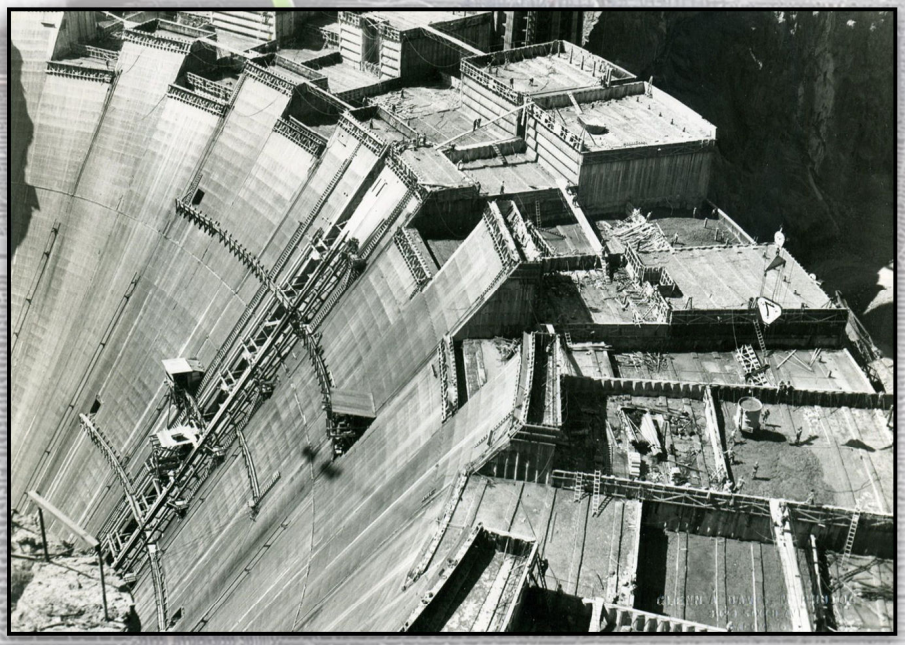
راهنمای
بتن حجیم

گزارش کمیته ۱۴۰۲-۲۰۷۰-ICI
از راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران

انجمن بتن ایران

به نام خدایی که خاک آفرید

راهنمای بتن حجیم

گزارش کار ICI-2070

از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن‌ساز انجمن بتن ایران

راهنمای بتن حجیم

گزارش کمیته ICI-2070

از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن‌ساز انجمن بتن ایران

راهنمای بتن حجیم
ناشر: اراده
نوبت چاپ: اول ۱۴۰۳
شمارگان : ۱۰۰۰جلد
شابک
ISBN : 8-0
فهرست نویسی براساس اطلاعات فیپا :
۱-

ویراستار: آیدین ریاضی
صفحه‌آرا: زهرا اسلامی نوکندی
پایگاه اینترنتی: WWW.ICI.IR

پیش گفتار محمد شکرچی‌زاده ۹
پیش گفتار محسن تدین/ هرمز فامیلی ۱۰
پیش گفتار علی‌رضا باقری/ محمدرضا جبروتی ۱۱
پیش گفتار علی‌اکبر مقیمی آذری ۱۲
چکیده ۱۳
فصل ۱- مقدمه و سیر تحول تاریخی ۱۵
۱-۱- گستره ۱۶
۱-۲- تاریخچه ۱۷
۱-۲-۱- پیش از ۱۹۰۰ ۱۷
۱-۲-۲- از ۱۹۰۰ تا ۱۹۳۰ ۱۸
۱-۲-۳- از ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۰ ۲۰
۱-۲-۴- از ۱۹۷۰ تاکنون ۲۲
۱-۲-۵- مقدار سیمان ۲۳
۱-۲-۶- کنترل دما ۲۵
۱-۲-۷- طراحی بر اساس مقاومت بلندمدت ۲۶
فصل ۲- تعاریف ۲۷
فصل ۳- مصالح و طرح مخلوط ۲۹
۳-۱- کلیات ۳۰
۳-۱-۱- تعریف بتن حجیم با روش سیمان معادل ۳۰
۳-۲- سیمان‌ها ۳۲
۳-۳- مواد سیمانی مکمل ۳۴
۳-۴- افزودنی‌های شیمیایی ۳۵
۳-۵- سنگدانه‌ها ۳۷
۳-۶- آب ۴۰
۳-۷- انتخاب نسبت‌ها ۴۰
فصل ٤- ویژگی‌ها ۴۳
۴-۱- کلیات ۴۴
۴-۲- مقاومت ۵۵
۴-۳- دما ۵۷
۴-۳-۱- کنترل دما ۵۷
۴-۳-۲- پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش بتن ۵۸

۴-۳-۳- کنترل افزایش دما ۵۸
۴-۳-۴- حداکثر (اوج) دما ۵۹
۴-۳-۵- اختلاف دما ۵۹
۴-۴- ویژگی‌های ارتجاعی ۶۱
۴-۵- خزش ۶۲
۴-۶- تغییر حجم ۶۳
۴-۷- نفوذپذیری ۶۵
۴-۸- ویژگی‌های حرارتی ۶۵
۴-۹- ویژگی‌های برشی ۶۵
۴-۱۰- دوام ۶۷
فصل ۵- ساخت ۶۹
۵-۱- پیمانه کردن ۷۰
۵-۲- مخلوط کردن ۷۱
۵-۳- بتن‌ریزی ۷۲
۵-۴- عمل‌آوری ۷۸
۵-۵- قالب‌ها ۷۹
۵-۶- ارتفاع بتن‌ریزی و فاصله زمانی بین بتن‌ریزی‌های همجوار ۸۱
۵-۷- سرمایش و کنترل دما ۸۲
۵-۸- نصب ابزار دقیق (ابزاربندی) ۸۴
۵-۸-۱- ابزارهای اندازه‌گیری دما ۸۵
۵-۹- تزریق دوغاب در درزهای انقباض در سدها ۸۵

راهنمای بتن حجیم

ریاست هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران:
دکتر محمد شکرچی‌زاده

مدیر افتخاری:
مهندس علی‌اکبر مقیمی‌آذری

رئیس کمیته بتن حجیم:
دکتر علی‌رضا باقری
مهندس محمدرضا جبروتی

کمیته کار (به ترتیب حروف الفبا):
دکتر علی‌رضا باقری
دکتر محسن تدین
مهندس محمدرضا جبروتی
مهندس حامد دشتارا
مهندس آیدین ریاضی
دکتر محمد شکرچی‌زاده
دکتر هرمز فامیلی

اعضا پیوسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):
مهندس امیر کاوه امینی
دکتر محمد اسماعیل نیاعمران
دکتر علی‌رضا باقری
دکتر محسن تدین
مهندس محمدرضا جبروتی
دکتر محمد شکرچی‌زاده
دکتر هرمز فامیلی

پیش‌گفتار

به‌نام خدا

در فرآیند پخت سیمان از مواد خام مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی در ذرات سیمان ذخیره می‌شود و سطح انرژی آن افزایش می‌یابد. زمان ترکیب سیمان با آب مقداری از انرژی ذخیره شده آزاد می‌شود و به صورت افزایش دما در بتن آشکار می‌شود. چنانچه ابعاد سازه بتنی کوچک باشد حرارت آزاد شده مقطع بتنی را ترک می‌کند ولی زمانی‌که ابعاد سازه بتنی بزرگ باشد یا مقدار سیمان در بتن زیاد باشد، حرارت ایجادشده و گرادیان حرارتی بین مغزه بتن و سطح بیرونی با توجه به ضریب انبساط حرارتی موجب کرنش حرارتی می‌شود و ایجاد تنش حرارتی می‌کند و می‌تواند به ترک‌خوردگی حرارتی منجر شود و در شرایطی در دوام و پایداری سازه اثرات منفی به‌همراه داشته باشد.

در کشور ما پروژه‌های بزرگ سدسازی در دهه‌ای گذشته انجام پذیرفته است و تجربیات گران‌سنگی از آن پروژه‌ها موجود است و اگرچه این پروژه‌ها امروز کمتر اجرا می‌شود ولی در عوض با توجه به توسعه اجرای پروژه‌های بزرگ و بلندمرتبه خصوصاً فونداسیون این پروژه‌ها با ابعاد بزرگ اجرا می‌شود و برخلاف پروژه‌های سدسازی، مقدار سیمان در هر متر مکعب، گاه بیش از دو برابر پروژه‌های سدسازی است و بنابراین پتانسیل تولید گرما افزایش می‌یابد.

نشریه حاضر با هدف آشنایی بیشتر و توسعه دانش بتن حجیم تهیه گردیده و تلاش شده تا برای دانشجویان و دست‌اندرکاران اجرای سازه‌های بتن حجیم مفید باشد. لازم می‌دانم از تهیه‌کنندگان این گزارش که به پیشرفت دانش و کاربرد بتن حجیم در کشور کمک خواهد نمود، سپاسگزاری و تقدیر نمایم.

محمد شکرچی زاده

رئیس هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران

پیش‌گفتار

به‌نام خدا

انجمن بتن ایران در نظر دارد مجموعه‌ای را به نام راهنمای جامع بتن ساز گردآوری نماید و در اختیار علاقمندان قرار دهد. این فعالیت در قالب تشکیل کمیته‌های علمی تخصصی بتن شکل گرفته است. نوشته‌ای که در پیش رو دارید گزارش کمیته بتن حجیم است که شامل نکات برجسته و کلی بتن‌ریزی‌های حجیم است. محاسبات و طراحی سیستم‌های پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش و اثر تغییرات حجمی و حرارتی در ترک‌خوردگی بتن‌های حجیم می‌تواند در گزارش‌های بعدی این کمیته گنجانده شود.

هر چند تعداد سدهای بتنی درکشور ما محدود است، اما امروزه بتن حجیم در شالوده سازه‌های بلند، پایه‌ها و کوله‌های پل‌ها، نیروگاه‌ها و ساختمان‌های مرتبط با پروژه‌های هسته‌ای و غیره کاربرد وسیعی پیدا کرده است که معمولاً برخلاف سدهای بتنی غیرمسلح، به‌صورت مسلح اجرا می‌شوند و گاه رده‌های مقاومتی زیادی را دارا هستند که جای آن در نشریات موجود کشور خالی بود. در چنین بتن‌هایی، مصرف مواد سیمانی معمولاً به‌مراتب بیشتر از بتن حجیم سدها است که اغلب دارای رده‌های مقاومتی چندان زیادی نیستند. خوشبختانه در این نشریه به بتن حجیم مسلح نیز پرداخته شده است و جا دارد توجه بیشتری به این نوع بتن‌ها شود. در تهیه این نشریه از گروه کار متشکل از اساتید دانشگاه، کارشناسان و مهندسان مشاوری که در زمینه‌ی سدسازی و سازه‌های بتن حجیم به صورت تخصصی فعالیت دارند، همکاری داشته‌اند.

امیدواریم انتشار چنین گزارش‌هایی تداوم یابد و انجمن بتن ایران بتواند در راستای اهداف آموزشی و ترویج دانش و فناوری علم بتن قدم‌های موثری بردارد.

در پایان لازم است از حمایت مالی جناب آقای مهندس مقیمی‌آذری مدیریت محترم شرکت ساختمانی ژیان تشکر نموده و در آینده نیز از کمک‌های ایشان در تهیه گزارش‌های تکمیلی بهره‌مند شویم.

محسن تدین　　هرمز فامیلی

پیش گفتار

به‌نام خدا

سنگدانه، سیمان و آب اصلی ترین مصالح متشکله مخلوط های بتن هستند. ذرات سیمان در مجاورت آب واکنشی همراه با تولید گرما ایجاد می کند که هیدراته‌شدن نام دارد. همه مخلوط‌های بتن تولید گرما می کنند ولی آنچه بتن حجیم را از سایر بتن ها متمایز می‌سازد این است که عواملی مانند ابعاد سازه، مقدار و نوع سیمان مصرفی، دمای بتن تازه، دمای محیط و امثال آن ممکن است شرایطی ایجاد نماید که حرارت ایجاد شده نتواند به طور سریع از توده بتن خارج شود و باعث افزایش دمای بتن گردد. تغییرات حجمی مقید شده عضو بتنی ناشی از افزایش و افت بعدی دما و همچنین اختلاف دمای توده درونی و سطوح بیرونی بتن می‌تواند سبب ترک‌خوردگی و سایر خرابی‌ها در سازه بتنی گردد.

رفتار حرارتی بتن‌های حجیم از اوایل قرن بیستم در ساخت سدهای بتنی و شناسایی ترک‌های حرارتی مورد توجه مهندسین قرار گرفت. تلاش‌های گسترده‌ای برای شناخت عوامل تولید گرما و کنترل حرارت در بتن‌های حجیم صورت گرفت که زمینه ساز انتشار گزارش‌های علمی و ارایه توصیه‌های فنی و اجرایی برای مهندسین گردیده است.

انجمن بتن ایران بر آن شد این انتشارات متنوع را در قالب مجموعه‌ای به نام راهنمای جامع بتن‌ساز گردآوری و در اختیار دست اندرکاران صنعت ساخت قرار دهد. برای این منظور کمیته‌های علمی- تخصصی بتن سازمان‌دهی شده است. آنچه در این راهنما ارائه شده، گزارش کمیته بتن حجیم است که با حمایت شرکت ساختمانی ژیان در انجمن بتن ایران تهیه و منتشر شده است و حاوی تاریخچه و ملاحظات کلی است که مهندسان باید در کاربرد بتن‌های حجیم رعایت نمایند.

علیرضا باقری　　محمدرضا جبروتی

پیام شرکت ژیان

به‌نام خدا

شرکت ژیان به دلیل سابقه‌ی طولانی در اجرای سدهای بتنی و دیگر سازه‌های حجیم در کشورمان به اهمیت رعایت نکات و دستورالعمل‌های فنی و کنترل کیفیت در اجرای سازه‌های بتنی حجیم، به خوبی آگاه است به همین دلیل در راستای آرمان و چشم‌انداز خود به دنبال ایجاد فضایی برای همکاری با متخصصان صنعت تکنولوژی بتن است در همین راستا این شرکت با همکاری نزدیک با انجمن بتن ایران درصدد آن برآمده تا با حمایت مالی و معنوی خود از تحقیق و توسعه در زمینه‌ی بتن‌های خاص به ویژه بتن حجیم، گامی کوچک بر دارد.

کاهش فاصله‌ی میان دانشگاه و صنعت از دیگر رسالت‌های این شرکت است چرا که به این امر واقف است که بدون دسترسی به علم روز دنیا عملا اجرای بتن‌های خاص کاری دشوار است لذا برای افزایش آگاهی و دسترسی مخاطبان و متخصصان حوزه‌ی تکنولوژی بتن به دانش روز دنیا با همکاری نزدیک با انجمن بتن ایران راهنمای بتن حجیم از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن‌ساز این انجمن که پیش روی شماست را به مرحله‌ی چاپ و انتشار برای عموم رسانده است.

امید است این همکاری مفید به فایده باشد و این راهنما که با همکاری با برجسته‌ترین و متخصص‌ترین افراد صنعت بتن تهیه و تنظیم شده است به منبعی مطمئن برای دانشجویان و متخصصان این حوزه تبدیل شود و نقشی کوچک را در راستای ایجاد توسعه‌ی پایدار در میهن عزیزمان ایفا کند.

علی اکبر مقیمی آذری
فارغ‌التحصیل ۱۳۳۷ دانشکده فنی دانشگاه تهران
شرکت ژیان

چکیده

این راهنما، تاریخچه‌ای از سیر تکاملی روش‌های مورد استفاده در بتن حجیم و بررسی مصالح مصرفی، طرح مخلوط (تعیین نسبت اجزا)، ویژگی‌ها، روش‌های ساخت و تجهیزات آن را در بر می‌گیرد. همچنین، مباحث مرتبط با بتن حجیمی که به صورت متداول ریخته و متراکم شده است را برای ساخت سازه‌های حجیمی مانند سدها پوشش می‌دهد و اطلاعاتی ارائه می‌کند که برای بتن حجیم سازه‌ای با آرماتور زیاد و نیز برای بتن‌های با کنترل حرارتی همچون قطعات پل و پی ساختمان‌ها قابل اعمال است. این راهنما بتن غلتکی را شامل نمی‌شود.

کلیدواژه‌ها: سیمان، ترک‌خوردگی، خاکستر بادی، حرارت هیدراته‌شدن، بتن حجیم، طرح مخلوط، مواد سیمانی مکمل، افزایش دما، برنامه کنترل حرارت، انبساط حرارتی، تغییر حجم.

فصل ۱

مقدمه و
سیر تحول تاریخی

۱-۱- گستره

در این راهنما، بتن حجیم[1] به‌طور کلی به دو نوع یا رده طبقه‌بندی می‌شود. نوع اول، بتن حجیم متعارف سازه‌هایی مانند سدهاست که در آن‌ها بیشتر سازه با بتن حجیم و از بتن‌ریزی‌های درهم‌آمیخته[2] ساخته شده است. نوع دوم، شامل بتن‌ریزی‌های جداگانه یا مجزا مانند پی ساختمان‌های مرتفع یا پل‌هاست و اغلب از آن تحت عنوان بتن با کنترل حرارتی[3] یاد می‌شود. هر دو نوع بتن حجیم، اصول و ملاحظات اساسی مشابهی دارند؛ با این حال، بتن با کنترل حرارتی اغلب با بتن آماده قابل خرید ساخته می‌شود. بنابراین، ممکن است به گونه‌ای طراحی شود که قابل پمپ‌شدن باشد و می‌تواند شامل بتن خودتراکم[4]، پرمقاومت[5] یا توانمند[6] باشد که معمولا منجر به تولید بتنی با مقدار مواد سیمانی بسیار بیشتر از بتن حجیم متعارف می‌شود. اگرچه این راهنما، عمدتا بر بتن حجیم متعارف متمرکز است، اما بسیاری از اطلاعات ارائه‌شده را می‌توان برای بتن با کنترل حرارتی نیز به‌کار برد.

به‌طور کلی، طراحی سازه‌هایی مانند سدها که با بتن حجیم متعارف ساخته می‌شوند، مبتنی بر ملاحظات مربوط به دوام، صرفه اقتصادی و الزامات حرارتی است. عملکرد مقاومتی بیشتر از اینکه یک دغدغه اصلی باشد، اغلب یک ملاحظه ثانویه است، و گاهی اوقات به گونه‌ای تعیین می‌شود که به جای ۲۸ روز، در سن ۵۶ یا ۹۱ روز به دست آید.

ویژگی منحصربه‌فردی که بتن حجیم را از سایر کارهای بتنی متمایز می‌کند، رفتار حرارتی است. به دلیل اینکه واکنش بین آب و سیمان ذاتا گرمازاست، اگر حرارت به سرعت از بین نرود، افزایش دمای درون توده بزرگ بتن می‌تواند خیلی زیاد شود. زمانی که حرارت هیدراته‌شدن، در سطوح و لبه‌های بیرونی توده بتن مستهلک می‌شود اما در هسته آن از بین نمی‌رود، ممکن است تنش‌ها و کرنش‌های کششی قابل‌توجهی در اثر این گرادیان حرارتی ایجاد شود. در مواردی که ترک‌خوردگی ناشی از رفتار حرارتی، بر یکپارچگی، دوام یا کیفیت ظاهری سازه اثر نامطلوبی بگذارد، باید تدابیری در نظر گرفته شود.

این راهنما، تاریخچه‌ای از سیر تکاملی روش‌های مورد استفاده در بتن حجیم و بررسی مصالح مصرفی، طرح مخلوط، ویژگی‌ها، روش‌های ساخت و تجهیزات آن را در بر می‌گیرد.

روش‌های بتن‌ریزی حجیم، عمدتا در نتیجه ساخت سدهای بتنی که ترک‌خوردگی‌های مربوط به دما برای اولین بار در آن‌ها شناسایی شد، گسترش یافته‌اند. ترک‌خوردگی ناشی از دما، در سایر سازه‌های بتنی از جمله پی‌های گسترده، سر شمع‌ها، پایه پل‌ها، قطعات روسازه، پوشش ترمیمی جاده‌ها[7] و پوشش داخلی تونل‌ها[8] نیز تجربه شده‌اند.

---

[1] Mass concrete
[2] Intertwined
[3] Thermally controlled concrete
[4] Self consolidating
[5] High strength
[6] High performance
[7] Roadway patch
[8] Tunnel lining

در سازه‌های بتن حجیم متعارف، معمولاً مقاومت فشاری زیاد مورد نیاز نیست. با این حال، مواردی مانند سدهای قوسی با ضخامت کم وجود دارند که ممکن است در آن‌ها از بتن پرمقاومت استفاده شود. سازه‌های حجیمی مانند سدهای وزنی، در وهله اول به واسطه شکل و جرم خود در برابر بارها مقاومت می‌کنند و مقاومت در آن‌ها در درجه بعدی اهمیت قرار دارد. دوام، ویژگی‌های مرتبط با رفتار حرارتی و تمایل به ترک‌خوردگی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.

اثرات ایجاد گرما، قید و تغییرات حجمی بر طراحی و رفتار اعضا و سازه‌های بتن مسلح حجیم، در ACI 207.2R مورد بحث قرار گرفته است. همچنین، روش‌های پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش و عایق‌کاری حرارتی برای بتن حجیم در ACI 204.4R قابل دسترسی است.

۱-۲- تاریخچه

از لحاظ تاریخی، ملاحظات بتن حجیم در نتیجه استفاده از بتن در سدها تکامل یافته است. نخستین سدهای بتنی، نسبتا کوچک بودند و بتن به‌صورت دستی مخلوط می‌شد. سیمان پرتلند مورد استفاده معمولا باید کهنه می‌بود تا با آزمایش سلامت سیمان[9] به روش جوشاندن[10] مطابقت داشته باشد. سنگدانه‌ها، مخلوط درهم از شن و ماسه حاصل از منبع قرضه بودند و طرح مخلوط بتن بر اساس پیمانه‌کردن با بیل[11] انجام می‌شد (Davis، ۱۹۶۳). از دهه اول قرن بیستم تاکنون، پیشرفت عظیمی حاصل شده و هنر و علم سدسازی، به وضعیت بسیار پیشرفته‌ای رسیده است. در حال حاضر، انتخاب و طرح مخلوط مصالح بتن برای ایجاد مقاومت، دوام و نفوذناپذیری مناسب محصول نهایی را می‌توان با دقت پیش‌بینی و کنترل کرد.

مراحل اصلی توسعه فن‌آوری بتن حجیم، از ابتدا تا وضعیت کنونی در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. امروزه در ساخت سدهای بزرگ، پیمانه‌کردن و اختلاط مصالح به‌صورت دقیق و خودکار انجام می‌گیرد. با روش‌های معمول، می‌توان بتن را با نرخ ۷۶۵۰ مترمکعب در روز در جام‌هایی با حجم ۹ مترمکعب به گونه‌ای ریخت که حتی در هوای بسیار گرم، دمای بتن در هنگام ریختن کمتر از ۱۰°C باشد. سد Grand Coulee همچنان رکورد نرخ بتن‌ریزی ماهانه با حجم ۴۱۰,۰۰۰ مترمکعب را در اختیار دارد و پس از آن، سد Itaipu در مرز برزیل و پاراگوئه با نرخ بتن‌ریزی ماهانه با حجم ۳۳۷,۰۰۰ مترمکعب قرار گرفته است (Itaipu Binacional، ۱۹۸۱).

۱-۲-۱- پیش از ۱۹۰۰

پیش از آغاز قرن بیستم، بیشتر سیمان پرتلند مصرفی در ایالات متحده از اروپا وارد می‌شد. همه سیمان‌ها، بر اساس استانداردهای فعلی بسیار درشت‌دانه و معمولا نیم‌پخته[12] بودند و مقدار آهک آزاد زیادی داشتند.

---

[9] Soundness test
[10] Boiling test
[11] Shovelful
[12] Underburned

در سدهای آن دوره، مخلوط درهم شن و ماسه برداشت‌شده از منبع قرضه بدون شستشو استفاده می‌شد. مخلوط‌های بتن از نظر مقدار سیمان و نسبت سنگدانه ریز به سنگدانه درشت بسیار متفاوت بودند. اختلاط، معمولا به صورت دستی و پیمانه‌کردن با بیل، فرغون، جعبه یا گاری دستی انجام می‌شد. تاثیر نسبت آب به سیمان (*w/c*) ناشناخته بود و به‌طور کلی هیچ تلاشی برای کنترل حجم آب اختلاط انجام نمی‌شد. به جز بررسی چشمی بتن تازه مخلوط‌شده، هیچ معیاری برای سنجش روانی وجود نداشت.

برخی از سدها، معماری شبه‌بنایی[13] داشتند که در آن، سنگ‌های بزرگ[14] در یک بتن بسیار شل، نیمه‌مدفون شده بودند. سپس فضاهای بین این سنگ‌های بزرگ با بتن پر می‌شد. برخی از سدهای اولیه، بدون درزهای جمع‌شدگی[15] و بدون ارتفاع منظم نوبت‌های بتن‌ریزی ساخته شدند. با این حال، استثنائات قابل‌توجهی وجود داشت که در آن‌ها، بتن در بلوک‌های قالب‌بندی‌شده ریخته می‌شد. در این حالت، ارتفاع نوبت بتن‌ریزی، کنترل و بتن با روانی بسیار کم در لایه‌های نازک ریخته و با کوبش دستی (تخماق‌زنی)[16] به سختی متراکم می‌شد.

عموما مخلوط بتن، با فرغون به قالب‌ها منتقل می‌شد. در مواردی که در معماری شبه‌بنایی حاوی سنگ‌های بزرگ استفاده می‌شد، جرثقیل‌های دکلی ثابت[17] در محل ساخت، بتن شل و سنگ‌های بزرگ را جابه‌جا می‌کردند. نرخ بتن‌ریزی، حداکثر چند صد مترمکعب در روز بود. به‌طور کلی، هیچ تلاشی برای عمل‌آوری رطوبتی بتن انجام نمی‌گرفت.

یک استثنا برای این روش‌های معمول، سد Lower Crystal Springs بود که در سال ۱۸۹۰ تکمیل شد. این سد در نزدیکی شهر San Mateo ایالت کالیفرنیا، تقریبا در ۳۰ کیلومتری جنوب سانفرانسیسکو واقع شده است. بر اساس اطلاعات موجود، این سد اولین سد در آمریکا بود که در آن، حداکثر مقدار مجاز آب اختلاط مشخص شد. بتن این سازه با ارتفاع ۴۷ متری، در سامانه‌ای از بلوک‌های به هم قفل‌ویست‌شده با شکل و ابعادی مشخص ریخته شد. یک عکس قدیمی نشان می‌دهد که برای متراکم‌کردن بتن خشک (بتنی با مقدار آب کم و احتمالا کارایی بسیار کم)، از کوبه‌های دستی (تخماق‌ها) استفاده شده است. به منظور محافظت در برابر آفتاب، بتن با تخته‌هایی پوشانده و تا زمان سخت‌شدن، مرطوب نگه داشته شده بود.

۱-۲-۲- از ۱۹۰۰ تا ۱۹۳۰

پس از شروع قرن بیستم، ساخت انواع سدهای بتنی سرعت زیادی گرفت. سدهای بیشتر و مرتفع‌تری برای آبیاری و تامین برق و آب ساخته شد. بتن‌ریزی به وسیله برجک‌ها و ناوه‌های شیب‌دار[18] (شوت‌ها) رایج شد. در ایالات متحده، صنعت سیمان پرتلند کاملا مستقر و سیمان به ندرت از اروپا وارد شد. در ۳۰ سال

---

[13] Cyclopean masonry
[14] Plum
[15] Contraction joint
[16] Hand tamping
[17] Stiff-leg derrick
[18] Chute

ابتدایی قرن بیستم، مشخصات ASTM برای سیمان پرتلند، به جز افزایش نسبتا کم در نرمی مورد نیاز که توسط دانه‌بندی با الک تعیین می‌شد، تغییر ناچیزی داشت. به غیر از محدودیت مقدار اکسید منیزیم و افت سرخ‌شدن[19]، الزامات شیمیایی دیگری وجود نداشت. در این دوره، ویژگی‌ها و دانه‌بندی سنگدانه‌ها مورد توجه بیشتری قرار گرفت. پیشرفت بسیار چشمگیری در تکامل روش‌های طرح مخلوط بتن حاصل گردید. با استفاده از مطالعات انجام گرفته قبل از سال ۱۹۱۸، رابطه بین مقاومت بتن و نسبت آب به سیمان توسط Abrams (۱۹۱۸) ایجاد شد. با این حال، به مقدار آب اختلاط توجه کمی می‌شد. روش‌های بتن‌ریزی غالب، با استفاده از برجک‌ها و ناوه‌های با شیب کم بود و برای حداقل ۱۲ سال پس از اثبات اهمیت *w/c* همچنان استفاده از مخلوط‌های بیش از حد شل معمول بود.

از سیمان پرتلند، اغلب بدون افزودنی مکمل معدنی استفاده می‌شد. استثناتاتی مانند سیمان‌های حاوی ماسه ریز مورد استفاده توسط اداره احیای اراضی ایالات متحده (که اکنون سازمان احیای اراضی ایالات متحده[20] (USBR) نامیده می‌شود) در ساخت سد Elephant Butte در ایالت نیومکزیکو و سد Arrowrock در ایالت آیداهو وجود داشت. سد قوسی وزنی Arrowrock با ارتفاع ۱۰۷ متر، هنگام تکمیل در سال ۱۹۱۵، بلندترین سد جهان بود. بخش‌های درونی این سد با بتن کم‌سیمان[21] و سطوح بیرونی آن با بتن پرسیمان‌تر[22] ساخته شد. مخلوط بتن بخش‌های درونی، تقریبا حاوی ۲۲۳ kg/m^3 از یک ترکیب سیمان آمیخته با گرانیت پودرشده بود. مخلوط سیمان، با آسیاب‌کردن توام مقادیر تقریبا مساوی سیمان پرتلند و گرانیت پودرشده در کارگاه تولید شد، به‌طوری که بیش از ۹۰ درصد آن از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) عبور کرد. این ترکیب آسیاب‌شده، بسیار ریزتر از سیمانی بود که در آن زمان تولید می‌شد.

در بتن یکی از تکیه‌گاه‌های کناری سد Big Dalton، که یک سد چندقوسی ساخته‌شده توسط اداره ناحیه‌ای کنترل سیلاب لس‌آنجلس[23] در اواخر دهه ۱۹۲۰ است، استثنای دیگری رخ داد. از پومیسیت[24] (یک نوع پوزولان) شهر Friant ایالت کالیفرنیا، به عنوان جایگزین ۲۰ درصد جرمی سیمان پرتلند استفاده شد.

