

طرح اختلاط بتن معمولی به روش ACI 211

مثال:

در یک کار بتنی، مقاومت ۲۸ روزه استوانه ای ($f'c$) برابر با ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و اسلامپ ۸ تا ۱۰ سانتیمتر مورد نیاز است. دانه های شنی مورد استفاده، دارای بزرگترین بعد حدود ۴۰ میلیمتر و وزن مخصوص ظاهری خشک و میله خورده ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. سیمان مصرفی مورد استفاده، سیمان پرتلند معمولی تیپ I است.

رطوبت طبیعی دانه های شنی و ماسه ای مورد استفاده به ترتیب برابر با ۲٪ و ۶٪ و مدول نرمی ماسه برابر با ۲/۸ اندازه گیری شده اند. با استفاده از روش وزنی و حجمی $ACI - 211$ ، طرح مخلوط بتن را ارائه دهید.

حل:

لازم است مراحل نه گانه به ترتیب زیر انجام گیرند.

مرحله اول - تعیین اسلامپ:

بر اساس صورت مسأله: $Slump = 8 \sim 10 \text{ cm}$

مرحله دوم - انتخاب بزرگترین اندازه دانه ها:

بر اساس صورت مسأله: $D_{max} = 40 \text{ mm}$

مرحله سوم - تخمین مقدار آب و هوا:

با توجه به اینکه شرایط محیطی نامناسبی در صورت مسأله پیش بینی نشده، می توان از بتن بدون هوا استفاده کرد. با استفاده از جدول (۲) و با درون یابی:

$$W = 181 - \frac{40 - 37.5}{50 - 37.5} (181 - 169) \cong 179 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 1\%$$

مرحله چهارم - انتخاب نسبت آب به سیمان:

با استفاده از جدول (۳):

$$W/C = 0.61$$

مرحله پنجم - محاسبه مقدار سیمان:

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{179}{0.61} = 293 \text{ kg/m}^3$$

مرحله ششم - تخمین مقدار دانه های درشت:

با استفاده از جدول (۵) و با درون یابی:

$$\text{حجم ظاهری شن در واحد حجم بتن} = 0.71 + ((40 - 37.5)/(50 - 37.5))(0.74 - 0.71) \cong 0.72$$

$$CA = 0.72 * 1600 = 1152 \text{ kg/m}^3$$

مرحله هفتم - تعیین مقدار دانه های ریز:

تا این مرحله نتایج حاصله برای روش وزنی و روش حجمی ACI یکسان بود. از این مرحله به بعد هر یک از دو روش به صورت جداگانه دنبال خواهد شد. البته در یک طرح عملی، به کار بردن یکی از دو روش وزنی یا حجمی کافی است.

الف - بر اساس روش وزنی:

در این روش اساس کار بر این اصل استوار است که جمع وزن کلیه اجزاء بتن در یک متر مکعب باید برابر با وزن مخصوص بتن تازه شود. بنابراین اگر اوزان شن، سیمان و آب در یک متر مکعب از وزن مخصوص بتن تازه کم شود، وزن ماسه در یک متر مکعب بدست خواهد آمد. یعنی:

$$FA = U - CA - W - C$$

که C، W و CA به ترتیب، اوزان سیمان، آب و شن در یک متر مکعب بتن هستند که در مراحل قبلی بدست آمده اند. همچنین U معرف وزن مخصوص بتن تازه است.

برای بدست آوردن وزن مخصوص بتن تازه، از تجربه (جدول ۶ که البته چندان دقیق نیست)، و یا با رابطه زیر (توصیه می شود) استفاده می گردد:

$$U = 10G_a(100 - A) + C \left(1 - \frac{G_a}{G_c}\right) - W(G_a - 1)$$

$$G_a = \frac{1}{2}(G_{CA} + G_{FA}) = \frac{1}{2}(2.68 + 2.64) = 2.66$$

$$U = 10 * 2.66(100 - 1) + 293 \left(1 - \frac{2.66}{3.15}\right) - 179(2.66 - 1) = 2382 \text{ kg/m}^3$$

(در صورت عدم انجام آزمایش بر روی مصالح مصرفی در بتن، چگالی شن، ماسه و سیمان به صورت تجربی به ترتیب برابر با ۲/۶۸، ۲/۶۴ و ۳/۱۵ در نظر گرفته می شود.)

