدانه و درشت بافت کردن دانه‌بندی و یا استفاده از سنگدانه ریز گردگوشه‌تر (در صورت امکان و مجاز بودن هر یک از آنها) کاهش یابد تا از مقدار عیار سیمان نیز کاسته شود.

در گام پنجم یافتن مقادیر سنگدانه دنبال می‌گردد و به نوعی می‌توان گفت که آخرین مرحله جدی در طرح مخلوط اولیه بتن است. در این مرحله با داشتن چگالی ذرات سیمان و افزودنی و با کمک رابطه حجم مطلق و فرض حجم هوای بتن، حجم کل ذرات سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک محاسبه می شود و سپس با در دست داشتن سهم هر یک از سنگدانه‌ها در مخلوط سنگدانه، حجم ذرات هر یک از سنگدانه‌ها بدست می‌آید سپس با ضرب چگالی اشباع با سطح خشک ذرات هر نوع سنگدانه در حجم متناظر با آن، جرم اشباع با سطح خشک هر یک از آنها محاسبه می‌گردد.

بدیهی است به این ترتیب می‌توان جرم یک متر مکعب از بتن تازه متراکم را در پایان بدست آورد و طرح مخلوط اولیه را تکمیل نمود.

٤-٢ گام اول: انتخاب محدوده منحنی مخلوط سنگدانه و تعیین سهم سنگدانه‌های بتن

برای ساخت بتن همگن، ضروری است که سنگدانه‌های ریز و درشت به گونه‌ای با یکدیگر مخلوط شوند که ضمن ایجاد انسجام کافی، بتن نیز دارای کارآیی مناسب باشد. بدین منظور بر اساس منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۵ برای حداکثر اندازه سنگدانه ۹/۵ ،۱۲/۵، ۱۹ ، ۲۵ ، ۳۸میلی‌متر، نسبت اختلاط ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها تعیین می‌گردد. سپس به منظور محاسبه مقدار آب لازم (گام سوم)، مدول نرمی سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود. مدول نرمی (ریزی) سنگدانه شاخصی از ریزی یا درشتی سنگدانه است. برای محاسبه مدول نرمی، باید، مجموع درصدهای تجمعی وزنی سنگدانه‌های مانده روی الک‌های ۳۸ ، ۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۴، ۱/۲، ۰/۶، ۰/۳ و ۰/۱۵ میلیمتر،را بر عدد ۱۰۰ تقسیم کرد.

اهمیت دانه‌بندی مخلوط سنگدانه را می‌توان به این صورت مطرح کرد که مقدار خمیر سیمان در بتن، تابع فضای خالی بین سنگدانه‌ها و کل مساحت سطح جانبی سنگدانه‌ها می‌باشد، زیرا منافذ بین سنگدانه‌ها توسط خمیر سیمان اشغال می‌گردد و سطح سنگدانه‌ها باید با خمیر سیمان اندود شود. وقتی که اندازه سنگدانه‌ها تقریباً مشابه و یکسان یا یکنواخت باشد، حجم منافذ بین سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. اما اگر از سنگدانه‌هایی با اندازه‌های مختلف استفاده شود، ذرات کوچکتر بین دانه‌های بزرگتر قرار می‌گیرند و به این ترتیب، منافذ کاهش می‌یابند و از مقدار خمیر سیمان مورد نیاز کاسته می‌شود. به طور نظری می‌توان برای هر حداکثر اندازه سنگدانه و نیز شکل خاص ذرات آن، یک منحنی دانه‌بندی با حداقل فضای منافذ را بدست آورد. اما چنین توزیعی از اندازه ذرات، علیرغم بهبود مقاومت و کاهش مصرف سیمان نمی‌تواند بتنی با کارایی مناسب تولید کند، بنابراین باید بین کارایی، مقاومت و اقتصاد تعادل برقرار نمود.

تولید سنگدانه‌ها به نحوی است که ممکن است دانه‌بندی آن‌هادر محدوده دانه‌بندی استاندارد قرار نگیرد. لذا ضروری است که سنگدانه‌ها با دانه‌بندی‌های مختلف به گونه‌ای اصلاح شوند که در محدوده‌های استاندارد سنگدانه‌های ریز یا درشت و یا در محدوده مطلوب مخلوط آن‌ها قرار گیرند. بهرحال می‌توان با سنگدانه‌هایی که دانه‌بندی آن‌ها در محدوده استاندارد نیست، تا حد امکان مخلوطی را بوجود آورد که مخلوط سنگدانه در محدوده دانه‌بندی مطلوب باشد.

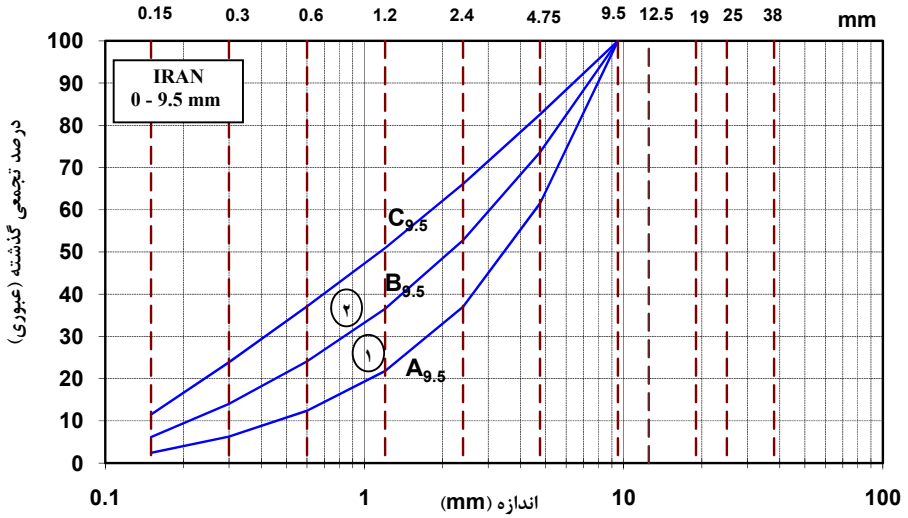
مقاومت بتن‌ها با نسبت آب به سیمان یکسان، بویژه در نسبت آب به سیمان کم، با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، معمولاً افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده احتمالاً این است که مقاومت پیوستگی بین

خمیر سیمان و ذرات سنگدانه بزرگ، کمتر از سنگدانه کوچک می‌باشد، زیرا مساحت ویژه سنگدانه بزرگ، کمتر از سنگدانه کوچک است. از طرف دیگر، افزایش حداکثر اندازه سنگدانه، مقدار آب مورد نیاز مخلوط را برای کارایی مشخص، کاهش می‌دهد. در نتیجه نسبت آب به سیمان کاهش و مقاومت افزایش می‌یابد، بنابراین، افزایش حداکثر اندازه سنگدانه دو اثر متضاد دارد. با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی در بتن، می‌توان از شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۵، شکل مورد نظر را انتخاب نمود. در شکل‌های مذکور حروف A ، B و C به ترتیب نشان‌دهنده دانه‌بندی درشت، متوسط و ریز است که دو محدوده ۱ و ۲ را ایجاد می‌کنند. چنانچه دانه‌بندی سنگدانه در محدوده ۱ قرار گیرد، منحنی دانه‌بندی درشت و اگر دانه‌بندی مطابق با محدوده ۲ باشد، منحنی دانه‌بندی ریز محسوب می‌گردد. در محدوده ۱ با تمایل به سمت منحنی فوقانی، باعث می‌شود که مخلوط دارای بافت ریزتر، چسبنده‌تر و دارای قابلیت پمپ‌پذیری بیشتری باشد و آب‌انداختگی کمتر شود. بهرحال انتخاب محدوده دانه‌بندی و مناطقی از آن به روانی بتن، جداشدگی، آب انداختن، جمع‌شدگی و وسایل حمل و ریختن و نوع قطعات بستگی دارد و تابع سلیقه‌های درخواست کننده طرح مخلوط و هم‌چنین طراح مخلوط است.

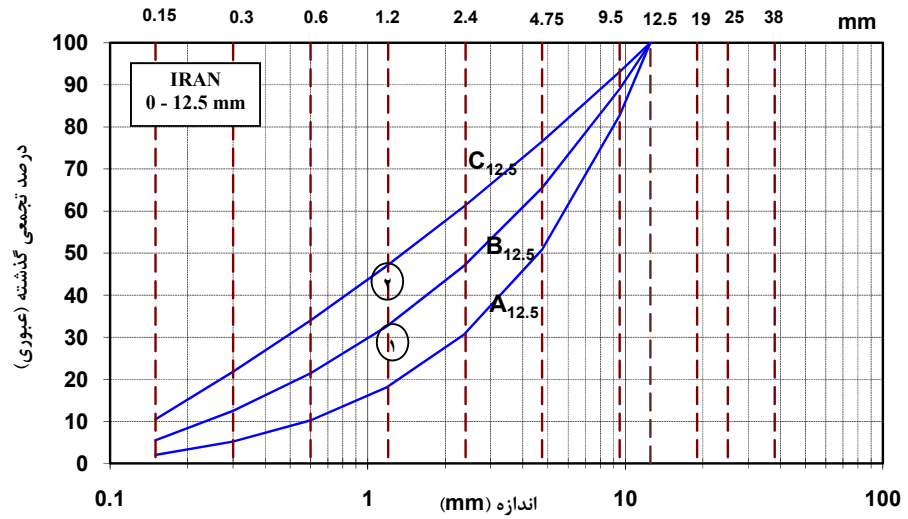
هر چه روانی بتن بیشتر باشد و نیاز به کاهش استعداد جداشدگی و آب انداختن احساس گردد لازم است دانه‌بندی ریزبافت‌تری بکار رود. در بتن پمپی سعی می‌شود تا منحنی دانه‌بندی مخلوط سنگدانه در نیمه بالایی محدوده ۱ واقع گردد. برای اطلاع بیشتر درباره محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب و انتخاب محدوده مناسب به راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن مراجعه شود.