در اوایل قرن بیستم، بتن حاوی سنگ‌های بزرگ از رده خارج شد. برای سدهای با سطح مقطع ضخیم، حداکثر اندازه سنگدانه برای بتن حجیم به ۲۵۰ میلی‌متر افزایش یافت. آزمایش اسلامپ، به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری روانی بتن مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش آزمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ و ۴۰۰×۲۰۰ میلی‌متر در ایالات متحده رایج شد. کشورهای اروپایی برای آزمایش مقاومت در سنین مختلف، اغلب از آزمونه‌های مکعبی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر استفاده می‌کردند. تا پایان دهه ۱۹۲۰، معمولا از مخلوط‌کن‌هایی[25] با ظرفیت ۲/۳ مترمکعب استفاده می‌شد و برخی از آن‌ها ظرفیتی برابر ۳ مترمکعب داشتند.

---

[19] Loss on ignition
[20] U.S. Bureau of Reclamation
[21] Lean concrete
[22] Rich concrete
[23] Los Angeles County Flood Control District
[24] Pumicite
[25] Mixer

در این دوره، فقط سیمان نوع I (سیمان پرتلند) موجود بود. در مناطقی که شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن[۲۶] شدت داشت، استفاده از مخلوط بتن حاوی ۳۳۵ kg/m³ سیمان برای کل توده بتن، متداول بود. تجربه ساخت با استفاده از مخلوط بخش‌های درونی حاوی ۲۲۳ kg/m³ سیمان و مخلوط سطوح بیرونی حاوی ۳۳۵ kg/m³ سیمان، برای مقاوم کردن سطوح بیرونی سد در برابر شرایط اقلیمی سخت و در عین حال به حداقل رساندن کل سیمان مصرفی، به‌کار گرفته شد. در مناطقی با شرایط اقلیمی معتدل، در برخی از سدها از نوعی بتن کم‌سیمان به مقدار ۲۲۳ kg/m³ استفاده شد (TVA[۲۷]، ۱۹۴۰).

یک استثنا دیگر، سد Theodore Roosevelt بود که در سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۱ در ایالت آریزونا ساخته شد. این سد، یک سازه بنایی لاشه‌سنگی[۲۸] است که رویه آن از بلوک‌های سنگی چیده‌شده با ملات سیمان پرتلند ساخته شده بود. برای این سازه، میانگین مقدار سیمان مصرفی تقریبا ۱۶۷ kg/m³ محاسبه شده است. برای توده داخلی، سنگ‌های استخراج‌شده از معدن، در ملات ۱ به ۲/۵ حاوی تقریبا ۵۰۰ kg/m³ سیمان مدفون شدند. در هر لایه، منافذ بین سنگ‌های مجاور هم، با بتن حاوی ۳۳۵ kg/m³ سیمان پر می‌شد و خرده سنگ‌ها به صورت دستی در آن قرار می‌گرفت. این شرایط، دلیل میانگین بسیار کم مقدار سیمان مصرفی است. سرعت ساخت کند بود و سد Roosevelt احتمالا آخرین سد بزرگی به شمار می‌رود که در ایالات متحده با این روش ساخته شده است.

۱-۲-۳- از ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۰

این بازه زمانی، دوره گسترش سریع ساخت سدها با بتن حجیم بود. استفاده از روش برجک و ناوه شیب‌دار در این دوره کاهش یافت و تنها در پروژه‌های کوچک مورد استفاده قرار گرفت. بتن، معمولا توسط جام‌های بزرگ، جرثقیل‌ها، جرثقیل‌های کابلی[۲۹]، سامانه‌های ریلی یا ترکیبی از آن‌ها ریخته می‌شد. در پروژه‌های ساختمانی بزرگ‌تر و با کنترل دقیق‌تر، سنگدانه‌ها با دقت فرآوری شدند، طرح مخلوط مواد تشکیل‌دهنده به صورت جرمی تعیین و آب اختلاط به‌صورت حجمی اندازه‌گیری می‌شد. با به‌کارگیری مواد سیمانی مکمل[۳۰] (SMCs)، افزودنی‌های هوازا و افزودنی‌های شیمیایی، کارایی بتن بهبود یافت. اسلامپ‌های کم تا حدود ۷۶ میلی‌متر بدون لرزاندن به کار گرفته شد؛ با این حال، در سال‌های بعدی این دوره، در اکثر پروژه‌ها از لرزاننده‌های بزرگ میله‌ای[۳۱] (خرطومی) برای متراکم‌کردن بتن استفاده گردید.

مطالعه سوابق و بازرسی واقعی تعداد قابل‌توجهی از سدها نشان می‌دهد که شرایط متفاوتی بوجود آمده است که قابل توضیح نیستند. از دو سازه‌ای که با کیفیت مشابه و در معرض شرایط محیطی یکسان بودند، یکی ترک‌خوردگی بیش از حد را نشان می‌داد در حالی که دیگری، پس از یک دوره بهره‌برداری مشابه، در شرایط تقریبا بی‌نقص قرار داشت. سوابق موجود در چند سد، تغییرات گسترده‌ای در دمای درونی ناشی

---

[26] Freezing and thawing
[27] Tennessee Valley Authority
[28] Rubble masonry
[29] Cableway
[30] Supplementary cementitious materials
[31] Spud vibrator

از هیدراته‌شدن سیمان را نشان می‌دهد. برای درک بهتر تفاوت‌های ناشی از رفتار حرارتی مشاهده شده در کارگاه، موسسه بتن آمریکا[۳۲] (ACI)، کمیته‌ای را برای مطالعه اثرات بتن حجیم تاسیس کرد.

کمیته ACI 207 (کمیته بتن حجیم)، در سال ۱۹۳۰ با هدف جمع‌آوری اطلاعات در مورد ویژگی‌های مهم بتن حجیم در سدها و عوامل موثر بر این ویژگی‌ها سازماندهی شد. پیش از این، Bogue (۱۹۲۹) ترکیبات اصلی سیمان پرتلند را شناسایی کرده بود. Hubert Woods و همکارانش مشغول مطالعاتی برای تعیین میزان مشارکت هریک از این ترکیبات در گرمای هیداته‌شدن و مقاومت ملات و بتن بودند (Woods و همکاران، ۱۹۳۲).

تا شروع سال ۱۹۳۰، سد Hoover در ایالت نوادا در مراحل اولیه طراحی بود. به دلیل بزرگی بی‌سابقه این سد، مطالعات عمیقی برای تعیین تاثیر عواملی مانند جنس و نرمی سیمان، مقدار سیمان، دمای عمل‌آوری و حداکثر اندازه سنگدانه بر گرمای هیدراته‌شدن سیمان، مقاومت فشاری و سایر ویژگی‌های ملات و بتن انجام شد (USBR، ۲۰۰۹).

نتایج این مطالعات، به استفاده از سیمان کم‌حرارت[۳۳] در سد Hoover منجر شد و نیز برای نخستین بار، اطلاعاتی برای طراحی سامانه لوله‌های مدفون خنک‌کننده[۳۴] در این سد ارائه شد. سیمان کم‌حرارت برای اولین بار در سد Morris، در نزدیکی شهر Pasadena در ایالت کالیفرنیا، که ساخت آن یک سال قبل از سد Hoover آغاز شده بود، به‌کار رفت. در سد Hoover، ظرفیت مرکز بتن‌ساز، بی‌سابقه بود. پیمانه‌کردن و اختلاط، به‌صورت کاملا خودکار انجام می‌شد. رکورد روزانه حجم بتن تولیدی، برای دو مرکز بتن‌ساز مجهز به مخلوط‌کن‌هایی با حجم ۳ مترمکعب، بیش از ۷۶۰۰ مترمکعب بود. بتن در جام‌هایی با حجم ۶ مترمکعب توسط جرثقیل‌های کابلی، حمل و در ابتدا با کوبیدن توسط میله و تخماق متراکم می‌شد. در بهار سال ۱۹۳۳، لرزاننده‌های درونی[۳۵] بزرگ معرفی شدند و پس از آن برای متراکم‌کردن بقیه بتن مورد استفاده قرار گرفتند. در مدت تقریبا ۲ سال، ۲,۴۴۰,۰۰۰ مترمکعب بتن ریخته شد.

سد Hoover سرآغاز دوره‌ای از روش‌های بهبودیافته در ساخت سدهای بتنی بزرگ بود. روش‌های به‌کاررفته در این سد که ساخت آن با سرعتی بی‌سابقه در سال ۱۹۳۵ به اتمام رسید، با برخی اصلاحات، در بیشتر سدهای بتنی بزرگی که از آن زمان در ایالات متحده و بسیاری از کشورهای دیگر ساخته شده‌اند، استفاده شده است.

استفاده از یک ماده پوزولانی (پومیسیت) توسط اداره ناحیه‌ای کنترل سیلاب لس‌آنجلس در سد Big Dalton آزموده شد. برای سد Bonneville که توسط گروه مهندسی ارتش ایالات متحده[۳۶] در سال ۱۹۳۸ در Oregon تکمیل گردید، از مخلوط سیمان پرتلند و پوزولان استفاده شد. این مخلوط، بوسیله آسیاب‌کردن کلینکر سیمان به همراه یک پوزولان فرآوری‌شده که از کلسینه‌کردن یک ماده آتشفشانی دگرگونی در دمای تقریبا ۸۲۰°C بدست آمده بود، تولید شد. نسبت وزنی کلینکر سیمان به پوزولان ۳ به ۱ بود. این نوع سیمان بر اساس نتایج آزمایش بر روی بتن که نشان‌گر افزایش کم دما بود، برای استفاده در سد Bonneville

[32] American Concrete Institute
[33] Low-heat cement
[34] Embedded pipe cooling system
[35] Internal vibrator
[36] United States Army Corps of Engineers

انتخاب شد. این سد، اولین سد بتنی شناخته‌شده در ایالات متحده است که در آن از سیمان آمیخته پرتلند پوزولانی استفاده شده است. استفاده از پوزولان به عنوان یک ماده سیمانی جداگانه که به میزان ۳۰ درصد یا بیشتر، به کل ماده سیمانی به مخلوط کن افزوده می‌شود، توسط اداره احیای اراضی ایالات متحده (USBR)، سازمان عمران دره تنسی[۳۷] (TVA)، گروه مهندسی ارتش ایالات متحده (USACE) و دیگر نهادها به روش متداول تبدیل شده است.

افزودنی‌های شیمیایی که در جهت کاهش مقدار آب در مخلوط‌های بتن، کنترل گیرش و افزایش مقاومت بتن عمل می‌کنند، در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ به‌طور جدی به‌عنوان موادی که می‌توانند در بتن حجیم مفید واقع گردند، شناخته شدند. از آن زمان به بعد، افزودنی‌های شیمیایی در بیشتر بتن‌های حجیم استفاده شده‌اند.

در حوالی سال ۱۹۴۵، در اکثر سازه‌هایی که در معرض شرایط هوازدگی شدید قرار داشتند، واردکردن عمدی هوا در بتن به روشی استاندارد تبدیل شد. این روش در بتن سطوح نمایان سدها و نیز روسازی‌های بتنی و به‌طور کلی بتن مسلح به کار گرفته می‌شود. واردکردن عمدی هوا در بتن بخش درونی و سطوح بیرونی تقریبا تمام سدهایی که از سال ۱۹۴۵ ساخته شده‌اند به کار رفته است. گاهی اوقات واردکردن عمدی هوا در بتن حجیم در مناطقی که تحت تاثیر چرخه‌های یخزدن و آب‌شدن قرار ندارند، به عنوان روشی برای افزایش کارایی بدون افزودن سیمان استفاده می‌شود. این روش اخیرا در سازه کنترلی کمکی سد Folsom در شهر Folsom ایالت کالیفرنیا استفاده شد (USBR، ۱۹۹۹).

۱-۲-٤- از ۱۹۷۰ تاکنون

در این دوره، بتن غلتکی[۳۸] ابداع شد و به روش غالب برای ریختن بتن حجیم سدها مبدل گشت. از آنجا که در حال حاضر بتن غلتکی به صورت متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد، ACI 207.5R، مرجعی اصلی برای این موضوع است. سایر روش‌های بتن‌ریزی همچنان در بسیاری از پروژه‌های بزرگ و کوچک استفاده می‌شوند، به ویژه در مواردی که استفاده از بتن غلتکی غیرعملی یا دشوار است. این موارد شامل سدهای قوسی، دیوارهای بزرگ و پی‌ها می‌شوند، به ویژه در مواقعی که آرماتور مورد نیاز باشد.

پیشرفت بی‌وقفه افزودنی‌های شیمیایی، امکان بتن‌ریزی بسیار حجیم در زیر آب که بتن به صورت جانبی تا ۳۰ متر جریان می‌یابد را فراهم کرده است. روش‌های ساخت سازه‌های شناور[۳۹] که در آن‌ها اعضای سازه‌ای به صورت پیش‌ساخته[۴۰] هستند و بعدا با بتن‌ریزی زیر آب پر می‌شوند، ابداع شده‌اند.

در اواسط دهه ۱۹۹۰، توجه به اثرات ایجاد دماهای درونی زیاد، اختلاف دما در درون اعضا، و بتن‌ریزی‌هایی که به‌طور سنتی بتن حجیم در نظر گرفته نمی‌شدند، آغاز شد. این نگرانی‌ها، با افزایش قابل‌توجه ترک‌خوردگی سازه‌ها و افزایش تمرکز بر عمر بهره‌برداری بلندمدت زیرساخت‌های حمل و نقل آغاز گردید.

---

[37] Tennessee Valley Authority
[38] Roller-compacted concrete
[39] Float-in
[40] Precast or prefabricated

این افزایش ترک‌خوردگی، به استفاده از بتن حاوی مقادیر زیاد سیمان و مواد سیمانی مکمل، آسیاب ریزتر سیمان، مقاومت فشاری اولیه زیاد و روش‌های ساخت سریع مرتبط بود. این روش‌ها، به بتن‌ریزی با افزایش زیاد دما و اختلاف زیاد دمای درونی منجر می‌شد. در حوالی همین دوره، اثر مخرب تشکیل تاخیری اترینگایت[41] (DEF) در صنعت پیش‌ساخته به وضوح نمایان گردید و نیز به عنوان یک سازوکار محتمل برای زوال بتن غیرپیش‌ساخته شناخته شد. این موضوع به افزایش تمرکز بر کنترل حرارتی بتن‌ریزی در پروژه‌های تجاری و حمل‌ونقل منجر شد، که از طریق اطلاق بتن‌ریزی حجیم به بتن‌ریزی در این پروژه‌ها انجام گرفت. در حال حاضر هیچ تعریف استانداردی از ویژگی‌های مشخص بتن یا بتن‌ریزی‌هایی که به کنترل دما و اختلاف دما نیاز دارند وجود ندارد، اگرچه تلاش‌هایی برای ایجاد چنین تعریفی بر اساس ابعاد بتن‌ریزی و تولید حرارت بتن مورد استفاده در حال انجام است.

ACI 350، ACI 301 و ACI 349 شامل الزاماتی برای مشخصات بتن‌ریزی‌هایی که بتن حجیم در نظر گرفته می‌شوند، هستند. ACI 301 توصیه می‌کند که بتن‌ریزی‌هایی که ضخامت ۱/۲ متر یا بیشتر دارند یا قادر به ایجاد مقدار گرمای زیاد در سنین اولیه هستند، باید به عنوان بتن حجیم در نظر گرفته شوند. بتن‌ریزی‌هایی که حرارت را محبوس می‌کنند مانند مواردی که گرمای زمین اجازه خنک‌شدن بتن‌ریزی را نمی‌دهد یا در بتن‌ریزی‌های لایه لایه که زمان بسیار کمی برای استهلاک کافی حرارت وجود دارد نیز باید به عنوان بتن حجیم در نظر گرفته شوند. ACI 301، دمای حداکثر بتن را به ۷۰°C و اختلاف دما را به کمتر از ۲۰°C محدود می‌کند. از زمان شروع بتن‌ریزی تا زمانی که گرم‌ترین قسمت بتن تا دمای قابل‌قبول که بر اساس میانگین دمای هوا تعیین می‌شود، خنک شود باید دماها و تغییرات دما در بتن کنترل گردد. این الزام، برای حفظ حداکثر دما و تغییرات دما در محدوده‌ای مشخص در نظر گرفته شده است. این تغییرات دمایی اغلب در مواردی رخ می‌دهند که کنترل‌های حرارتی خیلی زود متوقف شوند. ACI 301 همچنین لازم می‌داند که برای تشریح اقدامات خاصی که برای کنترل دما و اختلاف‌های دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، برنامه کنترل حرارتی تدوین و ارائه شود. علاوه بر آن برای نشان‌دادن اینکه دما از مقادیر مشخص‌شده فراتر نرفته است، پایش دما انجام گیرد. کلیه الزامات مذکور در ACI 301، الزامات پیش‌فرض هستند و می‌توانند توسط مهندس ناظر یا با درخواست پیمانکار، پس از بررسی و تایید مهندس مشاور طرح اصلاح شوند.

۱-۲-۵- مقدار سیمان

در اواخر دهه ۱۹۲۰ و اوایل دهه ۱۹۳۰، به‌طور تجربی یک قانون نانوشته وجود داشت که بتن حجیم برای سدهای بزرگ باید حاوی بیش از ۲۲۳ kg/m³ سیمان باشد. اما برخی از مراجع آن دوره معتقد بودند که مقدار سیمان هرگز نباید کمتر از ۳۳۵ kg/m³ باشد. مقدار سیمان برای بتن بخش درونی سد Norris (TVA، 1940) که توسط سازمان عمران دره تنسی (TVA) در سال ۱۹۳۶ ساخته شد، ۲۲۳ kg/m³ بود. میزان ترک‌خوردگی در این سد بیش از حد بود.

---

[41] Delayed ettringite formation

مقاومت فشاری آزمونه‌های ۱ ساله استوانه‌ای کارگاهی ۳۰۰ × ۱۵۰ میلی‌متری الک‌شده[۴۲]، ۴۸ MPa بود. به‌طور مشابه، آزمونه‌های ۹۱۰ × ۴۶۰ میلی‌متری ۲ ساله مغزه‌گیری‌شده از بتن مرحله اول سد Grand Coulee که حاوی ۲۲۳ kg/m³ سیمان بود، مقاومتی بیش از ۵۵ MPa از خود نشان دادند. سیمان مورد استفاده، بر اساس ترکیب از نوع حرارت متوسط بود که مطابق با سیمان پرتلند نوع II فعلی است. با توجه به تنش‌های نسبتا کم در دو سازه یادشده، مشخص شد که این مقاومت‌های فشاری زیاد، غیرضروری هستند.

مقدار سیمان مصرفی در بتن حجیم سد Hiwassee، که ساخت آن توسط سازمان عمران دره تنسی در سال ۱۹۴۰ تکمیل شد، ۱۶۷ kg/m³ بود که این مقدار برای آن زمان به‌طور غیر معمول کم بود. سد Hiwassee به‌طور غیرمنتظره، عاری از ترک حرارتی بود که به سرآغاز شیوه‌ای برای کاهش مقدار سیمان تبدیل شد. از آن زمان به بعد، مقدار سیمان پرتلند نوع II در بتن حجیم بخش‌های درونی سد، تقریبا برابر ۱۴۰ kg/m³ و حتی ۱۲۶ kg/m³ بوده است. نمونه‌ای از یک سد وزنی بزرگ که مقدار سیمان پرتلند نوع II در بتن حجیم برابر ۱۴۰ kg/m³ بود، سد Pine Flat در کالیفرنیاست که توسط گروه مهندسی ارتش ایالات متحده در سال ۱۹۵۴ تکمیل شد. در سدهای قوسی مرتفع که معمولا تنش‌ها در مقایسه با سدهای وزنی بزرگ، بیشتر هستند، مقدار سیمان بتن حجیم معمولا در محدوده ۱۸۰ kg/m³ تا ۲۷۰kg/m³ است که مقدار سیمان بیشتر، در سدهای قوسی با ضخامت کمتر و تحت تنش‌های بیشتر استفاده می‌شود.

نمونه‌هایی از مقدار مواد سیمانی، از جمله پوزولان، برای سدهای جدیدتر عبارتند از:

الف) سدهای قوسی: مقدار ۱۶۷ kg/m³ سیمان و پوزولان در سد Glen Canyon، یک سد قوسی با ضخامت نسبتا زیاد در ایالت آریزونا، که در سال ۱۹۶۳ ساخته شد؛ مقدار ۲۲۱ kg/m³ سیمان در سد Morrow Point که در سال ۱۹۶۸ در ایالت کلرادو، احداث گردید؛ و مقدار ۱۵۰ kg/m³ تا ۱۸۰ kg/m³ سیمان پرتلند پوزولانی نوع IP در سد El Cajon که در سال ۱۹۸۴ بر روی رودخانه Humuya در هندوراس ساخته شد.

ب) سدهای وزنی بدون انحنا: مقدار ۱۳۴ kg/m³ سیمان پرتلند نوع II در سد Detroit که در سال ۱۹۵۲ در ایالت اورگان احداث گردید؛ مقدار ۱۱۵ kg/m³ سیمان پرتلند نوع II و خاکستر بادی در سد Libby در ایالت مونتانا، که در سال ۱۹۷۲ ساخته شد؛ و مقدار ۱۰۹ kg/m³ سیمان پرتلند نوع II و رس کلسینه‌شده در سد Ilha Solteira که در سال ۱۹۷۳ در برزیل ساخته شد.

ج) سرریزها[۴۳]: مقدار ۷۶ kg/m³ سیمان و ۲۲۷ kg/m³ سیمان سرباره برای بتن با مقاومت ۲۱ MPa، و مقدار ۲۵۲ kg/m³ سیمان و ۱۰۷ kg/m³ سیمان سرباره برای بتن با مقاومت ۳۴/۵ MPa در سرریز کمکی سد Folsom که در سال ۲۰۱۷ در ایالت کالیفرنیا احداث شد.

طرح مخلوط‌های بتن حجیم سازه‌ای، در مقایسه با طرح مخلوط‌های بتن حجیم معمولی که در ساخت سد استفاده می‌شوند، اغلب حاوی مقدار مواد سیمانی بیشتری هستند. این طرح مخلوط‌ها اغلب برای برآورده ساختن الزامات مقاومت زیاد، جایدهی در نواحی پرتراکم، قابلیت پمپ‌شدن و دیگر محدودیت‌های اعضای

---

[۴۲] Wet-screening: فرآیندی که در آن، مخلوط بتن تازه مورد استفاده برای آزمایش به منظور حذف مجموعه‌ای از سنگدانه‌های بزرگ‌تر از اندازه معین، از الک عبور داده می‌شود.

[۴۳] Spillway

سازه‌ای مورد نیاز هستند. برای مثال، طرح مخلوط‌های بتن حجیم سازه‌ای در اغلب اوقات دارای مقدار مواد سیمانی بیش از $415\ kg/m^3$ هستند. به منظور جلوگیری از افزایش دمای زیاد در مخلوط‌های بتن حجیم سازه‌ای، اغلب از درصد جایگزینی زیاد مواد سیمانی مکمل استفاده می‌شود. به عنوان مثال، جایگزینی سیمان با ۴۰ تا ۵۰ درصد خاکستر بادی یا ۷۰ درصد سیمان سرباره‌ای متداول است.

۱-۲-۶- کنترل دما

روش پیش‌سرمایش[۴۴] مصالح بتن قبل از اختلاط به منظور دستیابی به حداکثر دمای کمتر بتن حجیم بخش درونی در طول دوره هیدراته‌شدن، در اوایل دهه ۱۹۴۰ آغاز شد و به‌طور گسترده در ساخت سدهای بزرگ مورد استفاده قرار گرفت. به نظر می‌رسد اولین استفاده از روش پیش‌سرمایش، در زمان ساخت سد Norfork از سال ۱۹۴۱ تا ۱۹۴۵ توسط گروه مهندسی ارتش ایالات متحده اتفاق افتاده است. برنامه این بود که در ماه‌های گرم‌تر سال، از یخ خُردشده در آب مخلوط استفاده شود. با انجام این کار، این امکان فراهم شد تا دمای بتن حجیم تازه مخلوط‌شده، تقریبا به میزان $5/6\ ^\circ C$ کاهش یابد.

نه تنها از یخ خردشده در آب اختلاط استفاده شد، بلکه سنگدانه‌های درشت نیز قبل از پیمانه‌کردن، با هوای سرد یا آب سرد پیش‌خنک‌سازی شده‌اند. سنگدانه ریز و درشت، با روش‌های مختلفی همچون اشباع‌سازی با خلاء و تزریق نیتروژن مایع در طول پیمانه‌کردن و اختلاط بتن، پیش‌سرمایش شده‌اند.

در ایالات متحده، استفاده از بتن حجیم خنک‌سازی‌شده در مواقعی که شرایط محیطی، گرم یا خیلی گرم باشد به روشی متداول تبدیل شده است. برای سدها، این دمای بتن‌ریزی اغلب به میانگین دمای هوای سالانه در محل پروژه محدود شده است. محدودیت دما در ابتدا برای اطمینان از اینکه سازه سد در طول عمر بهره‌برداری خود در شرایط تنش حرارتی کم قرار داشته باشد، در نظر گرفته شده بود. ACI 301 در ابتدا لازم می‌دانست که برای بتن با کنترل حرارتی، دمای بتن در زمان ریختن، بیشتر از $20^\circ C$ نباشد. با این حال، این محدودیت در نهایت حذف شد و با کنترل دما و اختلاف دمای بتن‌ریزی جایگزین شد، زیرا بتن با کنترل حرارتی معمولا ملاحظات محدودکننده سدها را نداشت.

در برخی از سدهای بزرگ، از جمله سد Hoover، ترکیبی از پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش تا دمای محیط یا کمتر از آن توسط لوله‌های مدفون استفاده شده است (USBR، ۱۹۴۹). یک مثال خوب از این روش، سد Glen Canyon است که در آن دمای محیط در ماه‌های تابستان می‌تواند به بیش از $38^\circ C$ برسد. دمای بتن تازه پیش‌سرمایش‌شده از $10^\circ C$ تجاوز نکرد. برای رسیدن به این دمای اولیه کم، هم از سنگدانه‌های خنک‌شده و هم از یخ خردشده استفاده شد. حداکثر دمای بتن در حال سخت‌شدن با استفاده از لوله‌های مدفون، کمتر از $24\ ^\circ C$ نگه داشته شد. گاهی اوقات در سدهای وزنی و قوسی که دارای درزهای عرضی[۴۵] هستند، استفاده از پس‌سرمایش مورد نیاز است تا این درزهای عرضی بتوانند با خنک‌سازی بتن سخت‌شده،

---

[44] Precooling

[45] Transverse joint

برای تزریق روان‌ملات[۴۶] بازتر شوند. پس‌سرمایش، موجب کنترل دماهای بیشینه بتن می‌شود که به کنترل ترک‌خوردگی حرارتی نیز کمک می‌کند. در بتن‌های با حرارت کنترل‌شده، روش پس‌سرمایش به عنوان یکی از راه‌های کنترل افزایش دمای زیاد بتن حاوی مقدار سیمان زیاد و نیز برای کاهش مدت زمان حفظ اقدامات کنترل حرارتی، به‌طور فزاینده‌ای استفاده می‌شود. گزارش ACI 207.4R-23 اطلاعاتی در مورد سامانه‌های پس‌سرمایش ارائه می‌دهد.

۱-۲-۷- طراحی بر اساس مقاومت بلندمدت

مهم‌ترین پیشرفت دهه ۱۹۵۰، کنار گذاشتن مقاومت ۲۸ روزه به عنوان یک الزام طراحی برای سدها بود. در سازه‌های حجیمی مانند سدها، حداکثر تنش‌های تحت بارگذاری معمولا تا زمانی که بتن دست‌کم ۱ ساله نشده باشد، ایجاد نمی‌شوند. در شرایط عمل‌آوری بتن حجیم حاوی سیمان و مواد مکمل سیمانی که به‌طور معمول استفاده می‌شوند، افزایش مقاومت بتن بین ۲۸ روز تا ۱ سال عموما زیاد است. ACI232.2R گزارش می‌کند که این افزایش مقاومت، بسته به مقدار و نسبت مواد سیمانی، ویژگی‌های سنگدانه‌ها و بازه زمانی مقرر برای افزایش مقاومت، می‌تواند از ۳۰ درصد تا بیش از ۱۰۰ درصد متغیر باشد. مشخص کردن مقاومت موردنظر بتن حجیم در سنین زیاد مانند ۵۶ یا ۹۰ روز یا حتی ۱ یا ۲ سال، به روال معمول برخی از مهندسین طراح سد تبدیل شده است.

[46] Grouting

فصل ۲

تعاریف

برای مشاهده فهرست جامع تعاریف، به آخرین نسخه واژگان سیمان و بتن ACI مراجعه شود. تعاریف ارائه شده در این فصل، مکمل فهرست یادشده هستند.

بتن حجیم: در حال حاضر هیچ تعریف پذیرفته‌شده همگانی از بتن حجیم بر مبنای ویژگی‌های خاص بتن یا بتن‌ریزی‌هایی که نیاز به کنترل دما و اختلاف دما دارند، وجود ندارد. فهرست واژگان سیمان و بتن ACI، بتن حجیم را به عنوان هر حجمی از بتن سازه‌ای تعریف می‌کند که در آن ترکیبی از ابعاد قطعه در حال بتن‌ریزی، شرایط مرزی، ویژگی‌های مخلوط بتن و شرایط محیطی می‌تواند به تنش‌های حرارتی نامطلوب، ترک‌خوردگی، واکنش‌های شیمیایی مخرب یا کاهش مقاومت بلندمدت در نتیجه افزایش دمای بتن در اثر گرمای ناشی از هیدراته‌شدن سیمان منجر شود. با این حال، این تعریف هیچ راهنمایی قطعی از نظر ویژگی‌های فیزیکی بتن حجیم ارائه نمی‌دهد.

بتن با کنترل حرارتی: که به آن بتن حجیم یا بتن حجیم سازه‌ای مسلح (Reinforcement Structural Mass Concrete) RSMC نیز گفته می‌شود، به‌طور کلی به منظور توصیف بتن ساخت‌وساز به کار می‌رود که در آن، الزامات مقاومت طراحی زیادتر می‌تواند به مشکلات ناشی از ایجاد گرما مانند دمای زیاد بتن در طول عمل‌آوری و خطر زیاد ترک‌خوردگی حرارتی منجر شود. بتن با کنترل حرارتی عموما برای توصیف بتن‌هایی استفاده می‌شود که در مقایسه با بتن حجیم متعارف دارای مقدار مواد سیمانی بیشتر، افزایش دمای زیادتر، حداکثر اندازه سنگدانه کوچک‌تر هستند و یا نیاز به مقاومت فشاری زیادتر یا زودهنگام بیشتری دارند (Bartojay، ۲۰۱۲). این شرایط اغلب به مخلوط‌هایی منجر می‌شوند که در مقایسه با مخلوط‌هایی که معمولا در بتن حجیم متعارف مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمال افزایش دمای زیادتری دارند.

