

## مروری بر روش های مختلف طرح اختلاط روسازی های بتن غلتکی

رضا مهرعلیزاده<sup>۱</sup>، مهدی چینی<sup>۲</sup>، محمد شکرچی زاده<sup>۲</sup>، مجتبی کهندل نیا<sup>۱</sup>، شادی  
آزاد<sup>۱</sup> و بهار بیهقی<sup>۱</sup>، رضا بنی اردلان<sup>۲</sup>

(۱) کارشناس انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و دانشجوی کارشناسی دانشگاه تهران

(۲) کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

(۳) عضو هیئت علمی گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه تهران و سرپرست انستیتو

### چکیده :

روشهای متعددی برای تعیین نسبت های اختلاط بتن غلتکی (RCCP) توسط سازمان ها و کمیته های بتن ارائه شده است. این روش ها عموماً تجربی، نیمه تجربی و براساس روش های تئوری می باشد. اگرچه، عموماً در روش های مختلف طرح نسبت اختلاط، از دو رویکرد تراکم خاک و رویکرد روانی (کارایی) استفاده می شود. این دو رویکرد به ترتیب براساس بهینه سازی چگالی خشک نمونه بواسطه رطوبت بهینه و طرح اختلاط بواسطه حجم مطلق تعریف شده اند. در این مقاله به بررسی روش های مختلف ارائه شده جهت تعیین نسبت های اختلاط بتن غلتکی پرداخته شده است که عبارتند از: روش طرح اختلاط PCA (راهنمای بتن غلتکی روسازی<sup>۱</sup>)، ACI (گزارش بتن غلتکی روسازی<sup>۲</sup>)، روش خمیر بهینه و روش اجسام معلق. روش تراکم خاک PCA بصورت گسترده ای برای طرح نسبت اختلاط روسازی های بتن غلتکی مورد استفاده قرار میگیرد. در این راستا، در این مقاله روش تراکم خاک PCA به عنوان روش اصلی انتخاب شده است و روشهای دیگر به جزئیات با روش PCA مقایسه شده اند.

واژگان کلیدی : بتن غلتکی - طرح اختلاط - روسازی - PCA - ACI

<sup>1</sup> Guide For Roller-Compacted Concrete Pavements

<sup>2</sup> Report on Roller-Compacted Concrete Pavements

## ۱- مقدمه :

در دهه های اخیر استفاده از بتن غلتکی در صنعت سازه های بتنی بیش از پیش شده است. در حیطه سازه های مهندسی، بتن غلتکی در راستای صنعت سازه های «سد» و «روسازی راه» مورد استفاده قرار می گیرد. تعریف بتن غلتکی روسازی از نقطه نظر ACI 325.10R از قرار زیر می باشد: بتن غلتکی مخلوطی سفت از مجموعه سنگدانه ها (با حداکثر اندازه  $\frac{3}{4}$  اینچ (۱۹ میلیمتر))، مواد سیمانی و آب می باشد که با غلتک های ویریه ای متراکم می گردد و طی واکنش هیدراتاسیون تبدیل به بتن می شود (۱).

برای سازه های بتن غلتکی روش های متعددی برای طراحی نسبت اختلاط ارائه شده است. بنابراین، انتخاب یکی از این روش ها به عنوان یک روش استاندارد مشکل است :

1. Portland Cement Association (PCA 2010) – Guide For Roller-Compacted Concrete Pavements – National Concrete Pavement Technology Center – August 2010
2. American Concrete Institute (ACI) – ACI325.10R - Report on Roller-Compacted Concrete Pavements – 1995 (Reapproved 2001)
3. Corps of Engineers Method
4. High Paste Method
5. Solid Suspension Model (روش عددی)

در تمامی روش های فوق هدف از تولید طرح اختلاط بتن غلتکی، بدون توجه به روش استفاده شده این است که حجم خمیر کافی جهت پوشاندن سنگدانه ها را داشته باشد و فضای خالی بین آنها را نیز پر کند، مقاومت مکانیکی و مشخصات الاستیک مورد نظر را داشته باشد، مشخصات کارایی مورد نظر را داشته باشد تا به آسانی چگالی مورد نیاز بدست آید، و پایایی کافی داشته باشد تا در شرایط زیست محیطی موجود دوام آورد (۲). بنابراین، آگاهی کامل از روش های مختلف در طراحی طرح مخلوط های روسازی بتن غلتکی از اهمیت زیادی برخوردار است.

## ۲- مشخصات مهندسی بتن غلتکی :

مشخصات بتن غلتکی مشابه مشخصات روسازی بتنی معمولی (Conventional Pavement) می باشد، با این تفاوت که نسبت اختلاط بتن غلتکی و روش اجرای روسازی غلتکی متفاوت می باشد. مشخصات مهندسی ذکر شده برای بتن غلتکی، از آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های استوانه ای بدست آمده از پروژه های واقعی روسازی استخراج شده است.

آزمایش های مورد نیاز برای تعیین مشخصات مهندسی بتن غلتکی شامل موارد زیر می باشند :

- ASTM C1435 / C1435M : استاندارد ساخت نمونه های استوانه ای بتن غلتکی بوسیله ی چکش ویریه (۳)
- ASTM D1557 : آزمایش تعیین مشخصات آزمایشگاهی تراکم خاک به روش اصلاح شده (۵۶۰۰۰ ft-lbf/ft<sup>3</sup> (۲۷۰۰ kN/m<sup>3</sup>)) (۴)
- ASTM C39 / C39M : استاندارد تعیین مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای (۵)
- ASTM C42 / C42M : روش استاندارد ایجاد و آزمایش هسته و تیر های بتنی (۶)
- ASTM C1170 / C1170M : (آزمایش وبه) استاندارد تعیین روانی و چگالی بتن غلتکی با میز لرزه (۷)
- ASTM C78 : استاندارد آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن (با استفاده از تیر ساده و بارگذاری ۳ نقطه ای) (۸)

## ۲-۱- مقاومت فشاری و خمشی :

مقاومت بتن غلتکی به عواملی چون عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، کیفیت سنگدانه ها و درجه تراکم بتن بستگی دارد. عموماً، مقاومت فشاری و خمشی روسازی غلتکی می تواند در حد و حدود روسازی بتنی معمولی باشد.