منحنی‌های دانه‌بندی در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۵، درصد تجمعی گذشته از هر الک را بر حسب حجم نشان می‌دهد. اگر چگالی ذرات سنگدانه‌ها با اندازه‌های مختلف، یکسان باشد، می‌توان منحنی‌ها را به عنوان درصدهای تجمعی وزنی در نظر گرفت. اگر چگالی ذرات سنگدانه با اندازه‌های مختلف، یکسان نباشد، لازم است منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه به صورت حجمی در نظر گرفته شود، هر چند آزمایش دانه‌بندی هر سنگدانه بصورت وزنی انجام می‌گردد.

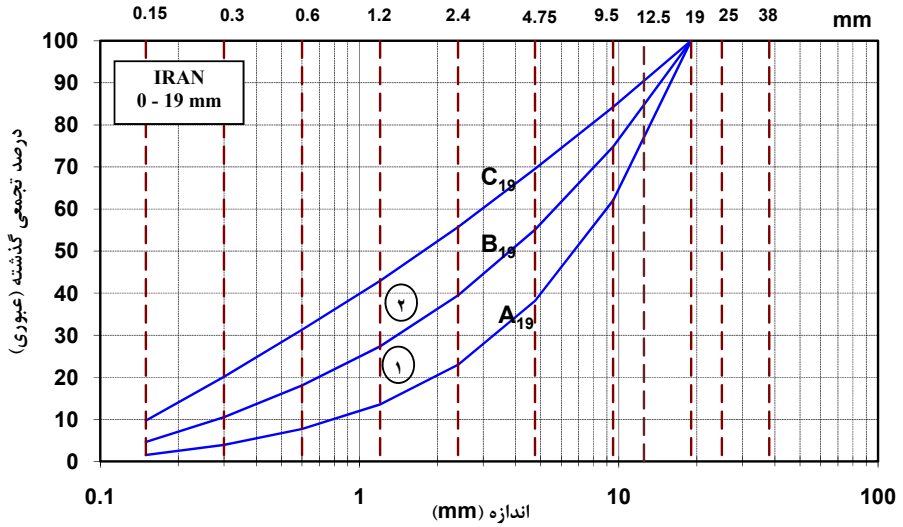
پس از تعیین سهم هر یک از سنگدانه‌ها، دانه‌بندی مخلوط سنگدانه مشخص می‌گردد. چنانچه از دو یا چند نوع سنگدانه درشت با درصد شکستگی‌های مختلف استفاده شود میانگین درصد شکستگی شن‌ها با توجه به سهم آنها در مخلوط سنگدانه قابل محاسبه است. هم‌چنین باید با توجه به درصد شکستگی تقریبی چشمی ماسه و با عنایت به تأثیر و اهمیت بیشتر آن در کارآیی بتن، درصد شکستگی متوسط معادل برای مخلوط سنگدانه را برای تعیین مقدار آب آزاد بتن بدست آورد.



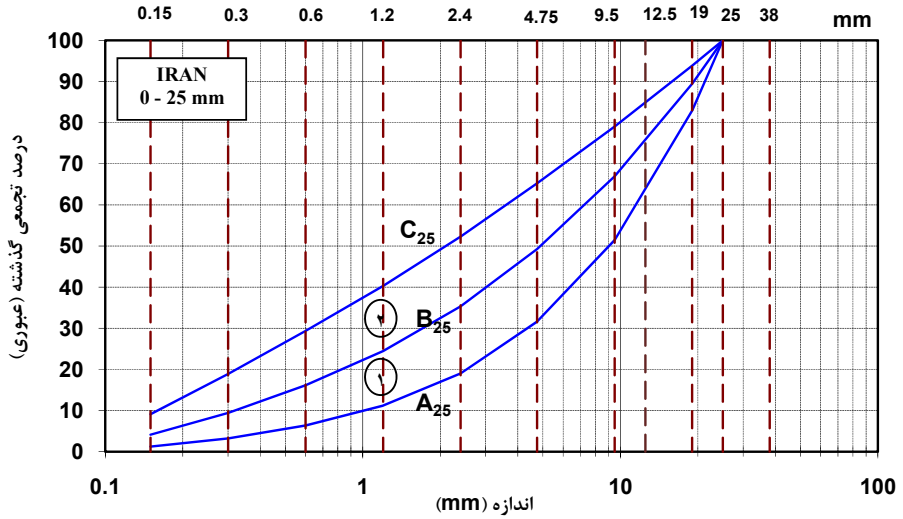
شکل ٤-١ منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر



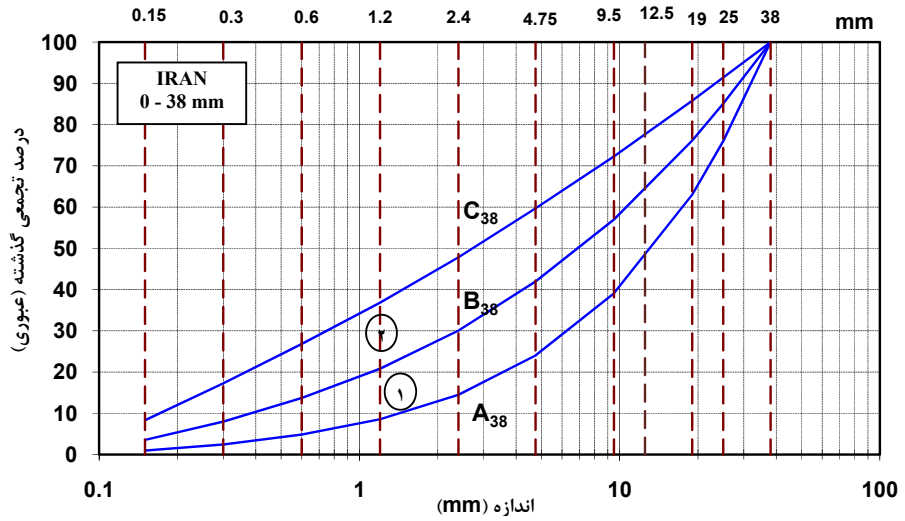
شکل ٤-٢ منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر



شکل ٤-٣ منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر



شکل ٤-٤ منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر



شکل ٤-٥ منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، با حداکثر اندازه ۳۸ میلی‌متر

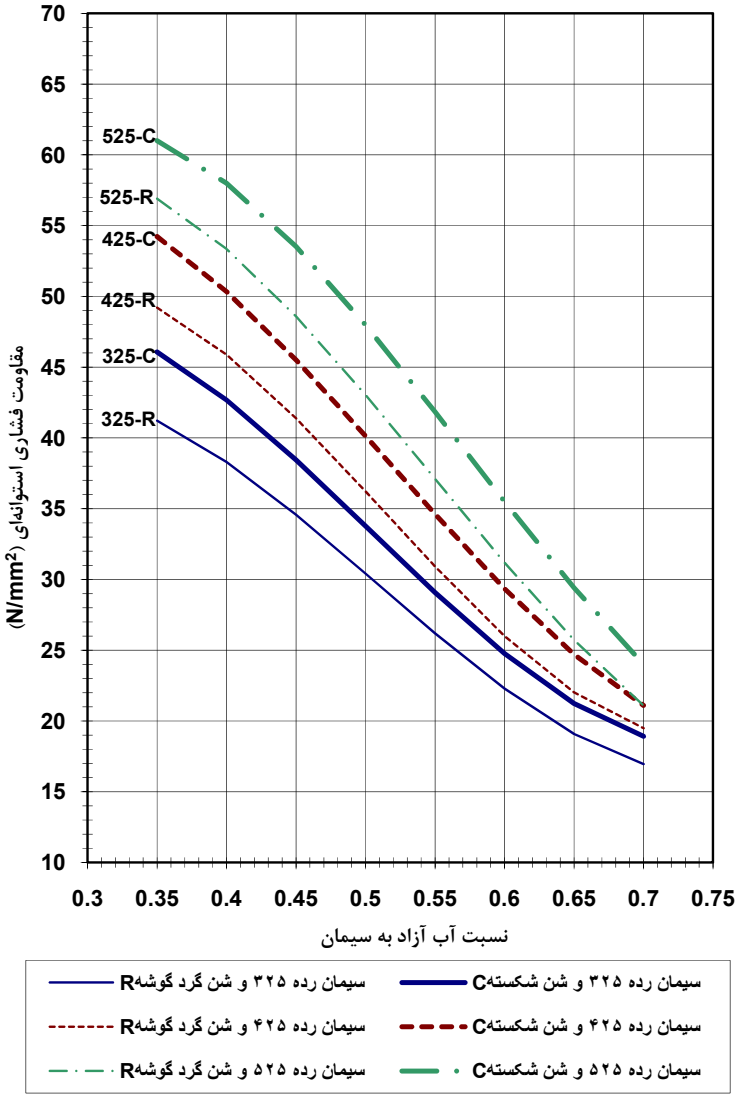
٤-۳ گام دوم: تعیین نسبت آب به سیمان بتن

نسبت (مؤثر) آب به سیمان به مفهوم نسبت مقدار آب آزاد به مقدار سیمان یا مواد سیمانی در بتن تازه است. ارتباط بین نسبت آب به سیمان و مقاومت بتن بر این اساس است که افزایش نسبت آب به سیمان سبب افزایش منافذ مویینه در خمیر سیمان سخت شده بتن می‌شود. بنابراین با کاهش نسبت آب به سیمان به مقاومت بتن افزوده می‌شود.نسبت آب به سیمان اثر قابل توجهی در مقاومت بتن دارد. بدیهی است که دوام بتن نیز در بیشتر حالات به شدت تابع نسبت آب به سیمان می‌باشد.