بتن حجیم متعارف: بتن حجیم متعارف اصطلاحی است که به‌طور کلی برای توصیف بتن حجیم مورد استفاده برای ساخت سازه‌هایی مانند سدها به کار می‌رود که در آن به دلیل بتن‌ریزی‌های مرحله‌ای در ابعاد بزرگ که گرمای زیادی را محبوس می‌کند، مشکلات حرارتی مربوط به گرما مشاهده شده است (Bartojay، ۲۰۱۲). بتن حجیم متعارف معمولا به بتن مورد استفاده برای این نوع بتن‌ریزی‌ها اطلاق می‌شود که عموما دارای مقدار مواد سیمانی نسبتا کمتر، افزایش دمای کمتر، الزامات مقاومت طراحی کمتر یا دیرهنگام‌تر، و یا حداکثر اندازه سنگدانه درشت بزرگتری هستند.

فصل ۳

مصالح و طرح مخلوط

۳-۱- کلیات

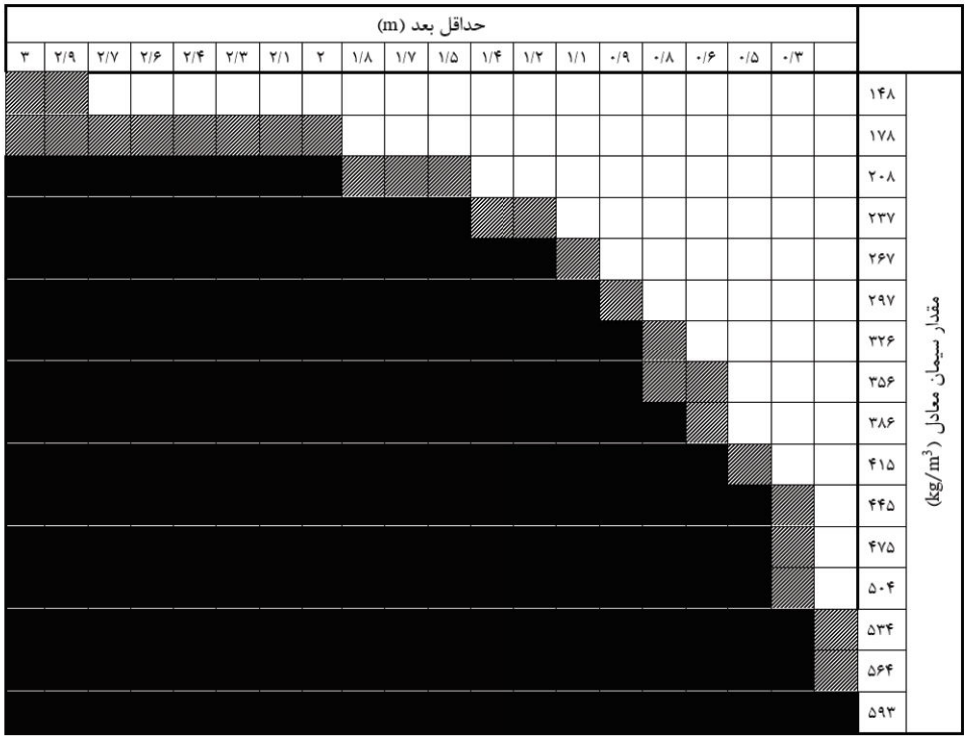
بتن حجیم، همچون سایر بتن‌ها از سیمان، سنگدانه، آب، افزودنی‌های شیمیایی و در اغلب مواقع مواد سیمانی مکمل (SCMs) مانند سرباره، خاکستر بادی، دوده‌سیلیس و متاکائولین تشکیل شده است. هدف تعیین طرح مخلوط بتن حجیم، انتخاب ترکیبی از مواد است که بتنی را برای برآورده کردن الزامات سازه‌ای بوجود می‌آورد. مسائل اقتصادی، کارایی، پایداری ابعادی، کنترل ترک‌خوردگی، افزایش دمای کم، مقاومت کافی، دوام طولانی‌مدت و در برخی موارد نفوذپذیری کم برای سازه‌های بتن حجیم از اهمیت زیادی برخوردار هستند. محدودیت‌ها و الزامات مربوط به ویژگی‌های فوق، با درنظرگرفتن شرایط بهره‌برداری و محیطی درنظرگرفته‌شده در طراحی تعیین می‌شوند. شرایط خاص کارگاه و روش‌های ساخت نیز در هنگام ارزیابی و انتخاب مواد و نسبت‌های طرح مخلوط‌های بتن حجیم در نظر گرفته می‌شوند.

برای پروژه‌های کوچک‌تر و نیز پروژه‌هایی که به دفعات کمتری نیاز به بتن با کنترل حرارتی دارند، معمولا از بتن‌های استاندارد فروشندگان بتن آماده تجاری استفاده می‌شود، زیرا ممکن است هزینه و زمان تهیه یک مخلوط بهینه برای بتن حجیم مقرون‌به‌صرفه نباشد. برای پروژه‌های بزرگ‌تر، میزان تلاش برای بهینه‌سازی مخلوط بتن در مقایسه با مزایای استفاده از بتن بهینه‌شده، اغلب ناچیز است.

این فصل، بتن‌های بهینه‌شده برای ساخت‌وساز با بتن حجیم و عوامل موثر بر انتخاب و طرح مخلوط آن‌ها را تشریح می‌کند. ممکن است توصیه‌های ارائه‌شده در این فصل برای کاربردهای خاصی همچون سازه‌های بتن مسلح پرآرماتور، بتن‌ریزی با استفاده از لوله ترمی[۴۷] و مواردی از این قبیل به اصلاحاتی نیاز داشته باشند.

۳-۱-۱- تعریف بتن حجیم با روش سیمان معادل

هنگام تهیه طرح مخلوط بتن حجیم، یکی از ملاحظات کلیدی علاوه بر مقاومت و قابلیت جای‌دهی[۴۸]، افزایش دمای بتن پس از بتن‌ریزی است. برای بتن حجیم متعارف، این معیاری است که اقدامات لازم برای رسیدگی به جنبه‌های حرارتی از جمله ارتفاع هر نوبت بتن‌ریزی، پس‌سرمایش و دمای بتن در زمان بتن‌ریزی را مشخص می‌کند.



شکل ۳-۱-۱- تعریف بتن حجیم به صورت تابعی از مقدار سیمان معادل بتن و ارتفاع هر نوبت بتن‌ریزی (Gjada و همکاران، ۲۰۱۸)

برای بتن با حرارت کنترل‌شده، این معیار می‌تواند تعیین کند که آیا کنترل حرارتی بتن مورد نیاز است یا خیر (یعنی اقدامات لازم برای کاهش تنش‌های ناشی از دماهای متفاوت لازم هستند یا نه).

شکل ۳-۱-۱ برای تعریف بتن حجیم به عنوان تابعی از عوامل تاثیرگذار اصلی، یعنی طرح مخلوط بتن و حداقل ارتفاع هر نوبت بتن‌ریزی ایجاد شد (Gajda و همکاران، ۲۰۱۸). این شکل برای بتن با کنترل حرارتی در نظر گرفته شده است و نه برای سازه‌های بتن حجیم متعارف با تعداد زیاد لایه‌های بتن‌ریزی پی‌درپی. همچنین می‌توان از این شکل به عنوان راهنمایی برای ایجاد مخلوط‌های بتن با هدف کاهش تلاش برای کنترل دما و اختلاف‌های دمایی، یا ایجاد مخلوط بتن برای مجموعه‌ای از بتن‌ریزی‌ها که به اقدامات کاهش حرارتی نیاز ندارد، استفاده نمود. در شکل ۳-۱-۱ قسمت‌های سفید، بتن حجیم در نظر گرفته نمی‌شوند؛ قسمت‌های سیاه بتن حجیم هستند؛ و قسمت‌های هاشورخورده، حالت مرزی هستند که نشان می‌دهند بتن‌ریزی می‌تواند بتن حجیم باشد یا نباشد. در این راستا، بتن حجیم به این معنی است که انتظار می‌رود حداکثر دما در محل بتن‌ریزی بیش از ۷۰°C باشد یا پیش‌بینی می‌شود که اختلاف دما در بتن از ۲۰°C فراتر رود.

مقدار سیمان معادل[49] (ECC) بتن برای استفاده در شکل ۳-۱-۱ را می‌توان از معادله (۳-۱-۱) تخمین زد:

$$ECC=Cement+0.5\ FAsh+0.8\ CAsh+1.2\ SFMK+Factor.Slag \qquad (۳-۱-۱)$$

[49] Equivalent cement content

که در این معادله، Cement سیمان پرتلند نوع I یا II برحسب kg/m^3؛ FAsh خاکستر بادی نوع F برحسب kg/m^3؛ CAsh خاکستر بادی نوع C (تمایزی برای مقدار اکسید کلسیم خاکستر بادی که بخش اصلی ایجاد گرماست، درنظر گرفته نمی‌شود) برحسب kg/m^3؛ SFMK دوده‌سیلیس یا متاکائولین برحسب kg/m^3؛ Slag سرباره برحسب kg/m^3؛ و Factor متغیری است که به درصد جایگزینی سیمان پرتلند با سرباره بستگی دارد و به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

- برای جایگزینی ۰ تا ۲۰ درصد برابر ۱ تا ۱/۱؛
- برای جایگزینی ۲۰ تا ۴۵ درصد برابر ۱؛
- برای جایگزینی ۴۵ تا ۶۵ درصد برابر ۰/۹؛
- برای جایگزینی ۶۵ تا ۸۰ درصد برابر ۰/۸؛

۳-۲- سیمان‌ها

با کاهش مقدار کل مواد سیمانی و انتخاب مواد سیمانی با ویژگی‌های حرارتی کم می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی و افزایش دمای کم دست یافت. ACI 207.2R و ACI 207.4R شامل اطلاعات اضافی در مورد انواع سیمان و اثرات آن‌ها بر ایجاد گرما هستند.

سیمان‌های هیدرولیکی زیر برای استفاده در ساخت بتن حجیم مناسب هستند:

الف) سیمان پرتلند: نوع I، II، IV و V، مطابق با ASTM C150/C150M

ب) سیمان آمیخته: نوع IP (سیمان آمیخته پوزولانی)، IS (سیمان آمیخته سرباره‌ای)، IT (سیمان آمیخته سه‌جزئی[۵۰]) و IL (سیمان آمیخته سنگ‌آهکی)، مطابق با ASTM C595/C595M

ج) سیمان هیدرولیکی: نوع GU (سیمان برای کاربردهای معمولی)، MS (سیمان با مقاومت متوسط در برابر سولفات)، HS (سیمان با مقاومت زیاد در برابر سولفات)، MH (سیمان با حرارت متوسط)، و LH (سیمان کم‌حرارت)، مطابق با ASTM C1157/C1157M

سیمان پرتلند نوع I و سیمان GU برای استفاده در ساخت‌وسازهای عمومی مناسب هستند. در صورتی که این سیمان‌ها به تنهایی در بتن حجیم استفاده شوند، به دلیل گرمای هیدراته‌شدن بسیار بیشترشان، کنترل افزایش دمای بتن بدون سایر اقدامات کمک‌کننده در جهت کنترل دما، می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

سیمان پرتلند نوع II (سیمان با حرارت متوسط) و سیمان نوع MH برای ساخت بتن حجیم ارجحیت دارند زیرا معمولا گرمای هیدراته‌شدن متوسطی دارند که برای کنترل دما و در نتیجه کاهش ترک‌خوردگی حرارتی مهم است. سیمان‌های پرتلند نوع II برای مقاومت متوسط در برابر سولفات طراحی می‌شوند و ممکن است ویژگی‌های گرمایی متوسطی داشته باشند. مشخصات سیمان پرتلند نوع II لازم می‌داند که حاوی بیش از ۸ درصد آلومینات سه کلسیم (C_3A)، ترکیبی که به شدت به ایجاد گرمای اولیه در بتن کمک می‌کند، نباشد. ویژگی‌های اختیاری برای سیمان پرتلند نوع II، محدودیتی معادل ۱۰۰ درصد یا کمتر را برای مجموع

---

[۵۰] این نوع سیمان شامل دو ماده سیمانی مکمل (مانند خاکستر بادی، دوده‌سیلیس و سرباره) است.

($4/75C_3A$ و C_3S) یا محدودیت گرمای هیدراته‌شدن ۷ روزه تا ۲۹۰kJ/kg (۷۰ کالری بر گرم) را تعیین می‌کند. هنگامی که در طراحی، از یکی از الزامات اختیاری استفاده می‌شود، به دلیل سرعت کمتر کسب مقاومت ناشی از استفاده از این نوع سیمان، مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان که مطابق با شرایط ASTM C150/C150M بدست می‌آید، کاهش می‌یابد.

سیمان پرتلند نوع III و سیمان نوع HE (سیمان زودسخت‌شونده) که در فهرست بالا ذکر نشدند، معمولا در بتن با کنترل حرارتی به‌کار نمی‌روند. با این حال، هنگامی که این سیمان‌ها برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند، ممکن است به دلیل افزایش دمای زیادشان، اقدامات مورد نیاز در جهت کنترل گرما را با پیچیدگی روبرو کنند.

سیمان پرتلند نوع IV و سیمان LH (سیمان‌های کم‌حرارت)، ممکن است در مواردی که در سازه‌های حجیم، ایجاد حرارت کم مدنظر باشد، به‌کار روند. این سیمان‌ها در کاربردهای محدودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، زیرا به‌سختی در دسترس هستند و مهم‌تر از آن، به این دلیل که تجربه نشان داده است در بیشتر موارد، با راه‌کارهای دیگر می‌توان ایجاد گرما را به نحو مطلوبی کنترل کرد. الزامات ویژگی‌های سیمان پرتلند نوع IV، حداکثر مقدار C_3A و C_3S را به ترتیب به ۷ و ۳۵ درصد محدود و حداقل مقدار C_2S را برابر ۴۰ درصد تعیین می‌کند. به انتخاب خریدار، ممکن است گرمای هیدراته‌شدن ۷ روزه به ۲۵۰kJ/kg (۶۰ کالری بر گرم) و ۲۸ روزه ۲۹۰kJ/kg (۷۰ کالری بر گرم) محدود شود. سیمان پرتلند نوع IV عموما به صورت تجاری در ایالات متحده و ایران موجود نیست. سیمان نوع LH در برخی از بازارهای کانادا موجود است.

سیمان پرتلند نوع V و سیمان HS (سیمان مقاوم در برابر سولفات) در مناطقی با خاک‌های حاوی سولفات زیاد در دسترس هستند و اغلب ویژگی‌های حرارتی متوسطی دارند. این سیمان‌ها معمولا کم‌قلیا (قلیاهای معادل کمتر از ۰/۶ درصد) و معمولا نسبتا کم‌حرارت هستند (حرارت ۷ روزه کمتر از ۲۹۰kJ/kg یا ۷۰ کالری بر گرم).

سیمان نوع IP (سیمان پرتلند پوزولانی) مخلوطی یکنواخت از سیمان پرتلند و پودر پوزولان است. این نوع سیمان یا از طریق آسیاب هم‌زمان کلینکر سیمان پرتلند و پوزولان و یا با مخلوط‌کردن سیمان پرتلند و پوزولان آسیاب‌شده تولید می‌شود.

محدودیت ۷۰ کالری بر گرم (۲۹۰kJ/kg) در ۷ روز برای گرمای هیدراته‌شدن، یک شرط اختیاری برای سیمان نوع IP است که در این صورت، پسوند MH به آن اضافه می‌شود. همچنین، در صورت استفاده از محدودیت ۶۰ کالری بر گرم (۲۵۰kJ/kg) در ۷ روز برای گرمای هیدراته‌شدن سیمان نوع IP، پسوند LH به آن افزوده می‌شود.

سیمان نوع IS (سیمان پرتلند سرباره کوره آهن‌گدازی) مخلوطی یکنواخت از سیمان پرتلند و سرباره است. این سیمان یا از طریق آسیاب هم‌زمان کلینکر سیمان پرتلند و سرباره و یا با مخلوط‌کردن سیمان پرتلند و سرباره آسیاب‌شده تولید می‌شود. مقدار سرباره می‌تواند تا ۹۵ درصد جرمی سیمان پرتلند سرباره‌ای باشد. این سیمان گاه همراه با پوزولان استفاده شده است.

۳-۳- مواد سیمانی مکمل

مواد سیمانی مکمل (SCMs) شامل سرباره، خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی، متاکائولین و دوده‌سیلیس هستند. مواد سیمانی مکمل در بتن حجیم، برای کاهش مقدار سیمان پرتلند؛ ایجاد گرمای کمتر درونی و افزایش دمای کمتر (در برخی مواد سیمانی مکمل مشخص)؛ بهبود کارایی (در برخی مواد سیمانی مکمل مشخص)؛ کاهش نفوذپذیری؛ و در صورت امکان، کاهش استعداد انبساط مخرب ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (ASR)، کاهش تشکیل اترینگایت تاخیری (DEF) و کاهش حمله سولفاتی استفاده می‌شوند. باید دانست که ویژگی‌های مواد سیمانی مکمل مختلف و همچنین ویژگی‌های یک ماده سیمانی مکمل یکسان از منابع مختلف می‌تواند بسیار متفاوت باشد. دوده‌سیلیس و متاکائولین نسبت به سیمان پرتلند افزایش دمای بیشتری دارند و روانی را کاهش می‌دهند. برای اطلاعات بیشتر به ACI 201R، ASTM C1778 و ACI 221R مراجعه شود.

یک ماده سیمانی مکمل باید قبل از استفاده، در ترکیب با سیمان و سنگدانه‌های پروژه مورد آزمایش قرار گیرد تا اثبات شود که به‌طور موثر به بهبود کیفیت بتن و صرفه‌جویی در هزینه‌های آن کمک می‌کند. در برخی از مواد سیمانی مکمل مشخص، کسب مقاومت در سنین اولیه ممکن است در مقایسه با سیمان پرتلند کند باشد اما تا سطح مقاومتی زیادتر برای مدت زمان طولانی‌تری ادامه می‌یابد. برای نسبت یکسان آب به مواد سیمانی (*w/cm*)، عموما انتظار می‌رود که مقاومت اولیه بتن حاوی مواد سیمانی مکمل مشخص (به استثنای دوده‌سیلیس و متاکائولین)، از بتن حاوی سیمان پرتلندی که برای مقاومت مشابه در سنین زیادتر طراحی شده است، کمتر باشد.

هنگام استفاده از مواد سیمانی مکمل در بتن، مصالح معمولا به‌طور جداگانه در بتن‌ساز مرکزی پیمانه می‌شوند؛ با این حال، همیشه اینطور نیست، زیرا سیمان‌های آمیخته ترکیبی از سیمان پرتلند و انواع مختلف مواد سیمانی مکمل هستند.

ASTM C618، الزامات پوزولآن‌های طبیعی (نوع N) و خاکستر بادی (نوع F یا C) را طبقه‌بندی و ارائه می‌کند، و ACI 232.2R به استفاده از خاکستر بادی در بتن می‌پردازد. خاکستر بادی تقریبا برای جایگزینی تا حداکثر ۶۰ درصد از سیمان پرتلند در کاربردهای خاص استفاده شده و ۵۰ درصد جایگزینی سیمان با خاکستر بادی نوع F رواج بسیاری یافته است؛ با این حال، حد بالای سودمندی آن به ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند و خاکستر بادی بستگی دارد. ذرات خاکستر بادی معمولا کروی‌شکل هستند که به کارایی و قابلیت پمپ‌شدن بتن کمک می‌کند. مزیت خاکستر بادی نوع F در کم کردن افزایش دمای بتن را می‌توان در معادله (۳-۱-۱) مشاهده کرد؛ گرمای هیدراته‌شدن خاکستر بادی کلاس F تقریبا نصف سیمان پرتلند است.

ASTM C989/C989M استاندارد حاکم بر سرباره است که بر اساس شاخص فعالیت سرباره، آن را به سه رده مختلف تقسیم‌بندی می‌کند: رده ۸۰، رده ۱۰۰ و رده ۱۲۰. استفاده از سرباره در بتن، در ACI 233R مورد بحث قرار گرفته است. همانطور که در معادله (۳-۱-۱) مشاهده می‌شود، اثر سرباره بر افزایش دمای بتن به سطح جایگزینی آن بستگی دارد. سرباره معمولا برای جایگزینی ۵۰ تا ۷۵ درصد از سیمان پرتلند در

مخلوط بتن حجیم استفاده می‌شود. با انجام آزمایش‌های مشخص، از سطوح جایگزینی زیادتر نیز استفاده شده است زیرا عملکرد، به ویژگی‌های سیمان پرتلند و سرباره بستگی دارد.

ACI 318 در مکان‌هایی که بتن در معرض شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن در حضور مواد شیمیایی یخ‌زدا (رده‌بندی شرایط محیطی F3) باشد، اجازه استفاده از بتن‌هایی که مقدار مواد سیمانی آن‌ها شامل بیش از ۲۵ درصد خاکستر بادی یا ۵۰ درصد سرباره است را نمی‌دهد. این محدودیت مبتنی بر تجربیات پیشین است که بر اساس آن‌ها، در برخی از سطوح افقی حاوی مقدار زیاد مواد سیمانی مکمل و نسبت زیاد آب به مواد سیمانی، پوسته‌شدن رخ داد و با عمل‌آوری ناکافی و یا پرداخت نامناسب سطوح قبل از قرار گرفتن در معرض نمک، تشدید شد. نمونه‌های زیادی از عملکرد موفقیت‌آمیز بتن‌های حاوی مقدار زیاد مواد سیمانی مکمل وجود دارد که ۷۵ درصد از مواد سیمانی را مواد سیمانی مکمل تشکیل می‌دهند. ASTM C672/C672M یا آزمایش‌های جدیدتری همچون CSA A23.2-22C را می‌توان برای تایید مقاومت در برابر پوسته‌شدن بتن‌های حاوی مقدار زیاد مواد سیمانی مکمل انجام داد (CSA A23.2-22C؛ 2012، Vassilev و Hooton).

گاهی اوقات برای افزایش مقاومت بتن در سنین اولیه و کاهش نفوذپذیری بتن از دوده‌سیلیس و متاکائولین استفاده می‌شود؛ با این حال، استفاده از این مواد اغلب نیازمند توجه بیشتری به ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری و عمل‌آوری است. جایگزینی سیمان پرتلند با دوده‌سیلیس، متاکائولین یا هر دو، معمولا مقدار افزایش دمای بتن را همانطور که در معادله (۳-۱-۱) مشاهده می‌شود، افزایش می‌دهد. استفاده از دوده‌سیلیس در ACI 234R مورد بحث قرار گرفته است.

۳-٤- افزودنی‌های شیمیایی

افزودنی‌های شیمیایی با بهبود کارایی، افزایش اسلامپ، کاهش مقدار آب مخلوط، به تاخیر انداختن زمان گیرش، اصلاح نرخ یا ظرفیت آب‌انداختن، هوازایی، کاهش جداشدگی و کاهش نرخ افت اسلامپ، مزایای مهمی را برای بتن حجیم در حالت خمیری به ارمغان می‌آورند. افزودنی‌های شیمیایی با فراهم‌کردن امکان اصلاح و بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن (کاهش مقدار مواد سیمانی) برای تولید بتنی با گرمازایی کمتر در طول فرآیند سخت‌شدن، مقاومت بیشتر، دوام بیشتر، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت سایشی و فرسایشی، می‌توانند فواید مهمی را برای بتن حجیم در حالت سخت‌شده فراهم کنند. بررسی جامع افزودنی‌های شیمیایی در ACI 212.3R و الزامات مربوط به آن‌ها در ASTM C494/C494M ارائه شده است.

افزودنی‌های هوازا، در طول فرآیند اختلاط حباب‌های هوای ریزی در بتن ایجاد می‌کنند که برای مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن لازم هستند. مزایای دیگر هوازایی شامل بهبود کارایی، کاهش جداشدگی و کاهش آب‌انداختن بتن است. به این دلایل، گاهی اوقات حتی زمانی که سازه در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن قرار ندارد، از هوازایی استفاده می‌شود. هر ۱ درصد هوای ایجادشده، با اندکی بهبود در کارایی بتن و بدون افت اسلامپ اجازه می‌دهد تا آب اختلاط به میزان ۲ تا ۴ درصد کاهش داده شود. به‌طور کلی در یک نسبت آب به مواد سیمانی یکسان، افزایش مقدار هوا با استفاده

از هوازایی، عموما مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. بطور سرانگشتی هر ۱ درصد افزایش در مقدار هوای ایجادشده، مقاومت فشاری بتن را به میزان ۳ تا ۵ درصد کاهش می‌دهد. با این حال، در مواردی که مقدار سیمان ثابت نگه داشته شده و از کاهش آب مورد نیاز ناشی از هوای ایجادشده بهره‌برداری می‌شود، نسبت آب به مواد سیمانی کمتری بدست می‌آید. هوازایی در بتن حجیم ممکن است تاثیر ناچیزی بر مقاومت داشته باشد. برخی از عواملی که بر مقدار هوای ایجادشده در بتن توسط مقدار معین ماده هوازا تاثیر می‌گذارند عبارتند از دانه‌بندی و شکل ذرات سنگدانه، عیار سیمان مخلوط، وجود سایر افزودنی‌ها، مدت زمان اختلاط، اسلامپ و دمای بتن. برای یک مقدار معین از افزودنی هوازا، مقدار هوا با افزایش اسلامپ افزایش و با افزایش مقدار ریزدانه، دمای بتن و زمان اختلاط کاهش می‌یابد. در صورتی که از خاکستر بادی حاوی مقدار کربن زیاد استفاده شود، انتظار می‌رود مقدار افزودنی هوازای بیشتری مورد نیاز باشد. هنگامی که به بتن هوازایی‌شده نیاز باشد، بیشتر مشخصات فنی لازم می‌دانند که مقدار هوا در محدوده ۵ تا ۸ درصد باشد. با این حال، این محدوده به اندازه سنگدانه درشت بستگی دارد. برای شرایط خاص به ACI 301 مراجعه شود.

افزودنی‌های زودگیرکننده معمولا در بتن حجیم استفاده نمی‌شوند زیرا نرخ ایجاد گرمای اولیه را افزایش می‌دهند و می‌توانند در کنترل دما چالش ایجاد کنند. در مواردی همچون شالوده جرثقیل‌های برجی، که مقاومت اولیه زیادی مدنظر است و در مخلوط بتن حجیم از افزودنی‌های زودگیرکننده استفاده می‌شود، باید آزمایش‌هایی برای ارزیابی افزایش دما انجام شود و برنامه‌ای برای کنترل حرارتی با استفاده از داده‌های مربوطه وجود داشته باشد. در مواردی که در بتن از افزودنی‌های بازدارنده‌های خوردگی نیتریت کلسیم استفاده می‌شود، به دلیل خاصیت زودگیرکنندگی آن‌ها باید اقدامات مراقبتی مشابهی در دستور کار قرار گیرد.

افزودنی‌های کاهنده آب برای کاهش آب مورد نیاز اختلاط به منظور دستیابی به یک کارایی معین با افزایش مقاومت، کاهش جمع‌شدگی بتن، افزایش کارایی بتن، یا ایجاد مقاومت یکسان با سیمان کمتر استفاده می‌شوند. به منظور حفظ حالت خمیری بتن برای مدت زمان طولانی‌تر به‌طوری که بتوان لایه‌های متوالی بتن را پیش از وقوع گیرش لایه زیرین جای‌دهی و متراکم کرد، می‌توان از افزودنی‌های کنترل‌کننده گیرش یا تثبیت‌کننده هیدراته‌شدن استفاده کرد. افزودنی‌های کاهنده آب مقدار آب را تا ۵ درصد یا بیشتر کاهش می‌دهند. اگر مقدار آب ثابت نگه داشته شود، این افزودنی‌ها اسلامپ را افزایش می‌دهند. این افزودنی‌ها بسته به ترکیب می‌توانند زمان گیرش بتن را به تاخیر بیندازند اما لزوما نرخ افت اسلامپ را کاهش نمی‌دهند. بسته به نوع بتن، ترکیب سیمان، دما و سایر عوامل، استفاده از افزودنی‌های شیمیایی می‌تواند به افزایش قابل‌توجه مقاومت‌های اولیه و مقاومت در سنین بیشتر منجر شود. این افزایش مقاومت را می‌توان به کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و پراکندگی بهتر مواد سیمانی در بتن نسبت داد که به درجه هیدراته‌شدن بیشتری منجر می‌شود.

۳-۵- سنگدانه‌ها

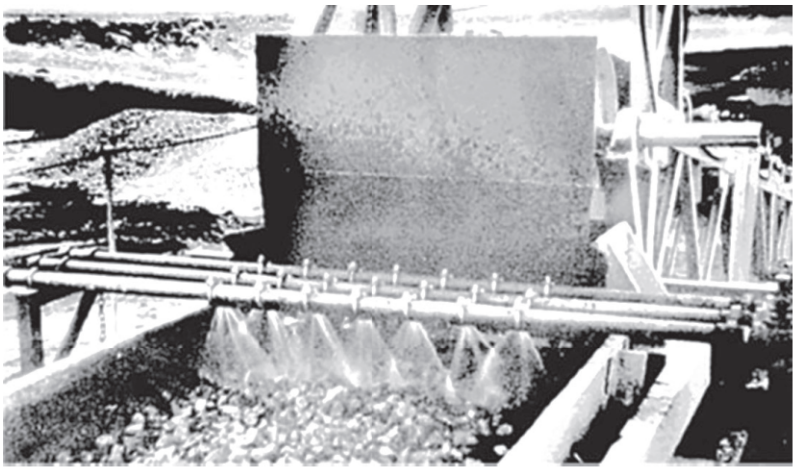
الزامات سنگدانه‌های ریز و درشت در ASTM C33/C33M تعیین شده است. دانه‌بندی مخلوط سنگدانه بر مقدار خمیر تاثیر می‌گذارد و حداکثر اندازه کوچک‌تر سنگدانه در مقایسه با حداکثر اندازه بزرگ‌تر معمولا به خمیر بیشتری نیاز دارد. اطلاعات تکمیلی در مورد سنگدانه‌ها در ACI 221R ارائه شده است.