## ۲-۱-۱- مقاومت فشاری :

مقاومت فشاری بتن غلتکی عموماً در محدوده ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ psi (۲۸ تا ۴۱ MPa) می باشد. در بعضی پروژه‌ها تا مقاومت های بیشتر از ۷۰۰۰ psi (۴۸ MPa) نیز بدست آمده است. استفاده از دانه‌بندی متراکم سنگدانه ها در طرح اختلاط بتن غلتکی نیز در کسب مقاومت فشاری تاثیر گذار است. نسبت آب به سیمان کم در طرح اختلاط بتن غلتکی باعث ایجاد ماتریس سیمان با تخلخل کم می شود که منجر به افزایش مقاومت فشاری می گردد. هر نسبت اختلاط دارای درصد رطوبت بهینه می باشد که در این درصد رطوبت بیشینه چگالی خشک بدست می آید. در قسمت ۴ مراحل تعیین نسبت اختلاط بر اساس مقاومت طراحی درج شده است (۲).

## ۲-۱-۲- مقاومت خمشی :

مقاومت خمشی رابطه مستقیمی با چگالی و مقاومت فشاری بتن دارد. در روسازی بتن غلتکی، با توجه به نسبت آب به سیمان کم، چگالی خمیر و چسبندگی آن با سنگدانه‌ها بالاست. در نتیجه، مقاومت خمشی بتن غلتکی عموماً بالاست و در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ psi (۳.۵ تا ۷ MPa) می باشد. رابطه بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن غلتکی بصورت زیر می باشد :

$$fr = C \sqrt{f_c} \quad (1)$$

که،

$f_r$ ، مقاومت خمشی (بارگذاری سه نقطه‌ای)، (MPa) psi

$f_c$ ، مقاومت فشاری، (MPa) psi

C، ضریب ثابت وابسته به اختلاط واقعی بتن غلتکی بین ۹ تا ۱۱ (برای psi) یا بین ۰.۷۴۷ تا ۰.۹۱۳ (برای MPa) (۲)

## ۳- انتخاب مصالح بتن غلتکی :

انتخاب صحیح مصالح در تولید بتن غلتکی بر روی کیفیت ترکیبات بتن غلتکی بسیار تاثیرگذار است. بنابراین، مشخصات مصالح مصرفی مورد استفاده در طرح مخلوط های بتن غلتکی در ذیل آمده است.

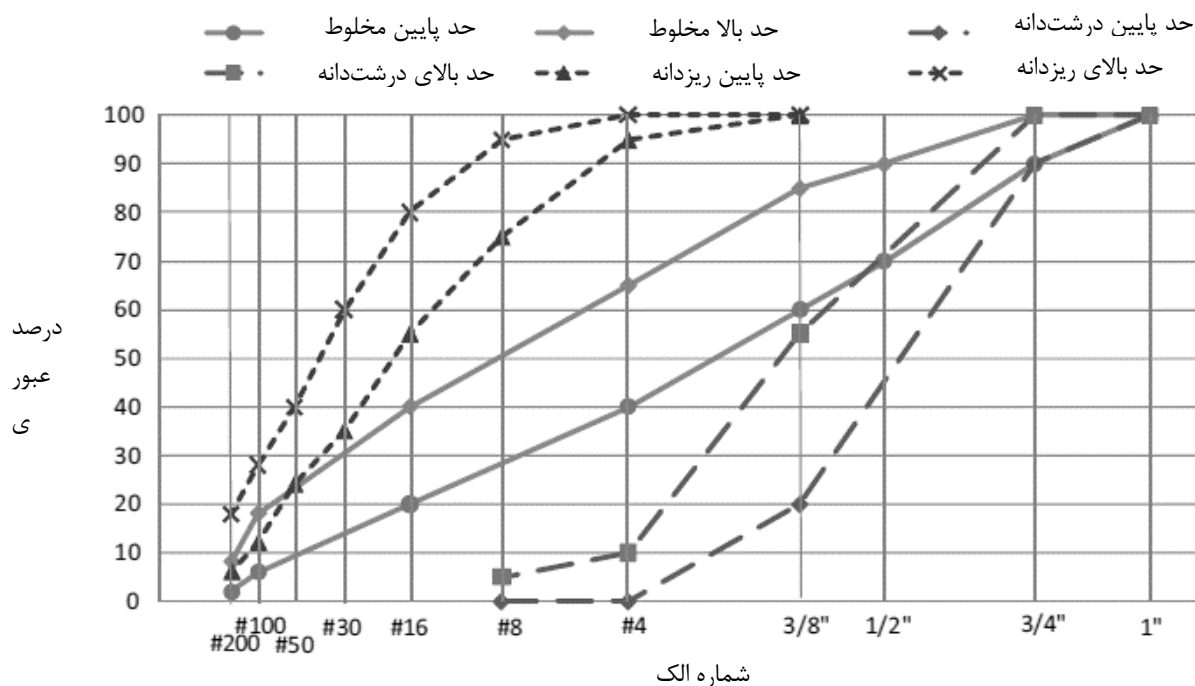
### ۳-۱- سنگدانه‌ها :

سنگدانه‌های معدنی حدود ۸۵٪ وزن بتن غلتی را تشکیل می دهند و نقش مهمی در کسب کارپذیری موردنظر، چگالی طراحی تحت تراکم و بهره‌ای، مقاومت خمشی و فشاری، مشخصات حرارتی، مشخصات بلند مدت و دوام ایفا می کند (۲).