اکنون برای محاسبه ماسه که آخرین پارامتر باقی مانده است، با اعمال رابطه وزنی در حجم واحد بتن داریم:

$$FA = U - CA - W - C$$

$$FA = 2382 - 1152 - 179 - 293 = 758 \text{ kg/m}^3$$

ب- بر اساس روش حجمی:

با ساده کردن فرمول محاسبه وزن ماسه در روش وزنی داریم:

$$FA = 10G_{FA}(100 - A) - G_{FA} \left(\frac{CA}{G_{CA}} + \frac{C}{G_C} + W\right)$$

$$FA = 10 * 2.64(100 - 1) - 2.64 \left(\frac{1152}{2.68} + \frac{293}{3.15} + 179\right) = 761 \text{ kg/m}^3$$

مؤلفه های رابطه فوق عبارتند از:

FA = وزن ماسه لازم بر حسب کیلوگرم در یک مترمکعب از بتن.

A = درصد هوای تقریبی غیر عمودی در بتن بدون حباب هوا.

G_{FA} = چگالی ماسه مصرفی در بتن.

G_{CA} = چگالی شن مصرفی در بتن.

G_C = چگالی سیمان مصرفی در بتن.

مرحله هشتم - تصحیح به جهت رطوبت دانه ها:

الف- بر اساس روش وزنی:

- تصحیح وزن دانه ها:

$$CA_W = CA(1 + \omega_{CA}) = 1152(1 + 0.02) = 1175 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = FA(1 + \omega_{FA}) = 758(1 + 0.06) = 803 \text{ kg/m}^3$$

- تصحیح وزن آب:

$$W_{\text{(اصلاح شده)}} = W_{\text{(قبلی)}} - [CA(\omega_{CA} - \omega_{SSD,CA}) + FA(\omega_{FA} - \omega_{SSD,FA})]$$

$$W_{\text{(اصلاح شده)}} = 179 - [1152(0.02 - 0.005) + 758(0.06 - 0.007)] = 122 \text{ kg/m}^3$$

در صورت عدم انجام آزمایش روی مصالح، رطوبت SSD دانه های شری ۰/۵ درصد، و دانه های ماسه ای برابر ۰/۷ درصد در نظر گرفته می شود. ($\omega_{SSD,CA} = 0.005$ و $\omega_{SSD,FA} = 0.007$)

الف- بر اساس روش حجمی:

$$CA_W = CA(1 + \omega_{CA}) = 1152(1 + 0.02) = 1175 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = FA(1 + \omega_{FA}) = 761(1 + 0.06) = 807 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{(اصلاح شده)}} = 179 - [1152(0.02 - 0.005) + 761(0.06 - 0.007)] = 121 \text{ kg/m}^3$$

مرحله نهم - ساخت نمونه آزمایشی و انجام تصحیحات لازم:

الف- بر اساس روش وزنی:

معمولاً ساخت نمونه ای در حدود ۲۰ لیتر برای انجام کلیه آزمایش ها کافی است. برای ساخت این نمونه، لازم است مقادیر زیر را جدا کنیم.

$$\text{وزن شن لازم} = 0.02 * 1175 = 23.50 \text{ kg}$$

$$\text{وزن ماسه لازم} = 0.02 * 803 = 16.10 \text{ kg}$$

$$\text{وزن سیمان لازم} = 0.02 * 293 = 5.90 \text{ kg}$$

$$\text{مقدار آب لازم} = 0.02 * 122 = 2.40 \text{ kg}$$

برای ساخت نمونه، اوزان شن، ماسه و سیمان را دقیقاً رعایت کرده ولی مقدار آب را به صورت حدودی رعایت می کنیم. یعنی در اینجا میزان دقیق آب بر اساس کنترل چشمی اسلامپ تعیین می شود. (اگر برای کنترل اسلامپ تجربه نداشته باشیم، می توان مقدار محاسبه شده آب را نیز دقیقاً رعایت کرد. طبیعتاً در این حالت خطای حل مسأله بیشتر خواهد شد).