سنگدانه ریز از الک ۴/۷۵ میلی‌متری عبور می‌کند. سنگدانه ریز می‌تواند از مصالح طبیعی (ماسه)، مصالح بدست‌آمده از خرد کردن سنگدانه‌های بزرگ‌تر یا مخلوطی از این دو تشکیل شده باشد. سنگدانه ریز باید از ذرات سخت، متراکم، بادوام و بدون پوشش تشکیل شده باشد. سنگدانه ریز نباید تا حدی حاوی مقادیر مضر رس، لای، گرد و غبار، میکا، مواد آلی یا سایر ناخالصی‌ها باشد که به‌طور جداگانه یا با یکدیگر، در هنگام استفاده از نسبت‌های معمول اجزای تشکیل‌دهنده، دستیابی به ویژگی‌های مورد نیاز بتن را غیرممکن کنند. ASTM C33/C33M محدودیت‌های کلی و پذیرفته‌شده مواد مضر در سنگدانه ریز را مشخص می‌کند. مهندس طراح باید شرایط محیطی بتن حجیم را در نظر بگیرد و حدود مجاز مواد مضر بر اساس سختی شرایط محیطی را مشخص کند.

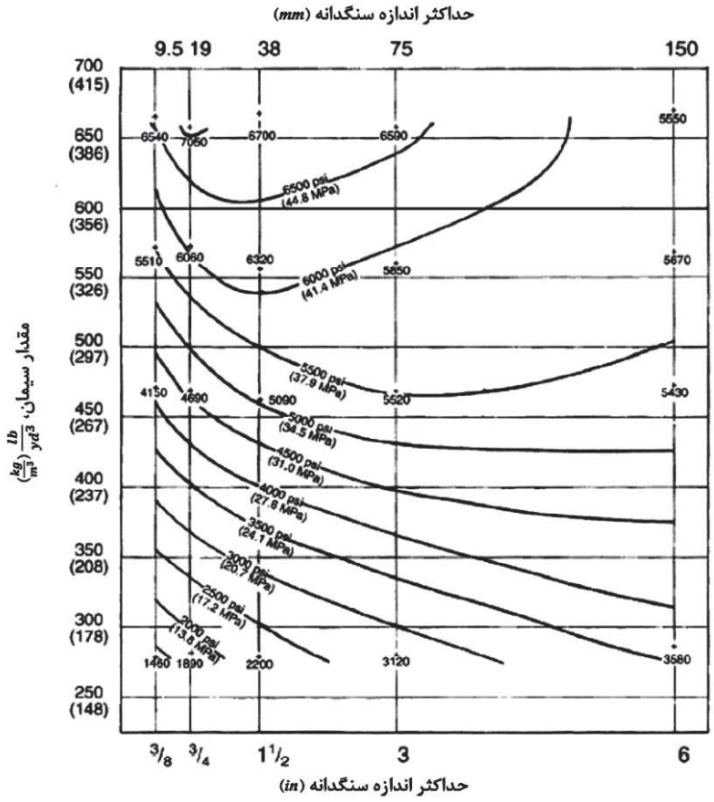
دانه‌بندی سنگدانه ریز به شدت بر کارایی و مقاومت بتن تاثیرگذار است. دانه‌بندی ماسه برای بتن حجیم باید در محدوده ASTM C33/C33M باشد مگر اینکه بررسی‌های آزمایشگاهی، دانه‌بندی‌های دیگر را رضایت‌بخش نشان دهند. پس از تعیین طرح مخلوط، باید دانه‌بندی سنگدانه ریز کنترل شود تا از ایجاد تغییرات در کارایی بتن جلوگیری به عمل آید.

سنگدانه درشت به عنوان شن رودخانه‌ای، شن خردشده، سنگ خردشده یا مخلوطی از این‌ها که اندازه اسمی بزرگ‌تر از الک ۴/۷۵ میلی‌متری و کوچک‌تر از الک ۱۵۰ میلی‌متری دارند، تعریف می‌شود. سنگدانه درشت باید از ذرات سخت، متراکم، بادوام و بدون پوشش تشکیل شده باشد. شکل ۳-۵-الف، سرند شستشوی مجدد[51] سنگدانه درشت در بتن‌ساز مرکزی را نشان می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان گرد و غبار و پوشش انباشته شده ناشی از انبارکردن و حمل‌ونقل سنگدانه‌ها را پاک نمود. ASTM C33/C33Mمحدودیت‌های مربوط به ذرات مضر در منابع سنگدانه درشت بر اساس رده و نوع کاربری بتن را ارائه می‌کند.

[51] Rewashing screen



شکل ۳-۵-الف- شستشوی مجدد سنگدانه درشت



هر یک از نقاط نشان‌دهنده میانگین مقاومت دو آزمونه استوانه‌ای ۹۰۰*۴۵۰ میلی‌متری و دو آزمونه استوانه‌ای ۱۲۰۰*۶۰۰ میلی‌متری هستند که پس از ۱ سال برای هر دو سنگدانه Grand Coulee و Clear Creek آزمایش شده‌اند.

شکل ۳-۵-ب- تاثیر اندازه سنگدانه و مقدار سیمان بر مقاومت فشاری پس از ۱ سال (برگرفته از Higginson و همکاران، ۱۹۶۳)

جدول ۳-۵-الف- راهنمای دانه‌بندی برای قسمت قلوه‌سنگی سنگدانه درشت (اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۱۹۸۱)

اندازه الک آزمایش با چشمه‌های مربعی (mm)	درصد جرمی عبوری بدست‌آمده از الک آزمایش			
	قلوه‌سنگ: ۱۵۰ mm تا ۷۵	درشت: ۷۵ mm تا ۳۷/۵	متوسط: ۳۷/۵ mm تا ۱۹	ریز: ۱۹ mm تا ۴/۷۵
۱۷۵	۱۰۰	به ASTM C33/C33M مراجعه شود.		
۱۵۰	۹۰ تا ۱۰۰			
۱۰۰	۲۰ تا ۴۵			
۷۵	۰ تا ۱۵			
۵۰	۰ تا ۵			
۳۷/۵				
۲۵				
۱۹				
۹/۵				
۴/۷۵				

جدول ۳-۵-ب- بازه‌ای از هر اندازه ذرات سنگدانه درشت که بتن حجیم حاوی قلوه‌سنگ با کارایی مناسب ایجاد کرده‌اند (اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۱۹۸۱)

حداکثر اندازه سنگدانه در بتن (mm)	درصد ذرات سنگدانه درشت تمیز جداسازی‌شده				
	قلوه‌سنگ: ۱۵۰ mm تا ۷۵	درشت: ۷۵ mm تا ۳۷/۵	متوسط: ۳۷/۵ mm تا ۱۹	ریز	
				۱۹ mm تا ۴/۷۵	۹/۵ mm تا ۴/۷۵
۱۵۰	۲۰ تا ۳۵	۲۰ تا ۳۲	۲۰ تا ۳۰	۲۰ تا ۳۵	۱۲ تا ۲۰	۸ تا ۱۵
۷۵		۲۰ تا ۴۰	۲۰ تا ۴۰	۲۵ تا ۴۰	۱۵ تا ۲۵	۱۰ تا ۱۵
۳۷/۵			۴۰ تا ۵۵	۴۵ تا ۶۰	۳۰ تا ۳۵	۱۵ تا ۲۵
۱۹				۱۰۰	۵۵ تا ۷۳	۲۷ تا ۴۵

قاعده کلی برای بتن حجیم، استفاده از بزرگ‌ترین حداکثر اندازه عملی سنگدانه درشت با دانه‌بندی مناسب[52] به منظور کاهش مقدار خمیر سیمانی مورد نیاز برای کارایی است. اندازه چنین سنگدانه‌هایی می‌تواند ۱۵۰، ۷۵ یا ۳۸ میلی‌متر باشد. استفاده از سنگدانه‌های با دانه‌بندی نامناسب[53]، سنگدانه‌هایی که کشیده[54] یا تخت[55] هستند یا سنگدانه‌هایی که دارای هر دوی این ویژگی‌ها هستند، می‌تواند به اندازه حالتی که از سنگدانه‌های کوچک‌تر استفاده شود یا حتی بیش از آن، به خمیر سیمان نیاز داشته باشد و در نتیجه هدف استفاده از حداکثر اندازه بزرگ سنگدانه درشت را نقض کند.

[52] Well graded
[53] Poorly graded
[54] Elongated
[55] Flat

در برخی موارد، ممکن است به دلیل فاصله کم آرماتورها یا سایر اقلام مدفون یا به دلیل در دسترس‌نبودن سنگدانه‌های بزرگ‌تر، استفاده از سنگدانه کوچک‌تر اجباری گردد. با این حال، هرچه اندازه سنگدانه کوچک‌تر باشد، مقدار آب و خمیر سیمان مورد نیاز بیشتر است. مقدار زیاد سیمان و خمیر می‌تواند بر ایجاد گرمای درونی، ترک‌خوردگی و استعداد جمع‌شدگی اثرات نامطلوبی داشته باشد. صرف‌نظر از اندازه سنگدانه، بتن حجیم باید کارا بوده و قابلیت جای‌دهی، متراکم‌کردن و پرداخت با تجهیزات و روش‌های انتخاب‌شده را داشته باشد. انتخاب حداکثر اندازه سنگدانه باید تابعی از کوچکترین بعد سازه، فاصله آزاد بین آرماتورها و ضخامت پوشش بتنی روی آرماتورها باشد. (شکل ۵-۳-ب) نشان می‌دهد که برای دستیابی به بیشترین بازدهی سیمان، برای هر مقاومت فشاری، حداکثر اندازه سنگدانه بهینه‌ای وجود دارد (Higginson و همکاران، ۱۹۶۳).

سنگدانه‌های درشت باید از مخلوط سنگدانه‌های با اندازه بزرگ، متوسط و ریز تشکیل شده باشند تا دانه‌بندی مناسبی ایجاد کنند. مشخص شده است که حفظ درصد عبوری از الک ۹/۵ میلی‌متری در کمتر از ۳۰ درصد (در صورتی که خردشده ترجیحا نزدیک به صفر) بخش ۱۹ تا ۴/۷۵ میلی‌متری، کارایی بتن حجیم و بازدهی در برابر لرزاندن را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد (Tuthill، ۱۹۸۰).

الزامات دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت با حداکثر اندازه ۹۰ میلی‌متر یا کمتر را ارائه ASTM C33/C33M می‌کند. جدول ۵-۳-الف، راهنمای اداره احیای اراضی ایالات متحده (۱۹۸۱) برای ذرات سنگدانه بزرگ‌تر از ۷۵ میلی‌متر را ارائه می‌دهد. جدول ۵-۳-ب مثال‌هایی از دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های درشت که بتن حجیم کارا حاوی قلوه‌سنگ را ایجاد کرده‌اند، نشان می‌دهد. در صورت فقدان تجربه قبلی، توصیه‌های ارائه‌شده در جدول ۵-۳-ب برای دانه‌بندی، نقطه شروع خوبی است.

۳-۶- آب

آب مورداستفاده برای اختلاط بتن باید مطابق شرایط ASTM C1602/C1602M باشد.

۳-۷- انتخاب نسبت‌ها

هدف اصلی مطالعات تعیین طرح مخلوط برای بتن حجیم، تهیه مخلوط‌های اقتصادی با مقاومت، دوام و نفوذپذیری مناسب با بهترین ترکیب از مصالح قابل دسترسی است که کارایی کافی برای جای‌دهی و کمترین افزایش دمای ممکن پس از بتن‌ریزی را فراهم می‌کند.

همانطور که قبلا ذکر شد، در پروژه‌های کوچک‌تر برای بتن‌ریزی‌های حجیم با کنترل حرارتی، اغلب از مخلوط‌های بتن حاوی مصالح استاندارد که در بتن‌ساز مرکزی تجاری محلی تولید شده‌اند استفاده می‌شود. این مخلوط‌ها می‌توانند مخلوط‌های بتن متداول باشند و یا به‌طور ویژه بر اساس الزامات خاص پروژه با استفاده از مصالح موجود تهیه شوند. برای پروژه‌های بزرگ یا خیلی بزرگ تهیه مخلوط‌های بتن ویژه، باصرفه و اقتصادی می‌باشد. در برخی موارد ممکن است مصالح غیرمحلی همچون سنگدانه درشت و ریز از جای دیگری آورده شوند، زیرا استفاده از آن‌ها نسبت به مصالح موجود در کارگاه یا مصالح محلی دارای مزایای بیشتری است.

سایر مطالب این بخش در درجه اول در مورد بتن حجیم متعارف سدهاست؛ با این حال، اصول کلی تشریح‌شده در این قسمت برای تمام بتن‌های حجیم نیز به‌کار می‌رود.

انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت، دوام و نفوذپذیری بتن را تعیین می‌کند. همچنین لازم است مواد ریز کافی برای سهولت در جای‌دهی بتن در مخلوط وجود داشته باشد. مخلوط‌های آزمایشی تولیدی با استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی لازم و مقدار آب مورد نیاز مشاهده‌ای برای مصالح مربوط به پروژه، می‌تواند مقدار مواد سیمانی برای فراهم کردن کارایی مورد نیاز را نشان دهد (انجمن سیمان پرتلند[56]، ۱۹۷۹؛ Ginzburget، ۱۹۶۶).

اولین قدم برای رسیدن به وزن‌های واقعی اجزای مخلوط، انتخاب حداکثر اندازه سنگدانه برای هر قسمت از کار است. معیارهای این انتخاب در بخش ۳-۵ ارائه شده است. گام بعدی، فرض یا تعیین مقدار کل آب لازم برای تامین اسلامپ مورد نیاز است که حداقل مقدار آن می‌تواند ۳۸ تا ۵۰ میلی‌متر باشد. در آزمایش‌های اسلامپ، سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۳۸ میلی‌متر باید بلافاصله با سرند کردن بتن تازه حذف شوند. برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار آب برای بتن با حباب هوا و دارای اسلامپ حداقل می‌تواند حدودا از kg/m^3 ۷۱ تا kg/m^3 ۸۹ برای سنگدانه‌های طبیعی گردگوشه و از kg/m^3 ۸۳ تا kg/m^3 ۱۱۳ برای سنگدانه‌های شکسته متغیر باشد. آب مورد نیاز برای سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه ۷۵ میلی‌متر تقریبا ۲۰ درصد بیشتر است. اما برای مقاومت‌های بیش از ۲۸ مگاپاسکال در ۱ سال، ممکن است سنگدانه با حداکثر اندازه ۷۵ میلی‌متر موثرتر باشد (شکل ۳-۵-الف).

وزن مواد سیمانی از تقسیم وزن کل آب مخلوط بر نسبت آب به مواد سیمانی تعیین می‌شود اما زمانی که کارایی بتن دغدغه اصلی باشد، این مقدار معادل حداقل وزن مورد نیاز مواد سیمانی برای جای‌دهی مطلوب بتن است. با تعیین وزن مواد سیمانی و آب و با مقدار هوای فرضی ۳ تا ۵ درصد، بقیه اجزای بتن که باید وزنشان تعیین شود، سنگدانه‌ها هستند. تنها تصمیم باقی‌مانده، انتخاب نسبت سنگدانه ریز و سنگدانه درشت است. نسبت بهینه، به دانه‌بندی و شکل ذرات سنگدانه بستگی دارد و نهایتا فقط در کارگاه قابل تعیین است. برای بتن حاوی شن و ماسه طبیعی (گردگوشه) با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۵۰ میلی‌متر، حداقل درصد سنگدانه ریز به کل سنگدانه بر اساس حجم مطلق می‌تواند تا ۲۱ درصد باشد. برای بتن حاوی سنگدانه‌های شکسته، این درصد می‌تواند در محدوده ۲۵ تا ۲۷ درصد متغیر باشد.

هنگامی که از یک ماده سیمانی مکمل در مخلوط بتن استفاده می‌شود، روش تعیین طرح مخلوط تغییری نمی‌کند. لازم است به موارد زیر توجه کافی مبذول گردد:

الف) مقدار آب مورد نیاز ممکن است تغییر کند.

ب) مقاومت در سنین کم ممکن است بحرانی شود و تعیین‌کننده گردد.

پ) به منظور حداکثر صرفه جویی، باید سنی که در آن مقاومت طراحی در نظر گرفته می‌شود زیادتر باشد.

---

[56] Portland Cement Association

سرعت کسب مقاومت بتن حاوی اغلب مواد سیمانی مکمل تا حدودی کمتر از بتنی است که تنها با سیمان پرتلند ساخته شده است؛ هرچند، در بتن حجیم معمولا تا زمانی که چندین ماه یا چندین سال از عمر بتن نگذشته باشد، باری اعمال نمی‌شود. بنابراین، بتن حجیم حاوی مواد سیمانی مکمل معمولا بر اساس مقاومت‌های ۹۱ روزه تا ۱ ساله طراحی می‌شود. در حالی که بتن حجیم در سنین اولیه برای انجام کارکرد طراحی‌شده خود به عملکرد مقاومتی نیاز ندارد، اما در اکثر روش‌های ساخت نیاز است که قالب‌های هر مرحله ارتفاعی (نوبت بتن‌ریزی)[57] به بتن مرحله زیرین خود مهار شوند. بنابراین، مقاومت اولیه باید در حدی باشد که از بیرون‌کشیدگی[58] مهارهای قالب جلوگیری شود. به منظور امکان استفاده مجدد[59] ایمن و سریع قالب‌ها، به‌ویژه زمانی که از مقادیر زیادی مواد سیمانی مکمل استفاده می‌شود یا زمانی که بتن به‌صورت کم‌سیمان و از پیش‌سرمایش شده می‌باشد، ممکن است به مهارهای قالب که به صورت ویژه طراحی شده‌اند، نیاز باشد.

[57] Lift
[58] Pullout
[59] Turnaround time

فصل ۴

ویژگی‌ها

٤-١- کلیات

عوامل متعددی می‌توانند بر طراحی و ساخت سازه‌های بتنی حجیم تاثیر بگذارند. علاوه بر الزامات مربوط به مقاومت، دوام و الزامات بهره‌برداری، سایر عوامل می‌تواند شامل هزینه، شرایط محیطی، روش بتن‌ریزی و الزامات مربوط به آن، دسترسی به مصالح ساخت مناسب، ویژگی‌های خاک بستر و عوارض طبیعی زمین[60] محل ساخت باشد. ممکن است عوامل اقتصادی، در برخی از جنبه‌های طراحی و ساخت از جمله انتخاب نوع سازه برای یک ساختگاه مشخص نیز تعیین کننده باشند.

طرح مخلوط انتخابی برای یک پروژه بتن حجیم می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر الزامات ساخت آن داشته باشد. صرف زمان و هزینه برای طراحی و آزمایش مخلوط بتن برای سازه‌های بزرگ‌تر موجه و ضروری خواهد بود. این فرآیند شامل بررسی و ارزیابی منابع سنگدانه در دسترس، نوع افزودنی‌ها، و مواد سیمانی مکمل گوناگون می‌شود. مخلوط بهینه بتن می‌تواند از خطر ترک‌خوردگی کاسته و هزینه کلی ساخت را از طریق کم‌کردن هزینه مصالح، کاهش الزامات کنترل حرارتی، امکان بتن‌ریزی‌های بزرگ‌تر و تسریع ساخت کاهش دهد.

به منظور قضاوت صحیح در مورد مناسب‌بودن مخلوط بتن، می‌توان ویژگی‌ها و خواص ذیل را ارزیابی کرد: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و نرخ توسعه آن‌ها با گذشت زمان[61]، ضریب کشسانی، ضریب پواسون، ظرفیت کرنش کششی، خزش، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، جمع‌شدگی خودزا[62]، افزایش دمای بی‌دررو[63]، ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت گرمای ویژه، رسانایی حرارتی و نفوذپذیری. در ارزیابی‌های اولیه، معمولا از مقادیر تقریبی این ویژگی‌ها بر اساس محاسبات یا تجربیات قبلی استفاده می‌شود. مقدار واقعی این ویژگی‌ها در صورت امکان، باید از طریق آزمایش مخلوط واقعی و مصالح مورد استفاده در پروژه تعیین شود؛ زیرا خطاهای کوچک اغلب می‌توانند بر رفتار پیش‌بینی‌شده سازه تاثیر بگذارند. همچنین استفاده از نمونه‌های بزرگ‌مقیاس[64] یا بلوک‌های آزمایشی با مصالح ساخت و شرایط بتن‌ریزی نیز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد افزایش دما و عملکرد بتن ارائه دهد که می‌توانند برای اصلاح مدل‌های تحلیل حرارتی مفید باشند.

۴-۱-۱- مجموعه‌ای از داده‌های مربوط به طرح مخلوط بتن برخی از سدهای منتخب، در جدول ۴-۱-۱-الف ارائه شده است (Price و Higginson، ۱۹۶۳؛ Ginzburg و همکاران، ۱۹۶۶؛ ICOLD، ۱۹۶۴؛ Harboe، ۱۹۶۱؛ USBR، ۱۹۵۸؛ Houghton و Hall، ۱۹۷۲؛ Houghton، ۱۹۶۹، ۱۹۷۰). در این جدول، به بخش مخلوط‌های بتن ارائه‌شده در جدول ۳-۵-الف و ویژگی‌های گزارش‌شده در جداول ۴-۱-۱-ب تا ۴-۱-۱-ج ارجاع داده شده است.

---

[60] Topography
[61] Maturity
[62] Autogenous
[63] Adiabatic
[64] Mockup

جدول ۴-۱-۱-الف- داده‌های مخلوط بتن سدهای مختلف

شماره	نام سد (کشور)	سال اتمام ساخت	نوع سد	سیمان		پوزولان		ماسه	سنگدانه درشت		حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m^3)	w/cm	درصد هوازایی	چگالی (kg/m^3)	افزودنی کاهنده آب
				نوع	مقدار (kg/m^3)	نوع	مقدار (kg/m^3)	مقدار (kg/m^3)	نوع	مقدار (kg/m^3)						
۱	Hoover (آمریکا)	۱۹۳۶	قوسی وزنی	پرتلند نوع IV	۲۲۵	–	۰	۵۵۲	سنگ آهک و گرانیت	۱۵۸۹	۲۲۵	۱۳۰	۰/۵۸	۰	۲۴۹۸	خیر
۲	Norris (آمریکا)	۱۹۳۶	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوع II	۲۰۰	–	۰	۷۵۰	دولومیت	۱۴۸۷	۱۵۰	۱۳۵	۰/۶۷	۰	۲۴۹۹	خیر
۳	Bonneville (آمریکا)	۱۹۳۸	وزنی	پرتلند پوزولانی	۱۹۵	–	۰	۶۴۹	بازالت	۱۵۱۳	۱۵۰	۱۴۹	۰/۷۶	۰	۲۵۰۵	خیر
۴	Bartlett (آمریکا)	۱۹۳۹	چندقوسی	پرتلند نوع IV	۲۷۶	–	۰	۷۱۳	کوارتزیت و گرانیت	۱۳۴۶	۷۵	۱۶۰	۰/۵۸	۰	۲۴۸۰	خیر
۵	Grand Coulee (آمریکا)	۱۹۴۲	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوع II و IV	۲۲۴	–	۰	۵۸۲	بازالت	۱۵۲۳	۱۵۰	۱۳۴	۰/۶۰	۰	۲۴۶۴	خیر
۶	Kentucky (آمریکا)	۱۹۴۴	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوعII	۲۰۰	–	۰	۵۷۳	سنگ آهک	۱۵۵۰	۱۵۰	۱۲۶	۰/۶۳	۰	۲۴۵۴	خیر
۷	Shasta (آمریکا)	۱۹۴۵	قوسی وزنی	پرتلند نوع IV	۲۱۹	–	۰	۵۳۷	آندزیت و سنگ لوح	۱۶۱۴	۱۵۰	۱۲۲	۰/۵۶	۰	۲۴۹۴	خیر

جدول ۴-۱-۱-الف (ادامه)- داده‌های مخلوط بتن سدهای مختلف

شماره	نام سد (کشور)	سال اتمام ساخت	نوع سد	سیمان		پوزولان		ماسه	سنگدانه درشت		حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m^3)	w/cm	درصد هوازایی	چگالی (kg/m^3)	افزودنی کاهنده آب
				نوع	مقدار (kg/m^3)	نوع	مقدار (kg/m^3)	مقدار (kg/m^3)	نوع	مقدار (kg/m^3)						
۸	Hungry Horse (آمریکا)	۱۹۵۲	قوسی وزنی	پرتلند نوع II	۱۱۱	خاکستر بادی	۵۳	۴۹۹	ماسه سنگ	۱۶۷۲	۱۵۰	۷۷	۰/۴۷	۳	۲۴۱۵	خیر
۹	Detroit (آمریکا)	۱۹۵۳	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوع II و IV	۱۳۴	-	۰	۵۹۳	دیوریت	۱۵۹۵	۱۵۰	۱۱۳	۰/۸۵	۵/۵	۲۴۳۷	خیر
۱۰	Monticello (آمریکا)	۱۹۵۷	قوسی	پرتلند نوع II LA	۱۲۶	رس دیاتومه کلسینه شده	۴۲	۴۵۷	ماسه سنگ گل خمیره‌ای و کوارتزیت	۱۷۵۶	۱۵۰	۹۶	۰/۵۷	۲/۷	۲۴۷۷	خیر
۱۱	Flaming Gorge (آمریکا)	۱۹۶۲	قوسی وزنی	پرتلند نوع II	۱۱۱	رس کلسینه شده	۵۶	۳۳۲	سنگ آهک و ماسه سنگ	۱۷۲۰	۱۵۰	۸۸	۰/۵۳	۳/۵	۲۴۰۹	خیر
۱۲	Glen Canyon (آمریکا)	۱۹۶۳	قوسی وزنی	پرتلند نوع II	۱۱۱	پومیسیت	۵۶	۴۶۱	سنگ آهک، چرت کلسدونی و ماسه سنگ	۱۶۵۱	۱۵۰	۹۱	۰/۵۴	۳/۵	۲۳۷۱	خیر
		۱۹۶۳	قوسی وزنی	پرتلند نوع II	۱۱۱	پومیسیت	۵۳	۴۷۴		۱۶۶۲	۱۵۰	۸۳	۰/۵۰	۳/۵	۲۳۸۵	بله

جدول ۴-۱-۱-الف (ادامه)- داده‌های مخلوط بتن سدهای مختلف

شماره	نام سد (کشور)	سال اتمام ساخت	نوع سد	سیمان		پوزولان		ماسه	سنگدانه درشت		حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m³)	w/cm	درصد هوازایی	چگالی (kg/m³)	افزودنی کاهنده آب
				نوع	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)						
۱۳	Yellowtail (آمریکا)	۱۹۶۵	قوسی وزنی	پرتلند نوع II	۱۱۷	خاکستر بادی	۵۰	۵۲۶	سنگ آهک و آندزیت	۱۶۷۰	۱۵۰	۸۲	۰/۴۹	۳	۲۳۴۹	خیر
۱۴	Morrow Point (آمریکا)	۱۹۶۷	قوسی نازک	پرتلند نوع II	۲۲۱	–	۰	۳۷۶	آندزیت، توف و بازالت	۱۶۹۱	۱۱۴	۹۳	۰/۴۲	۴/۳	۲۳۸۲	بله
۱۵	Dworshak (آمریکا)	۱۹۷۲	وزنی	پرتلند نوع II	۱۲۵	خاکستر بادی	۴۲	۴۳۹	گنایس و گرانیت خردشده	۱۷۷۰	۱۵۰	۹۷	۰/۵۹	۵/۳	۲۴۷۳	خیر
۱۶	Libby (آمریکا)	۱۹۷۲	وزنی	پرتلند نوع II	۸۸	خاکستر بادی	۲۹	۵۳۶	شن کوارتزی طبیعی	۱۷۰۸	۱۵۰	۷۹	۰/۶۸	۵/۳	۲۴۳۹	خیر
۱۷	Lower Granite (آمریکا)	۱۹۷۳	وزنی	پرتلند نوع II	۸۶	گدازه آتشفشانی آسیاب شده	۲۹	۴۵۶	شن بازالتی طبیعی	۱۸۳۷	۱۵۰	۸۲	۰/۷۱	۵/۳	۲۳۹۰	بله
۱۸	Pueblo (آمریکا)	۱۹۷۴	پشت‌بنده‌دار	پرتلند نوع II LA	۱۳۴	–	۴۴	۵۶۵	گرانیت، شیست، سنگ آهک و دولومیت	۱۵۳۵	۸۹	۱۰۰	۰/۵۶	۵/۳	۲۳۷۹	بله

جدول ۴-۱-۱-الف (ادامه)- داده‌های مخلوط بتن سدهای مختلف

شماره	نام سد (کشور)	سال اتمام ساخت	نوع سد	سیمان		پوزولان		ماسه	سنگدانه درشت		حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m³)	w/cm	درصد هوازایی	چگالی (kg/m³)	افزودنی کاهنده آب
				نوع	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)						
۱۹	Crystal (آمریکا)	۱۹۷۶	قوسی ناتراک	پرتلند نوع II LA	۲۳۱	–	۰	۴۹۲	شیست، سنگ‌های آتشفشانی دگرگونی	۱۶۲۵	۷۵	۱۰۹	۰/۴۷	۵/۳	۲۳۵۷	بله
۲۰	Richard B. Russel (آمریکا)	۱۹۸۲	وزنی	پرتلند نوع II	۱۳۳	خاکستر بادی	۳۵	۴۸۸	گرانیت خردشده	۱۷۵۵	۱۵۰	۱۰۳	۰/۵۷	۴/۳	۲۵۱۵	بله
				پرتلند نوع II	۱۰۳	خاکستر بادی	۴۳	۵۱۳		۱۷۴۱	۱۵۰	۱۰۵	۰/۶۷	۴/۳	۲۴۹۹	بله
۲۱	Rossens (سوییس)	۱۹۴۸	قوسی	پرتلند نوع I	۲۵۰	–	۰	–	سنگ آهک	–	۷۹	۱۳۳	۰/۵۳	۰	–	خیر
۲۲	Pieve di Cadore (ایتالیا)	۱۹۴۹	قوسی وزنی	پرتلند پوزولانی دارای ترکیبات آهن	۱۵۰	طبیعی	۵۰	۷۰۰	سنگ آهک	۱۲۳۹	۱۲۰	۱۲۶	۰/۶۳	۲	۲۵۶۰	بله
۲۳	Francisco Madero (مکزیک)	۱۹۴۹	پشت‌بنددار سر گرد[1]	پرتلند نوع IV	۲۲۱	–	۰	۵۳۰	ریولیت و بازالت	۱۴۱۲	۱۵۰	۱۳۲	۰/۶۰	–	–	–