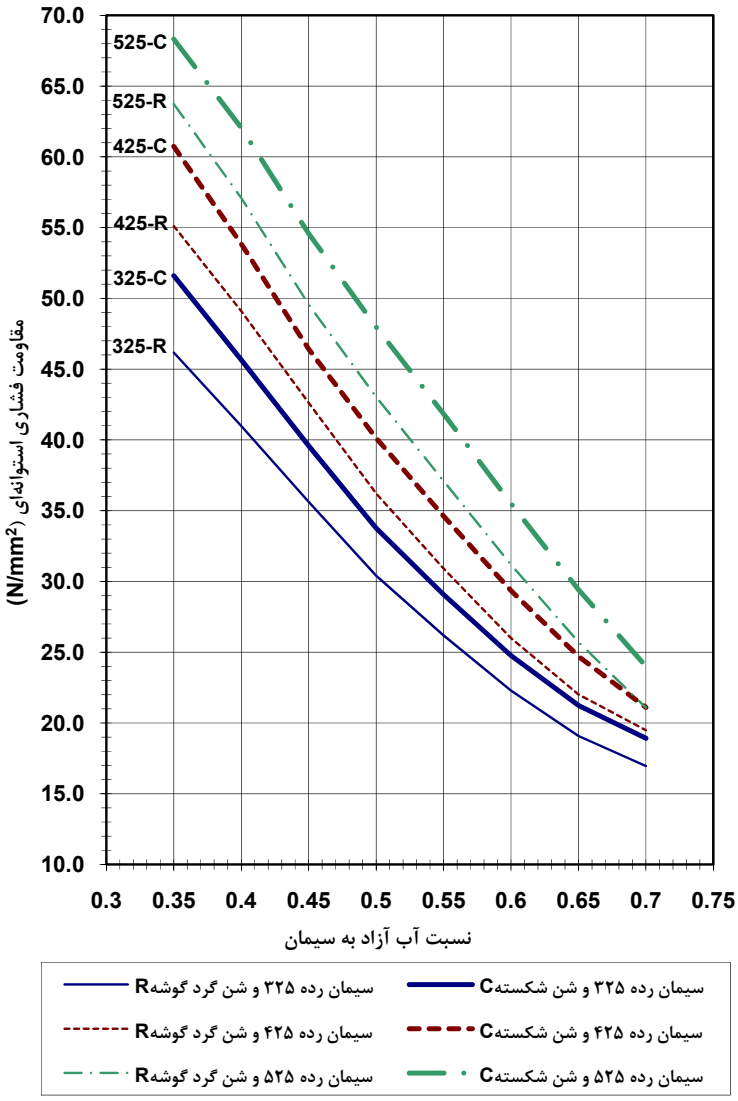
وقتی مقدار سیمان تغییر داده می شود و مقدار آب ثابت نگه داشته می‌شود، روانی بتن به همان نسبت تغییر نمی‌کند. به‌عبارت دیگر، افزایش مقدار سیمان تا حد معینی، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد،زیرا از نسبت آب به سیمان کاسته می‌شود، اما روانی تقریباً بدون تغییر می‌ماند. از طرف دیگر، وقتی که مقدار سیمان ثابت نگه داشته می‌شود و مقدار آب تغییر می‌کند، روانی بتن در حد قابل توجهی تغییر می‌کند. اگر روانی بتن خیلی کم باشد، امکان دارد به دلیل عدم تراکم مطلوب، مقاومت فشاری آن کاهش یابد.

با استفاده از شکل ۴-۶ (الف) براساس رده مقاومتی سیمان و مقاومت فشاری متوسط (هدف) طرح مخلوط می‌توان W/C را بدست آورد. هم‌چنین در صورتی که سنگدانه درشت کاملاً گردگوشه یا صد در صد شکسته نباشد، نسبت آب به سیمان را می‌توان با توجه به درصد شکستگی متوسط شن‌ها با میانیابی بین منحنی‌های C و R بدست آورد. در صورت تعیین مقاومت ملات استاندارد سیمان (۲۸ روزه) با درون‌یابی می‌توان W/C را بدست آورد که روش دقیق‌تری خواهد بود. در منحنی‌های شکل ۴-۱، مقدار هوای ناخواسته بتن در حدود ۱ تا ۲ درصد فرض شده است. همچنین در ارائه منحنی‌ها، حداکثر اندازه سنگدانه‌ها ۱۹ تا ۲۵ میلی‌متر، فرض شده است که در یک نسبت آب به سیمان برابر، با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، مقاومت فشاری بصورت جزئی افزایش می‌یابد.

چنانچه از افزودنی‌های روان کننده (معمولی یا ممتاز) استفاده شود مشروط بر اینکه حباب‌زایی نداشته باشد می‌توان از شکل ۴-۶-(ب) برای تعیین نسبت آب به سیمان استفاده نمود. تفاوت شکل ۴-۶-(الف) و ۴-۶-(ب) در نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ مشهود است. علت این امر بهبود روانی و تراکم بتن و هم‌چنین عیار سیمان مصرفی کمتر و پراکندگی بهتر سیمان در بتن می‌باشد.



شکل ٤-٦-(الف) رابطه بین نسبت آب به سیمان (W/C) و مقاومت فشاریاستوانه‌ای بتن در سن ۲۸ روزه برای رده‌های مختلف مقاومتی سیمان و شکل سنگدانه درشت بدون افزودنی‌های روان کننده



شکل ٤-٦-(ب) رابطه بین نسبت آب به سیمان (W/C) و مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن در سن ۲۸ روزه برای رده‌های مختلف مقاومتی سیمان و شکل سنگدانه درشت با افزودنی‌های روان کننده

در صورتی که نسبت آب به سیمان بدست آمده با توجه به مقاومت فشاری، بیشتر از ضابطه حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز برای دستیابی به دوام باشد باید حداکثر نسبت آب به سیمان دوام را در طرح مخلوط بتن رعایت نمود. در این حالت طرح مخلوط بتن را دوام محور می‌نامند.

٤-٤ گام سوم: تعیین مقدار آب آزاد بتن

مقدار آب آزاد بتن، تابع عوامل متعددی مانند کارایی مورد نظر، حداکثر اندازه سنگدانه، دانه‌بندی و نوع سنگدانه‌های مصرفی از نظر بافت سطحی و شکل است، هر چند عواملی مانند نوع سیمان و ریزی آن و عیار سیمان نیز بر مقدار آب آزاد لازم تأثیر می‌گذارد. مقدار آب مهمترین عامل تأثیرگذار در کارایی بتن می‌باشد. افزایش مقدار آب باعث افزایش سهولت ریختن بتن و تراکم‌پذیری آن می‌شود. هرچند، افزایش آب،ضمن ایجاد کاهش در مقاومت، منجر به جداشدگی ذرات و آب انداختن می‌گردد و جمع‌شدگی را افزایش می‌دهد و دوام بتن را نیز کم می‌کند.

مقدار آب آزاد مخلوط باید در حدی باشد که خمیر سیمان حاصله سطح ذرات سنگدانه را بپوشاند و سپس فضای بین ذرات سنگدانه را تا حدودی پر کند تا با ایجاد لایه‌ای از دوغاب سیمان بر روی سنگدانه‌ها حالت روغنکاری را به وجود آورد. بر همین اساس، ذرات ریزتر نیاز به آب و خمیر سیمان بیشتری دارند. از طرف دیگر، در صورت کمبود ذرات ریز (فیلر یا پرکننده)، بتن نمی‌تواند حالت خمیری نشان دهد و کارآیی مناسبی ندارد، بنابراین نمی‌توان مقدار آب مخلوط را مستقل از دانه‌بندی سنگدانه در نظر گرفت.

با استفاده از منحنی‌های شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ و همچنین بر اساس روانی مورد نظر(بعد ازحدود ۵ دقیقه پس از ساخت بتن) و مدول نرمی مخلوط سنگدانه می‌توان مقدار آب آزاد بتن را بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب تعیین نمود. منحنی‌های موجود برای میانگین هر رده اسلامپ داده شده است. برای اسلامپ‌های دیگر می‌توان از درون‌یابی استفاده نمود. هم‌چنین برای اسلامپ ۲۵-۱۰ و ۲۱۰-۱۸۵ میلی‌متر با برون‌یابی مناسب مقدار آب را می‌توان تخمین زد.

شکل ۴-۷ را برای سنگدانه‌های گردگوشه با بافت سطحی صیقلی که آب نسبتاً کمتری نیاز دارند، می‌توان ملاک قرار داد.

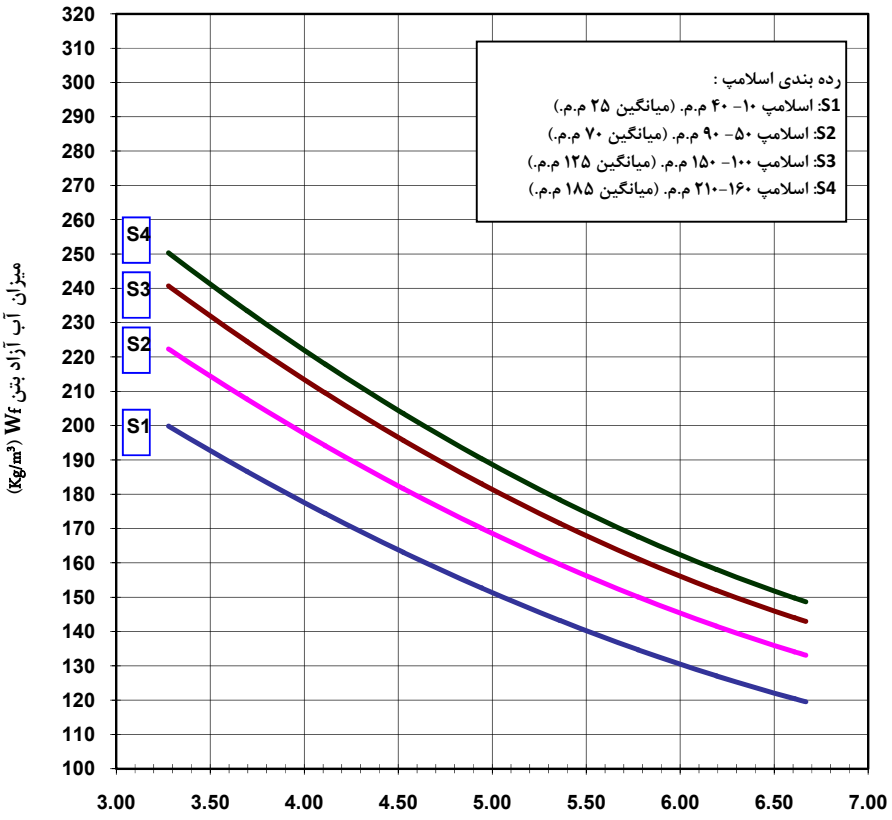
شکل ۴-۸، در مواردی که سنگدانه‌های شکسته یا تیزگوشه و با بافت سطحی زبر .به آب نسبتاً زیادی نیاز دارد، به کار برده می‌شود.