سنگدانه های مصرفی در روسازی بتنی معمولی که نتایج مطلوبی به همراه داشته باشد می تواند در روسازی بتن غلتکی نیز مورد استفاده قرار گیرد. مشابه بتن معمولی، طی اجرای پروژه لازم است سنگدانه های منبع برای کیفیت و روانی مطلوب مورد ارزیابی قرار گیرند. منظور از روانی دانه بندی سنگدانه ها مشخصاتی از قبیل جذب آب، وزن مخصوص، شاخص خمیری، مقاومت سایشی، واکنش پذیری قلیایی-سیلیسی (ASR) و دوام می باشد (۲).

انتخاب صحیح سنگدانه‌ها و دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای روسازی بتن غلتکی احتمال جداسازی را کاهش می دهد و مقاومت و دوام روسازی را بهبود می بخشد. علاوه‌براین، انتخاب سنگدانه‌ها بر روی میزان آب و مواد سیمانی مورد نیاز تاثیر گذار می باشد (۲).

مخلوط سنگدانه با دانه بندی خوب و متراکم در بتن غلتکی مطلوب می باشد. در اکثر موارد ریزدانه ها و درشت‌دانه‌ها بصورت مخلوط تهیه می شود که دانه بندی مطلوب را داشته باشد. شکل ۱ دانه بندی مناسب برای ریزدانه‌ها، درشت‌دانه‌ها و مخلوط آنها را پیشنهاد می کند.



شکل ۱. دانه بندی توصیه شده

برای داشتن بتن غلتکی با کیفیت بالا، لازم است درشت دانه ها و ریز دانه ها محکم و مداوم باشند. لازم است برای ارزیابی کیفیت سنگدانه ها، آزمایش های لیست شده در استاندارد ASTM C33 برای ارزیابی مشخصات فیزیکی تمامی سنگدانه های مصرفی در طرح اختلاط بتن غلتکی صورت بگیرد (۲، ۹).

۳-۱-۱- درشت دانه ها :

برای طرح اختلاط بتن غلتکی، درشت دانه های مطابق با استاندارد ASTM C33 پیشنهاد می گردد (۲، ۹). جهت داشتن سطحی محکم و برای جلوگیری از جداشدگی، بیشترین بعد اسمی سنگدانه ها باید از ۳/۴ اینچ (۱۹ میلیمتر) کوچکتر باشد. معمولاً بیشترین بعد اسمی سنگ دانه ها بین محدوده ۵/۸ تا ۳/۴ اینچ (۱۶ تا ۱۹ میلیمتر) تغییر می کند. در صورت داشتن نسبت های اختلاط مناسب (با ریز دانه های کافی)، با NMSA بیش از ۳/۴ اینچ (۱۹ میلیمتر) (تا حد ۱ ۱/۲ اینچ (۳۸ میلیمتر)) نیز می توان به سطحی با کیفیت خوب دست یافت. برای کاهش جداشدگی، افزایش چسبندگی و بهبود کیفیت رانندگی می توان از NMSA های کوچکتر از ۳/۴ اینچ (۱۹ میلیمتر) (به کوچکی ۱/۲ اینچ (۱۳ میلیمتر)) استفاده نمود. اگرچه، در صورت استفاده از NMSA های کوچک، میزان مصرفی سیمان افزایش می یابد که منجر به کاهش مقاومت روسازی می شود. علاوه بر آزمایش های معمول که بر روی درشت دانه ها صورت می گیرد، لازم است آزمایش سایش لوس آنجلس (مطابق استاندارد AASHTO T96 / ASTM C131) انجام شود (۱۰، ۱۱). در بعضی موقعیت ها انجام آزمایش های سلامت (AASHTO T104 / ASTM C88) (۱۲، ۱۳)، واکنش پذیری قلیایی-سیلیسی (ASTM C586 و ASTM C1105 / AASHTO T303) (۱۴-۱۶)، ضریب دوام (AASHTO T103 / ASTM D3744) (۱۷، ۱۸) و ضریب انبساط حرارتی (AASHTO TP60) (۱۹) ضروریست.

۳-۱-۲- ریزدانه ها :

ریزدانه ها باید الزامات مربوط به دوام ذکر شده در استاندارد ASTM C33 را داشته باشند. استفاده از سنگدانه های ریز تر از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون)، در صورتیکه پلاستیک نباشند، برای پر کردن فضای خالی سنگ دانه ها مناسب می باشند.

بنابراین، منبع سنگ دانه های که گرد و غبار زیادی در محل دپوی آنها موجود باشد، در صورتیکه پلاستیک نباشند، برای استفاده در طرح اختلاط بتن غلتکی میتواند مفید باشد (۲، ۹).

اسکلت سنگدانه های مصرفی در بتن غلتکی که تحت تراکم تحکیم می یابند بسیار تحت تاثیر ریزدانه ها می باشند. استفاده از ریزدانه های بیشتر منجر که کاهش میزان سیمان مصرفی و خمیر مربوطه می شود که در صورتیکه با دانه بندی مناسب با درشت دانه ها مخلوط شود، یک مخلوط تراکم پذیر و با دوامی را به ارمغان می آورد. برخلاف مخلوط های آسفالتی، گوشه دار بودن ریزدانه ها در مخلوط های بتن غلتکی از اهمیت بالایی برخوردار نیست. کاملا گویاست که کارپذیری و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط های آسفالتی بسیار تحت تاثیر گوشه دار بودن ریزدانه هاست. برخلاف مخلوط های آسفالتی، استفاده از ریزدانه های طبیعی (کروی) در مخلوط های بتن غلتکی جهت ایجاد ماتریس قوی بسیار معمول می باشد.