(1) Roundhead buttress

جدول ۴-۱-۱-الف (ادامه)- داده‌های مخلوط بتن سدهای مختلف

شماره	نام سد (کشور)	سال اتمام ساخت	نوع سد	سیمان		پوزولان		ماسه	سنگدانه درشت		حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m³)	w/cm	درصد هوازایی	چگالی (kg/m³)	افزودنی کاهنده آب
				نوع	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)	مقدار (kg/m³)	نوع	مقدار (kg/m³)						
۲۴	Chastang (فرانسه)	۱۹۵۱	قوسی وزنی	۳۱۵/۲۵۰	۲۲۵	–	۰	۴۵۰	گرانیت	۱۶۴۰	۲۵۰	۱۰۰	۰/۴۵	–	۲۴۱۵	–
۲۵	Salmonde (پرتغال)	۱۹۵۳	قوسی نازک	پرتلند نوع II	۲۵۰	–	۰	۴۳۸	گرانیت	۱۵۵۴	۲۰۰	۱۳۳	۰/۵۴	۰	۲۳۷۶	–
۲۶	War-ragamba (استرالیا)	۱۹۶۰	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوع II	۱۹۶	–	۰	۵۰۳	سنگ آذرین و گرانیت	۱۶۸۷	۱۵۰	۱۰۴	۰/۵۳	۰	۲۴۶۹	خیر
۲۷	Krasnoiarsk (روسیه، شوروی سابق)	حدود ۱۹۷۰	وزنی بدون انحنا	پرتلند نوع IV و پرتلند سرباره کوره آهن گدازی	۲۳۰	–	۰	–	گرانیت	–	۱۰۰	۱۲۶	۰/۵۵	–	–	بله
۲۸	Ilha Solteira (لاوزره)	۱۹۷۴	وزنی	پرتلند نوع II	۸۲	رس کلسینه شده	۲۷	۴۶۸	شن کوارتزی، بازالت خردشده	۱۸۹۳	۱۵۰	۸۲	۰/۷۵	۳/۵	۲۵۵۲	خیر
۲۹	Itaipu (برزیل- پاراگوئه)	۱۹۸۲	پشت‌بنددار وزنی توخالی	پرتلند نوع II	۱۰۸	خاکستر بادی	۱۳	۵۸۲	بازالت خردشده	۱۸۳۷	۱۵۰	۸۵ ۱۰۱	۰/۷۰	۴	۲۵۳۷	خیر
۳۰	Peace Site 1 (کانادا)	۱۹۷۹	وزنی	پرتلند نوع I	۹۴	خاکستر بادی	۶۳	۵۷۵	کوارتزیت، سنگ آهک و ماسه سنگ	۱۵۴۹	۷۵	۸۵	۰/۶۷	۳/۶	۲۳۷۹	بله
۳۱	بازسازی سد Theodore Roosevelt (آمریکا)	۱۹۹۵	قوسی وزنی	پرتلند نوع II LA	۱۲۸	خاکستر بادی	۳۲	۵۶۶	گرانیت	۱۵۸۵	۱۰۰	۸۵	۰/۵۳	۴	۲۳۹۷	بله

جدول ۴-۱-۱-ب- طرح مخلوط و مقاومت فشاری بتن در سدهای مختلف

سد	کشور	سیمان یا مواد سیمانی (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	نوع سنگدانه غالب	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	w/cm	مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa)	بهره‌وری سیمان در سن ۹۰ روزه ($MPa/kg/m^3$)
La Palisse	فرانسه	۳۰۰	۱۴۸	گرانیت	۱۲۰	۰/۴۹	۳۳	۰/۱۱۱
Chastang	فرانسه	۲۲۵	۱۰۰	گرانیت	۲۵۰	۰/۴۵	۲۶	۰/۱۱۵
L'Aigle	فرانسه	۲۲۵	۱۲۵	گرانیت	۲۵۰	۰/۵۶	۲۲/۱	۰/۰۹۸
Pieve di Cadore	ایتالیا	۲۰۰	۱۲۶	دولومیت	۱۰۰	۰/۶۳	۴۴/۱	۰/۲۲۰
Forte Baso	ایتالیا	۲۴۰	۱۴۱	سنگ آذرین	۹۸	۰/۵۹	۳۳/۹	۰/۱۴۱
Cabrilo	پرتغال	۲۲۰	۱۱۶	گرانیت	۱۵۰	۰/۵۳	۲۸/۶	۰/۱۳۰
Salamonde	پرتغال	۲۴۹	۱۳۳	گرانیت	۲۰۰	۰/۵۴	۲۹/۳	۰/۱۱۸
Castelo Bode	پرتغال	۲۲۰	۱۰۷	کوارتزیت	۲۰۰	۰/۴۹	۲۶/۲	۰/۱۱۹
Rossens	سوییس	۲۴۹	۱۳۳	مخلوط سنگدانه‌های یخچالی	۶۴	۰/۵۴	۴۱/۳	۰/۱۶۶
Mauvoisin	سوییس	۱۸۹	۹۶	گنایس	۹۶	۰/۵۱	۳۴/۲	۰/۱۸۱
Zervreila	سوییس	۱۹۹	۱۲۶	گنایس	۹۶	۰/۶۳	۲۶/۵	۰/۱۳۳
Hungry Horse	آمریکا	۵۳ – ۱۱۱	۷۷	ماسه سنگ	۱۵۰	۰/۴۷	۲۱/۴	۰/۱۳۰
Glen Canyon	آمریکا	۵۶ – ۱۱۱	۹۹	سنگ آهک	۱۵۰	۰/۵۴	۲۶/۳	۰/۱۶۰
Lower Granite	آمریکا	۲۹ – ۸۶	۸۲	بازالت	۱۵۰	۰/۷۱	۱۴/۳	۰/۱۲۴
Libby	آمریکا	۲۹ – ۸۸	۷۹	کوارتزیت	۱۵۰	۰/۶۸	۱۷	۰/۱۴۵
Dworshak	آمریکا	۴۲ – ۱۲۵	۹۷	گرانیت	۱۵۰	۰/۵۸	۲۱	۰/۱۲۶
Dworshak	آمریکا	۴۰ – ۱۱۷	۹۷	گنایس	۱۵۰	۰/۶۲	۱۷/۴	۰/۱۱۱
Dworshak	آمریکا	۴۳ – ۱۰۰	۹۸	گنایس	۱۵۰	۰/۶۹	۱۴	۰/۰۹۸
Dworshak	آمریکا	۲۷ – ۱۳۰	۹۸	گنایس	۱۵۰	۰/۷۵	۱۳/۲	۰/۰۸۴
Dworshak	آمریکا	۴۲ – ۱۲۵	۹۷	گرانیت	۱۵۰	۰/۵۸	۲۱	۰/۱۲۶
Dworshak	آمریکا	۴۰ – ۱۱۷	۹۷	گنایس	۱۵۰	۰/۶۲	۱۷/۴	۰/۱۱۱
Dworshak	آمریکا	۴۳ – ۱۰۰	۹۸	گنایس	۱۵۰	۰/۶۹	۱۴	۰/۰۹۸
Dworshak	آمریکا	۲۷ – ۱۳۰	۹۸	گنایس	۱۵۰	۰/۷۵	۱۳/۲	۰/۰۸۴
Pueblo	آمریکا	۴۴ – ۱۳۴	۱۰۰	گرانیت، سنگ آهک و دولومیت	۸۹	۰/۵۶	۲۰/۷ (۱)	۰/۱۱۶
Crystal	آمریکا	۲۳۱	۱۰۹	شیست و سنگ‌های آتشفشانی دگرگونی	۷۵	۰/۴۷	۲۷/۶ (۲)	۰/۱۱۹
Flaming Gorge	آمریکا	۵۶ – ۱۱۱	۸۸	سنگ آهک و ماسه سنگ	۱۵۰	۰/۵۳	۲۴/۱	۰/۱۴۴

جدول ۴-۱-۱-ب (ادامه)- طرح مخلوط و مقاومت فشاری بتن در سدهای مختلف

سد	کشور	سیمان یا مواد سیمانی (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	نوع سنگدانه غالب	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	w/cm	مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa)	بهره‌وری سیمان در سن ۹۰ روزه (MPa/kg/m^3)
Krasnoiarsk	روسیه، شوروی سابق	۲۳۰	۱۲۶	گرانیت	۱۰۰	۰/۵۵	۲۲/۶	۰/۰۹۸
Ilha Solteira	برزیل	۸۲ - ۲۷	۸۲	شن کوارتزی و بازالت خردشده	۱۵۰	۰/۷۵	۲۱	۰/۱۹۳
Itapu	برزیل	۱۰۸ - ۱۳	۸۵	بازالت خردشده	۱۵۰	۰/۷۰	۱۸	۰/۱۴۹
بازسازی سد Theodore Roosevelt	آمریکا	۱۶۰	۸۵	گرانیت	۱۵۰	۰/۵۳	۳۱	۰/۱۹۴

(۱) مقاومت پس از ۸۰ روز

(۲) مقاومت پس از ۱ سال

جدول ۴-۱-۱-پ- مقاومت فشاری و ویژگی‌های کشسانی بتن حجیم

شماره	سد	مقاومت فشاری (MPa)				ویژگی‌های کشسانی							
						مدول کشسانی، $E\times10^6$ (GPa)				ضریب پواسون			
		سن بتن (روز)				سن بتن (روز)				سن بتن (روز)			
		۲۸	۹۰	۱۸۰	۳۶۵	۲۸	۹۰	۱۸۰	۳۶۵	۲۸	۹۰	۱۸۰	۳۶۵
۱	Hoover	۲۰/۹	۲۲/۸	–	۲۹/۶	۳۸	۴۳	–	۴۷	۰/۱۸	۰/۲۰	–	۰/۲۱
۲	Grand Coulee	۳۳	۳۵/۶	–	۴۱/۳	۳۲	۴۲	–	۴۱	۰/۱۷	۰/۲۰	–	۰/۲۳
۳	Glen Canyon	۱۷/۶	۲۶/۳	۲۷/۲	–	۳۷	–	۴۰	–	۰/۱۱	–	۰/۱۴	–
۴	(۱) Glen Canyon	۲۴/۱	۳۳/۸	۴۵/۲	۴۷	۳۷	۴۳	۴۶	–	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۹	–
۵	Flaming Gorge	۲۰/۳	۲۴/۱	۲۶/۷	۳۲/۳	۲۴	۳۰	۳۲	–	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۲۰	–
۶	Yellowtail	–	۳۱/۶	۳۷/۴	۳۸/۹	–	۴۲	۴۷	۴۳	–	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۷
۷	(۱) Morrow Point	۳۲/۹	۴۱/۱	۴۴/۳	۴۶/۱	۳۰	۳۳	۳۷	۳۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۰
۸	(۱) Lower Granite	۸/۸	۱۴/۳	۱۶/۷	۱۸/۸	۱۹	۲۷	۲۶	۲۷	۰/۱۹	۰/۲۰	–	–
۹	Libby	۱۰	۱۷	–	۲۲	۲۲	۲۸	–	۳۸	۰/۱۴	۰/۱۸	–	–
۱۰	(۱) Dworshak	۸/۳	۱۴	–	۲۱/۴	–	۲۶	–	۲۶	–	–	–	–
۱۱	Ilha Solteira	۱۶	۱۹	۲۱	۲۲	۳۵	۴۱	–	–	۰/۱۵	۰/۱۶	–	–
۱۲	Itapu	۱۳	۱۸	۱۸	۱۹	۳۸	۴۳	۴۳	۴۵	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۰
۱۳	(۱)Peace Site	۲۱/۱	۲۷/۲	۳۱/۱	۳۲/۲	–	–	–	–	–	–	–	–
۱۴	بازسازی سد Theodore Roosevelt	۱۶/۵	۳۱	۳۷/۴	۴۰	۳۱	۳۷	–	۴۳	۰/۲۰	۰/۲۱	–	۰/۲۱

(۱) از مادهٔ کاهندهٔ آب استفاده شده است.

جدول ۴-۱-۱-ت- ویژگی‌های کشسانی بتن حجیم

سن بتن در زمان بارگذاری	ضرایب ارتجاعی آنی و ماندگار[1] (Gpa)													
	Grand Coulee			Shasta			Hungry Horse			Dworshak			Libby		
	E	E^1	E^2	E	E^1	E^2	E	E^1	E^2	E	E^1	E^2	E	E^1	E^2
۲ روز	۱۲	۵/۷	۵/۲	۹/۷	۳/۷	۳/۴	۱۹	۱۰	۹/۷	۹/۷	۵/۲	۴/۸	۱۱	۶/۹	۶/۲
۷ روز	۱۶	۷/۶	۶/۹	۱۴	۶/۹	۶/۶	۲۹	۱۳	۱۲	۱۴	۶/۹	۶/۲	۲۲	۱۱	۹
۲۰ روز	۲۴	۱۲	۱۱	۲۴	۱۲	۱۱	۳۱	۱۸	۱۷	۱۹	۹/۷	۹	۲۸	۱۵	۱۴
۹۰ روز	۲۰	۱۷	۱۶	۳۰	۱۹	۱۷	۳۶	۲۲	۲۱	۲۶	۱۵	۱۴	۳۶	۲۰	۱۹
۱ سال	۳۴	۱۷	۱۶	۳۰	۱۹	۱۷	۳۶	۲۲	۲۱	۲۶	۱۵	۱۴	۳۶	۲۰	۱۹
۵ سال	۳۷	۲۵	۲۳				۴۱	۲۸	۲۶	۳۴	۲۱	۲۰	۴۴	۳۰	۲۸
۷ سال و ۳ ماه				۳۹	۳۰	۲۸									

[1] تمامی مخلوط‌های بتن برای حذف سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۳۷/۵ میلی‌متر، الک شده است.

توجه: E ضریب ارتجاعی آنی، E^1 ضریب ارتجاعی ماندگار پس از ۳۶۵ روز تحت بار، و E^2 ضریب ارتجاعی ماندگار پس از ۱۰۰۰ روز تحت بار هستند. ضریب ارتجاعی آنی ارائه‌شده، به ضریب بدست‌آمده از آزمایش با نرخ بارگذاری استاتیکی یا عادی (مدت زمان یک تا ۵ دقیقه) اشاره دارد و ضریب آنی واقعی، بدست‌آمده از آزمایش با نرخ بارگذاری دینامیکی یا سریع نیست.

جدول ۴-۱-۱-ث- جمع‌شدگی و نفوذپذیری بتن حجیم

سازه	جمع‌شدگی خودزا		جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن	نفوذپذیری،
	پس از ۹۰ روز (microstrain)	پس از ۱ سال (microstrain)	پس از ۱ سال (microstrain)	m/s/m hydraulic head[1]
Hoover	–	–	-۲۷۰	۱/۸۳×۱۰$^{-۱۳}$
Grand Coulee	–	–	-۴۲۰	–
Hungry Horse	-۴۴	-۵۲	-۵۲۰	۵/۴۵×۱۰$^{-۱۳}$
Canyon Ferry	+۶	-۳۷	-۳۹۷	۵/۶۹×۱۰$^{-۱۳}$
Monticello	-۱۵	-۳۸	-۹۹۸	۲/۴۲×۱۰$^{-۱۲}$
Glen Canyon	-۳۲	-۶۱	-۴۵۹	۵/۴۲×۱۰$^{-۱۳}$
Flaming Gorge	–	–	-۴۹۶	۳/۲۷×۱۰$^{-۱۲}$
Yellowtail	-۱۲	-۳۸	-۳۴۵	۵/۸۱×۱۰$^{-۱۳}$
Dworshak	+۱۰	-۸	-۵۱۰	۵/۵۹×۱۰$^{-۱۳}$
Libby	+۳	+۱۲	-۴۸۰	۱/۳۸×۱۰$^{-۱۳}$
Lower Granite	+۴	+۴	–	–

[1] نرخ حرکت جریان آب به ازای هر متر اختلاف ارتفاع هیدرولیکی.

توجه: آزمونه‌های تغییر حجم برای سدهای Hoover و Grand Coulee به صورت منشورهای ۱۰۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری و برای سدهای Dworshak، Libby و Lower Granite به صورت استوانه‌های آب‌بندی‌شده ۴۶۰×۲۳۰ میلی‌متری بودند. در سایر سدها، آزمونه‌ها به صورت منشورهای ۷۶۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری بودند. آزمونه‌های آزمایش نفوذپذیری برای سدهای Dworshak، Libby و Lower Granite به صورت استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری و برای سایر سدهای مندرج در جدول، با ابعاد ۴۶۰×۴۶۰ میلی‌متر بودند.

جدول ۴-۱-۱-ج- ویژگی‌های برشی بتن (آزمایش‌های سه‌محوری)

سد	سن (روز)	*w/cm*	مقاومت فشاری (MPa)	چسبندگی (MPa)	tanϕ	s_s/s_c [1]
Grand Coulee	۲۸	۰/۵۲	۳۶/۲	۸/۱	۰/۹۰	۰/۲۲۳
	۲۸	۰/۵۸	۳۱/۲	۷	۰/۸۹	۰/۲۲۵
	۲۸	۰/۶۴	۲۶/۳	۵/۷	۰/۹۲	۰/۲۱۸
	۹۰	۰/۵۸	۳۲/۸	۷	۰/۹۷	۰/۲۱۳
	۱۱۲	۰/۵۸	۳۳/۹	۶/۴	۱/۰۵	۰/۱۸۹
	۳۶۵	۰/۵۸	۵۸/۶	۱۳	۰/۹۱	۰/۲۲۱
Hungry Horse	۱۰۴	۰/۵۵	۱۵/۵	۳/۴	۰/۹۰	۰/۲۲۲
	۱۴۴	۰/۵۵	۲۱	۴/۷	۰/۸۹	۰/۲۲۴
	۶۲۲	۰/۶۰	۱۲/۱	۲/۸	۰/۸۶	۰/۲۲۹
Monticello	۲۸	۰/۶۲	۱۹/۳	۴/۲	۰/۹۳	۰/۲۱۸
	۴۰	۰/۹۲	۲۸/۴	۶/۶	۰/۸۵	۰/۲۳۱
Shasta	۲۸	۰/۵۰	۳۹/۶	۷/۹	۱/۰۵	۰/۱۹۹
	۲۸	۰/۶۰	۳۳/۹	۷/۳	۰/۹۵	۰/۲۱۵
	۹۰	۰/۵۰	۳۷/۶	۷/۵	۱/۰۵	۰/۲۰۰
	۹۰	۰/۵۰	۴۵/۴	۹/۴	۱/۰۱	۰/۲۰۶
	۹۰	۰/۶۰	۳۴/۵	۷/۲	۱	۰/۲۰۸
	۲۴۵	۰/۵۰	۴۲/۲	۸/۵	۱/۰۴	۰/۲۰۱
Dworshak	۱۸۰ [2]	۰/۵۹	۲۸/۶	۱۰/۳	۰/۴۴	۰/۳۵۹
	۱۸۰ [2]	۰/۶۳	۲۲/۲	۷/۴	۰/۴۶	۰/۳۳۵
	۱۸۰ [2]	۰/۷۰	۱۶/۷	۶/۶	۰/۴۳	۰/۳۹۳
	۲۰۰ [3]	۰/۵۹	۲۰/۱	۵	۰/۸۴	۰/۲۴۷

[1] چسبندگی تقسیم بر مقاومت فشاری.

[2] مربوط به آزمونه‌های ۹۰۰×۴۵۰ میلی‌متری که به منظور جلوگیری از خشک‌شدن، آب‌بندی شده‌اند.

[3] مربوط به آزمونه‌های ۹۰۰×۴۵۰ میلی‌متری که به منظور جلوگیری از خشک‌شدن، آب‌بندی شده‌اند و حداکثر اندازه سنگدانه در آن‌ها به ۱۵۰ میلی‌متر محدود شده است.

توجه: تمامی آزمونه‌ها به جز موارد (۲) و (۳)، دارای ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری و حداکثر اندازه سنگدانه ۳۸ میلی‌متر هستند.

۴-۲- مقاومت

از جمله رایج‌ترین عواملی که بر مقاومت بتن تاثیر می‌گذارند عبارتند از:

الف) نوع، مقدار، جنس و نرمی ماده سیمانی

ب) کانی‌شناسی، شکل، کیفیت و دانه‌بندی سنگدانه

پ) مقدار آب

مطالعه داده‌های مقاومت فشاری ارائه‌شده در جدول ۴-۱-۱-ب، تغییرات قابل‌توجهی را در رابطه مستقیم بین نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت نشان می‌دهد. کاهش نسبت آب به مواد سیمانی معمولا به افزایش مقاومت منجر می‌شود.

به طور کلی، مقاومت بتن در موارد کاربرد بتن حجیم باید صرفا به برآورده ساختن الزامات سازه‌ای محدود شود. تعیین مقاومت اضافه بر نیاز عموما به مقدار زیاد سیمان در مخلوط بتن و در نتیجه افزایش دما و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن و همچنین افزایش تنش‌های حرارتی احتمالی و تنش‌های بالقوه مربوط به جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن منجر می‌شود. با توجه به طرح مخلوط و الزامات پروژه، تعیین حداقل مقاومت فشاری لازم در سنین بیش از ۲۸ روز، مانند ۵۶ روز یا بیشتر می‌تواند در اسناد طراحی منظور گردد.

اندازه‌گیری مقاومت فشاری اغلب با استفاده از آزمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌شود و به عنوان قاعده‌ای کلی، قطر استوانه نباید کمتر از سه برابر بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه و نسبت ارتفاع به قطر باید ۲ به ۱ باشد. برای پروژه‌هایی با بتن حاوی سنگدانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر، اغلب ساخت و حمل آزمونه‌های استوانه‌ای بزرگ غیرعملی است، بنابراین معمولا در طول فرآیند ساخت آزمونه استوانه‌ای، بتن تازه به منظور حذف سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر، مطابق با ASTM C31/C31M الک می‌شود. این کار امکان استفاده از آزمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری را فراهم می‌کند. هنگامی که از این روش استفاده می‌شود، اغلب در اوایل پروژه رابطه همبستگی[65] مقاومت، قبل و بعد از الک‌کردن، برقرار می‌شود. زیرا مقاومت آزمونه‌های بزرگ تا ابعاد ۱۸۰۰×۹۰۰ میلی‌متر، معمولا ۸۰ تا ۹۰ درصد مقاومت آزمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری در سن یکسان خواهد بود (USBR، ۲۰۰۱).

روش‌های عمل‌آوری تسریع‌شده، مانند روش‌های ASTM C1768/C1768M و روش عمل‌آوری جایگزین که در ASTM C1202 ارائه شده است، در سنین اولیه، شاخص معقولی از مقاومت بتن در سنین زیادتر ارائه می‌دهد. شاخص مقاومت تسریع‌شده زمانی مفید است که با مقادیر مقاومت بلندمدت بدست‌آمده از آزمونه‌های مکمل همان بتن، همبستگی مطلوبی داشته باشد. با وجود اینکه ممکن است این شاخص، ویژگی‌های نهایی بتن را به طور دقیق پیش‌بینی نکند، اما می‌تواند در طول فرآیند ساخت، برای پایش تغییرات احتمالی در مخلوط یا اجزای مخلوط بتن مفید باشد.

برای پروژه‌های بتن حجیم بسیار بزرگ مانند سدهای وزنی، عوامل پیچیده متعددی در ارتباط بین نتایج آزمایش مقاومت نمونه‌های کوچک با مقاومت احتمالی بتن در سازه با ابعاد واقعی دخیل هستند. به دلیل

---

[65] Correlation

این پیچیدگی‌ها، الزامات مقاومت بتن در سازه‌های بتن حجیم بعضا چند برابر حداکثر تنش‌های طراحی محاسباتی است. به عنوان مثال، ضوابط طراحی سدهای وزنی که به صورت متداول توسط اداره احیای اراضی ایالات متحده (۱۹۷۶) و USACE EM 1110-2-2200 استفاده می‌شوند، حداکثر تنش فشاری مجاز برای ترکیبات بارگذاری معمول را برابر یک سوم مقاومت مشخصه بتن تعیین می‌کنند. انتخاب تنش‌های مجاز و ضرایب اطمینان به نوع سازه، شرایط بارگذاری در تحلیل و ساختگاه سازه بستگی دارد.

بتن دارای مقاومت فشاری زیادتر، تمایل به داشتن مقاومت کششی بیشتری دارد، اما در عین حال هنگام ترسیم نتایج این مقاومت‌ها در برابر یکدیگر، پراکندگی زیادی در داده‌ها وجود دارد. مقاومت کششی را می‌توان بوسیله چندین آزمایش اندازه‌گیری کرد که در درجه اول، آزمایش‌های کشش مستقیم[66] (USBR 4914، 1992 a)، کشش شکافتی[67] (ASTM C496/C496M)، و مدول گسیختگی[68] (ASTM C78/C78M؛ ASTM C293/C293M) هستند. هریک از این آزمایش‌ها رابطه متفاوتی با مقاومت فشاری دارند. مقاومت کششی بتن حجیم به طور قابل ملاحظه‌ای متغیر است و به سن سازه، اندازه و نوع سنگدانه درشت، نسبت ابعاد آزمونه به ابعاد سنگدانه و جهتی که مغزه‌ها گرفته و آزمایش شده‌اند، بستگی دارد (Schrader و همکاران، ۲۰۱۸). داده‌های USBR نشان می‌دهد که مقاومت کششی مستقیم بتن حاوی سنگدانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر در اکثر سدهای قدیمی ایالات متحده، ۳ تا ۶/۶ درصد مقاومت فشاری است (Dolen و همکاران، ۲۰۱۴؛ Darbar و همکاران، ۲۰۱۶). مقاومت کششی بتن سازه‌ای حاوی سنگدانه‌های درشت کوچک‌تر از ۵۰ میلی‌متر، معمولا ۸ تا ۱۲ درصد مقاومت فشاری گزارش شده است (Kosmatkaand Wilson، ۲۰۱۶؛ Arioglu و همکاران، ۲۰۰۶).

در صورت امکان و ضرورت، برای تایید این روابط باید آزمایش انجام شود، که در حالت ایده‌آل از طریق اندازه‌گیری مقاومت کششی مستقیم (USBR 4914؛ USACE CRD-164) انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری با استفاده از مصالح مختلف می‌تواند به ضرایبی منجر شود که بر اساس کیفیت سنگدانه و سایر عوامل به طور قابل‌توجهی با ضریب کلی روابط فوق‌الذکر متفاوت باشند.

مقاومت بتن همچنین تحت تاثیر نرخ بارگذاری قرار می‌گیرد؛ آزمایش‌های معمول بتن بصورت استاتیکی هستند و در آن‌ها از نرخ بارگذاری نسبتا کمی استفاده می‌شود. رخدادهای دینامیکی مانند زلزله، انفجار یا ضربه، در کسری از ثانیه منجر به ایجاد تنش می‌شوند. هنگام ارزیابی بارگذاری‌های انفجاری، در نظر گرفتن نرخ کرنش می‌تواند عامل مهمی باشد (Schrader و همکاران، ۲۰۱۸). مقاومت فشاری آزمونه‌های بتن مرطوب در حالت بارگذاری بصورت دینامیکی، در مقایسه با مقادیر به‌دست‌آمده از نرخ بارگذاری استاندارد، تا ۳۰ درصد و مقاومت کششی آن‌ها تا ۵۰ درصد افزایش نشان داده است (Saucier، ۱۹۷۷؛ Graham، ۱۹۷۸؛ Raphael، ۱۹۸۴؛ Harris و همکاران، ۲۰۰۰). با این حال، بتن حجیم به طور بالقوه برای تنش‌های ثابت با دامنه کمتر در مدت زمان طولانی‌تر، ظرفیت کششی کمتری دارد (Darbar و همکاران، ۲۰۱۶). به منظور تعیین تاثیر احتمالی این تغییرات بر یک طراحی یا تحلیل مشخص، در صورت نبود داده‌های آزمایش بتن، باید آنالیز حساسیت با طیف وسیعی از داده‌ها انجام شود.

---

[66] Direct tension
[67] Splitting tension
[68] Modulus of rupture

٤-۳- دما

٤-۳-۱- کنترل دما

یکی از ویژگی‌های مهم که رفتار بتن حجیم را از بتن معمولی متمایز می‌کند، رفتار حرارتی آن است. این موضوع بدان معنا نیست که بتن معمولی در اثر مسائل مربوط به دما دچار مشکل نمی‌شود؛ بلکه به این معناست که احتمال بروز مشکلات مربوط به دما برای بتنی که حجیم تلقی می‌شود، زیادتر است و اقداماتی برای جلوگیری از چنین مسائلی نیاز دارد.

اقدامات لازم برای کنترل دما در زمان ساخت معمولا در برنامه‌های کنترل حرارتی تشریح می‌شود که شامل اقدامات مخصوص به پروژه جهت کنترل و پایش حداکثر دما و اختلاف دما در بتن حجیم است. برنامه‌های کنترل حرارتی، ابزاری برای هدایت برنامه‌ریزی و اجرای بتن‌ریزی‌های حجیم در فرآیند ساخت هستند. جنبه‌های مربوط به چیدمان آرماتور، ابعاد سازه، قیدها یا همه این موارد در بتن‌ریزی‌های حجیم باید قبل از ساخت و در مرحله طراحی بررسی شوند. موضوعاتی که معمولا در برنامه کنترل حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرند باید شامل موارد زیر باشد:

الف) طرح مخلوط بتن

ب) افزایش دمای بی‌درروی محاسباتی یا اندازه‌گیری‌شده‌ی بتن

پ) حداکثر دمای بتن در زمان بتن‌ریزی

ت) شرح اقدامات ویژه برای کنترل حداکثر دما و حداکثر اختلاف دما

ث) حداکثر دما و اختلاف دمای محاسباتی بتن‌ریزی بر اساس شرایط مورد انتظار در زمان بتن‌ریزی

ج) روش‌شناسی یا مدل‌سازی برای محاسبه افزایش دما و اختلاف‌های دمایی پیش‌بینی‌شده

چ) شرح تجهیزات و روش‌هایی که برای پایش و ثبت دماها و اختلاف‌های دما مورد استفاده قرار می‌گیرند

ح) شرح اقدامات برای رسیدگی و کاهش دماها و اختلاف‌های دمای بیش از حد در صورت وقوع

خ) نمایش محل قراردادن حسگرهای دما در بتن‌ریزی

د) شرح ساختار و تعداد دفعات ارائه داده‌های دما

ذ) شرح شیوه‌های عمل‌آوری شامل مواد، روش‌ها و مدت زمان عمل‌آوری

ر) روش‌های مورد استفاده برای سرمایش بتن پس از بتن‌ریزی، در صورت استفاده

ز) شرح روش‌های قالب‌برداری برای اطمینان از اینکه اختلاف دما در سطحی که به طور موقت نمایان می‌شود، از حد مجاز اختلاف دما تجاوز نمی‌کند، و شرح چگونگی حفظ عمل‌آوری

حتی با رعایت نکات روش‌های متعارف بتن‌ریزی، جلوگیری از وقوع ترک‌خوردگی حرارتی همیشه امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، زمانی که لازم باشد هیچ‌گونه ترک‌خوردگی اتفاق نیفتد، باید اقدامات ویژه‌ای که ممکن است هزینه‌های طراحی و ساخت را تحت تاثیر قرار دهند، در نظر گرفته شوند (Bamforth، ۲۰۰۷). در برنامه‌های کنترل حرارتی، عوامل مرتبط با سازوکارهای غیرحرارتی مانند جمع‌شدگی خودزا یا جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن پوشش داده نمی‌شوند. با این حال، تنش‌های ناشی از چنین سازوکارهایی

می‌توانند تنش‌های کل را افزایش و باعث وقوع ترک‌خوردگی در تنش‌های حرارتی کمتری شوند.