همانگونه که مشاهده می‌شود هرچه مدول نرمی بیشتر شود، مقدار آب کمتری در طرح مخلوط بتن لازم است.

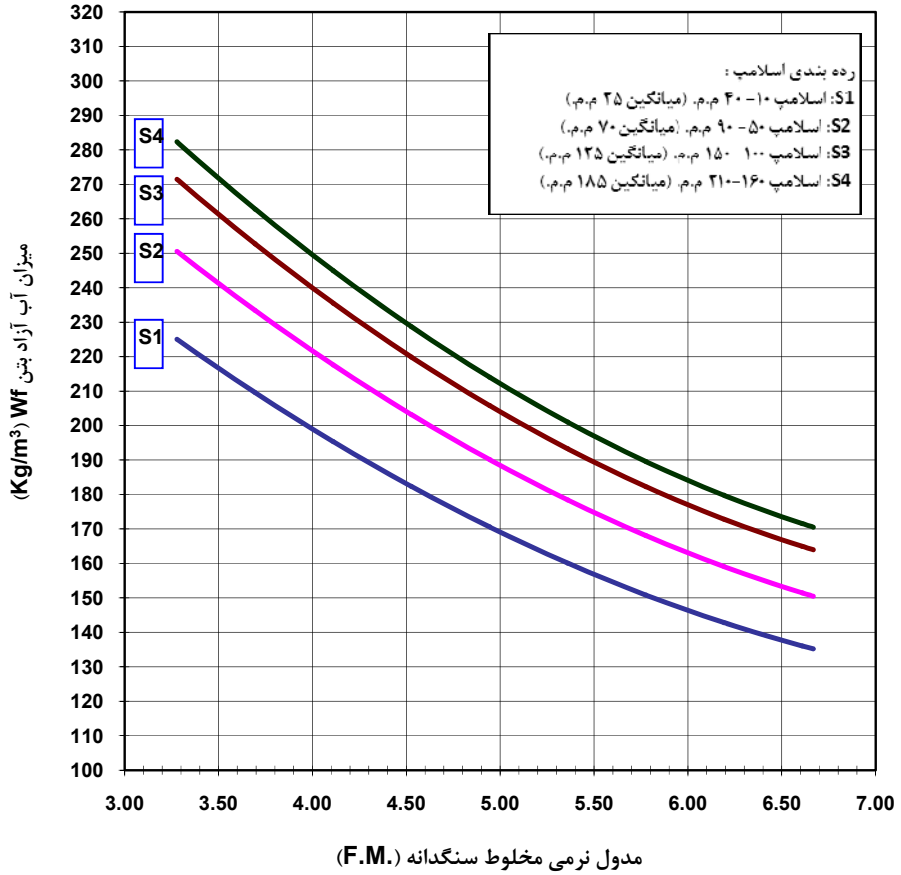
با توجه به درصد شکستگی (تیزگوشگی) سنگدانه درشت و ریز و با در نظر گرفتن اهمیت شکل سنگدانه ریز در تعیین مقدار آب آزاد بتن، لازم است مقدار آب آزاد با درون‌یابی بین اعداد حاصله از دو شکل مورد نظر بدست آید.

تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه و دانه بندی در شاخص مدول نرمی مخلوط سنگدانه منظور شده است و آب آزاد بدست آمده به این عوامل نیز مربوط می‌شود.

این منحنی‌ها برای بتن‌هایی با عیار سیمان $۳۵۰ kg/m^۳$ تهیه شده است. در صورتیکه عیار سیمان بدست آمده در گام چهارم بیشتر از $۳۵۰ kg$ باشد، لازم است به ازاء هر $۱۰ kg/m^۳$ سیمان اضافی با توجه به میزان روانی بتن، آب آزاد را در حدود ۱ تا $۲kg/m^۳$ افزایش داد.



شکل ٤-٧ مقدار آب آزاد مورد نیاز بتن بر حسب مقدار روانی و مدول نرمی سنگدانه‌های گردگوشه با بافت سطحی صاف و صیقلی



شکل ٤-٨ مقدار آب آزاد مورد نیاز بتن بر اساس مقدار روانی و مدول نرمی سنگدانه‌های تیزگوشه (شکسته) با بافت سطحی زبر

بدیهی است در ساخت بتن، آب مصرفی باید با توجه به مقدار آب آزاد مورد نیاز و آب لازم برای رساندن رطوبت سنگدانه‌ها از حالت خشک یا مرطوب به حالت اشباع با سطح خشک بدست آید. از آنجا که در مراحل فوق، سنگدانه‌ها بصورت اشباع با سطح خشک در نظر گرفته شده‌اند و در عمل رطوبت موجود سنگدانه‌ها، کمتر یا بیشتر از رطوبت متناظر با حالت اشباع با سطح خشک می‌باشد، مقدار آب مصرفی می‌تواند بیشتر یا کمتر از آب آزاد طرح مخلوط بتن باشد.

٤-٥ گام چهارم – تعیین مقدار سیمان بتن

پس از تعیین مقدار آب آزاد و نسبت آب به سیمان می‌توان مقدار سیمان را بر حسب kg/m^3 از رابطه ۴-۱ محاسبه کرد.

رابطه (۴-۱)

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

پس از تعیین مقدار سیمان، لازم است در صورت داشتن عیار سیمان بیش از kg/m^3 ۳۵۰ تصحیح مقدار آب با توجه به بند ۴-۴ انجام شود و مجدداً مقدار سیمان تعیین گردد. این تصحیح فقط یک بار انجام می‌شود و نیازی به تکرار آن وجود ندارد. مقدار سیمانی که از رابطه ۴-۱ محاسبه می‌گردد، باید با مقدار حداکثر یا حداقل اعلام شده در مشخصات فنی و یا الزامات دوام مقایسه گردد. چنانچه مقدار سیمان محاسبه شده کمتر از حداقل مقدار مجاز باشد، باید حداقل مورد نظر انتخاب گردد. بدیهی است در این حالت مقدار آب آزاد برای ثابت نگهداشتن روانی و نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد و در صورتیکه مقدار آب ثابت باشد با افزایش سیمان، نسبت آب به سیمان و روانی بتن کاهش خواهد داشت.

در صورتیکه عیار سیمان محاسبه شده بیشتر از حداکثر مقدار مجاز باشد باید تمهیداتی را اندیشید تا بتوان مقدار آب و در نهایت مقدار سیمان را کم نمود. برای کاهش آب آزاد طرح مخلوط بتن راهکارهایی وجود دارد که دارای محدودیت زیادی است. بهترین راهکار استفاده از مواد روان‌کننده (کاهنده آب) است.

در مخلوط‌های کم سیمان (کمتر از$kg/m^3$۳۰۰)، ممکن است مخلوط طراحی شده به علت کمبود ذرات ریز، خشن گردد. بنابراین در این موارد توصیه می‌شود از مواد پوزولانی یا پودر سنگ آهک یا پودر سنگ‌های سیلیسی برای جبران کمبود ذرات ریز استفاده شود .

در مواردی که از ماده شیمیایی روان‌کننده یا فوق‌روان‌کننده در مخلوط بتن استفاده می‌شود، می‌توان مقدار آب مخلوط را حدود ۵ تا ۳۵ درصد بسته به نوع و مقدار ماده مزبور کاهش داد، بدون آنکه در مقدار اسلامپ مورد نظر تغییری حاصل شود.

٤-٦ گام پنجم – تعیین مقدار سنگدانه بتن

مقدار سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک که آخرین جزء مجهول بتن در این روش طرح مخلوط می‌باشد، طبق رابطه(۴-۲) تعیین می‌گردد.

$$V_{A_{SSD}} = 1 - (\frac{C}{\rho_c} + \frac{W_f}{\rho_w} + \frac{D}{\rho_D} + V_{at}) \qquad (۴-۲)$$

که در آن:

$V_{A_{SSD}}$ = حجم کل ذرات سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب m^3

C = جرم سیمان بر حسب kg/m^3

W_f = جرم آب آزاد بر حسب kg/m^3

D = جرم مواد افزودنی شیمیایی و پودری معدنی جایگزین سیمان بر حسب kg/m^3

V_{at} = حجم هوای کل موجود در بتن (خواسته و ناخواسته) بر حسب m^3

ρ_c = جرم مخصوص سیمان بر حسب kg/m^3

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

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

با توجه به سهم بدست‌آمده برای سنگدانه‌های ریز و درشت در مخلوط سنگدانه و با در نظر گرفتن حجمی‌بودن دانه‌بندی‌های ارائه‌شده در بند ۴-۲، مقدار حجم سنگدانه‌های ریز و درشت به تفکیک بدست می‌آید. با ضرب چگالی ذرات اشباع با سطح خشک سنگدانه‌های ریز و درشت بر حسب kg/m^3 در حجم سنگدانه‌های متناظر با آن‌ها، جرم سنگدانه‌های ریز و درشت به تفکیک در حالت اشباع با سطح خشک تعیین می‌شود.