### ۳-۲- مواد سیمانی :

مخلوط های بتن غلتکی می تواند از هرگونه انواع سیمان های هیدرولیکی، سیمان مخلوط و یا ترکیبی از سیمان های هیدرولیکی و پوزولان ساخته شود. اطلاعات دقیقی تری در خصوص انتخاب و استفاده سیمان های هیدرولیکی و مکمل های سیمانی در گزارش ACI 225R گردآوری شده است (۲۰).

مشابه بتن معمولی، مصالح مورد استفاده در مخلوط های بتن غلتکی باید بگونه ای انتخاب شوند که مقاومت شیمیایی کافی در برابر حملات سولفاته، واکنش های قلیایی و ساییدگی داشته باشد. نوع مواد سیمانی تاثیر چشمگیری در هیدراتاسیون و روند کسب مقاومت دارد که در نتیجه آن بر روی مقاومت بتن در سنین پایین اثر گذار می باشد.

در روسازی بتن غلتکی استفاده از سیمان های تیپ I و II بسیار رایج و معمول می باشد. در صورتیکه مقاومت بالا در سنین پایین مدنظر باشد می توان از سیمان تیپ III استفاده نمود. سیمان تیپ V نیز باید در مناطقی مورد استفاده قرار بگیرد که خاک موجود در آن مناطق شرایط مناسبی داشته باشد. مواد سیمانی باید الزامات ذکر شده در استاندارد های ASTM C150 و ASTM C1157 را داشته باشد (۲۱، ۲۲).

مصالح سیمانی مکمل (SCM) نیز می تواند جهت اطمینان از تراکم کافی در مخلوط هایی که ریزدانه های با دانه بندی استاندارد دارد مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه در ایالات متحده آمریکا استفاده از مصالح سیمانی مکمل رایج نیست. در صورت استفاده، مصالح سیمانی مکمل کارپذیری بتن را بهبود می بخشد، واکنش پذیری قلیایی سنگدانه ها و واکنش پذیری قلیایی-سیلیسی را کاهش می دهند و زمان تراکم را افزایش می دهند. در صورت استفاده از میکروسیلیس شرایط ذوب و یخ را نیز بهبود می بخشد (۲).

### ۳-۳- آب :

در بتن غلتکی، آب مورد نیاز هیدراتاسیون شیمیایی از دو منبع تامین می شود. قسمتی از آن از طریق آب اضافی (آب آزاد) در ریزدانه ها و درشت دانه ها تامین می شود و قسمت دیگر آن با اضافه کردن آب به میکسر تامین می شود. کیفیت آب مصرفی باید الزامات استاندارد ASTM C1602 را داشته باشد. پیش از اجرای پروژه لازم است کیفیت آب توسط مهندسان مجرب تایید شده باشد (۲۳).

## ۴- تعیین طرح اختلاط :

بطور کلی روش های تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی بر اساس موارد زیر است :

- استفاده از روش تراکم خاک برای روسازی های بتن غلتکی معمول و رایج می باشد. بنابراین، این روش با جزئیات در ادامه توضیح داده خواهد شد.

- روش تراکم خاک بصورت گسترده‌ای برای طرح نسبت اختلاط روسازی های بتن غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق این روش رابطه‌ای بین چگالی و درصد رطوبت مخلوط های بتن غلتکی ایجاد می شود به این منظور که حداکثر چگالی نمونه های متراکم شده بدست آید.

در ادامه روش های متداول در طراحی مخلوط بتن غلتکی مورد بررسی قرار می‌گیرد:

#### ۴-۱- روش تراکم:

روش تراکم خاک ارائه شده در PCA شامل مراحل زیر می باشد:

- ۰) انتخاب مقاومت طرح
- ۱) انتخاب سنگدانه های خوب دانه بندی شده
- ۲) انتخاب محدوده متوسطی از مصالح سیمانی
- ۳) رسم نمودار درصد رطوبت-چگالی
- ۴) آماده سازی نمونه ها برای سنجش مقاومت فشاری
- ۵) آزمایش نمونه ها و انتخاب عیار سیمان موردنیاز
- ۶) محاسبه نسبت های اختلاط

در ذیل مراحل فوق شرح داده خواهد شد :