ترکیبی از ابعاد بتن‌ریزی، زمان‌بندی بتن‌ریزی‌های مجاور، مقدار افزایش دمای بتن، و دمای بتن در زمان بتن‌ریزی، احتمال ایجاد دماهای قابل‌توجه در درون بتن و اختلاف دمای زیاد بین بخش درونی و سطوح بیرونی بتن را افزایش می‌دهد. چهار عنصر یک برنامه کنترل دمای موثر، که ممکن است هریک یا تمامی آن‌ها در یک پروژه بتن حجیم استفاده شوند، عبارتند از:

الف) کنترل مقدار مواد سیمانی، که در آن انتخاب نوع و مقدار مواد سیمانی می‌تواند استعداد ایجاد گرما در بتن را کاهش دهد

ب) پیش‌سرمایش، که در آن خنک‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده به دمای کمتر بتن در زمان بتن‌ریزی در سازه یا قالب‌ها منجر می‌شود

پ) پس‌سرمایش، که در آن مستهلک کردن گرمای درون بتن با استفاده از لوله‌های خنک‌کننده مدفون با فاصله‌های منظم، افزایش دما و اختلاف‌های دما در سازه بتنی را محدود می‌کند

ت) مدیریت ساخت، که در آن سعی می‌شود تا با استفاده از دانش عایق‌بندی، جابجایی بتن، زمان‌بندی و روش‌های ساخت، دمای بتن پایش و سازه از اختلاف‌های دمایی بیش از حد محافظت شود.

ممکن است کنترل حرارتی تنها توسط یک یا دو مورد از اقدامات فوق صورت پذیرد؛ مانند استفاده از بتنی با گرمای هیدراته‌شدن کم یا محدودکردن عملیات بتن‌ریزی به ساعات خنک شب یا به شرایط آب‌وهوایی خنک که معمولا دمای بتن در هنگام بتن‌ریزی کمتر است. این اقدامات، آسان‌تر و ارزان‌تر انجام می‌شوند و بنابراین عمدتا به عنوان نخستین اقدامات کنترل دما برگزیده می‌شوند. از سوی دیگر، ممکن است برخی از پروژه‌ها به طیف وسیعی از اقدامات مجزا اما مکمل یکدیگر برای کنترل دمای بتن نیاز داشته باشند که می‌تواند شامل تمامی روش‌های فوق باشد. مهندس طراح یا پیمانکار، بر اساس افزایش دما و اختلاف دمای پیش‌بینی‌شده، اقدامات مناسب را انتخاب می‌کند.

٤-٣-٢- پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش بتن

پیش‌سرمایش بتن تازه می‌تواند با کاهش دمای سنگدانه‌ها، استفاده از آب سرد یا یخ به عنوان بخشی از آب اختلاط، و یا استفاده از نیتروژن مایع برای خنک‌کردن سنگدانه‌ها یا بتن تازه حاصل شود. پس‌سرمایش را می‌توان با استفاده از لوله‌های مدفون در بتن برای سرمایش موثر بتن‌ریزی انجام داد. بحث جامع در مورد مسائل گرمایی در ACI 207.2R ارائه شده است. راهنمای مربوط به سامانه‌های خنک‌کننده برای بتن حجیم را می‌توان در ACI 207.4R مطالعه کرد.

٤-٣-٣- کنترل افزایش دما

ابزارهای اصلی برای محدودکردن افزایش دما، کنترل نوع و مقدار مواد سیمانی است. کنترل افزایش دمای بتن معمولا برای به حداقل رساندن حداکثر دمای بتن و کاهش اختلاف دمای بتن، در دوره عمل‌آوری پس

از بتن‌ریزی است. بهترین روش‌ها برای تعیین افزایش دما، آزمون‌های آزمایشگاهی یا آزمایش نمونه‌های بزرگ‌مقیاس با استفاده از مصالح ساخت و شرایط بتن‌ریزی مشابه پروژه است. برای اهداف طراحی اولیه، افزایش دمای بتن پس از حدود ۷ تا ۱۰ روز در بتن‌ریزی با ارتفاع ۱/۸ متر یا بیشتر را می‌توان با استفاده از رابطه زیر که شکل اصلاح‌شده رابطه (۳-۱-۱) است، به طور تقریبی تخمین زد (Gajda و همکاران، ۲۰۱۸).

"Rise = 0.15 (Cement + 0.5 FAsh + 0.8 CAsh + 1.2 SFMK + Factor.Slag),°C" ۳-۳-۴

که در آن ضرایب، مشابه رابطه (۳-۱-۱) هستند.

از معادله (۴-۳-۳) نباید به منظور طراحی نهایی استفاده کرد. برنامه نهایی کنترل حرارتی باید ویژگی‌های مصالح آزمایش‌شده و اثرات ناشی از ترکیب مصالح مورد استفاده در پروژه و محدوده موردانتظار شرایط دامنه دمایی را در نظر گیرد. سایر روش‌های پیش‌بینی افزایش دمای بتن، در ACI 207.2R ارائه شده است.

٤-۳-٤- حداکثر (اوج) دما

کاهش حداکثر دمای بتن، باعث کاهش تغییرات حجمی و تنش‌های کششی و ترک‌خوردگی ناشی از آن می‌شود. حداکثر دمای بتن اغلب به ۷۰°C محدود می‌شود. این موضوع عمدتا به این دلیل است که اگر دماهای درونی بتن از این حد فراتر روند، برخی سیمان‌ها می‌توانند در معرض مساله‌ای مشکل‌ساز برای دوام قرار گیرند که با نام تشکیل اترینگایت تاخیری (DEF) شناخته می‌شود. با این حال، تمامی مخلوط‌های بتن در زمان قرارگرفتن در معرض دماهای بیشتر از این حد در هنگام عمل‌آوری، سطح خطر یکسانی برای تشکیل اترینگایت تاخیری ندارند. در موارد خاص، زمانی که مواد سیمانی از حداقل مقدار معینی از مواد سیمانی مکمل تشکیل شده باشند، دماهای بیش از این حد نیز قابل قبول هستند. به عنوان مثال، تحقیقات (Folliard، ۲۰۰۸؛ Ramlochan و همکاران، ۲۰۰۳؛ Ferraro، ۲۰۱۸) نشان داده است هنگامی که مواد سیمانی شامل مواد زیر باشند، دماهای تا حداکثر ۸۵ °C به تشکیل اترینگایت تاخیری منجر نمی‌شود:

الف) ۲۵ درصد جرمی خاکستر بادی نوع F مطابق با ASTM C618

ب) ۳۵ درصد جرمی خاکستر بادی نوع C مطابق با ASTM C618

پ) ۳۵ درصد جرمی سرباره مطابق با ASTM C989/C989M

با وجود اینکه تحقیقات، مزایای کاهش تشکیل اترینگایت تاخیری در بتن حاوی مواد سیمانی مکمل را نشان داده‌اند، ممکن است همه مواد سیمانی مکمل، سطح خطر را به یک اندازه کاهش ندهند. اطلاعات بیشتر مربوط به تشکیل اترینگایت تاخیری را می‌توان در ACI 201.2R، Day (۱۹۹۲)، Thomas و Ram-lochan (۲۰۰۲)، Ramlochan و همکاران (۲۰۰۴) و Ferraro (۲۰۱۸) مطالعه کرد.

٤-۳-٥- اختلاف دما

اختلاف دمای زیاد در درون بتن، به تنش حرارتی منجر می‌شود. ترک‌خوردگی معمولا زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های کششی از مقاومت کششی ایجادشده بیشتر باشند. بسته به الزامات شرایط رویارویی و الزامات

دوامی، ممکن است نگرانی‌هایی در نتیجه ترک‌خوردگی ایجاد شود. این ترک‌ها معمولا ابتدا در مرکز سطوح بزرگ بتن، جایی که قید بیشتر بصورت درونی است، رخ می‌دهد، مانند شرایطی که در اعضای با کنترل حرارتی همچون پی پل‌های واقع‌شده بر روی شمع‌های فولادی و زمین وجود دارد. قید بیرونی می‌تواند محل و شدت ترک‌خوردگی را تحت تاثیر قرار دهد. در ACI 207.2R به طور مفصل به قید بیرونی پرداخته شده است. قید بیرونی همچنین بر تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی حرارتی در سطح مشترک بین بتن‌ریزی‌های مجاور تاثیر می‌گذارد که در این بخش به آن پرداخته نشده است.

ACI 301 لازم می‌داند که حداکثر اختلاف دما بین مغز بتن و نواحی نزدیک به سطح بتن در دوره‌ی عمل‌آوری به حداکثر ۲۰ °C محدود شود. این محدودیت، روش ساده‌ای است که بر اساس تجربیات قبلی، در نبود اقدامات کنترل حرارتی مختص به پروژه، نتایج مطلوبی ارائه کرده است. با این حال، این محدودیت همه ملاحظات عملکردی را در بر نمی‌گیرد.

برای بتن‌هایی با ضریب انبساط حرارتی کم، گاه از حد اختلاف دمای زیادتری استفاده می‌شود. برای مثال، برای بتن حاوی سنگدانه درشت گرانیتی، بعضا از حد اختلاف دمای ۲۵ °C و برای بتن حاوی سنگدانه درشت آهکی خالص، بعضا از حد اختلاف دمای ۳۱ °C استفاده شده است (Bamforth، ۱۹۸۴).

محدودیت‌های دمایی ذکرشده، روش‌های ساده‌ای هستند که برای به حداقل رساندن یا جلوگیری از ترک‌خوردگی حرارتی بتن در نظر گرفته شده‌اند. این محدودیت‌ها به هیچ عنوان برای جلوگیری از ترک‌خوردگی حرارتی در همه موارد به اندازه کافی دقیق نیستند و در اکثر موارد دیگر ممکن است بیش از حد محافظه‌کارانه باشند. زمانی که درجه اطمینان بیشتری برای جلوگیری از ترک حرارتی موردنیاز باشد، از حد اختلاف دمایی که تابعی از کسب مقاومت کششی بتن است استفاده می‌شود. (Gajda، ۲۰۰۸؛ Gajda و VanGeem، ۲۰۰۲). این محدودیت بر این فرض استوار است که زمانی که تنش‌های کششی در سطح بتن از مقاومت کششی سطح فراتر رود یا کرنش کششی ایجادشده از ظرفیت کرنش کششی بتن بیشتر شود، بلافاصله ترک‌خوردگی رخ می‌دهد (Houghton، ۱۹۷۲؛ Houghton، ۱۹۷۶؛ Dusinberre، ۱۹۴۵). عبارت ساده‌شده‌ی زیر که برگرفته از مجموعه‌ای از معادلات است، می‌تواند برای تعیین حد اختلاف دمای مرتبط با ترک‌خوردگی ناشی از قید درونی بکار رود (Bamforth، ۱۹۸۴؛ Crook، ۲۰۰۶؛ Bamforth، ۲۰۰۷).

$$\text{حد اختلاف دما } (^{\circ}C) = \frac{f_t'}{E \times CTE \times R \times C} \qquad (۵-۳-۴)$$

که در این رابطه، f_t' مقاومت کششی برحسب MPa، CTE ضریب انبساط حرارتی برحسب mm/mm/°C، E ضریب ارتجاعی برحسب MPa، R درجه قید[69] و C ضریب خزش هستند.

معادله (۴-۳-۵) برای ایجاد رابطه‌ای تقریبی بین حد اختلاف دما و ویژگی‌های موجود در بتن درجا استفاده می‌شود. این رابطه برای استفاده به عنوان یک حد اختلاف دمای مشخص مانند محدودیت ۲۰ °C که با تغییر سن یا ویژگی‌های بتن اجراشده دست‌خوش تغییر نمی‌شود، در نظر گرفته نشده است.

---

[69] Degree of restraint

این معادله برای کاربرد با ویژگی‌های سطح بیرونی بتن که ترک‌خوردگی ابتدا در آنجا رخ می‌دهد، در نظر گرفته شده است. در معادله (۴-۳-۵)، معمولا قید بر اساس نوع بتن‌ریزی در نظر گرفته می‌شود (Bam-forth، ۲۰۰۷؛ Crook، ۲۰۰۶). برای جزئیات بیشتر در مورد قید به ACI 207.2R مراجعه شود. ملاحظات مربوط به خزش در سنین کم، بر محاسبات حد اختلاف دما تاثیرگذار است. از آنجا که آزمایش خزش نسبتا زمان‌بر است، اغلب یک ضریب خزش بر اساس مقادیر گزارش‌شده در ادبیات تخصصی در نظر گرفته می‌شود (Bamforth، ۲۰۰۷؛ Crook، ۲۰۰۶).

معادله (۴-۳-۵) یک رابطه تقریبی است زیرا در بهترین حالت، اطلاع دقیق از ویژگی‌های مواد و ضریب قید دشوار است. مولفان و استفاده‌کنندگان برنامه‌های کنترل حرارتی باید به مساله آگاه باشند که دقت حد اختلاف دمای محاسبه شده از معادله (۴-۳-۵)، تنها به اندازه دقت فرضیات انجام‌شده برای پارامترهای ورودی خواهد بود که این پارامترها با زمان تغییر می‌کنند.

به استفاده‌کنندگان هشدار داده می‌شود که معادله (۴-۳-۵) ضرایب اطمینانی که تغییرات ذاتی بتن را درنظر می‌گیرند را شامل نمی‌شود.

٤-٤- ویژگی‌های ارتجاعی

بتن یک ماده کاملا ارتجاعی نیست و رابطه ترسیمی تنش و کرنش آن برای بار در حال افزایش مداوم، خطی نمی‌باشد. با این حال برای اهداف عملی، ضریب ارتجاعی در محدوده تنش‌هایی تا حداکثر ۴۰ درصد تنش نهایی که بتن حجیم معمولا تحت آن قرار می‌گیرد، اغلب به صورت مقدار ثابت تخمین زده می‌شود.

ضرایب ارتجاعی فشاری بتن سدهای مختلف در جدول ۴-۱-۱-پ ارائه شده است. این مقادیر از $۱/۹\times۱۰^{۴}$ MPa تا $۳/۸\times۱۰^{۴}$ MPa در ۲۸ روز و از $۲/۶\times۱۰^{۴}$ MPa تا $۴/۷\times۱۰^{۴}$ MPa در یک سال متغیر هستند. برای یک نوع سنگدانه مشخص، بتن با مقاومت بیشتر تمایل به داشتن ضریب ارتجاعی بیشتری دارد. سختی سنگدانه مهم است و بخشی از این اهمیت به این دلیل است که سنگدانه‌های بزرگ، درصد بسیار زیادی از حجم بتن را تشکیل می‌دهند و سختی سنگدانه با توجه به کانی‌شناسی آن می‌تواند به میزان قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت باشد. مقادیر ضریب ارتجاعی کششی به طور معمول، اندکی کمتر از ضریب ارتجاعی فشاری است. تحقیقات نشان داده‌اند که ضریب ارتجاعی کششی تقریبا ۱۰ درصد کمتر از ضریب ارتجاعی فشاری است (Ferraro، ۲۰۰۹؛ Balendran، ۱۹۹۵). با این حال، به منظور ساده‌سازی، اغلب مقدار آن برابر با ضریب ارتجاعی فشاری تخمین زده می‌شود (Philleo، ۱۹۶۶).

داده‌های ضریب پواسون ارائه‌شده در جدول ۴-۱-۱-پ، بین مقادیر ۰/۱۶ و ۰/۲۰ متغیر است و با افزایش زمان عمل‌آوری، اندکی افزایش می‌یابد. مقادیر حدی می‌توانند از ۰/۱۱ تا ۰/۲۷ متغیر باشند. ضریب پواسون، مانند ضریب ارتجاعی، تحت تاثیر سنگدانه، خمیر سیمان و مقادیر نسبی این دو قرار دارد.

بر اساس نتایج چند مطالعه، به نظر می‌رسد که ضریب ارتجاعی بدون توجه به اینکه آزمایش با نرخ بارگذاری عادی یا دینامیکی انجام می‌شود، نسبتا بدون تغییر است (Hess، ۱۹۹۲). ضریب پواسون را نیز

می‌توان برای نرخ بارگذاری عادی یا دینامیکی، یکسان در نظر گرفت (Hess، ۱۹۹۲).

هنگامی که تنش در حین بارگذاری کوتاه‌مدت، از حدود ۵۰ درصد تنش نهایی فراتر رود، ریزترک‌های درونی ایجاد می‌شوند و ضریب پواسون و ضرایب ارتجاعی به دلیل افزایش کرنش، از حالت خطی فاصله می‌گیرند.

٤-٥- خزش

خزش بتن، تغییرشکل وابسته به زمان در اثر یک بار ماندگار است که موجب کاهش تنش بتن حجیم می‌شود. خزش به طور کلی با افزایش مقاومت بتن، افزایش ضریب ارتجاعی و با گذشت زمان کاهش می‌یابد (Smith و Hammons، ۱۹۹۳). با فرض یکسان‌بودن سایر پارامترهای مخلوط بتن، خطر ترک‌خوردگی با افزایش مقاومت آن افزایش می‌یابد، زیرا واداد‌گی تنش[70] در اثر خزش کاهش می‌یابد. احتمال برخورداری از مزایای خزش در بتن دارای مقاومت و ضریب ارتجاعی کمتر، بیشتر است. رفتار بتن حجیم با نرخ هیدراته‌شدن نسبتا کم که در آن مخلوط بتن، حاوی حجم زیادی از خاکستر بادی بود گزارش شده است؛ در این حالت، نرخ کسب ویژگی‌های مکانیکی کمتر بود که به نرخ زیادتر واداد‌گی تنش (خزش) منجر شد و بتن استعداد ترک‌خوردگی کمتری داشت (Zhao و همکاران، ۲۰۱۹). در بتن حاوی نوعی سنگدانه ثابت، میزان خزش ارتباط نزدیکی با مقدار خمیر سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی دارد (Polivka و همکاران، ۱۹۶۳). مباحث مربوط به پیش‌بینی خزش، جمع‌شدگی، و اثرات دما در سازه‌های بتنی، در ACI 209R ارائه شده است.

سهم خزش کششی در کاهش ترک‌خوردگی بتن حجیم در سنین کم، به طور کامل ثبت نشده است (Zhao و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، روش‌های دیگر که می‌توانند به طور غیرمستقیم سهم خزش را در نظر گیرند، ترجیح داده شده است. یکی از روش‌های نشان‌دادن تاثیر خزش، ضریب ارتجاعی ماندگار بتن است که در آن، تنش به کل تغییرشکل ایجادشده در زمان اعمال بار تقسیم می‌شود. مقادیر ضریب ارتجاعی آنی و ماندگار بدست‌آمده از آزمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر که با حذف سنگدانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۳۸ میلی‌متر ساخته شده‌اند، در جدول ۴-۱-۱-ت ارائه شده است. ضریب ارتجاعی آنی بلافاصله پس از بارگذاری بتن اندازه‌گیری می‌شود. ضریب ارتجاعی ماندگار که ضریب ارتجاعی موثر نیز نامیده می‌شود، بیان‌گر مقدار ضریب ارتجاعی پس از ۳۶۵ و ۱۰۰۰ روز بارگذاری است. جدول ۴-۱-۱- ت نشان می‌دهد هنگامی که بارگذاری در سنین کم انجام می‌شود، مقادیر ضریب ارتجاعی ماندگار درازمدت، تقریبا نصف ضریب ارتجاعی آنی است و زمانی که بارگذاری پس از ۹۰ روز یا بیشتر انجام گیرد، مقدار آن، چند درصد بیشتر از نصف ضریب ارتجاعی آنی است. به نظر می‌رسد خزش بلندمدت بتن تا حداکثر ۴۰ درصد مقاومت نهایی بتن، به صورت تقریبی با نسبت تنش اعمالی به مقاومت نسبت مستقیم دارد. در تنش‌های بیش از ۴۰ درصد مقاومت نهایی، ریزترک‌خوردگی ایجاد می‌شود که همانطور که در بخش ۴-۴ توضیح داده شد، بر ضریب ارتجاعی تاثیر می‌گذارد (Liners، ۱۹۸۷).

هنگام بررسی خزش کوتاه‌مدت، همانند زمان ارزیابی تنش‌های حرارتی ناشی از هیدراته‌شدن اولیه،

---

[70] Stress relaxation

مقادیر خزش می‌توانند بسیار زیاد و بسیار بیشتر از مقادیر خزش تحت بارگذاری بلندمدت باشند. مقادیر خزش اولیه همچنین می‌توانند در چند روز اولیه به طور چشم‌گیری تغییر کنند، و آزمایش زمانی می‌تواند مناسب باشد که این مقادیر در ارزیابی‌ها حائز اهمیت در نظر گرفته شوند (Altoubat و Lange، ۲۰۰۱؛ Bamforth، ۲۰۱۸).

٤-٦- تغییر حجم

تغییر حجم عمدتا در اثر تغییر در دمای بتن، میزان رطوبت، واکنش‌های شیمیایی و بارهای اعمالی رخ می‌دهد. ترک‌ها زمانی در بتن مقیدشده ایجاد می‌شوند که تنش‌های ایجادشده، از مقاومت کششی یا ظرفیت کرنشی بتن بیشتر شوند.

شکل ۴-۶- ترک‌خوردگی در بتن پایه سرچکشی پل

وقوع ترک‌خوردگی در سازه‌های مقیدشده محتمل‌تر است، اما می‌تواند در سازه‌های با قید کم، به دلیل اختلاف دمای زیاد ناشی از حرارت هیدراته‌شدن و افزایش دمای مربوط به آن که در درون عضو بتنی ایجاد می‌شود نیز رخ دهد. شکل ۴-۶، این نوع ترک‌خوردگی در اثر اختلاف دمای زیاد بین بخش‌های درونی و سطح بیرونی بتن حجیم را نشان می‌دهد. می‌توان انتظار داشت که عرض ترک‌ها با گذشت زمان به دلیل تجمیع اثرات جمع‌شدگی خودزا، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن یا هر دو افزایش یابد.

اگرچه وقوع ترک‌خوردگی در سازه‌های بتنی انتظار می‌رود، ولی می‌تواند بر دوام، زیبایی ظاهری و یکپارچگی سازه تاثیر منفی بگذارد. داده‌های تغییر حجم برای برخی از بتن‌های حجیم در جدول ۴-۱-۱-ث ارائه شده است. عوامل مختلف تاثیرگذار بر ترک‌خوردگی بتن حجیم در ACI 207.2R و USAC EETL 1110-2-542 مورد بحث قرار گرفته‌اند.

جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن در سطوحی که در معرض هوا هستند اتفاق می‌افتد. جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، ملاحظه‌ای بلندمدت است و در بازه کمتر از ۰/۰۲ درصد (یا ۲۰۰ میکروکرنش) برای بتن کم سیمان دارای اسلامپ کم حاوی سنگدانه‌های با دانه‌بندی مناسب و باکیفیت، تا بیش از ۰/۱ درصد (یا ۱۰۰۰ میکروکرنش) برای ملات یا بتن‌های پرسیمان دارای مقدار زیاد خمیر، سنگدانه‌های بی‌کیفیت و مقدار آب زیاد متغیر است (Neville، ۲۰۱۱). جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، در اثر از دست رفتن رطوبت خمیر سیمان رخ می‌دهد که می‌تواند به دلیل خشک‌شدن، تا ۱ درصد جمع‌شدگی داشته باشد. سنگدانه‌ها می‌توانند قید درونی ایجاد کنند که این جمع‌شدگی را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. میزان جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، عمدتا تحت تاثیر حجم خمیر و آب، نوع سنگدانه و عوامل بیرونی مانند دما و رطوبت نسبی غالب محیط است. افزودن مواد سیمانی مکمل، به غیر از مواردی که باعث کاهش آب موردنیاز می‌شوند، می‌تواند جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن را افزایش دهد. نقش برخی از سنگدانه‌ها در افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن شناخته شده است. عوامل دخیل در ویژگی‌های خشک‌شدن بتن، در ACI 224R و Houghton (۱۹۷۲) مورد بحث قرار گرفته‌اند.

جمع‌شدگی خودزا، عبارت است از کاهش حجم ایجادشده در فرآیند هیدراته‌شدن سیمان، صرف‌نظر از اینکه خشک‌شدن به صورت از دست دادن آب به محیط یا به دلیل بارگذاری خارجی باشد. بتن‌هایی با نسبت آب به مواد سیمانی بیش از ۰/۴۲، جمع‌شدگی خودزای ناچیزی دارند (Holt، ۲۰۰۱). در بتن‌هایی با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، جمع‌شدگی خودزای بیشتری اتفاق می‌افتد و زمانی که این نسبت برابر ۰/۳ باشد، میزان جمع‌شدگی می‌تواند به ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکروکرنش برسد.

ضریب انبساط حرارتی (CTE) بتن، منعکس‌کننده‌ی نوع و مقدار مواد تشکیل‌دهنده بتن از جمله مواد سیمانی، آب، سنگدانه درشت و سنگدانه ریز می‌باشد. در اکثر بتن‌های متعارف، سنگدانه‌های درشت معمولا بیشترین حجم را در بتن اشغال نموده و بنابراین بیشترین تاثیر را بر ضریب انبساط حرارتی بتن دارند. ضریب انبساط حرارتی سنگدانه، باتوجه به کانی‌شناسی آن (ACI 207.2R) تقریبا از ۳/۶ تا ۱۴/۴ میکروکرنش به ازای هر درجه سانتی‌گراد متغیر است. ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان، بسته به نوع و مقدار هر ماده سیمانی، نسبت آب به مواد سیمانی و درجه اشباع، تقریبا از ۱۰/۸ تا ۲۵/۲ میکروکرنش به ازای هر درجه سانتی‌گراد متغیر است (Neville، ۲۰۱۱؛ Helmuth، ۱۹۶۱). ضریب انبساط حرارتی بتن معمولی کاملا اشباع، معمولا در محدوده ۶/۳ تا ۱۲/۶ میکروکرنش به ازای هر درجه سانتی‌گراد متغیر است (Hall و Tayabji، ۲۰۱۱).

درجه اشباع بتن بر ضریب انبساط حرارتی آن نیز تاثیرگذار است. برای اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی بتن اشباع معمولا از روش AASHTO T 336 استفاده می‌شود. این روش به یک آزمونه استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر نیاز دارد که برای انجام آزمایش، به طول ۱۷۵ میلی‌متر برش داده می‌شود. برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر، الک‌کردن سنگدانه‌ها در بتن تازه باعث افزایش نامتناسب مقدار خمیر سیمان می‌شود و معمولا منجر به ضریب انبساط حرارتی زیادتری می‌گردد.

هنگام اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بزرگ، آزمایش چند مغزه برای بدست‌آوردن نمونه معرف مناسب می‌تواند رویکرد بهتری باشد.

٤-٧- نفوذپذیری

در بتن‌های حجیم متعارف، نفوذپذیری معمولا عامل قابل‌توجهی نیست. نفوذپذیری معمول توده بتن، کم و حدودا بین 10^{-12} m/s تا 10^{-13} m/s است. ضرایب نفوذپذیری بدست‌آمده از روش USBR 4913 برای برخی بتن‌های حجیم، در جدول ۴-۱-۱-ث ارائه شده است. در بتن با کنترل حرارتی، حفاظت از آرماتور در برابر خوردگی مهم است. هنگامی که تعیین نسبت اجزای مخلوط بتن و بتن‌ریزی به درستی انجام شود و بتن در معرض ترک‌خوردگی قرار نگیرد، مشکلات دوام ناشی از نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

افزودنی‌های هوازا و سایر افزودنی‌های شیمیایی، با کاهش مقدار آب مزایای قابل‌توجهی مانند کارایی مناسب در بتن ایجاد کرده و در نتیجه امکان کاهش نفوذپذیری را می‌دهند. استفاده از مواد سیمانی مکمل در بتن حجیم نیز نفوذپذیری بتن در سنین زیادتر را به طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد که این امر مطابق همبستگی ضعیف با نتایج آزمایش ASTM C1202، می‌باشد (Tibbets et al. ۲۰۲۰).

٤-٨- ویژگی‌های حرارتی

ویژگی‌های حرارتی مهم مصالح که بر بتن حجیم تاثیر می‌گذارند، عبارتند از: گرمای ویژه، چگالی، هدایت حرارتی، انتشار حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و افزایش دمای بی‌دررو. ترکیب کانی‌شناسی سنگدانه معمولا عامل اصلی موثر بر ویژگی‌های حرارتی بتن است (Rhodes، ۱۹۷۸)؛ زیرا سنگدانه‌های درشت معمولا بیشترین نسبت حجم بتن را تشکیل می‌دهند. ویژگی‌های سیمان، مواد سیمانی مکمل، نسبت سنگدانه درشت به ریز، و مقدار آب، از جمله دیگر عوامل موثر هستند که تاثیر ناچیزی بر ویژگی‌های حرارتی دارند. هوای عمدی نقش عایق‌کننده دارد و مقدار هدایت حرارتی را به میزان نه‌چندان قابل‌توجه کاهش می‌دهد. ACI 207.2R در مورد مقادیر ویژگی‌های حرارتی بتن حجیم مباحث بیشتری ارائه می‌دهد.

٤-٩- ویژگی‌های برشی

در سدها، امکان وقوع خرابی از نوع ترک‌خوردگی و لغزش در درون بتن حجیم یا در فصل‌مشترک بتن و پی، نیاز به بررسی دقیق دارد. پایداری در برابر لغزش، به مقاومت برشی بتن حجیم بدون در نظر گرفتن آرماتور بستگی دارد. ویژگی‌های برشی به ویژه در درزهای افقی حائز اهمیت هستند زیرا پایداری در برابر لغزش در امتداد این درزها، اغلب آسیب‌پذیرترین بخش سد و حالت محتمل خرابی است. تعیین ویژگی‌های مقاومت برشی بتن پروژه، برای انجام یک تحلیل دقیق اهمیت دارد. تخصیص واقع‌بینانه پارامترهای مقاومت برشی به بتن اصلی و در محل درزها، مستلزم انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی آزمونه‌های بدست‌آمده از

سازه موردنظر یا مخلوط بتن مورد استفاده است. تعمیم[۷۱] پارامترهای آزمایشگاهی به مقیاس کارگاهی نیاز به قضاوت مهندسی دارد.