فرض کنیم که در شرایط آزمایشگاهی با اضافه کردن ۲/۴ کیلوگرم آب احساس شده که اسلامپ در محدوده ۸ الی ۱۰ سانتیمتر نیست. بنابراین به اضافه کردن آب ادامه داده ایم تا اینکه در مجموع ۲/۷ کیلوگرم آب مورد مصرف قرار گرفت. حال باید روی نمونه آزمایشات لازم انجام گیرد. چون بتن بدون هواست، فقط آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص انجام می شود. فرض کنید که نتایج حاصله از آزمایش روی نمونه به صورت زیر باشد:

$$Slump = 5 \text{ cm}$$

$$U = 2390 \text{ kg/m}^3$$

از آن جهت که اسلامپ بدست آمده کمتر از اسلامپ مورد نظر (به طور متوسط ۹ سانتیمتر) بوده است، به ازای هر یک سانتیمتر اختلاف اسلامپ، باید مقدار آب لازم در بتن را به میزان 2 kg/m^3 افزایش داد.

$$W = 2.70 + \frac{23.50}{1.02} (0.02 - 0.005) + \frac{16.10}{1.06} (0.06 - 0.007) = 3.85 \text{ kg}$$

(مفهوم محاسبه فوق این است که اگرچه به صورت دستی ۲/۷ کیلوگرم آب به نمونه اضافه کرده ایم، ولی در واقع به دلیل رطوبت اضافی دانه ها، مقدار ۳/۸۵ کیلوگرم آب داشته ایم.)

$$\text{وزن نمونه} = 23.50 + 16.10 + 5.90 + 2.70 = 48.20 \text{ kg}$$

$$\text{حجم دقیق نمونه} = 48.20 / 2390 = 0.02017 \text{ m}^3$$

آب لازم برای ساخت ۱ مترمکعب بتنی که کاملاً مشابه نمونه باشد، برابر است با:

$$W = 3.85 / 0.02017 = 191 \text{ kg/m}^3$$

- اصلاح آب به جهت اسلامپ (اضافه نمودن ۲ کیلوگرم آب به ازای هر سانتیمتر کسری اسلامپ):

$$W = 191 + 4 * 2 = 199 \text{ kg/m}^3$$

(دقت شود که عدد ۱۹۹ به جای عدد ۱۷۹ که در ابتدای حل مسأله از جدول استخراج کردیم، قرار گرفته است)

- محاسبه مقدار سیمان:

$$C = 199/0.61 = 326 \text{ kg/m}^3$$

- محاسبه مقدار شن:

شن لازم برای ساخت ۱ مترمکعب بتنی که کاملاً مشابه نمونه باشد، برابر است با:

$$CA_W = 23.50/0.02017 = 1165 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_d = 1165/1.02 = 1142 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_{SSD} = 1142 (1 + 0.005) = 1148 \text{ kg/m}^3$$

- محاسبه مقدار ماسه:

وزن کلیه اجزاء در یک مترمکعب از بتن باید برابر وزن مخصوص بتن تازه گردد. بنابراین:

$$FA_{SSD} = 2390 - (199 + 326 + 1148) = 717 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_d = 717/1.007 = 712 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = 712(1 + 0.06) = 755 \text{ kg/m}^3$$

- تصحیح مقدار آب به جهت رطوبت دانه ها:

$$W_{\text{(اصلاح شده)}} = 199 - [1142(0.02 - 0.005) + 712(0.06 - 0.007)] = 144 \text{ kg/m}^3$$

- مقادیر نهایی اجزاء بتن:

$$C = 326 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_W = 1165 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = 755 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 144 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{TOTAL: } U = 2390 \text{ kg/m}^3$$

ب- بر اساس روش حجمی:

برای ساخت نمونه ۲۰ لیتری، به اجزاء زیر نیاز داریم:

$$\text{وزن شن لازم} = 0.02 * 1175 = 23.50 \text{ kg}$$

$$\text{وزن ماسه لازم} = 0.02 * 807 = 16.10 \text{ kg}$$

$$\text{وزن سیمان لازم} = 0.02 * 293 = 5.90 \text{ kg}$$

$$\text{مقدار آب لازم} = 0.02 * 121 = 2.40 \text{ kg}$$

مجدداً فرض می کنیم که در ساخت نمونه مقادیر شن، ماسه و سیمان را کاملاً رعایت کرده ولی آب را با کنترل چشمی اسلامپ، به میزان ۲/۷ کیلوگرم مصرف کرده ایم. فرض می کنیم در این قسمت نیز پس از انجام آزمایش، اسلامپ ۵ سانتیمتر و وزن مخصوص ۲۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده باشد. با عملیاتی مشابه با روش وزنی خواهیم داشت:

$$3.85 \text{ kg} = \text{آب موجود در نمونه آزمایشی}$$

$$0.02017 \text{ m}^3 = \text{حجم دقیق نمونه}$$

$$W = (3.85/0.02017) + 4 * 2 = 199 \text{ kg}$$

$$C = 199/0.61 = 326 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_W = 23.50/0.02017 = 1165 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_d = 1165/1.02 = 1142 \text{ kg/m}^3$$