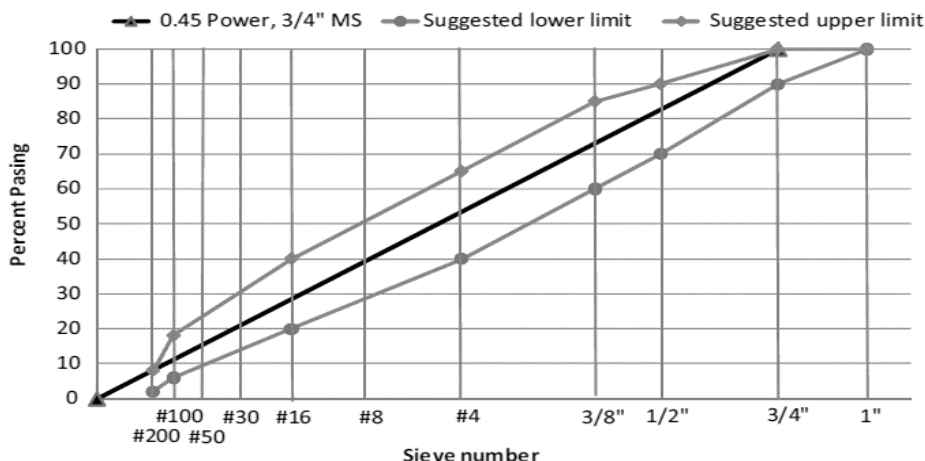
#### ۰- انتخاب مقاومت طرح

به جهت تنوع مصالح و متفاوت بودن شرایط اختلاط و اجرا، لازم است طرح اختلاط های بتن غلتکی در آزمایشگاه ساخته شوند تا مقاومت های بیش از مقاومت موردنظر بدست آید. مقاومت مورد نظر تحت عنوان نام "میانگین مقاومت موردنیاز ( $f'_{cr}$ )" نامیده می شود. ACI 214R-02 روش تعیین  $f'_{cr}$  را برای بتن معمولی نشان داده است. اگرچه، برای مخلوط های بتن غلتکی استاندارد تایید شده‌ای برای تعیین  $f'_{cr}$  درج نشده است. پیشنهاد می شود از دستورالعمل ذکر شده در استاندارد ACI 214R-02 (به جز قسمت تعیین  $f'_{cr}$ ) پیروی شود (۲۴).

پیشنهاد می شود برای هر پروژه‌ای، طراح، میانگین مقاومت مورد نیاز،  $f'_{cr}$  و ضوابط تایید مقاومت را تعریف کند. میانگین مقاومت مورد نیاز ( $f'_{cr}$ ) برابر با مجموع مقاومت طراحی ( $f'_c$ ) با ضریب اطمینان می باشد.

#### ۱- انتخاب سنگدانه های خوب دانه بندی شده :

در مرحله اول لازم است سنگدانه ها از نقاط نظر دانه بندی، مقاومت در برابر جداسازی و تراکم پذیری بهینه شود. دانه بندی سنگدانه های مخلوط باید دانه بندی حداکثر چگالی را بدست دهد. شکل اسلاید بعد دانه بندی مناسب بتن غلتکی را به همراه منحنی فولر برای حداکثر اندازه ۴/۳ اینچ (۱۹ میلیمتر) را نشان می دهد. منحنی فولر روشی برای تعریف دانه بندی متراکم به منظور دستیابی به حداکثر چگالی با هر حداکثر اندازه سنگدانه می‌باشد.



شکل ۲. دانه بندی توصیه شده در PCA

محدوده نشان داده شده در شکل بر اساس دانه بندی پیشنهادی PCA 2006 (تولید بتن غلتکی) می باشد، با این تفاوت که حداکثر درصد عبوری از الک شماره ۴ کمی افزایش یافته است. عموماً، در صورت استفاده از سنگدانه هایی که دانه بندی آنها در محدوده پیشنهادی باشد، بتن تولید شده می تواند در حوالی حداکثر چگالی متراکم گردد. بغیر از ذرات کوچکتر از الک شماره ۱۰۰، منحنی فولر در بین محدوده پیشنهادی قرار میگیرد.

#### ۲- انتخاب محدوده متوسطی از مصالح سیمانی

انتخاب مصالح سیمانی براساس مشخصات پروژه، موارد اقتصادی، میزان دسترسی به مصالح و الزامات تولید تعیین می شود. برای شروع، می توان میزان ۱۱ تا ۱۳ درصد برای سیمان بدون مصالح مکمل سیمانی بمنظور پوشاندن درشت دانه ها در نظر گرفت. مصالح سیمانی بصورت درصدی از کل مصالح خشک بیان می گردد و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\text{مصالح سیمانی (\%)} = \frac{\text{سیمانی مصالح وزن}}{\text{(فردر شده خشک های سنگدانه + سیمانی مصالح وزن)}} * 100 \quad (2)$$

#### ۳- رسم نمودار درصد رطوبت-چگالی :

برای درصد مصالح سیمانی ثابت، درصد رطوبت های مختلفی جهت رسم نمودار درصد رطوبت-چگالی انتخاب گردد.

برای اکثر سنگدانه ها، درصد رطوبت بهینه در محدوده ۵ تا ۸ درصد بدست می آید. پیشنهاد میشود درصد رطوبت های مختلفی در محدوده های نشان داده شده در نمودار اسلایدهای بعدی انتخاب شود و یا بر اساس تجربیات قبلی محدوده هایی انتخاب گردد.

درصد رطوبت مطابق با رابطه زیر محاسبه میگردد :

$$\text{درصد رطوبت (\%)} = \frac{\text{لب وزن}}{\text{(فردر شده خشک های سنگدانه + سیمانی مصالح وزن)}} * 100 \quad (3)$$

برای هر درصد مصالح سیمانی، میتوان حداکثر چگالی خشک و درصد رطوبت بهینه را با انجام آزمایش پروکتور اصلاح شده (ASTM D1557) را بدست آورد. در صورت استفاده از سنگدانه های ضعیف، لازم است جهت جلوگیری از شکست سنگدانه ها از آزمایش پروکتور استاندارد (ASTM D698) استفاده نمود. روش دیگر برای تعیین رابطه درصد رطوبت-چگالی، انجام آزمایش استاندارد ASTM C1170 (استاندارد تعیین روانی و چگالی بتن غلتکی با استفاده از میز ویبره) می باشد (۴، ۷، ۲۵).

پیشنهاد می شود برای هر ۳ درصد مصالح سیمانی مختلف، حداقل ۳ منحنی درصد رطوبت-چگالی رسم شود. به عنوان مثال، می توان از درصد های ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۴٪ برای ۳ درصد مصالح سیمانی مختلف استفاده نمود.

۴- آماده سازی نمونه ها برای سنجش مقاومت فشاری :

برای هر درصد مصالح سیمانی، با استفاده از چکش ویبره (ASTM C1435) و یا روش میز ویبره (ASTM C1176) نمونه های استوانه ای مقاومت فشاری آماده شود (۳، ۲۶). نظیر هر یک از درصد مصالح سیمانی، تمامی نمونه ها بایستی در درصد رطوبت بهینه متناظر ساخته شود.