همچنین در جدول ۴-۳ مقدار درصد هوای ناخواسته موجود در بتن (a_1) بر اساس حداکثر اندازه سنگدانه به عنوان راهنما، ارائه شده است.

جدول ٤-۳ مقدار درصد هوای ناخواسته در بتن (a_1)

حداکثر 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

کارآیی بتن یکی از عوامل مؤثر در مقدار هوای ناخواسته می‌باشد، لذا جهت تعیین درصد هوا با توجه به محدوده‌های ارائه شده در جدول ۴-۳، چنانچه کارآیی بتن نسبتاً زیاد باشد از مقادیر درصد هوای کمتر و اگر کارایی بتن کم باشد، باید از مقادیر درصد هوا بیشتر استفاده گردد.

معمولاً در صورتی که حجم مواد افزودنی بتن کمتر از ۰/۰۰۳ m^3 باشد نیازی به منظور نمودن حجم آن در رابطه حجم مطلق نیست. در صورتی که حجم مواد افزودنی شیمیایی بیش از ۰/۰۰۳ m^3 باشد لازم است آب موجود در افزودنی را جداگانه منظور نمود.

٤-٧ تعیین جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه (به صورت محاسباتی)

برای تعیین جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه با توجه به هوای عمدی و غیر عمدی موجود در آن، می‌توان جرم همه اجزای بتن را با یکدیگر جمع نمود.

رابطه (۴-۳)

$$G= C + W_f + A_{SSD} + D$$

که در آن:

G = جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه بر حسب kg

A_{SSD} = جرم کل سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک در هر متر مکعب بتن بر حسب kg می‌باشد.

٤-٨ ارائه نتایج طرح مخلوط اولیه

مقادیر بدست آمده از محاسبات بخش چهارم در نهایت به تهیه طرح مخلوط اولیه منجر می‌گردد. طرح مخلوط اولیه شامل نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، مقدار آب آزاد، مقادیر سنگدانه‌های بتن به تفکیک بصورت اشباع با سطح خشک و افزودنی‌ها خواهد بود. این نتایج را می‌توان به شکل دیگری نیز ارائه نمود که در آن بجای آب آزاد، آب کل و بجای سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک، سنگدانه کاملاً خشک مطرح گردد. مقدار سنگدانه کاملاً خشک از رابطه ۴-۴ بدست می‌آید.

رابطه (۴ -۴)

$$A_d = \frac{A_{SSD}}{1 + a_c}$$

که در آن:

A_d = جرم سنگدانه خشک بر حسب kg

a_c = ظرفیت جذب آب سنگدانه بصورت اعشاری می‌باشد.

هم‌چنین مقدار آب کل برابر مجموع آب آزاد و آب لازم برای اشباع با سطح خشک شدن سنگدانه‌های کاملاً خشک است (رابطه ۴-۵).

$$W_t = W_f + (A_{SSD} - A_d)$$ رابطه (۴-۵)

بخش پنجم

طرح مخلوط بتن حبابدار و بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان

۵-۱ طرح مخلوط بتن حبابدار:

۵-۱-۱ کلیات: یکی از راهکارهای مهم برای افزایش دوام بتن بویژه در شرایط یخ زدن و آبشدن و یا کاهش جذب آب و نفوذپذیری، ایجاد هوا (حباب) عمدی یا خواسته به کمک مواد حبابزا (حباب ساز) در بتن می‌باشد. مشخصات فنی عمومی یا خصوصی پروژه‌ها و آیین‌نامه‌ها یا مقررات ملی ساختمان، با توجه به شرایط محیطی حاکم و حداکثر اندازه سنگدانه، درصد هوای کل بتن را مشخص می‌کنند. درصد هوای کل بتن شامل هوای عمدی و غیرعمدی (خواسته یا ناخواسته) است. با توجه به جدول ۴-۳ یا با داشتن درصد هوای غیرعمدی بتن می‌توان درصد هوای عمدی را محاسبه نمود. در طرح مخلوط بتن حبابدار چند نکته را باید در روش ملی طرح مخلوط بتن در نظر گرفت که بدان پرداخته می‌شود. هم‌چنین لازم نیست حجم کم مواد حبابزا را در رابطه حجم مطلق منظور نمود.

۵-۱-۲ نقش هوای عمدی در دانه‌بندی مخلوط سنگدانه و سهم هر سنگدانه:

هوای عمدی بتن به کارآیی آن کمک می‌کند و می‌تواند کمبود یا فقدان برخی از ذرات ریز سنگدانه را جبران نماید. بنابراین امکان استفاده از ماسه‌های درشت‌تر و یا کاهش سهم ماسه در مخلوط سنگدانه فراهم می‌آید و به عبارتی مخلوط سنگدانه با بافت دانه‌بندی درشت‌تر می‌تواند بکار رود. می‌توان به ازای هر ۱ درصد هوای عمدی در بتن، سهم ماسه در مخلوط سنگدانه را ۰/۵ ± درصد کاهش داد مشروط بر اینکه ماسه مصرفی دارای ریزدانه کافی باشد.

۵-۱-۳ نقش هوای عمدی در مقاومت فشاری بتن و نسبت آب به سیمان:

هوای عمدی مانند هوای غیرعمدی، مقاومت فشاری بتن را با فرض ثابت بودن نسبت آب به سیمان معمولاً کاهش می‌دهد (مگر برای نسبت آب به سیمان بتن حبابدار بیش از ۰/۷۵ و عیار سیمان کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم بر هر متر مکعب بتن). مقدار این کاهش (r_2) در حدود ۱/۵±۴/۵ درصد برای هر

یک درصد هوا می‌باشد. این کاهش در نسبت‌های آب به سیمان کم، بیشتر و در نسبت‌های آب به سیمان زیاد، کمتر خواهد بود (در محدوده نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۵).

چنانچه مقاومت فشاری بتن را ثابت در نظر بگیریم، لازم است نسبت آب به سیمان را در بتن حبابدار، کمتر در نظر گرفت. این کاهش نسبت آب به سیمان (r_1) در حدود ۱/۵ ± ۳/۵ درصد برای هر ۱ درصد هوای بتن می‌باشد. برای بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان کمتر، این کاهش باید بیشتر و برای نسبت آب به سیمان بیشتر، باید کمتر منظور شود (در محدوده نسبت آب به سیمان اولیه بتن معمولی بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۵).

در صورت استفاده از مواد حبابزا، برای یافتن نسبت آب به سیمان بتن به دو طریق می‌توان عمل کرد. روش اول استفاده از شکل ۴- ۶- (الف) و (ب) و بدست آوردن نسبت آب به سیمان برای بتن معمولی بدون حباب هوای عمدی است و سپس درصد کاهش نسبت آب به سیمان بسته به مقدار درصد هوای عمدی a_2 (با توجه به حدود کاهش r_1 برای این نسبت آب به سیمان) ضربدر این کاهش برای (درصد هوای عمدی) اعمال می‌گردد.

رابطه (۵-۱) W/C بتن حبابدار $= W/C$ بتن معمولی $(1 - r_1 . a_2)$

r_1 درصد کاهش نسبت آب به سیمان به مقدار ۱/۵± ۳/۵ درصد به ازای ۱ درصد هوا می‌باشد.

روش دوم، یافتن مقاومت مجازی هدف طرح مخلوط برای بتن حبابدار $(f_{cm})'$ با توجه به مقاومت هدف طرح برای بتن بدون حباب هوای عمدی است. به این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$(f_{cm})' = \frac{f_{cm}}{1 - r_2 a_2}$$

رابطه (۵-۲)

r_2 برابر میزان کاهش مقاومت بتن حبابدار به ازای ۱ درصد هوای عمدی است که در بازه ۱/۵ ± ۴/۵ درصد قرار دارد.

a_2 درصد هوای عمدی بتن می‌باشد (بصورت اعشاری)

۵-۱-٤ نقش حباب هوای عمدی در مقدار آب آزاد بتن

حباب هوای عمدی ایجاد شده توسط مواد حبابزا در صورت ثابت بودن نسبت آب به سیمان،به روانی بتن کمک می‌کند و در حالتی که روانی ثابت باشد، کاهش آب آزاد را به همراه می‌آورد. این کاهش به درصد هوای عمدی و عیار سیمان یا نسبت آب به سیمان بستگی دارد. این کاهش آب به ازای هر ۱ درصد هوای عمدی در بتن در حدود ۱/۵±۲/۵ درصد می‌باشد. هر چه عیار سیمان بیشتر یا

نسبت آب به سیمان کمتر باشد درصد کاهش آب آزاد بتن کمتر می‌گردد و در عیار سیمان کمتر و نسب آب به سیمان زیادتر، درصد کاهش آب، بیشتر می‌شود.

بنابراین چنانچه این درصد کاهش آب را 'r بنامیم مقدار آب بدست آمده از روش ملی طرح مخلوط برای بتن حبابدار بصورت زیر بدست می‌آید:

W_f بتن حبابدار $= W_f$ بتن معمولی $(۱- r'. a_۲)$ (رابطه ۵-۳)

لازم به ذکر است که در یک مقدار هوای ثابت، درصد کاهش آب، به روانی بتن و هم‌چنین حداکثر اندازه سنگدانه نیز مربوط می‌شود. در روانی بیشتر و یا حداکثر اندازه بزرگتر، درصد کاهش آب، کمتر می‌شود.

بهرحال کاربر با توجه به شرایط بتن (عیار سیمان یا نسبت آب به سیمان، روانی مطلوب و حداکثر اندازه سنگدانه) درصد کاهش آب را باید در محدوده ۱ تا ۴ درصد به ازای هر ۱ درصد هوای عمدی بتن در نظر بگیرد و مقدار آب بتن حبابدار را محاسبه نماید.