برای محاسبه وزن ماسه به روش حجمی، ابتدا بررسی می کنیم که چه حجمی از نمونه به هوا اختصاص یافته است.

$$\text{وزن شن خشک در نمونه} = 23.50/1.02 = 23.04 \text{ kg}$$

$$\text{وزن ماسه خشک در نمونه} = 16.10/1.06 = 15.19 \text{ kg}$$

$$\text{حجم هوادر نمونه} = 0.02017 - \left(\frac{23.04}{2.68*1000} + \frac{15.19}{2.64*1000} + \frac{5.90}{3.15*1000} + \frac{3.85}{1000} \right) = 9.62 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$A = [(9.62 * 10^{-5})/0.02017] * 100 = 0.5\%$$

حال با نوشتن رابطه حجمی در یک مترمکعب بتن خواهیم داشت:

$$FA_d = 10G_{FA}(100 - A) - G_{FA}\left(\frac{CA}{G_{CA}} + \frac{C}{G_C} + W\right)$$

$$FA_d = 10 * 2.64(100 - 0.5) - 2.64\left(\frac{1142}{2.68} + \frac{326}{3.15} + 199\right) = 703 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = 703(1 + 0.06) = 745 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{(اصلاح شده)}} = 199 - [1142(0.02 - 0.005) + 703(0.06 - 0.007)] = 145 \text{ kg/m}^3$$

- مقادیر نهایی اجزاء بتن:

$$C = 326 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_W = 1165 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_W = 745 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 145 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{TOTAL: } U = 2381 \text{ kg/m}^3$$

واضح است که چون به روش حجمی عمل کرده ایم ، جمع این اجزاء لزوماً برابر با وزن مخصوص بتن تازه نخواهد بود.

جدول ۱- اسلامپ های پیشنهادی برای سازه های مختلف (ACI - 211 - 89)

اسلامپ (میلیمتر)		نوع سازه
حداقل	حداکثر	
۲۵	۷۵	پی ها و شالوده دیوارهای بتن آرمه
۲۵	۷۵	پی ها و دیوارهای غیر مسلح
۲۵	۱۰۰	تیرها و دیوارهای بتن آرمه
۲۵	۱۰۰	ستون های سازه
۲۵	۷۵	روسازی ها و دال ها
۲۵	۷۵	بتن حجیم

جدول ۲- مقادیر تقریبی آب و هوا بر اساس اسلامپ و بزرگترین بعد دانه ها (ACI - 211 - 89)

مقدار تقریبی آب بر حسب kg/m^3 بر اساس بزرگترین بعد دانه ها								اسلامپ (میلیمتر)
۱۵۰	۷۵	۵۰	۳۷/۵	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	
بتن بدون حباب هوا								
۱۱۳	۱۳۰	۱۵۴	۱۶۶	۱۷۹	۱۹۰	۱۹۹	۲۰۷	۲۵ - ۵۰
۱۲۴	۱۴۵	۱۶۹	۱۸۱	۱۹۳	۲۰۵	۲۱۶	۲۲۸	۷۵ - ۱۰۰
-	۱۶۰	۱۷۸	۱۹۰	۲۰۲	۲۱۶	۲۲۸	۲۴۳	۱۵۰ - ۱۷۵
۰/۲	۰/۳	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	درصد تقریبی هوای غیر عمدی در بتن بدون حباب هوا
بتن هوادار								
۱۰۷	۱۲۲	۱۴۲	۱۵۰	۱۶۰	۱۶۸	۱۷۵	۱۸۱	۲۵ - ۵۰
۱۱۹	۱۳۳	۱۵۷	۱۶۵	۱۷۵	۱۸۴	۱۹۳	۲۰۲	۷۵ - ۱۰۰
-	۱۵۴	۱۶۶	۱۷۴	۱۸۴	۱۹۷	۲۰۵	۲۱۶	۱۵۰ - ۱۷۵
مقادیر متوسط درصد هوای پیشنهادی بر اساس شرایط محیطی:								
۱/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۳/۰	۳/۵	۴/۰	۴/۵	شرایط عادی
۳/۰	۳/۵	۴/۰	۴/۵	۴/۵	۵/۰	۵/۵	۶/۰	شرایط متوسط
۴/۰	۴/۵	۵/۰	۵/۵	۶/۰	۶/۰	۷/۰	۷/۵	شرایط شدید

جدول ۳- نسبت آب به سیمان بر اساس مقاومت فشاری بتن (89 - 211 - ACI)