۵- آزمایش نمونه ها و انتخاب عیار سیمان موردنیاز :

نمونه ها برای تعیین مقاومت فشاری در درصد مصالح سیمانی انتخاب شده آزمایش شوند. منحنی مقاومت فشاری بر حسب درصد مصالح سیمانی رسم شود. با استفاده از این منحنی، درصد سیمانی که مقاومت موردنیاز تعیین شده ی قبلی پروژه را برآورده سازد انتخاب شود. همانطور که گفته شد، مقاومت مورد نیاز ( $f_{cr}$ ) برابر مجموع مقاومت طراحی ( $f'_c$ ) و ضریب اطمینان می باشد.

۶- محاسبه نسبت های اختلاط

در صورتیکه درصد مصالح سیمانی مورد نیاز اختلاف زیادی با تمامی درصد سیمان های انتخاب شده داشته باشد، منحنی درصد رطوبت-چگالی دیگری برای تعیین درصد رطوبت بهینه در درصد مصالح سیمانی جدید تشکیل شود. در صورتیکه درصد رطوبت بهینه با تغییر درصد مصالح سیمانی تغییرات قابل توجهی نداشته باشد، می توان درصد رطوبت بهینه را در درصد مصالح سیمانی مورد نیاز با درونبایی بدست آورد. در نهایت، با انتخاب درصد مصالح سیمانی مورد نیاز و درصد رطوبت بهینه، می توان نسبت های طرح اختلاط نهایی را برای پروژه محاسبه نمود. برای تعیین وزن مصالح و حجم متناظر آنها باید شرایط SSD (سطح اشباع خشک) را برای سنگدانه ها استفاده نمود.

#### ۴-۲- روش روانی یا کارپذیری (Consistency or Workability)

روش روانی یا کارپذیری بر اساس استاندارد ACI 211.3R تدوین شده است. این روش برای تعیین نسبت های طرح اختلاط بتن غلتکی با بزرگترین اندازه اسمی دانه ۳۷.۵ میلیمتر کاربرد دارد. در این روش نیز لازم است نسبت های اختلاط بگونه ای طرح شوند که حجم خمیر کافی برای پوشاندن سنگدانه ها و فضای خالی بین آنها موجود باشد. در این روش معیار تعیین کارپذیری و روانی بهینه، انجام آزمایش و به اصلاح شده می باشد. زمان و به، زمان تشکیل یافتن یک حلقه کامل شیره بتن به دور قالب و به تحت تحکیم میباشد. مطابق پیشنهاد استاندارد ACI 211، زمان و به مناسب برای تحکیم، زمان بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه می باشد (۲۷).

لازم به ذکر است در تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی به روش روانی، به جدول زیر دقت شود.

جدول ۱. مفاهیم عبارات آمده در تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی به روش روانی			
$p/c$	نسبت حجمی پوزولان به سیمان	$V_{MT}$	حجم کل ملات
$P_T$	حداقل مقدار خمیر سیمان	$V_m$	حجم ملات بدون هوا
$P_v$	نسبت حجم خمیر بدون هوا به حجم ملات بدون هوا	$V_{FA}$	حجم ریزدانه



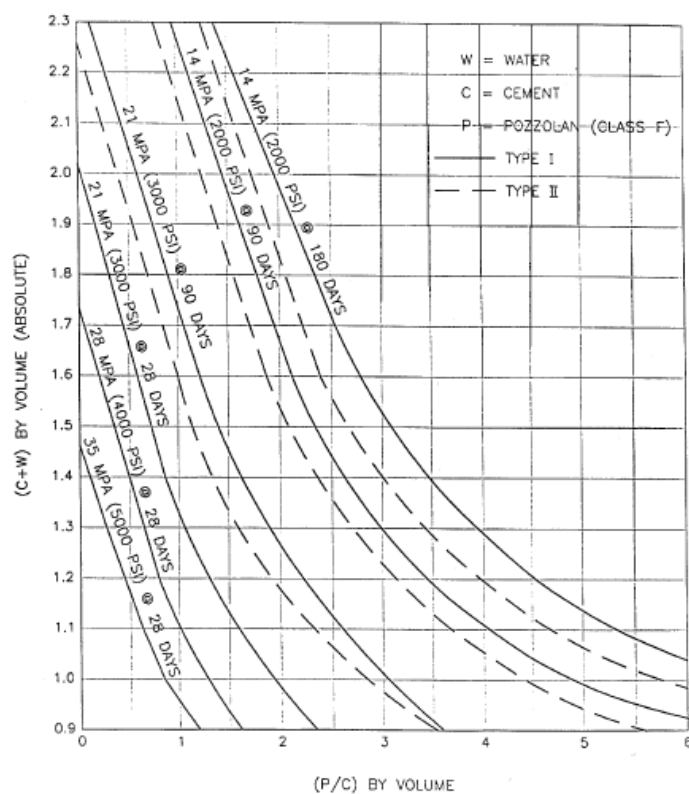
حجم آب	$V_W$	حجم درشت دانه	$V_{CA}$
حجم سیمان	$V_C$	حجم هوای مخلوط	$V_A$
حجم پوزولان	$V_F$	حجم درشت دانه	$V_{CA}$
نسبت حجمی آب به مجموع سیمان و پوزولان	$w/(c+p)$	حجم بتن	$C_v$
		حجم خمیر بدون هوا	$V_P$

روش روانی شامل مراحل زیر می باشد :