ویژگی‌های برشی برخی از بتن‌های حاوی سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه ۳۸ میلی‌متر در جدول ۴-۱-۱-ج ارائه شده است. این جدول همچنین نتایج کارگاهی مقاومت فشاری، چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی بتن را که بصورت توابع خطی مرتبطی هستند و از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تعیین می‌شوند، در بر می‌گیرد. تحلیل خطی نتایج آزمایش سه‌محوری، مقاومت برشی را کمی بیشتر از نتایج آزمایش مقاومت برشی دومحوری ارائه می‌دهد (USBR، a ۱۹۹۲). مطابق ضوابط قدیمی، می‌توان ضریب اصطکاک داخلی را برابر ۱ و چسبندگی را معادل ۱۰ درصد مقاومت فشاری در نظر گرفت (USBR، ۱۹۷۶). بررسی‌ها نشان داده‌اند که فرض این سطح از چسبندگی می‌تواند غیرمحافظه‌کارانه باشد (McLean و Pierce، ۱۹۸۸)، و ممکن است به آزمایش‌های تکمیلی نیاز باشد.

نتایج مطالعه جدیدی با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی گذشته نشان داده است که سایر ویژگی‌های تعیین‌شده در آزمایشگاه (مقاومت کششی مستقیم، مقاومت کششی شکافتی و مقاومت فشاری تک‌محوری)، پیش‌بینی‌های ضعیفی از مقاومت برشی بتن ارائه می‌دهند (Lindenbach، ۲۰۱۷). این مطالعه، با تحلیل نتایج بیش از ۱۰۰۰ آزمایش مقاومت برشی، بازه‌های واقع‌بینانه‌ای از مقادیر پارامترها را برای طراحی اولیه ارائه می‌دهد. با این حال، نویسنده مطالعه مذکور گوشزد می‌کند که با توجه به طیف وسیع مقادیر ارائه شده و نیز عدم همبستگی مناسب با سایر ویژگی‌ها، مقاومت برشی بتن برای اهداف طراحی باید از طریق انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی آزمونه‌های بدست‌آمده از سازه مورد بررسی تعیین شود (Lindenbach، ۲۰۱۷). تحلیل روابط مقاومت برشی گزارش‌شده، عمدتا با استفاده از معادله پوش گسیختگی مور ($Y = C + X \tan\varphi$) است، که در آن C (مقاومت چسبندگی واحد یا چسبندگی) به صورت مقاومت برشی در تنش عمودی[۷۲] صفر تعریف می‌شود؛ $\tan\varphi$، یا شیب خط، نشان‌دهنده ضریب اصطکاک داخلی است؛ و X و Y به ترتیب تنش‌های عمودی و برشی هستند. توجه شود که استفاده از پوشش گسیختگی خطی مور - کولمب، خطی‌سازی بخش کوچکی از یک پوش گسیختگی منحنی‌شکل بزرگ‌تر است. شیب و مقاومت برشی (به ترتیب اصطکاک داخلی و چسبندگی) این خطی‌سازی، به تنش‌های عمودی اعمالی در طول آزمایش بستگی دارد؛ برون‌یابی پارامترهای مقاومت برشی برای تنش‌های عمودی خارج از مقادیری که برای تشکیل پوش خطی استفاده می‌شود، باید با احتیاط انجام گیرد. از آنجا که پوش مقاومت برشی بسیج‌شده دارای شکلی غیرخطی با تقعر رو به پایین است، در تنش‌های عمودی کم، شیب خط مقادیر بیشتری خواهد داشت (زاویه اصطکاک بزرگ‌تر و چسبندگی کمتر) که احتمالا ناشی از میزان خردشدگی ذرات در امتداد سطح‌مشترک در حال لغزش نیز می‌باشد.

در بسیاری از موارد، مقاومت برشی ارائه شده در جدول ۴-۱-۱-ج، برای آزمونه‌های قدیمی‌تر، بیشتر بود؛ اگرچه، روند مشخصی در این خصوص وجود ندارد (Harboe، ۱۹۶۱). نسبت مقاومت برشی سه‌محوری به مقاومت فشاری برای بتن‌های مختلف از ۰/۱۹ تا ۰/۳۹ متغیر است. هنگامی که از مقاومت برشی برای طراحی

[71] Upscaling
[72] Normal stress

استفاده می‌شود، فشارهای محصورکننده اعمالی در آزمایش باید منعکس‌کننده شرایط پیش‌بینی‌شده در سازه باشند. در صورت امکان، آزمایش‌های برش مستقیم بتن اصلی و بتن در محل درزها[۷۳]، باید مطابق با شرایط USBR 4915 (USBR، 1992 b) و یا به منظور تعیین مقادیر قابل اطمینان چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی برای طراحی، مطابق ASTM D5607 انجام شود. باید توجه نمود که نشان داده شده است مقاومت برشی بسیج‌شده، با افزایش جابه‌جایی برشی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (Yathon و همکاران، ۲۰۱۹). این پدیده احتمالا به دلیل تخریب سطح برش حین لغزش است و باید در هنگام تعیین روش مناسب آزمایش و پارامترهای مقاومت برشی برای شرایط مرزی پیش‌بینی‌شده در نظر گرفته شود. مقاومت برشی در محل درزهای اجرایی افقی چسبیده[۷۴] می‌تواند نزدیک به مقاومت برشی بتن اصلی باشد. درزهای غیرچسبیده[۷۵]، معمولا چسبندگی کمتری دارند، اما ضریب اصطکاک داخلی آن‌ها با بتن اصلی برابر است. در صورتی که هیچ آزمایشی انجام نشود، می‌توان ضریب اصطکاک داخلی را برابر ۱ و چسبندگی درزهای غیرچسبیده را صفر در نظر گرفت. برای درزهای چسبیده، ضریب اصطکاک داخلی را می‌توان ۱ در نظر گرفت، اما چسبندگی آن می‌تواند به چسبندگی بتن اصلی نزدیک باشد (McLean و Pierce، ۱۹۸۸). تعداد قابل‌توجهی داده از مجموعه گسترده‌ای از آزمایش‌ها، در مرجع Lindenbach (۲۰۱۷) ارائه شده است که می‌تواند به مهندس طراح در انتخاب محدوده مناسب پارامترهای مقاومت برشی کمک کند (Lindenbach، ۲۰۱۷).

٤-١٠- دوام

بتن بادوام، بتنی است که توانایی مقاومت در برابر هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و سایر شرایط بهره‌برداری را داشته باشد. آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توانند دوام نسبی بتن را نشان دهند، اما معمولا نمی‌توان دوام در شرایط بهره‌برداری را مستقیما با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی کرد. در حالی که دوام خود بتن موضوعی مهم است، حذف یا کاهش ترک‌خوردگی نیز می‌تواند به همان اندازه دوام کلی سازه حائز اهمیت باشد. الزامات دوام بتن سازه‌ای در ACI 318 ارائه شده است.

از هم پاشیدن[۷۶] بتن ترک‌نخورده توسط هوازدگی، عمدتا به دلیل تاثیر مخرب یخ‌زدن و آب‌شدن بتن در حالت اشباع بحرانی و نیز به دلیل انبساط یا جمع‌شدگی ناشی از تغییرات دمایی و مرطوب‌شدن و خشک‌شدن متناوب بتن مقیدشده ایجاد می‌شود. هوای عمدی، مقاومت بتن در برابر آسیب ناشی از یخ‌زدگی را کاهش می‌دهد و باید در تمام بتن‌هایی که در حالت اشباع بحرانی و در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن هستند، به‌کار رود.

انتخاب مصالح باکیفیت، استفاده از هوای عمدی، نسبت کم آب به مواد سیمانی، طرح مخلوط مناسب، روش‌های مناسب بتن‌ریزی برای ایجاد سازه آب‌بند[۷۷]، و نیز عمل‌آوری رطوبتی مناسب معمولا بتنی ایجاد می‌کند که مقاومتی عالی در برابر اثرات هوازدگی دارد (ACI 201.2R) .

---

[73] Joinet concrete
[74] Bonded horizontal construction joint
[75] Unbonded joint
[76] Disintegraton
[77] Watertight structure

همانطور که در ACI 201.2R توضیح داده شده است، حمله شیمیایی در اثر قرار گرفتن در معرض آب‌های اسیدی و آب‌های حاوی سولفات و همچنین آب‌شستگی توسط آب‌های فاقد مواد معدنی رخ می‌دهد. به طور معمول، بتن حاوی سیمان پرتلند در برابر حمله اسیدها مقاومت زیادی ندارد. در صورت وجود چنین شرایط محیطی، بهترین محافظت برای بتن استفاده از پوشش‌های سطحی است.

حمله سولفاتی می‌تواند سریع و شدید باشد. سولفات‌ها با هیدروکسید کلسیم و آلومینات سه کلسیم هیدراته در خمیر سیمان واکنش شیمیایی داده، و سولفات کلسیم و سولفوآلومینات‌های کلسیم را تشکیل می‌دهند. این واکنش‌ها با انبساط و فروپاشی قابل‌توجه بتن همراه هستند. بتن حاوی سیمان دارای مقادیر کم آلومینات سه کلسیم (سیمان پرتلند نوع II، IV و V مطابق ASTM) در برابر حمله سولفاتی مقاوم‌تر است (ASTM C150/C150M). مواد سیمانی مکمل نیز معمولا باعث افزایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی می‌شوند.

هیدروکسید کلسیم یکی از محصولاتی است که هنگام ترکیب‌شدن سیمان و آب در بتن ایجاد، و به راحتی در آب خالص یا کمی اسیدی که ممکن است در نهرهای کوهستانی مرتفع وجود داشته باشد، حل می‌شود. مواد سیمانی مکمل که با هیدروکسید کلسیم آزادشده توسط هیدراته‌شدن سیمان واکنش می‌دهند، می‌توانند از شسته‌شدن سیمان[78] جلوگیری کنند. پوشش داخلی تونل‌ها، دیوارهای حائل، پایه‌ها و سایر سازه‌ها اغلب توسط سفیدک‌زنی[79] ناشی از تراوش آب از مسیر ترک‌ها، درزها و حفره‌های به‌هم‌پیوسته ظاهر نامناسبی پیدا می‌کند. در بتن‌های متراکم و با نفوذپذیری کم، آب‌شستگی به ندرت در حدی است که قابلیت بهره‌برداری سازه را مختل کند.

دلایل اصلی فرسایش سطوح بتنی، خلازایی[80] و جابجایی مواد ساینده توسط جریان آب است. استفاده از بتن با مقاومت زیاد و مقاوم در برابر سایش، فرسایش را تا حدی کاهش می‌دهد، اما بهترین راه‌حل، در پیشگیری، از بین بردن یا کاهش علل فرسایش از طریق طراحی، ساخت و بهره‌برداری مناسب سازه بتنی است (ACI 207.6R). برای مطالعه اطلاعات تکمیلی در مورد مقاومت در برابر فرسایش و خلازایی در سازه‌های بتنی حجیم، به ACI 207.6R مراجعه شود.

واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه[81] (AAR)، واکنش شیمیایی بین قلیایی‌های (سدیم و پتاسیم) حاصل از سیمان پرتلند یا سایر منابع با ترکیبات تشکیل‌دهنده برخی از سنگدانه‌هاست که تحت شرایط خاصی همچون رطوبت زیاد، باعث انبساط مخرب بتن می‌شوند. این واکنش‌ها شامل واکنش قلیایی سیلیسی[82] (ASR) و واکنش قلیایی کربناتی[83] (ACR) است. برای اطلاعات بیشتر در مورد دوام به ACI 201.2R مراجعه شود.

---

78 Leaching
79 Efflorescence
80 Cavitation
81 Alkali-aggregate reactivity
82 Alkali-silica reaction
83 Alkali-carbonate reaction

فصل ۵

ساخت

۵-۱- پیمانه کردن

پیمانه کردن صحیح بتن حجیم، مستلزم همان دقت، یکنواختی و قابلیت اطمینانی است که برای پیمانه کردن بتن‌های دیگر مورد نیاز است. برای حصول اطمینان از تولید صحیح و دقیق بتن، دستگاه بتن‌ساز مرکزی باید طبق الزامات مشخص‌شده واسنجی[۸۴] شود. جهت مطابقت با استانداردهای صنعتی، مانند انجمن ملی بتن آماده[۸۵] (NRMCA)، ممکن است به اخذ تاییدیه برای بتن‌ساز مرکزی نیاز باشد. ACI 304R اطلاعاتی را در خصوص جابجایی، اندازه گیری و پیمانه کردن کلیه مصالح مصرفی در ساخت بتن ارائه می‌دهد. ACI 221R اطلاعاتی در خصوص انتخاب و مصرف سنگدانه‌ها در بتن ارائه می‌دهد. رواداری‌های مجاز پیمانه کردن، در ASTM C94/C94M ارائه شده است.

لزوم کنترل افزایش دما در بتن حجیم از طریق محدود کردن مقدار مواد سیمانی مخلوط، حفظ کارایی بتن تازه را با چالشی دائمی روبرو می کند. مخلوط‌های بهینه بتن حجیم، اغلب حاوی مقادیر کمی از مواد سیمانی، ماسه و آب هستند. بنابراین، کارایی این مخلوط‌ها برای بتن‌ریزی متعارف، حساسیت بیشتری به تغییرات معمول در پیمانه کردن دارد. یکنواختی در دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت و همچنین تمیزی سنگدانه‌ها، برای تولید بتنی یکنواخت بسیار سودمند است. علاوه بر این، اطلاع مداوم از رطوبت سنگدانه‌ها و اقدامات لازم برای حفظ رطوبت نسبتا ثابت در آن‌ها نیز بسیار مفید است. این اقدامات معمولا شامل آب‌پاشی مستمر انباشته‌های سنگدانه درشت (در شرایط غیر یخبندان) و قرار دادن میله‌های حسگر رطوبت[۸۶] در مخازن سنگدانه ریز و درشت می‌شود.

تولید مقادیر زیاد بتن حجیم، به ویژه در ساخت سدها، مشابه عملیات یک خط مونتاژ است که انجام کارهای تکراری در آن، استفاده از تجهیزات تخصصی و روش‌های بهینه ساخت را از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌سازد.

هنگامی که به جای آب مخلوط از یخ استفاده می‌شود، برای حداکثر بازدهی، این یخ‌ها باید ترد، سخت، خشک، خردشده در ابعاد کوچک و دمای آن‌ها کمتر از صفر درجه سانتی گراد باشد. همچنین برای حداکثر بازدهی، باید از تجهیزات خودکار استفاده شود. پیمانه کردن یخ باید به صورت وزنی و از یخ‌های ذخیره‌شده در مخزنی که به خوبی عایق‌بندی شده، انجام گیرد و سپس به صورت همزمان با سایر اجزای تشکیل‌دهنده فورا به داخل مخلوط کن ریخته شود.

افزودنی‌های مایع معمولا به صورت حجمی پیمانه می‌شوند، اگرچه تجهیزات پیمانه‌کردن وزنی نیز با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تجهیزات قابل اطمینان برای پیمانه کردن افزودنی‌ها، از تولیدکنندگان آن‌ها و تولیدکنندگان تجهیزات بتن قابل تهیه هستند. تهیه ابزارهایی برای کنترل چشمی فرآیند پیمانه کردن ضروری است. برای جلوگیری از پیمانه‌شدن ماده افزودنی در هنگام باز بودن دریچه تخلیه مخلوط کن باید تمهیداتی اندیشیده شود.

[84] Calibrated
[85] National Ready Mixed Concrete Association
[86] Moisture probe

به منظور جلوگیری از پیمانه‌کردن سهوی بیش از حد مواد افزودنی، باید از سامانه‌های قفل خودکار[۸۷] استفاده گردد. هر گونه اختلال در پیمانه کردن مواد افزودنی می‌تواند به تغییرات مشکل‌آفرین در اسلامپ، مقدار هوا و یا هر دو منجر شود. هنگامی که قرار است از چند افزودنی مایع استفاده شود، باید آن‌ها را به طور جداگانه یا مطابق با توصیه‌های تولیدکننده به مخلوط‌کن اضافه کرد. برای تداوم عملکرد مناسب تجهیزات باید آن‌ها را به خوبی نگهداری و تمیز نمود. از سامانه‌های جریانی وابسته به زمان[۸۸] نباید استفاده کرد. همچنین در صورت لزوم، درنظرگرفتن تمهیدات حفاظت زمستانی از مخازن ذخیره‌سازی و خطوط تحویل بتن اهمیت فراوانی دارد.

به منظور جلوگیری از وقوع جداشدگی و همچنین اطمینان از یکنواختی سنگدانه‌ها، لازم است تا ذخیره‌سازی سنگدانه‌های دارای اندازه‌های مختلف، در انباشته‌ها و مخازن جدا از هم صورت گیرد. به عنوان مثال، انباشته‌ای از سنگدانه‌های با شماره رده دانه‌بندی ۴۶۷ مطابق با ASTM C33/C33M تمایل به جداشدگی دارد؛ بنابراین بهتر است برای سنگدانه‌های با شماره رده دانه‌بندی ۴ و شماره رده دانه‌بندی ۶۷، انباشته‌ها و مخازن جداگانه‌ای در نظر گرفته شود.

۵-۲- مخلوط کردن

مخلوط‌کن‌های بتن حجیم متعارف باید قابلیت تخلیه سریع بتن دارای اسلامپ کم را با حفظ توزیع یکنواخت سنگدانه‌های بزرگ در سراسر مخلوط داشته باشند. این کار، توسط مخلوط‌کن‌های بزرگ خم‌شونده[۸۹] در ایستگاه بتن‌ساز مرکزی ثابت به بهترین وجه انجام می‌شود. رایج‌ترین ظرفیت دیگ مخلوط‌کن ۳ مترمکعب است، اما با مخلوط‌کن‌هایی با ظرفیت کم ۱/۵ مترمکعب و با ظرفیت زیاد ۹ مترمکعب نیز نتایج مطلوبی حاصل شده است. کامیون‌های مخلوط‌کن[۹۰] برای اختلاط و تخلیه بتن حاوی سنگدانه‌های درشت و دارای اسلامپ کم مناسب نیستند. برای اختلاط بتن حجیم حاوی سنگدانه‌هایی با اندازه ۷۵ میلی‌متر، معمولا می‌توان از مخلوط‌کن‌های توربینی چرخشی[۹۱] و مخلوط‌کن‌های نیرویی (اجباری)[۹۲] استفاده نمود. حداکثر اندازه متداول سنگدانه در بتن حجیم مصرفی در ساختمان‌ها و پل‌ها، ۱۹ تا ۲۵ میلی‌متر است و می‌توان آن را پیمانه و مخلوط نمود و به صورت بتن متعارف توسط کامیون‌های مخلوط‌کن تحویل داد. تجهیزات پیمانه‌کردن و تحویل بتن باید توسط NRMCA یا سایر مراجع ذیصلاح تایید شده باشد.

مشخصات بتن حجیم متعارف، محدوده زمانی اختلاط را از حداقل ۸۰ ثانیه برای اولین مترمکعب، به علاوه ۲۰ ثانیه به ازای هر مترمکعب اضافی (ACI 304R، ASTM C94/C94M) تا ۱/۵دقیقه برای ۱/۵ مترمکعب نخست، به علاوه ۴۰ ثانیه به ازای هر مترمکعب اضافی تعیین می‌کند (USBR، ۱۹۸۱). مخلوط‌کردن مصالح

---

[۸۷] Interlocks: سازوکارهای خودکار ایمنی که تضمین می‌کنند عملیات اختلاط به صورت صحیح انجام می‌شود و از اقدامات خاصی که می‌تواند خطرآفرین باشند، جلوگیری می‌کند.

88 Timed-flow systems
89 Tilting
90 Truck mixers
91 Turbine-type mixers
92 Compulsory mixers

توسط تغذیه‌کننده نواری[93] در هنگام پیمانه‌کردن، زمان اختلاط را می‌تواند کاهش دهد. ورود بخشی از آب اختلاط و سنگدانه‌های درشت‌تر قبل از سایر مصالح به داخل مخلوط‌کن می‌تواند از چسبندگی بتن و کلوخه‌شدن جلوگیری کند. زمان اختلاط را می‌توان بر اساس نتایج آزمایش یکنواختی مخلوط (ASTM C94/C94M) کاهش داد. بهترین روش کنترل زمان اختلاط، استفاده از یک دستگاه کنترل زمانی است که تا قبل از سپری‌شدن زمان اختلاط، از بازشدن سازوکار تخلیه مخلوط‌کن جلوگیری می‌کند.

در حین اختلاط، باید مخلوط را به صورت چشمی با دقت بررسی نمود تا از ایجاد کارایی یکنواخت موردنظر، اطمینان حاصل شود. بدین منظور، متصدی مخلوط‌کن و مهندس ناظر باید هوشیار و مراقب باشند. روش‌ها و تجهیزات بازرسی موثر اختلاط، توسط Tuthill (۱۹۵۰) مورد بررسی قرار گرفته است. متصدی مخلوط‌کن باید بتواند به راحتی، شخصا و یا از طریق دوربین‌های نصب‌شده در نزدیکی مخلوط‌کن، مخلوط بتن را ببیند و در مورد مناسب‌بودن اسلامپ بتن قضاوت کند تا بدین ترتیب بتوان اصلاحات لازم را قبل از تخلیه مخلوط‌کن انجام داد. برای کمک به مشاهدات چشمی معمولا از آمپرسنج مخلوط‌کن[94] استفاده می‌شود. پیمانه‌کردن و اختلاط پیوسته (مخلوط‌کن پیشران افقی[95]) برای سال‌ها با موفقیت برای بتن غلتکی و در برخی موارد به صورت رضایت‌بخش برای بتن حجیم متعارف نیز استفاده شده است. حداکثر اندازه سنگدانه در این روش معمولا به ۷۵ و گاه به ۱۰۰ میلی‌متر محدود می‌شود. پیمانه‌کردن و اختلاط پیوسته در ACI 207.5R و ACI 304R با جزییات بیشتری مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۳- بتن‌ریزی

بتن‌ریزی شامل آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی (عمدتا برای بتن حجیم متعارف)، حمل‌ونقل، جابجایی، ریختن و متراکم کردن بتن است (ACI 304R؛ USBR، ۲۰۰۱).

مناسب‌ترین روش آماده‌سازی سطوح درزهای افقی، با تسطیح کردن بتن‌ریزی آغاز می‌شود. سطح باید عاری از سنگ‌های بیرون‌زده، ردپاهای عمیق، سوراخ‌های ایجادشده لرزاننده و سایر بی‌نظمی‌های سطحی باشد. به طور کلی، سطح باید نسبتا هموار و دارای شیبی کم برای زهکشی باشد. این شیب، تمیز کردن سطح، پیش از بتن‌ریزی نوبت بعدی را تسهیل می‌کند. شیره و آلودگی‌های سطحی بتن[96] باید در کوتاه‌ترین فاصله زمانی ممکن پیش از بتن‌ریزی بعدی پاک شوند تا سطح ملات و سنگدانه بتن قبلی، تمیز باشد. لایه‌برداری بیش از حد بتن به منظور نمایان کردن سنگدانه‌ها، غیرضروری و باعث به هدررفتن مصالح سالم است. مقاومت چسبندگی نه از طریق نمایان کردن کامل سنگدانه‌های درشت، بلکه عمدتا از طریق تماس مستقیم ذرات سیمان با یکدیگر حاصل می‌شود. مقاومت برشی درز نیز توسط این چسبندگی و اصطکاک سطح‌مشترک تعیین می‌گردد (Lindenbach، ۲۰۱۷؛ McLean و Pierce، ۱۹۸۸).

---

[93] Ribbon feeding
[94] Amperage meters
[95] Pugmill
[96] Laitance

میزان سهم اصطکاک در مقاومت برشی، تحت تاثیر فشار محصورکننده و قفل‌وبست سنگدانه‌های درشت قرار دارد. بسته به چگونگی عمل‌آوری سطح درز، اغلب چند میلی‌متر لایه‌برداری از مصالح بتن قبلی، سطح مطلوبی را برای ایجاد چسبندگی مناسب ایجاد می‌کند.

بهترین روش برای ایجاد درزهای اجرایی مناسب برای بتن حجیم متعارف، لایه‌برداری به موقع بتن نارس (جوان)[97] با استفاده از جریان آب پرفشار (جت آب) است (Neeley و Poole، ۱۹۹۶). باید از خراشیدن[98] و مضرس یا زبر کردن سطح بتن تازه اجتناب شود، زیرا چسبندگی و قابلیت تمیز کردن سطح را کاهش می‌دهد.

شیره سطحی، سنگدانه‌های نیمه‌مدفون و سایر آلودگی‌ها معمولا پیش از بتن‌ریزی نوبت بعدی، توسط پاشش آب پرفشار[99] از سطح بتن سخت‌شده برداشته می‌شوند. برای جلوگیری از بروز تکانه (شوک) حرارتی، ممکن است لازم باشد تا باتوجه به دمای آب، دمای درونی و دمای سطح بتن، از کاربرد آب سرد در فرآیند پاشش آب پرفشار اجتناب شود. این موضوع در زمان وزش بادهای شدید یا هنگام تبخیر آب عمل‌آوری تشدید می‌شود.

در شکل ۵-۳-الف، درز افقی را قبل و بعد از تمیز کردن با پاشش آب پرفشار نشان می‌دهد. تمیزی درزها برای چسبندگی مناسب و آب‌بند بودن درز بتن ضروری است.

شکل ۵-۳-الف- قبل و بعد از تمیز کردن درز اجرایی افقی توسط پاشش آب پرفشار

---

[97] Green cutting
[98] Raking
[99] Hydroblasting

سطح تمیز بتن باید بلافاصله قبل از زمان بتن‌ریزی نوبت بعدی، عاری از رطوبت سطحی اضافی باشد (USACE، ۱۹۵۹، ۱۹۶۳؛ Tynes و McCleese، ۱۹۷۳؛ Neeley و Poole، ۱۹۹۶؛ Neeley و همکاران، ۱۹۹۸). بتن باید نزدیک به حالت اشباع با سطح خشک[100] (SSD) و عاری از آب جمع‌شده[101] یا آب ساکن باشد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند درزهایی که هنگام بتن‌ریزی نوبت بعدی، تمیز و عاری از آب اضافه هستند، مقاومت و آب‌بندی خوبی دارند. آزمایش‌ها همچنین نشان داده‌اند که روش ملات‌ریزی روی درز پیش از بتن‌ریزی، برای افزایش مقاومت یا کاهش نفوذپذیری درز ضروری نیست (Houghton و Hall، ۱۹۷۲)، اگرچه پوشش ملات در گذشته به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گرفت. در صورتی که بتن تازه لایه اول نوبت بعدی به طور کامل در ناحیه درز لرزانده شود و سنگ‌های تجمع‌یافته پیرامون محل تخلیه پیمانه‌های بتن به خوبی پخش شوند، می‌توان بدون استفاده از ملات‌ریزی نیز نتایج مشابهی بدست آورد.

انتخاب تجهیزات جابجایی و ریختن بتن حجیم به میزان زیادی تحت تاثیر حداکثر اندازه سنگدانه است. بتن‌های حجیم مانند بتن سدها، حاوی قلوه‌سنگ‌هایی است که به صورت سنگدانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۷۵ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۱۵۰ میلی‌متر تعریف می‌شوند. تمایل قلوه‌سنگ‌ها به جداشدن از مخلوط در نتیجه لختی (اینرسی)[102] بیشتر آن‌ها در هنگام جابجایی، ممکن است استفاده از جام‌های بزرگ با ظرفیت ۱/۵ تا ۹ مترمکعب را الزامی کند. برای انتقال جام‌ها به محل بتن‌ریزی می‌توان از واگن‌های ریلی، کامیون‌ها، جرثقیل‌های کابلی، جرثقیل‌های برجی یا ترکیبی از آن‌ها استفاده کرد. برای بتن حاوی سنگدانه درشت ۷۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر، جام‌هایی با ظرفیت ۳ تا ۶ مترمکعب ترجیح دارند، زیرا جام‌های کوچک‌تر به راحتی تخلیه نمی‌شوند و حجم هربار تحویل بتن آنقدر کم است که نمی‌تواند برنامه زمان‌بندی بتن‌ریزی را عملی سازد. از سوی دیگر، جام‌های با ظرفیت ۹ مترمکعب، حجم زیادی از بتن را در یک محل تخلیه می‌کنند که علاوه بر ایجاد خطر جداشدگی، بیشتر وقت کارگران به جای متراکم کردن، صرف پخش کردن آن می‌شود. برخی مراجع، استفاده از دریچه‌های تخلیه قابل کنترل در جام‌های با حجم بیش از ۴ مترمکعب را برای اجتناب از ایجاد توده‌های بتن با حجم زیاد لازم می‌دانند. برای اطمینان از لرزاندن عمیق کافی در مرکز این توده‌ها و نواحی مرزی تماس با بتنی که قبلا ریخته شده، باید دقت مضاعفی صورت پذیرد. بتن حجیم دارای طرح مخلوط مناسب و اسلامپ کم، به دلیل فرونشست مواد جامد در حین چنین جابه‌جایی‌های کوتاه معمولا دچار جداشدگی نمی‌شود. با این حال، باید مراقب بود تا در هر مسیر انتقال از وقوع جداشدگی جلوگیری شود.

بتن حجیم متعارف را می‌توان توسط واگن‌های ریلی و کامیون‌های بدون همزن[103] حمل کرد و با استفاده از نوار نقاله[104] ریخت. زمانی که بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه، ۱۰۰ میلی‌متر یا کمتر باشد، موفق‌ترین و مقرون‌به صرفه‌ترین روش بتن‌ریزی حجیم، استفاده از نوار نقاله بوده است. محل تخلیه از نوار نقاله باید به گونه‌ای مدیریت شود که روی بتن تازه ریخته، و بلافاصله برای جلوگیری از انباشته‌شدن، لرزانده شود. ریختن بتن

---

100 Saturated surface dry
101 Ponding
102 Inertia
103 Non-agitating truck
104 Conveyor

حجیم توسط نوار نقاله در شکل ۵-۳-ب نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی در مورد ریختن بتن با نوار نقاله در ACI 304.4R ارائه شده است.