۵-۲ طرح مخلوط بتن حاوی مواد مکمل یا جایگزین سیمان

امروزه بکارگیری مواد پودری معدنی جایگزین سیمان که نقش پوزولانی و چسباننده را ایفا می‌کنند رایج شده است. دلیل این امر در ابتدا کاهش مصرف سیمان پرتلند (کلینکر سیمان)، کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی تولید کلینکر سیمان و مصرف انرژی کمتر بوده است. در حال حاضر عواملی همچون بهبود کیفیت بتن از نظر دوام و گاه مقاومت در درازمدت، به ترویج مصرف این مواد کمک می‌کند.

در ارتباط با طرح مخلوط بتن، این مواد جایگزین سیمان می‌توانند تغییراتی را بوجود آورند که اغلب به تعیین نسبت آب به سیمان و تعیین مقدار آب آزاد مربوط می‌شود و گاه در محدودیت حداقل عیار سیمان یا محدودیت نسبت آب به سیمان معادل نیز تأثیرگذار است.

۵-۲-۱ نقش مواد جایگزین سیمان در مقاومت فشاری بتن و تعیین نسبت آب به سیمان

منحنی‌های رابطه مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان برای بتن‌هایی است که با سیمان پرتلند یا آمیخته ساخته می‌شوند و با توجه به رده مقاومتی یا مقاومت ملات استاندارد ۲۸ روزه آنها، نسبت آب به سیمان بدست می‌آید.

در صورتی که از افزودنی پودری معدنی به عنوان جایگزین سیمان پرتلند یا آمیخته‌ای که حداکثر ۲۰ درصد مواد جایگزین دارد استفاده شود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن تغییر می‌کند و چنانچه دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه معینی مد نظر باشد، نسبت آب به سیمان لازم، دستخوش تغییر خواهد شد. به عبارت دیگر نیاز به منحنی‌های متفاوتی احساس می‌گردد. بهرحال برای سایر سیمان‌های آمیخته که مواد جایگزین آنها بیش از ۲۰ درصد است، ضرورت مصرف مواد افزودنی جایگزین احساس نمی‌گردد. برای اینکه منحنی‌های جدیدی ارائه نگردد مفهوم دیگری از نسبت آب به مواد سیمانی با بکارگیری ضریبی به نام ضریب مؤثر K ارائه می‌شود. ضریب K در محاسبه حداقل مقدار مواد سیمانی نیز مطرح می‌گردد که در قسمت‌های بعدی بدان پرداخته خواهد شد. این مواد می‌تواند دوده سیلیسی، سرباره کوره آهنگدازی، پوزولان‌های طبیعی، خاکستر بادی، متاکائولن، خاکستر پوسته برنج و غیره باشد. در هر مورد باید مقدار K مشخص گردد که نیاز به پژوهش‌های فراوانی در این موارد احساس می‌گردد.

تنوع کیفیت مواد جایگزین سیمان، نوع و رده مقاومتی سیمان مصرفی، مقاومت بتن مورد نظر و سطح نسبت آب به سیمان و میزان جایگزینی این مواد نقش مهمی را در مقدار K ایفا می‌کند.

بهرحال مقادیر K زمانی بدین صورت بکار می‌آید که این مواد، جایگزین سیمان پرتلند CEM I شوند و چنانچه سیمان آمیخته و صرفاً از نوع CEM II/A بکار رود موضوعیت دارد. مقادیر K بعنوان راهنمای اولیه برای تعیین نسبت آب به مواد سیمانی برای دستیابی به مقاومت در این روش ارائه می‌گردد.

۵-۲-۱-۱ ضریب K برای دوده سیلیسی:

چنانچه مقدار جایگزینی دوده سیلیسی مساوی یا کمتر از ۱۰ درصد وزنی مواد چسباننده (۱۱ درصد وزنی سیمان پرتلند CEM I یا سیمان‌های CEM II/A) باشد مقدار K بین ۲ تا ۴ در نظر گرفته می‌شود و نسبت آب به سیمان معادل عبارتست از :

$$\frac{W}{C + KM}$$

در صورتی که نسبت دوده سیلیسی به سیمان بیشتر از ۱۱ درصد باشد، مازاد بر آن در این رابطه منظور نمی‌گردد. هر چه دوده سیلیسی دارای فعالیت پوزولانی بیشتر و جایگزینی سیمان کمتر باشد و از طرفی نسبت آب به سیمان کمتر و رده مقاومتی سیمان زیادتر باشد مقدار K بیشتر خواهد بود و بر عکس. بهرحال حداقل مقدار K برابر ۲ منظور می‌گردد و حداکثر آن می‌تواند بیش از ۴ باشد اما در روش ملی طرح مخلوط در حال حاضر حداکثر K برابر ۴ در نظر گرفته می‌شود. بهرحال دوده سیلیسی مورد نظر باید با استاندارد ملی شماره ۱۳۲۷۸ ایران یا استاندارد ASTM C۱۲۴۰ انطباق داشته باشد.

۵-۲-۱-۲ ضریب K برای سرباره آهنگدازی:

چنانچه مقدار جایگزینی سرباره مساوی یا کمتر از ۵۰ درصد وزن مواد چسباننده (۱۰۰ درصد وزنی سیمان پرتلند CEM I و سیمان‌های آمیخته CEM II/A) باشد مقدار K بین ۰/۴ تا ۰/۸ خواهد بود و نسبت آب به سیمان معادل عبارتست از :

$$\frac{W}{C+KL}$$

هر چه خاصیت هیدرولیکی سرباره بیشتر و جایگزینی آن کمتر و نسبت آب به سیمان نیز کمتر باشد مقدار K بیشتر خواهد بود و برعکس. بهرحال فرض شده است سرباره موجود در ایران از پایین‌ترین حد خاصیت هیدرولیکی اما منطبق با استاندارد ASTM C۹۸۹ و استاندارد ملی شماره ۳۵۱۷ برخوردار باشد و محدوده فوق در این حالت برای K ارائه شده است.

۵-۲-۱-۳ ضریب K برای خاکستر بادی:

چنانچه مقدار جایگزینی خاکستر بادی مساوی یا کمتر از ۲۵ درصد وزن مواد چسباننده (۳۳ درصد وزنی سیمان پرتلند CEM I) و مساوی یا کمتر از ۲۰ درصد وزن مواد چسباننده (۲۵ درصد وزنی سیمان‌های آمیخته CEM II/A) باشد مقدار K بین ۰/۲ تا ۰/۴ خواهد بود و نسبت آب به سیمان معادل عبارتست از :

$$\frac{W}{C+KF}$$

در صورتی که مقدار خاکستر بادی بیش از مقادیر فوق باشد مقدار مازاد آن در رابطه فوق منظور نمی‌گردد. هرچه فعالیت پوزولانی خاکستر بادی بیشتر و جایگزینی آن کمتر و نسبت آب به سیمان نیز کمتر و رده مقاومتی سیمان بیشتر باشد K بیشتر خواهد بود.

بهرحال خاکستر بادی باید با استاندارد ASTM C۶۱۸ و یا استاندارد ملی شماره ۳۴۳۳ ایران انطباق داشته باشد.

۵-۲-۱-٤ ضریب K برای پوزولان‌های طبیعی:

هر چند پوزولان‌های طبیعی از تنوع زیادی برخوردار هستند اما برای سهولت می‌توان در طرح مخلوط اولیه مقدار K را مانند خاکستر بادی در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ در نظر گرفت. هم‌چنین محدودیت‌های جایگزینی مربوط به خاکستر بادی به قوت خود باقی است و نسبت آب به سیمان معادل عبارتست از :

$$\frac{W}{C + KP}$$

در صورتی که مقدار پوزولان‌های طبیعی بیش از حدود ذکر شده برای خاکستر بادی باشد مازاد آن در رابطه فوق منظور نمی‌شود. هرچه فعالیت پوزولانی پوزولان طبیعی بیشتر، و جایگزینی آن کمتر، و هرچه نسبت آب به سیمان کمتر، و رده مقاومتی سیمان بیشتر باشد مقدار K بیشتر خواهد بود.

بهرحال پوزولان طبیعی باید مشخصات استاندارد ملی شماره ۳۴۳۳ را دارا باشد تا از این محدوده مقادیر K بتوان استفاده نمود.

۵-۲-۱-۵ ضریب K برای متاکائولن:

مقدار K را می‌توان در محدوده ۲-۱/۵ در نظر گرفت. سایر موارد محدودیت مانند دوده سیلیس خواهد بود.

ضریب K برای خاکستر پوسته برنج:

به دلیل تنوع این خاکسترها هنوز مقدار K برای خاکستر پوسته برنج ارائه نشده است.

۵-۲-۲ نقش مواد افزودنی پودری معدنی جایگزین سیمان در اعمال محدودیت حداقل عیار سیمان و دوام:

گاه در مشخصات فنی پروژه‌ها یا آیین‌نامه‌های بتن ومقررات ملی ساختمان، در ارتباط با دوام، حداقل محدودیتی برای سیمان قائل شده‌اند. با مصرف مواد معدنی پودری جایگزین سیمان ممکن است این محدودیت‌ها دستخوش تغییراتی شود که در هر نوع از این مواد، نحوه عمل مشخص می‌شود.

۵-۲-۲-۱ دوده سیلیس:

مقدار C+kM نباید کمتر از حداقل سیمان مورد نیاز برای شرایط دوام باشد. در صورتی که برای تأمین این الزامات، مقدار حداقل سیمان مساوی یا کمتر از kg/m^3 ۳۰۰ باشد، مقدار کاهش سیمان در هنگام جایگزینی با دوده سیلیس نباید بیشتر از ۳۰ کیلوگرم بر هر مترمکعب بتن باشد. هم‌چنین اگر مقدار جایگزینی دوده سیلیس بیشتر از ۱۰ درصد (نسبت دوده سیلیس به سیمان بیشتر از ۰/۱۱) باشد مقدار اضافی در تعیین حداقل مواد سیمانی منظور نمی‌شود.