- ۱) انتخاب نسبت حجمی پوزولان به سیمان ( $p/c$ )
- ۲) تعیین حداقل حجم خمیر سیمان ( $P_T$ )
- ۳) تعیین حجم درشت دانه ( $V_{CA}$ )
- ۴) تعیین حجم هوای مخلوط ( $V_A$ )
- ۵) محاسبه حجم خمیر بدون هوا ( $V_P$ )
- ۶) تعیین حجم ریزدانه ( $V_{FA}$ )
- ۷) تعیین حجم آب آزمایشی ( $V_W$ )
- ۸) محاسبه حجم سیمان ( $V_C$ )
- ۹) تعیین حجم پوزولان ( $V_F$ )
- ۱۰) محاسبه وزن مصالح
- ۱۱) انجام آزمایش روانی بتن
- ۱۲) تعیین طرح نهایی و سنجش مقاومت فشاری

گام اول : انتخاب نسبت حجمی پوزولان به سیمان ( $p/c$ )

با توجه به شکل ۳ نسبت حجمی پوزولان به سیمان و نسبت حجمی آب به مجموع سیمان و پوزولان بر اساس مقاومت مورد نیاز و تیپ سیمان مصرفی برای تولید نمونه آزمایشی انتخاب شود :



### شکل ۳. نمودار تعیین نسبت حجمی پوزولان به سیمان و نسبت حجمی آب به مجموع سیمان و پوزولان بر اساس مقاومت

گام دوم : تعیین حداقل حجم خمیر سیمان ( $P_T$ )

حداقل حجم خمیر سیمان به دو روش قابل محاسبه می باشد :

(۱) با توجه به نسبت آب به سیمان انتخاب شده، نمونه های ملات با درصد های مختلف ریزدانه ساخته شود. سپس به روش ASTM D1557 (تراکم اصلاح یافته)، چگالی نمونه های ملات ساخته شده اندازه گیری شود. سپس با توجه به نمودار چگالی ملات - حجم خمیر، حجم خمیر ملاتی که بیشترین چگالی را بدست دهد انتخاب شود.

(۲) به عنوان جایگزین روش فوق، میتوان از یک روش تقریبی بهره جست. نسبت حجم خمیر بدون هوا به حجم ملات بدون هوا را میتوان از محدوده ۰.۳۸ تا ۰.۴۶ انتخاب نمود.

گام سوم : تعیین حجم درشت دانه ( $V_{CA}$ )

حجم درشت دانه نیز به دو روش قابل تعیین می باشد :

(۱) در روش اول، حجم درشت دانه بصورت آزمون و خطا بدست می آید. بدین گونه که نسبت های مختلف حجمی درشت دانه و ملات با یکدیگر ترکیب شوند. سپس، زمان و به اصلاح شده بتن غلتکی اندازه گیری شود. مراحل فوق به ازای نسبت های مختلف تکرار شود تا زمان و به مورد نظر حاصل شود.

(۲) می توان از جدول زیر برای تعیین حجم تقریبی درشت دانه استفاده نمود.

جدول ۲. تعیین درصد حجمی درشت دانه	
درصد حجمی درشت دانه	حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (میلیمتر (اینچ))
۶۳ تا ۶۴	۱۵۰ (۶)
۶۱ تا ۶۳	۱۱۵ (۴ ۲/۱)
۵۷ تا ۶۱	۷۵ (۳)
۵۲ تا ۵۶	۳۷.۵ (۱ ۲/۱)
۴۶ تا ۵۲	۱۹ (۴/۳)
۴۲ تا ۴۸	۹.۵ (۸/۳)

گام چهارم : تعیین حجم هوای مخلوط ( $V_A$ )

مقدار هوای بتن در محدوده بین ۱ تا ۲ درصد انتخاب شود. حجم هوای مخلوط بوسیله رابطه زیر قابل محاسبه می باشد :

$$V_A = \left( \frac{\text{هوا درصد}}{100} \right) * C_V \quad (۴)$$

گام پنجم : محاسبه حجم خمیر بدون هوا ( $V_P$ )

حجم خمیر بدون هوا به ۲ صورت محاسبه می شود :

(۱)

$$V_P = \left( \frac{P_T}{100} * V_{MT} \right) - V_A \quad (۵)$$

که در این رابطه، حجم کل خمیر ( $V_{MT}$ )، با رابطه زیر حساب می شود :

$$V_{MT} = C_V - V_{CA} \quad (۶)$$

(۲) در صورتیکه مقدار  $P_V$  در گام ۲ انتخاب شده باشد :

$$V_P = V_m * P_V \quad (۷)$$

که در این رابطه حجم ملات بدون هوا ( $V_m$ ) با رابطه زیر محاسبه می شود :

$$V_m = C_V - V_{CA} - V_A \quad (۸)$$

گام ششم : تعیین حجم ریزدانه ( $V_{FA}$ )

حجم ریز دانه نیز براساس گام پنجم بصورت زیر محاسبه می شود :

$$V_{FA} = V_m * (1 - P_V) \quad (۹)$$

گام هفتم : تعیین حجم آب آزمایشی ( $V_W$ )

با توجه به نسبت حجمی آب به مجموع سیمان و پوزولان انتخاب شده در گام اول، داریم :

$$V_W = V_P * \frac{w/c + p}{[1 + w/c + p]} \quad (۱۰)$$

گام هشتم : محاسبه حجم سیمان ( $V_C$ )

حجم سیمان به صورت زیر محاسبه می شود :

$$V_C = V_W / \{w/c + p * [1 + P/c]\} \quad (۱۱)$$

گام نهم : تعیین حجم پوزولان ( $V_F$ )

حجم پوزولان بصورت زیر محاسبه می شود :

$$V_F = V_C * P/c \quad (۱۲)$$

گام دهم : محاسبه وزن مصالح

با توجه به چگالی توده ای هر یک از مصالح، وزن آنها محاسبه شود.

گام یازدهم : انجام آزمایش روانی بتن

مطابق با استاندارد، آزمایش وبه اصلاح یافته بر روی بتن غلتکی تولید شده با طرح اختلاط آزمایشی، انجام شود تا روانی مورد نظر حاصل شود.