نسبت آب به سیمان		مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسگال)
بتن هوادار	بتن بدون حباب هوا	
---	۰/۴۲	۴۰
۰/۳۹	۰/۴۷	۳۵
۰/۴۵	۰/۵۴	۳۰
۰/۵۲	۰/۶۱	۲۵
۰/۶۰	۰/۶۹	۲۰
۰/۷۰	۰/۷۹	۱۵

جدول ۴- حداکثر نسبت مجاز آب به سیمان در شرایط محیطی نامناسب (89 - 211 - ACI)

سازه های در معرض آب دریا و یا سولفات ها	سازه هایی که به طور پیوسته یا متناوب مرطوبند و تحت اثر سیکل های یخ زدن و آب شدن قرار دارند.	نوع سازه
۰/۴۰	۰/۴۵	مقاطع ظریف (نظیر نرده ها، جان پناه ها، تیرچه ها و کارهای تزئینی) و مقاطعی با پوشش کمتر از ۵ میلیمتر روی آرماتورها
۰/۴۵	۰/۵۰	سایر سازه ها

جدول ۵- حجم دانه های درشت در واحد حجم بتن (89 - 211 - ACI)

حجم دانه های خشک میله خورده در واحد حجم بر اساس مقادیر مختلف مدول نرمی ماسه				بزرگترین اندازه اسمی دانه ها (میلیمتر)
۳/۰۰	۲/۸۰	۲/۶۰	۲/۴۰	
۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۰	۹/۵
۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۹	۱۲/۵
۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۶	۱۹
۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷۱	۲۵
۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۵	۳۷/۵
۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۸	۵۰
۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۸۲	۷۵
۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۱۵۰

جدول ۶- تخمین مقدماتی برای وزن مخصوص بتن تازه (89 - 211 - ACI)

تخمین مقدماتی برای وزن واحد حجم بتن kg/m^3		بزرگترین اندازه اسمی دانه ها (میلیمتر)
بتن هوادار	بتن بدون حباب هوا	
۲۲۰۰	۲۲۸۰	۹/۵
۲۲۳۰	۲۳۱۰	۱۲/۵
۲۲۷۵	۲۳۴۵	۱۹
۲۲۹۰	۲۳۸۰	۲۵
۲۳۵۰	۲۴۱۰	۳۷/۵
۲۳۴۵	۲۴۴۵	۵۰
۲۴۰۵	۲۴۹۰	۷۵
۲۴۳۵	۲۵۳۰	۱۵۰

جدول ۷- مخلوط های بتنی برای کارگاه های کوچک (پیشنهادی ACI - 211)

اوزان تقریبی اجزاء جامد kg/m^3					طرح مخلوط	بزرگترین بعد دانه ها (میلیمتر)
شن		ماسه		سیمان		
دانه های سرباره ای	دانه های شنی با سنگ شکسته	بتن بدون هوا	بتن هوادار			
۷۵۰	۸۶۰	۸۲۰	۷۷۰	۴۰۰	A	۱۲/۵
۷۸۰	۹۰۰	۷۸۰	۷۴۰	۴۰۰	B	
۸۲۰	۹۳۰	۷۵۰	۷۰۰	۴۰۰	C	
۸۹۰	۹۹۰	۷۸۰	۷۲۰	۳۷۰	A	۲۰
۹۰۰	۱۰۲۰	۷۵۰	۶۹۰	۳۷۰	B	
۹۳۰	۱۰۶۰	۷۲۰	۶۶۰	۳۷۰	C	
۹۸۰	۱۱۲۰	۷۲۰	۶۶۰	۳۵۰	A	۲۵
۱۰۱۰	۱۱۵۰	۶۹۰	۶۲۰	۳۵۰	B	
۱۰۴۰	۱۱۸۰	۶۶۰	۵۹۰	۳۵۰	C	
۱۰۴۰	۱۲۰۰	۷۲۰	۶۶۰	۳۲۰	A	۴۰
۱۰۷۰	۱۲۳۰	۶۹۰	۶۲۰	۳۲۰	B	
۱۱۰۰	۱۲۶۰	۶۶۰	۵۹۰	۳۲۰	C	
۱۱۰۰	۱۲۶۰	۷۲۰	۶۴۰	۳۰۰	A	۵۰
۱۱۴۰	۱۳۰۰	۶۹۰	۶۱۰	۳۰۰	B	
۱۱۵۰	۱۳۳۰	۶۶۰	۵۸۰	۳۰۰	C	