ضمناً در صورتی که نسبت آب به سیمان بزرگتر از ۰/۴۵ باشد و بتن در شرایط رویارویی با یخبندان و آبشدگی و کربناته شدن واقع گردد مقدار K باید برابر ۱ منظور شود.

۵-۲-۲-۲ سرباره:

مقدار C+KL نباید کمتر از حداقل سیمان مورد نیاز برای دوام باشد. اگر جایگزینی سرباره بیشتر از ۵۰ درصد (نسبت سرباره به سیمان بیشتر از ۱) باشد مقدار اضافی در محاسبه W(C+kL) و حداقل عیار سیمان وارد نمی‌شود.

خاکستر بادی:

مقدار C+kF نباید کمتر از حداقل سیمان مورد نیاز باشد. در صورت مصرف سیمان پرتلند CEM I چنانچه درصد جایگزینی خاکستر بادی به مواد سیمانی بیشتر از ۲۵ درصد (نسبت خاکستر بادی به سیمان بیشتر از ۰/۳۳) باشد و هم‌چنین در صورت مصرف سیمان‌های آمیخته از نوع CEM II/A (که ۹ نوع سیمان با درصد کم انواع مواد پوزولانی طبیعی و مصنوعی و سرباره را به

میزان تا ۲۰ درصد در برمی‌گیرد[1]) اگر درصد جایگزینی خاکستر بادی به مواد سیمانی بیشتر از ۲۰ درصد (نسبت خاکستر بادی به سیمان بیشتر از ۰/۲۵) باشد، زیادی خاکستر بادی را نباید در محاسبه $W/C + kF$ و حداقل عیار سیمان بکار برد.

۵-۲-۲-٤ پوزولان‌های طبیعی: در مورد پوزولان‌های طبیعی مانند خاکستر بادی عمل می‌شود.
۵-۲-۲-۵ متاکائولن: در مورد متاکائولن مانند دوده سیلیس رفتار گردد.

۵-۲-۳ نقش مواد افزودنی پودری معدنی جایگزین سیمان در کارآیی و مقدار آب آزاد طرح مخلوط

مواد افزودنی پودری معدنی جایگزین سیمان بسته به ریزی و شکل ذرات آن بر میزان آب آزاد لازم برای طرح مخلوط در اسلامپ ثابت و یا بر اسلامپ و کارآیی بتن در مقدار آب ثابت اثر می‌گذارد.

۵-۲-۳-۱ نقش دوده سیلیس بر کارآیی و مقدار آب آزاد:

در صورتی که افزودنی فوق روان کننده بکار نرود، هر کیلو دوده سیلیسی جایگزین سیمان (بسته به ریزی و اسلامپ مورد نظر) می‌تواند آب آزاد لازم را ۰/۷۵ تا kg/m^3 ۱ افزایش دهد. معمولاً در بتن‌های کم عیار و هم‌چنین در جایگزینی کمتر از ۵ درصد، دوده سیلیس تأثیر چندانی بر افزایش آب طرح مخلوط بتن ندارد. بدیهی است به دلیل پرهیز از افزایش آب و به دلیل پراکندگی بهتر دوده سیلیس در خمیر سیمان و بتن، مصرف افزودنی فوق‌روان‌کننده در بتن حاوی دوده سیلیس ضرورت دارد.

۵-۲-۳-۲ نقش سرباره بر مقدار آب آزاد:

---

[1] - در صورتی که سیمان آمیخته مزبور بیش از ۱۰ درصد دوده سیلیس را دارا باشد جزو این نوع سیمان‌ها منظور نمی‌گردد. بهرحال در صورت داشتن سیمان‌های نوع CEM II/B یا سیمان‌های نوع CEM III و CEM IV و CEM V طبق EN۱۹۷-۱ و استاندارد جدید ۱-۱۷۵۱۸ ایران (سال ۱۳۹۳) علی‌القاعده نیازی به مصرف مواد افزودنی پودری معدنی در بتن احساس نمی‌گردد.

معمولاً هر ۱۰ کیلو سرباره بسته به ریزی و اسلامپ مورد نظر می‌تواند آب را به میزان ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم بر متر مکعب بتن کاهش دهد. بنظر می‌رسد با توجه به سرباره‌های موجود در ایران و سطح ریزی آنها مقدار ۰/۵ کیلوگرم بر متر مکعب منطقی‌تر باشد.

۵-۲-۳-۳ نقش خاکستر بادی بر مقدار آب آزاد:

در مورد خاکستر بادی معمولی با ریزی حدود ۴۰۰ m^2/kg به ازای هر ۱۰ کیلو، آب آزاد بتن ۱ تا ۲ کیلو در هر متر مکعب بتن (بسته به روانی بتن) کاهش می‌یابد. این کاهش در مورد خاکسترهای بادی ریز و خیلی ریز بتدریج کمتر می‌شود و حتی ممکن است به صفر برسد یا افزایش نیاز به آب نیز داشته باشد.

۵-۲-۳-٤ نقش پوزولان‌های طبیعی بر مقدار آب آزاد:

پوزولان‌های طبیعی ایران بسته به ریزی و نوع آن معمولاً موجب افزایش آب آزاد مورد نیاز بتن می‌گردد. هر ۱۰ کیلو پوزولان طبیعی، آب آزاد را به میزان ۰/۵ تا ۲ کیلوگرم در هر متر مکعب زیادتر می‌کند. زئولیت‌ها ممکن است نقش بیشتری در افزایش آب داشته باشند و به دلیل جذب آب در بین لایه‌های خود، افت اسلامپ بیشتری را نیز باعث می‌شوند و بدین دلائل نیاز به مصرف روان کننده یا فوق‌روان‌کننده را جدی‌تر می‌کنند.

۵-۲-۳-۵ نقش متاکائولن در مقدار آب آزاد:

با توجه به ریزی و کیفیت و درصد جایگزینی متاکائولن به ازای هر کیلو متاکائولن جایگزین سیمان، مقدار آب به میزان ۰/۵ تا ۰/۷۵ کیلوگرم افزایش می‌یابد. لازم است برای کاهش مقدار آب و بهتر پراکنده شدن متاکائولن در بتن، از فوق‌روان‌کننده استفاده نمود.

۵-۲-۳-٦ نقش خاکستر پوسته برنج در مقدار آب آزاد:

با توجه به ریزی و شکل و درصد جایگزینی خاکستر پوسته برنج مانند دوده سیلیس عمل شود و حتی ممکن است افزایش مقدار آب به دلیل شکل و ساختار خاص این خاکسترها بیش از دوده سیلیس باشد.

۵-۲-۳-۷ نقش پودر سنگ بر مقدار آب آزاد:

نقش پودر سنگ به جنس و ریزی آن بستگی دارد. تقریباً هر ۱۰ کیلو پودر سنگ آهک، ۰/۵ تا ۱ کیلو آب مورد نیاز را افزایش می‌دهد، اما از تأثیر آن بر کارآیی بتن نباید گذشت، زیرا که می‌تواند اسلامپ مورد نیاز را کاهش دهد و در نتیجه آب لازم از افزایش چندانی برخوردار نمی‌گردد.

۵-۲-٤ نقش مواد افزودنی پودری معدنی در ایجاد هوای عمدی:

مواد جایگزین سیمان (پوزولانی، سرباره‌ای و پودر سنگ) باعث کاهش ایجاد هوای عمدی بتن می‌شوند و لازم است مقدار مواد حبابزا را در چنین مواردی افزایش داد.

۵-۲-۵ نقش مواد افزودنی پودری معدنی در تعیین سهم سنگدانه‌های بتن:

چنانچه هدف از ریزبافت کردن محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مطلوب، کاهش آب انداختن و استعداد جداشدگی و ایجاد چسبندگی کافی باشد، می‌توان در این مورد تعدیل به عمل آورد و سهم سنگدانه ریز را به مقدار جزئی کاهش و سهم سنگدانه درشت را افزایش داد. بهرحال این کار الزامی نیست.

بخش ششم

ساخت مخلوط آزمایشی و اصلاح طرح مخلوط بتن

٦-١ مقدمه

با توجه به اینکه در طرح مخلوط اولیه، فرض‌ها یا روابط و منحنی‌هایی بکار رفته که جنبه تقریبی و تجربی داشته است (بجز روابط ۴-۱ تا ۴-۵)، مشخص نیست که آیا می‌توان پس از ساخت دقیق بتن در آزمایشگاه، به خواسته‌های مورد نظر (مقاومت هدف، کارآیی هدف، دوام هدف و غیره) دست یافت؟ بنابراین لازم است این مخلوط در آزمایشگاه ساخته شود (مخلوط آزمایشی یا مخلوط آزمون آزمایشگاهی[۱])، و ویژگی‌های بتن تازه یا سخت شده، اندازه‌گیری گردد، و با خواسته‌های مورد نظر یا فرض‌های موجود در تهیه طرح مخلوط اولیه مقایسه شود، و پس از حک و اصلاح (تعدیل)و ایجاد تغییرات مقتضی در طرح مخلوط اولیه، طرح مخلوط نهایی بدست آید.

٦-٢ ساخت مخلوط آزمون آزمایشگاهی

برای ساخت مخلوط آزمون آزمایشگاهی، می‌توان از مقادیر آب کل و سنگدانه‌های کاملاً خشک که از رابطه (۴-۴) و (۴-۵) بدست آمده بود استفاده نمود. پس از تعیین رطوبت موجود در سنگدانه‌ها لازم است مقدار جرم سنگدانه با رطوبت موجود بدست آید (طبق رابطه ۶-۱). سپس مقدار آب مصرفی برای ساخت مخلوط، با کسر نمودن آب موجود در سنگدانه مرطوب از آب کل، طبق رابطه (۶ -۲)، محاسبه شود.