گام دوازدهم : تعیین طرح نهایی و سنجش مقاومت فشاری

پس از تعیین حجم نهایی سنگدانه ها، دو نمونه اضافی با نسبت های آب به سیمان کمتر و بیشتر از مقدار انتخاب شده ساخته شود. درنهایت، منحنی مقاومت فشاری برحسب نسبت آب به سیمان رسم شود تا طرح اختلاط نهایی بتن غلتکی تعیین شود.

#### ۴-۳- روش High Paste :

این روش طرح اختلاط توسط سازمان آبادسازی ایالات متحده آمریکا (U. S. Bureau of Reclamation) تدوین شده است. بتن غلتکی تولید شده توسط این روش عموماً درصد مواد سیمانی و پوزولانی بالا با دانه بندی متوسط و کارپذیری بالا دارد. هدف این روش تولید بتن غلتکی با نفوذپذیری بسیار پایین میباشد که این ویژگی با استفاده از میزان بهینه مواد سیمانی امکان پذیر است.

مقدار آب مصرفی، ریزدانه و درشت دانه بر اساس ارزیابی زمان و به اصلاح یافته در محدوده ۱۰ تا ۳۰ ثانیه با انجام آزمایش و به اصلاح یافته (ASTM C1176) بر روی مخلوط های بتنی آزمایشی تعیین می گردد.

#### ۴-۴- روش عددی (مدل اجسام معلق) (Solid Suspension Model) :

در سالهای اخیر، یک روش تئوری و عددی برای طراحی نسبت های اختلاط بتن غلتکی تحت نام «مدل اجسام معلق» معرفی شد.

این روش بر پایه بهینه سازی چگالی خشک مخلوط های بتن غلتکی، برای تعیین نسبت های هریک از مصالح خشک (سیمان، خاکستر بادی، میکروسیلیس، ماسه و درشت دانه) می باشد.

با استفاده از روش بهینه سازی چگالی خشک، مقدار آب لازم برای پوشاندن فضای خالی بین مصالح خشک محاسبه می شود.

با در دست داشتن مشخصات مصالح موجود (دانه بندی، وزن مخصوص و درصد ها)، می توان با استفاده از یک شبیه ساز کامپیوتری مدل اجسام معلق را برای طرح اختلاط بتن غلتکی مدل سازی کرد.

مزیت اصلی مدل اجسام معلق، سرعت در محاسبات و بهینه سازی نسبت های اختلاط می باشد. در عین حال، نیازی به انجام تعداد زیادی آزمایشات آزمایشگاهی نمی باشد.

#### ۵- نتیجه گیری :

- روش تعیین طرح اختلاط به روش تراکم خاک در استاندارد ACI 211.3R نیز آمده است. این روش تقریباً مشابه روش ارائه شده در استاندارد PCA 2010 می باشد. یکی از تفاوت های این دو روش در میزان درصد مواد سیمانی پیشنهادی می باشد.
- استاندارد PCA 2010 محدوده ۱۱ تا ۱۳ درصد را برای انتخاب درصد اولیه سیمان بصورت نسبت وزن مصالح سیمانی به مجموع مصالح سیمانی و سنگدانه های خشک پیشنهاد کرده است. درحالیکه استاندارد ACI محدوده ۱۲ تا ۱۶ درصد را بگونه نسبت وزن سیمان به وزن سنگدانه های خشک معرفی می کند.
- در روش تراکم خاک (PCA) تعداد مقادیر فرض شده نسبت به روش روانی (ACI) کمتر می باشد. بنابراین سرعت همگرایی به نسبت های نهایی طرح اختلاط، در روش تراکم خاک بیشتر است.
- جهت دستیابی به نسبت های نهایی طرح اختلاط، تعداد آزمایش های انجام شده در روش تراکم خاک کمتر از روش روانی می باشد.
- در صنعت روسازی (آسفالتی یا بتنی)، تراکم خاک نسبت به روانی از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو، استفاده از روش تراکم خاک بسیار گسترده تر است.

#### ۶- فهرست مراجع :

۱. Institute AC. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI Committee 325. 2001.
۲. Association PC. GUIDE FOR ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS. National Concrete Pavement Technology Center. 2010.
۳. C1435 A. Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer. 2008.
۴. D1557 A. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). 2002.

۵. C39 A. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2014.
۶. C42 A. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. 2013.
۷. C1170 A. Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table. 2014.
۸. C78 A. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). 2010.
۹. C33 A. Standard Specification for Concrete Aggregates. 2013.
۱۰. C131 A. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. 2006.
۱۱. T96 A. Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. 2010.
۱۲. C88 A. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. 2013.
۱۳. T104 A. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. 2011.
۱۴. C586 A. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method). 2011.
۱۵. C1105 A. Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction. 2008.
۱۶. T303 A. Standard Method of Test for Accelerated Detection of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars Due to Alkali-Silica Reaction. 2012.
۱۷. D3744 A. Standard Test Method for Aggregate Durability Index. 2011.
۱۸. T103 A. Standard Method of Test for Soundness of Aggregates by Freezing and Thawing. 2012.
۱۹. TP60 A. Standard Method of Test for Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete. 2005.
۲۰. Institute AC. Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements. ACI Committee 225. 1999.
۲۱. C ۱۵۰ A. Standard Specification for Portland Cement. 2012.
۲۲. C1157 A. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. 2011.
۲۳. C1602 A. Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. 2012.
۲۴. Institute AC. Evaluation of Strength Test Results of Concrete. ACI Committee 214. 2002.
۲۵. D698 A. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). 2012.
۲۶. C1176 A. Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table. 2013.
۲۷. Institute AC. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI Committee 211. 2002.