---

[۱] - Trial Mix or Labratory trial Mix

رابطه (۶-۱) $A=A_d\ (1+m)$

که در آن:

A = جرم سنگدانه مرطوب بر حسب kg/m^3 با رطوبت m (بصورت اعشاری) است

رابطه (۶-۲) $W_m=W_t-(A-A_d)$

که در آن:

W_m = جرم آب مصرفی برای ساخت بتن می‌باشد

هر چند می‌توان رابطه ۵-۲ را با توجه به رابطه (۴-۵) بصورت رابطه (۶-۳) نیز نوشت.

رابطه (۶-۳) $W_m= W_f+(A_{SSD}-A_d)-(A-A_d)=W_f+(A_{SSD}-A)$

هم‌چنین می‌توان از همان مقادیر سنگدانه اشباع با سطح خشک و آب آزاد استفاده نمود و با تعیین رطوبت موجود در سنگدانه و داشتن ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها بطور مستقیم طبق رابطه (۶-۴) مقدار سنگدانه مرطوب را بدست آورد، که رابطه مزبور همان روابط ترکیب شده (۶-۱) و (۴-۴) می‌باشد..

رابطه (٦-٤) $A=\dfrac{A_{SSD}\ (1+m)}{1+a_c}$

بدیهی است رابطه (۶-۳) برای تعیین مقدار آب مصرفی به قوت خود باقی است و قابل استفاده می‌باشد.

برخی ترجیح می‌دهند که برای ساخت مخلوط آزمون، همه سنگدانه‌ها را کاملاً خشک کنند و آب کل را به عنوان آب مصرفی در ساخت مخلوط بکار برند. برخی دیگر مایلند که همه سنگدانه‌ها را بصورت اشباع با سطح خشک درآورند وآب آزاد را برای ساخت مخلوط به عنوان آب مصرفی بکار گیرند. بهرحال به دلایل مختلف، این شیوه‌ها برای ساخت مخلوط آزمون توصیه نمی‌گردد و بهتر است حتی‌الامکان، بتن با سنگدانه‌های مرطوب موجود ساخته شود.

با توجه به مقادیر فوق و مقادیر سیمان و افزودنی در هر متر مکعب بتن و حجم بتن لازم برای ساخت مخلوط آزمون، بر اساس امکانات آزمایشگاهی و تعداد آزمایش‌ها و نمونه‌های (آزمونه‌های) مورد نیاز، باید مقادیر اجزای بتن را برای ساخت مخلوط آزمون بدست آورد. سپس طبق استاندارد ملی ۵۸۱ یا ۱۹۲ ASTM C باید بتن در آزمایشگاه ساخته شود و آزمایش‌های لازم برای تعیین خواص و ویژگی‌های آن انجام گردد.

٦-٣ انجام آزمایش‌های لازم بر روی مخلوط آزمون در آزمایشگاه

آزمایش‌های مختلفی ممکن است مورد نیاز باشد که عبارتند از:

- تعیین روانی بتن در فاصله زمانی ۵ دقیقه پس از ساخت و در فواصل زمانی دیگر بویژه فاصله زمانی ساخت تا هنگام ریختن و یا انجام سایر آزمایش‌های کارآیی
- تعیین جرم مخصوص (جرم یک متر مکعب بتن متراکم تازه)
- تعیین درصد هوای کل بتن
- تعیین شاخص‌های جداشدگی یا ذکر مشاهدات چشمی
- تعیین مقدار یا نرخ آب انداختن بتن یا ذکر مشاهدات چشمی
- تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی در صورت لزوم
- قالب‌گیری بتن و نگهداری در شرایط استاندارد عمل‌آوری در آزمایشگاه
- تعیین مقاومت فشاری بتن در سنین دلخواه بویژه در سن مربوط به مقاومت مشخصه
- تعیین سایر مقاومت‌ها و مشخصات مکانیکی بتن (خمشی، کششی و ضریب ارتجاعی و غیره) در سنین دلخواه بویژه در سن مقاومت مشخصه در صورت نیاز
- در صورت نیاز، تعیین ویژگی‌های مرتبط با دوام یا انجام آزمایش‌های دوام در سنین دلخواه بویژه در سن مقاومت مشخصه (مانند جذب آب نیم ساعته، جذب آب نهایی، جذب آب موئینه، جذب آب سطحی، سایش، یخزدن و آب شدن، پوسته شدگی ناشی از یخ زدن و آب شدن در مجاورت نمک‌های یخزدا، نفوذپذیری در برابر آب، عمق نفوذ آب، نفوذپذیری در برابر هوا یا گازها، کربناته شدن، انتشار یون کلرید، مقاومت یا هدایت ویژه الکتریکی، مقاومت در برابر نفوذ سریع یون کلرید (RCPT)، مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT)، مقابله با تهاجم سولفات‌ها، مقابله با حمله اسیدها، تبلور نمک‌ها، خوردگی میلگردها، مقابله با آتش).

- تعیین مقادیر تغییر حجم یا طول (جمع‌شدگی و انبساط) در حالت خمیری یا سخت شده در شرایط و سن مورد نظر در صورت لزوم.

٤-٦ اصلاح (تعدیل)طرح مخلوط اولیه[1]

پس از انجام آزمایش‌های لازم، تفاوت نتایج حاصله با خواسته‌های مورد نظر مشخص می‌شود. بهرحال باید تغییرات و اصلاحاتی را در طرح مخلوط اولیه اعمال نمود تا به خواسته‌های پروژه دست یابیم.

از آنجا که نتایج آزمایش‌های بتن تازه، در زمان کوتاهی پس از ساخت مخلوط آزمون بدست می‌آید اصلاح این موارد در همان روز ممکن می‌گردد، اما اصلاح طرح از نقطه‌نظر ویژگی‌های بتن سخت شده مدتها بطول می‌انجامد. بنابراین سعی می‌شود حداقل سه طرح مخلوط متفاوت بویژه از نظر نسبت آب به سیمان و یا مقدار افزودنی‌های پودری معدنی جایگزین سیمان ساخته شود تا پس از انجام آزمایش‌های مقاومتی یا دوام در موعد مقرر بتوان طرح مناسبی را در اختیار داشت. هرچند ممکن است این طرح نیازمند اصلاحات جزئی نیز باشد.

برای اصلاح روانی بتن، مقدار آب آزاد را در جهت مناسب بر اساس تجربه یا با استفاده از منحنی‌های مقدار آب آزاد و واسنجی آن‌ها می‌توان بدست آورد. بهرحال خطای ۲۰ ± درصد در روانی هدف را می‌توان نادیده گرفت.

برای اصلاح سایر خواص بتن تازه نیز باید اقدامات مقتضی را بعمل آورد.

در صورت وجود خطای بیش از ۱ درصد در وزن مخصوص بتن تازه، باید دلیل اختلاف را بدست آورد. خطای زیاد در تعیین چگالی و جذب آب ذرات سنگدانه، تفاوت بیش از ۱ درصد در مقدار هوای بتن و یا خطای زیاد در ساخت مخلوط آزمون و یا اشتباه در محاسبات طرح مخلوط اولیه بتن، می‌تواند دلیل مهمی برای این اختلاف باشد.

برای اصلاح طرح اولیه در ارتباط با مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان را باید در جهت مناسب بر اساس تجربه یا با استفاده از منحنی‌های نسبت آب به سیمان – مقاومت و واسنجی آن‌ها تغییر داد. بهرحال خطای ۵ ± درصد در دستیابی به مقاومت هدف طرح مخلوط بتن قابل صرفنظر

---

[1] - Adjustment of Initial Mix Design

کردن است. در مواردی که دوام بتن، تعیین کننده نسبت اب به سیمان طرح مخلوط باشد، بطور طبیعی مقاومت‌ها ممکن است به مراتب بالاتر از مقاومت هدف طرح باشد و نیازی به تغییر نسبت آب به سیمان وجود ندارد.

٦-٥ ارائه طرح مخلوط نهایی بتن

ارائه طرح مخلوط بتن باید شامل موارد زیر باشد:

- نام پروژه، نوع قطعات و محل آن در سازه و نوع بتن درخواستی
- مقاومت مشخصه بتن و سن آن و ذکر شکل و ابعاد آزمونه‌ها
- مقاومت هدف طرح مخلوط بتن
- محدودیت‌های نسبت آب به سیمان و عیار سیمان و شرایط رویارویی بتن با محیط و عوامل زیان‌آور
- روانی مورد نیاز در پای کار و روانی لازم در هنگام ساخت بتن در کارگاه
- سایر ویژگی‌های مورد نیاز در بتن تازه و سخت شده
- نسبت آب به سیمان طرح
- عیار سیمان یا مواد سیمانی طرح
- آب آزاد و آب کل
- مقادیر سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک و کاملاً خشک به تفکیک
- مقادیر افزودنی
- محل تأمین اجزای بتن و ذکر نوع آن‌ها (سیمان، آب، سنگدانه‌ها و افزودنی) به همراه ارائه مشخصات آن‌ها(بویژه در مورد سنگدانه‌ها، دانه‌بندی، چگالی و جذب آب، شکل و درصد شکستگی و غیره)
- جرم یک متر مکعب بتن تازه متراکم محاسباتی با ذکر درصد هوای مفروض (اعم از خواسته یا ناخواسته)
- دانه بندی مخلوط سنگدانه‌ها
- روانی بدست آمده پس از ساخت و در فواصل زمانی مختلف پس از آن
- مقاومت فشاری حاصله در سنین مورد نظر با ذکر شکل و ابعاد آزمونه‌ها
- درصد هوای بدست آمده (بویژه برای بتن حبابدار)

- وزن مخصوص بتن متراکم تازه بر اساس اندازه‌گیری آزمایشگاهی
- تشریح ظاهری بتن
- نتایج اندازه‌گیری سایر ویژگی‌های مورد نیاز در بتن تازه یا سخت شده
- دمای بتن ساخته شده

Building and HousingResearchCenter

The National Method for Concrete Mix Design

BHRC Publication No.S-٤٧٩
٢٠٠٨