(الف)

شکل ۵-۳-ب- (الف) ریختن بتن حجیم توسط نوار نقاله در یک بتن‌ریزی بتن حجیم متعارف؛ و (ب) در یک بتن‌ریزی بتن حجیم با کنترل حرارتی.

عدم دسترسی به سنگدانه‌های خیلی درشت و شرایط کار، ممکن است مانع استفاده از سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۳۸ میلی‌متر یا تجهیزات ویژه بتن‌ریزی شود. در چنین سازه‌هایی می‌توان بتن‌ریزی را با تجهیزات معمول‌تری مانند جرثقیل‌های دارای جام‌های کوچک‌تر، پمپ بتن یا نوار نقاله انجام داد. انتخاب تجهیزات بتن‌ریزی باید بر اساس قابلیت آن‌ها در ریختن موفقیت‌آمیز بتنی صورت پذیرد که طرح مخلوط آن مطابق با ملاحظات ارائه‌شده در بخش ۳-۷، که بر کاهش ایجاد گرما در بتن حجیم تاکید دارد، صورت گرفته است.

ظرفیت بتن‌ریزی و حجم بتن جام باید به اندازه کافی زیاد باشد تا از ایجاد درز سرد و قرار گرفتن سطوح بتن‌ریزی در معرض شرایط محیطی نامطلوب همچون گرما و سرمای شدید جلوگیری شود. این کار معمولا با استفاده از تعداد زیاد تجهیزات بتن‌ریزی انجام می‌گیرد. اطلاعات تکمیلی در مورد پمپ کردن بتن در ACI 304.2R ارائه شده است.

بهترین روش ریختن بتن حجیم متعارف، بتن‌ریزی در لایه‌های متوالی است. حداکثر ضخامت لایه به قابلیت لرزاننده‌ها در تراکم مناسب بتن و یکپارچه کردن لایه‌ها بستگی دارد. تراکم بتن حاوی سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه اسمی ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و دارای اسلامپ کمتر از ۴۰ میلی‌متر، که توسط جام‌هایی با ظرفیت ۳ تا ۶ مترمکعب و در لایه‌هایی با ضخامت ۴۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر ریخته شده است، توسط لرزاننده‌هایی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر به خوبی انجام می‌شود. در شرایطی که حداکثر اندازه اسمی سنگدانه بین ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر و اسلامپ بتن کمتر از ۵۰ میلی‌متر باشد و بتن‌ریزی توسط جام‌های کوچک‌تر و در لایه‌هایی با ضخامت ۳۰۰ تا ۳۸۰ میلی‌متر انجام شود، استفاده از لرزاننده‌های دارای قطر کوچک‌تر نیز نتایج مطلوبی ارائه می‌دهد. بتن‌ریزی در لایه‌های با ضخامت کمتر به جای لایه‌های با ضخامت زیاد، اطمینان بیشتری از تراکم مناسب لایه و نیز عاری بودن از شن‌زدگی[۱۰۵] در محل درزها، گوشه‌ها، و سطوح قالب‌بندی‌شده و نیز در درون بلوک بتن می‌دهد.

ضخامت هریک از لایه‌ها، باید معادل کسری یکسان از ارتفاع نوبت بتن‌ریزی باشد. برای بتن دارای اسلامپ کم، لایه‌های یک نوبت بتن‌ریزی به وسیله تخلیه‌های متوالی به صورت پلکانی به جلو آورده می‌شوند، به طوری که مطابق شکل ۵-۳-ب، بین لبه‌های جلویی لایه‌های متوالی تقریبا ۱/۵ متر عقب‌نشینی وجود خواهد داشت. بتن‌ریزی به صورت پلکانی با این هدف انجام می‌شود که در شرایط آب‌وهوایی گرم، سطوح کمتری در معرض گرما قرار گیرد و در شرایط آب‌وهوایی مرطوب، سطح کمتری تحت تاثیر بارش باران قرار داشته باشد. عقب‌نشینی بیش از ۱/۵ متر، در شرایط آب‌وهوایی گرم، بتن سرد را بی‌دلیل در معرض جذب گرمای محیط قرار می‌دهد و در شرایط بارانی نیز باعث افزایش خطر آسیب ناشی از نفوذ آب می‌شود. از سوی دیگر، عقب‌نشینی کمتر باعث می‌شود هنگام لرزاندن بتن یک لایه به منظور یکپارچه کردن با بتن لایه بعدی، دچار شکم‌دادگی شود. این روش پلکانی بتن‌ریزی، از یک انتهای بلوک تا انتهای دیگر ادامه داده می‌شود تا زمانی که قالب پر، و آن نوبت بتن‌ریزی تکمیل گردد.

نکته کلیدی در ریختن موفقیت‌آمیز بتن حجیم، به ویژه زمانی که اسلامپ بتن کم و دارای سنگدانه‌های بزرگ باشد، لرزاندن آن است (Tuthill، ۱۹۵۳). تجهیزات ناکارآمد، به دلیل نرخ کمتر بتن‌ریزی و احتمال تراکم ضعیف، برای پیمانکار هزینه بیشتری دارند. عملیات لرزاندن باید به صورت سازمان‌یافته انجام شود و هر لایه را به طور کامل پوشش دهد و در عمق آن نفوذ کند. برای اطمینان از لرزانده‌شدن کامل در محل تلاقی دو محموله بتن تخلیه‌شده باید توجه ویژه‌ای صورت گیرد، زیرا لبه بیرونی پیمانه اول تا زمانی که پیمانه بعدی روی آن ریخته نشود، لرزانده نمی‌شود.

---

[105] Rock pocket

سپس می‌توان پیرامون این دو تخلیه را با هم و به صورت یکپارچه لرزاند، بدون اینکه لبه هریک از آن‌ها به سمت پایین جریان یابد. لرزاندن مناسب بتن حجیم حاوی سنگدانه‌های بزرگ در شکل ۵-۳-پ نشان داده شده است. برای اطمینان از تراکم مناسب، لرزاننده‌ها باید هر بار به میزان ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر در لایه زیرین نفوذ کنند و در هنگام لرزاندن در حالت عمودی نگه داشته شوند. برای جلوگیری از ایجاد نقص در امتداد لبه نوبت‌ها و لایه‌های بتن‌ریزی در محل تماس با قالب، این نواحی باید هنگامی که هر لایه، از قالب ابتدایی، در راستای هریک از قالب‌های جانبی به سمت قالب انتهای دیگر پیش‌روی می‌کند، به طور منظم و عمیق دوباره لرزانده شوند. در صورت مشاهده مجموعه سنگدانه‌های درشت جدا از هم در یک نقطه، باید آن‌ها را پیش از آن که با بتن پوشانده شوند، کاملا روی بتن جدید پخش کرد. بعید است که لرزاندن باعث پر شدن فضای بین مجموعه سنگدانه‌های پخش نشده و یکپارچه شدن آن با ملات شود. هنگام تراکم، لرزاننده‌ها باید تا زمان بیرون‌آمدن حباب‌های بزرگ هوا از بتن، در محل خود باقی بمانند و به لرزاندن ادامه دهند. میانگین زمان برای تراکم کامل، می‌تواند ۸۰ ثانیه برای یک متر مکعب بتن باشد. لرزاندن بیش از حد بتن دارای اسلامپ کم اثر چندانی روی آن ندارد، ولی لرزاندن بیش از حد بتن دارای اسلامپ زیاد می‌تواند باعث جداشدگی شود.

به منظور تسهیل عملیات تمیزکردن، باید سطح فوقانی بالاترین لایه را تقریبا تراز، و تا جای ممکن با لرزاندن، هموار کرد. سوراخ‌های به وجود آمده ناشی از خارج کردن لرزاننده در بتن باید بسته شوند. سنگدانه‌های بزرگ باید تقریبا به طور کامل مدفون شوند. در صورتی که این کار به صورت دستی انجام می‌شود، باید تخته‌هایی به تعداد کافی روی سطح گذاشته شود تا از ایجاد رد پاهای عمیق جلوگیری گردد. هنگام ریختن بتن حجیم باید تجهیزات کافی و موثر برای لرزاندن در دسترس باشند و مورد استفاده قرار گیرند. توصیه‌های ویژه برای لرزاندن بتن حجیم در ACI 309R ارائه شده است.

شکل ۵-۳-پ- تراکم بتن حجیم دارای اسلامپ کم ریخته‌شده با جام

بتن‌ریزی‌های حجیم زیر آب، بدون لرزاندن انجام می‌شود. در این موارد، معمولا طرح مخلوط بتن با مقدار مواد سیمانی نسبتا زیاد و کاهش اندازه سنگدانه انجام می‌شود تا قابلیت مخلوط برای جریان یافتن جانبی بدون جداشدگی، پس از ریخته‌شدن در محل تخلیه توسط لوله ترمی یا خط لوله افزایش یابد. استفاده از افزودنی‌های ضد آب‌شستگی[۱۰۶] و افزودنی‌های کاهنده آب در مخلوط برای افزایش قابلیت روانی آن، کاهش آب‌شستگی خمیر و بهبود تراکم مخلوط رایج‌تر است. کاربردهای معمول بتن‌ریزی حجیم در زیر آب عبارتند از بتن ترمی دیوار آب‌بند پایه پل، تعمیر حوضچه‌های آرامش و سایر سازه‌های درون آب، و بتن‌ریزی سازه‌های شناور.

۵-٤- عمل‌آوری

عمل‌آوری بتن حجیم می‌تواند بدون استفاده از آب انجام شود. اگرچه زمانی‌که استفاده از آب برای عمل‌آوری بتن حجیم، باعث خنک‌شدن سریع سطح بیرونی و ایجاد اختلاف دمای بیش از حد بین سطح و بخش درونی بتن نشود، می‌توان عمل‌آوری را با آب انجام داد. در برخی موارد، می‌توان از آب گرم برای عمل‌آوری بتن استفاده نمود حتی اگر مناسب‌ترین یا اقتصادی‌ترین روش جایگزین نباشد. روش‌های عمل‌آوری از طریق حفظ رطوبت که متداول‌ترند، معمولا ایده‌آل هستند و استفاده از آن‌ها توصیه می‌شود.

در مخلوط‌هایی با مقدار سیمان بسیارکم که افزایش دمای کمی دارند، عمل‌آوری با آب در هوای گرم مزیت خنک‌کنندگی بیشتری دارد. عمل‌آوری با آب همچنین می‌تواند برای سطوحی از بتن حجیم که در معرض جریان سریع آب یا شرایط فرسایش و سایش احتمالی قرار دارند، مفید واقع شود.

به غیر از مواقعی که نرخ تبخیر زیاد است (در هوای گرم یا سرد، یا وزش شدید باد)، برای جلوگیری از خشک‌شدن بتن، پیش از بکارگیری روش‌های عمل‌آوری توسط حفظ رطوبت، فقط کافیست کمی رطوبت اضافه شود. با این حال، زمانی که بتن در معرض دماهای یخبندان قرار می‌گیرد، نباید اشباع باشد. در شرایط دمایی بیش از دمای یخبندان، چنانچه احتمال از دست رفتن رطوبت از سطوح بتن وجود دارد، باید از بتن حجیم در برابر افت رطوبت محافظت شود.

در روش‌های عمل‌آوری بتن حجیم و بتن با کنترل حرارتی باید از ترک‌خوردگی بتن جلوگیری شود. مدت زمان عمل‌آوری بتن حجیم در درجه اول توسط مواردی که در برنامه کنترل حرارتی مشخص شده‌اند، تعیین می‌شود. روش‌های کنترل دما و قالب‌برداری باید در روش‌های عمل‌آوری در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که حداکثر اختلاف دمای مغز و سطح بتن از حد مجاز فراتر نمی‌رود.

در شرایطی مانند دماهای کمتر از نقطه یخبندان، که استفاده از آب می‌تواند به خنک‌شدن سریع سطح یا اختلاف دمای زیاد منجر شود و عمل‌آوری با آب عملی نباشد، استفاده از آمیزه‌های عمل‌آوری با غشای مایع[۱۰۷] می‌تواند روش جایگزین مناسبی است.

---

[106] Anti-washout admixture

[107] Liquid-membrane curing compound

در صورتی که بر روی درزهای اجرایی از آمیزه عمل‌آوری استفاده شود، به منظور جلوگیری از کاهش یا از بین رفتن چسبندگی، باید قبل از بتن‌ریزی بعدی به طور کامل توسط ماسه‌پاشی یا پاشش آب پرفشار زدوده شوند.

۵-۵- قالب‌ها

قالب‌های بتن حجیم، همان الزامات اساسی برای مقاومت، جلوگیری از نشت ملات، دقت موقعیت، و به طور کلی شرایط سطح که در ACI 347R توضیح داده شده است را دارند. قالب‌های بتن حجیم متعارف ممکن است به دلیل ارتفاع نسبتا کم موردنیاز در هر نوبت بتن‌ریزی که به طور متداول بین ۱/۵ تا ۳ متر است، تا حدودی با سایر قالب‌ها متفاوت باشند. با وجود تاثیر نسبی اسلامپ کم در کاهش فشار وارد به قالب‌ها، ممکن است این فشار به دلیل استفاده از بتن با دمای کم و تاثیر تخلیه جام‌های بزرگ بتن در نزدیکی قالب‌ها یا فشار اضافی ناشی از استقرار ماشین‌آلات پخش و تراکم بتن، مقداری افزایش یابد. فشار وارد به قالب به روش‌های مورد استفاده و احتیاط در ریختن بتن در مجاورت قالب بستگی دارد. اطلاعات بیشتر در مورد فشار وارد به قالب را می‌توان در ACI 347R مطالعه کرد.

کش‌های قالب[108] متصل به مهاری‌های استاندارد کاشته شده در نوبت‌های قبلی بتن‌ریزی و مهاربندها، از دیرباز در بتن حجیم متعارف استفاده شده‌اند. امروزه در بسیاری از پروژه‌های بزرگ از قالب‌هایی استفاده می‌شود که توسط پشت‌بندهای طره‌ای[109] مهارشده به نوبت قبلی بتن‌ریزی، نگه داشته می‌شوند. به ویژه در مواردی که مقاومت بتن در سنین اولیه کم است، می‌توان با استفاده از کش‌های قالب، برای قالب‌های طره‌ای تکیه‌گاه بیشتری فراهم نمود. قالب‌های طره‌ای توسط سامانه‌های جک‌زنی هیدرولیکی، هوای فشرده یا برقی بالا برده می‌شوند. باید مراقب بود که هنگام قالب‌برداری از بتنی که دارای مقاومت اولیه کم است، از کنده‌شدن بتن در اطراف میل‌مهارها جلوگیری به‌عمل آید، زیرا این میل‌مهارها برای ایجاد مهار افقی در قالب‌بندی نوبت بعدی بتن‌ریزی استفاده خواهند شد. قالب‌های بتن حجیم با ارتفاع زیاد هر نوبت بتن‌ریزی، مشابه قالب کارهای بتنی در سازه‌های معمول است، با این تفاوت که طول کش‌های مهاری در مقطع نوبت بتن‌ریزی می‌تواند به جای ۰/۳ تا یک متر، بین ۶ تا ۱۲ متر باشد. برای سهولت در بتن‌ریزی با جام، باید از کش‌های دارای قطر و مقاومت کششی زیاد که در فواصل زیاد از یکدیگر قرار گرفته‌اند استفاده نمود تا امکان عبور جام‌ها از میان کش‌ها فراهم شود.

برای پوشاندن انحرافاتی که گاه در درزهای افقی بتن‌ریزی‌های حجیم رخ می‌دهد، می‌توان از تسمه‌های با گوشه اریب[110] و زوار سه‌گوش[111] با بعد ۲۵ میلی‌متر یا بیشتر استفاده کرد. این کار، معمولا شکل ظاهری سطوح قالب‌بندی شده را بهبود می‌بخشد. هنگامی که از این روش در بالا و پایین قالب‌ها استفاده شود، می‌تواند شیاری با ظاهر دلپذیر ایجاد کند.

---

[108] Form ties
[109] Cantilevered strongbacks
[110] Beveled grade strips
[111] Triangular toe fillet

همچنین به منظور بهبود نمای ظاهری و جلوگیری از لب‌پریدگی لبه‌ها، باید در گوشه‌های قالب، در انتهای بالادست و پایین‌دست درزهای اجرایی نیز از پخ سه‌گوش با بعد ۲۵ میلی‌متر یا بیشتر استفاده شود؛ در غیر این صورت، گوشه‌های تیز بلوک بتن اغلب دچار آسیب‌هایی می‌شوند که به راحتی قابل ترمیم نیستند. این پخی‌ها همچنین از لهیدگی[۱۱۲] و خردشدن ناشی از دماهای زیاد سطح در لبه‌های درز جلوگیری می‌کنند.

زمانی که از قالب‌های شیب‌دار استفاده می‌شود، اغلب تا جایی فراتر از درز اجرایی ادامه می‌یابند که بردن جام‌های بتن‌ریزی به نزدیکی قالب و ریختن و متراکم کردن بتن را دشوار می‌کند. می‌توان این قالب‌ها را به گونه‌ای مفصل کرد که تا زمانی که بتن تا محل مفصل ریخته می‌شود، بتوان نیمه بالایی قالب را در موقعیت عمودی نگه داشت. سپس نیمه بالایی پایین آورده می‌شود و بتن‌ریزی ادامه می‌یابد. فشار خارجی وارد بر قالب‌های شیب‌دار کمتر است، اما باید در مهار آن‌ها نیروی برخاستی (برکنش)[۱۱۳] را در نظر گرفت.

قالب‌بندی سرریز سدهای وزنی در قسمت‌های شیب‌دار و انحنادار تاج و سرریز جامی[۱۱۴] معمولا با مشکل روبروست. سطوح انحنادار یا شیب‌دار را می‌توان با استفاده از قالب‌های موقت به جای استفاده از کرم‌بندی[۱۱۵] و شمشه‌کشی[۱۱۶]، به بهترین نحو شکل داد و کاملا متراکم و پرداخت کرد. سطح بتن حجیم متعارف با طرح مخلوط مناسب را می‌توان به همان سادگی مخلوط حاوی سنگدانه‌های کوچک پرداخت کرد. اگرچه، گاهی اوقات به دلیل مسائل مربوط به دوام، استفاده از مخلوط بتن متفاوتی در سطح سرریز مورد نیاز است. همانطور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده، شکل مورد نظر با پرداخت سطوح توسط نیروی کار ماهر ایجاد شده است. برای پرداخت این اشکال هندسی پیچیده، به‌کارگیری نیروی کار خبره و دارای صلاحیت توصیه می‌شود. پرداخت سطوح منحنی‌شکل تاج و سرریز توسط کرم‌بندی انحنادار و شمشه‌های غلتکی نیز با موفقیت انجام شده است. پرداخت سطوح بتنی در سازه‌های انتقال آب مانند سرریزها و آب‌روها[۱۱۷] برای کاهش خطر تخریب ناشی از خلازایی از اهمیت فوق‌العاده برخوردار است.

شکل ۵-۵- پرداخت سرریز منحنی‌شکل سد **Minidoka**

[112] **Pinching**
[113] **Uplift**
[114] **Flip bucket**
[115] **Screed guides**
[116] **Strike-off**
[117] **Rollways**

۵-۶- ارتفاع بتن‌ریزی و فاصله زمانی بین بتن‌ریزی‌های همجوار

کنترل افزایش دما، تابعی از عوامل مختلفی از جمله ارتفاع و فاصله زمانی بین نوبت‌های بتن‌ریزی است. عوامل موثر شامل اندازه و نوع سازه حجیم، ویژگی‌های بتن و مقدار مواد سیمانی، شرایط اقلیمی حاکم در حین ساخت و بهره‌برداری، برنامه زمانی ساخت و سایر مشخصه‌های کنترل دمایی هستند. ارتفاع بتن در هر نوبت بتن‌ریزی از ۰/۷۵ متر برای چند نوبت بتن‌ریزی روی هم نزدیک پی‌ها، تا ۱/۵ الی ۲/۳ متر در بسیاری از سدهای وزنی، و تا ۳ متر یا بیشتر در سدهای قوسی نازک، پایه‌ها، سرشمع‌ها و تکیه‌گاه‌های کناری پل‌ها متغیر است.

از منظر ساخت، ارتفاع بیشتر هر نوبت بتن‌ریزی منجر به ایجاد درزهای اجرایی کمتر می‌شود. با توجه به تجربیات گذشته در خصوص دمای بتن سخت‌شده در هوای سرد، هرچه ارتفاع هر نوبت بتن‌ریزی کمتر باشد، درصد گرمای هیدراته‌شدن بیشتری قبل از نوبت بتن‌ریزی بعدی مستهلک می‌شود. در مورد مخلوط‌های کم‌سیمان و با انجام پیش‌سرمایش در هوای گرم، ممکن است عکس این موضوع صادق باشد. هنگامی که ارتفاع هر نوبت بتن‌ریزی از ۳ متر بیشتر باشد، تلف شدن حرارت از سطح بالایی بتن، درصد کمتری از کل گرمای تولیدشده در ارتفاع بتن‌ریزی خواهد بود. بنابراین، در بتن‌ریزی‌های با ارتفاع خیلی زیاد، فاصله زمانی بین نوبت‌های بتن‌ریزی، تاثیر قابل‌توجهی بر دمای درون بتن ندارد. در چنین موارد بسیار نادر، به ویژه به عنوان روشی برای به حداقل رساندن تمیز کردن درزها، کاهش خطر ترک‌خوردگی، یا امکان استفاده از قالب‌های لغزنده[۱۱۸] که به عنوان مثال برای پایه‌های حجیم به‌کار می‌روند، ممکن است حداقل فاصله زمانی بین نوبت‌های بتن‌ریزی با ارتفاع زیاد مطلوب باشد. در بلوک‌های بتنی بزرگ مانند سدها، از دست‌دادن گرما از سطح بتن‌ریزی در هوای سرد، قرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض شرایط محیطی را توجیه نمی‌کند، مشروط بر اینکه روشی برای سرمایش درونی بتن فراهم شود. قرار گرفتن طولانی‌مدت سطوح بتن‌ریزی در معرض تغییرات دمای محیط ممکن است باعث وقوع ترک‌خوردگی شود. در مواردی که اقداماتی برای کاهش تنش انجام می‌گیرد، بهترین برنامه زمانی ساخت شامل بتن‌ریزی‌های منظم روی هر بلوک، در کوتاه‌ترین فاصله زمانی و با کمترین اختلاف ارتفاع عملی ممکن بین بلوک‌های مجاور است، مجددا، مشروط بر اینکه روشی برای سرمایش داخلی بتن (پس‌سرمایش) فراهم شده باشد. در بتن با کنترل حرارتی که دمای درونی بتن در مدت کوتاهی پس از بتن‌ریزی می‌تواند زیاد شود، باید از ایجاد اختلاف دمای زیاد بین بتن موجود با بتنی که روی آن ریخته می‌شود، جلوگیری شود، همچنان که نباید گرمای هیدراته‌شدن بتن جدید به سرعت به بتن قبلی منتقل شود.

تلاش‌هایی در کانادا، طی دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، توسط برخی سازمان‌ها برای کاهش تراوش و به حداقل رساندن ترک‌خوردگی در سدهای ساخته‌شده در هوای سرد و حتی دمای زیر صفر درجه با به‌کارگیری نوبت‌های بتن‌ریزی با ارتفاع بیشتر صورت گرفته است. امروزه استفاده از این روش به دلیل نگرانی‌های مرتبط با ترک‌خوردگی دیگر رایج نیست.

---

[118] Slipforms

این روش در حالت حداکثری خود، امکان بتن‌ریزی مداوم نوبت‌هایی تا بیشینه ارتفاع ۱۵ متر را با استفاده از قالب‌های چوبی یا عایق‌بندی‌شده دارای محفظه‌ها[۱۱۹] و گرمای بخار فراهم می‌کند. تحت چنین شرایط بتن‌ریزی، افزایش دمای بی‌درروی (ATR) بتن و حداکثر میزان افت دمای سطح بتن به دماهای کم و پایدار، تقریبا برابرند. اکثر ضوابط طراحی، به منظور کنترل ترک‌خوردگی ناشی از تکانه حرارتی، حداکثر افت دمای سطح بتن را به ۱۴ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد محدود می‌کنند. به غیر از مواردی که تحلیل شرایط بتن‌ریزی نشان می‌دهد که افت دمای بیش از این مقادیر نیز قابل قبول است، باید از این محدودیت پیروی نمود. رعایت این محدودیت، به بتنی با افزایش دمای بی‌درروی کم و دمای کم در هنگام بتن‌ریزی نیاز دارد. تحت این شرایط، می‌توان الزامات طراحی را با کنترل میزان افزایش دمای بی‌دررو در محدوده‌های فوق‌الذکر، توسط طرح مخلوط بتن، برآورده کرد (Klein و همکاران، ۱۹۶۳). در شرایط اقلیمی گرم و بتن حجیم کم‌سیمان پیش‌سرمایش‌شده دارای دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد، گرمای محیط مزیت نوبت‌های بتن‌ریزی با ارتفاع کم را از بین می‌برد و به همین دلیل است که در سال‌های اخیر، اجازه نوبت‌های بتن‌ریزی با ارتفاع ۲/۳ یا حتی ۳ متر توسط مشخصات فنی در چندین پروژه سدسازی داده شده است.

۵-۷- سرمایش و کنترل دما

در حال حاضر، پیش‌سرمایش بتن حجیم قبل از بتن‌ریزی روشی متداول است. دمای بتن در محل بتن‌ریزی معمولا از طریق انجام یک مطالعه حرارتی تعیین می‌شود. امروزه برای تولید بتن با دماهای کمتر از ۷ درجه سانتی‌گراد در هر شرایط آب‌وهوایی، تجهیزات کارآمدی در دسترس است. استفاده از یخ خردشده در ابعاد کوچک یا یخ پولکی برای جایگزینی بخشی از آب اختلاط و نگهداری سنگدانه‌های نم‌دار (نه خیس) در زیر سایه‌بان، در هوای نسبتا گرم، می‌تواند دمای بتن‌ریزی را تا حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. به منظور پخش شدن موثر افزودنی‌ها هنگام اختلاط اولیه، یخ نباید جایگزین ۱۰۰ درصد آب اختلاط شود. تحت شرایط اجرایی، حداکثر میزان معمول جایگزینی یخ را می‌توان به حدود ۷۵ درصد آب اختلاط، پس از انجام اصلاحات رطوبتی سنگدانه، افزایش داد. بنابراین در این صورت، بهتر است رطوبت سنگدانه‌ها به ویژه ماسه‌ها زیادتر از حالت اشباع با سطح خشک نباشد تا بتوان از یخ بیشتری استفاده کرد.

---

[119] Housings

شکل ۵-۷-الف- پوشش فلزی در بالای انباشته سنگدانه ریز زهکشی‌شده برای کاهش جذب گرما

شکل ۵-۷-ب- سرمایش سنگدانه درشت از طریق پاشش آب سرد

شکل ۵-۷-پ- سرمایش بتن پیمانه‌شده از طریق تزریق نیتروژن مایع

روی مخازن ذخیره‌سازی و انباشته‌های سنگدانه باید مطابق شکل ۵-۷-الف سایه‌بان‌هایی تعبیه شود. سنگدانه‌ها را می‌توان از طریق تبخیر توسط ایجاد خلا، غرقاب‌کردن در آب سرد، گردش هوای سرد (ACI 207.4R؛ ACI 305R) یا نیتروژن مایع خنک نمود. نیتروژن مایع مستقیما به مخلوط‌کن مرکزی یا کامیون مخلوط‌کن تزریق می‌شود (Gajda و Sumodjo، ۲۰۱۲). شکل ۵-۷-ب، سرمایش سنگدانه‌های درشت توسط پاشیدن آب سرد بلافاصله قبل از انبارشدن در مخازن بتن‌ساز مرکزی را نشان می‌دهد. شکل ۵-۷-پ، سرمایش بتن پیمانه‌شده توسط نیتروژن مایع در دیگ کامیون مخلوط‌کن را نشان می‌دهد. در مورد سرمایش بتن از طریق نیتروژن مایع باید احتیاط کرد زیرا در صورت اجرای نادرست، می‌تواند به واردشدن آسیب به دیگ کامیون‌های مخلوط‌کن منجر شود.

سرمایش بتن به کمترین دمای عملی ممکن، حداکثر دمای بتن را کاهش می‌دهد، اما موجب کاهش میزان افزایش دمای بتن، که تابعی از نوع و مقادیر مواد سیمانی استفاده شده در بتن است، نمی‌شود. برای کاهش اتلاف گرما از سطوح بیرونی بتن، استفاده از عایق‌بندی سطح توصیه می‌شود. این کار، به ویژه در شرایط محیطی سردتر برای بتن حجیم متعارف، و تقریبا تمام شرایط دمایی برای بتن با کنترل حرارتی، از ایجاد اختلاف دمای زیاد در بتن جلوگیری می‌کند. هنگام بتن‌ریزی در هوای گرم، می‌توان جذب گرما توسط بتن سرد را از طریق بتن‌ریزی در شب به گونه‌ای که کم‌ترین نواحی در معرض تابش آفتاب قرار گیرند، مدیریت کرد و در صورتی که بتن‌ریزی زیر نور خورشید انجام می‌گیرد، با مه‌پاشی محیط کار از خشک‌شدن و جذب گرمای همرفتی جلوگیری نمود.

زمانی که نمی‌توان حداکثر دما را توسط سایر اقدامات سرمایشی محدود نمود، می‌توان برای کنترل افزایش دمای بتن ریخته‌شده از لوله‌های خنک‌کننده مدفون در بتن استفاده کرد. هنگامی که در سدها به تزریق دوغاب در درز انقباض نیاز باشد، می‌توان برای اطمینان از حداقل بازشدگی موردنیاز درزهای انقباض، استفاده از لوله‌های خنک‌کننده مدفون را الزام کرد. اطلاعات تکمیلی در خصوص پیش‌سرمایش سنگدانه و بتن، عایق‌بندی، حفاظت و ملاحظات پس‌سرمایش در ACI 207.4R ارائه شده است.

۵-۸- نصب ابزار دقیق (ابزاربندی)[120]

هدف از جمع‌آوری، انتقال، پردازش و بررسی داده‌های ابزار دقیق، ارائه ارزیابی دقیق و به موقع داده‌ها برای اقدامات اصلاحی احتمالی مربوط به ایمنی یک سازه است. به منظور تایید کلیه داده‌های مهم، باید ابزار دقیق به تعداد کافی نصب شوند. برای تسهیل در ارائه تحلیل، اغلب استفاده از بیش از یک نوع ابزار دقیق توصیه می‌شود. همچنین در مواردی که نیاز به تایید یا تنظیم یک مفهوم طراحی[121] غیرمعمول مربوط به سازه یا شرایط بهره‌برداری باشد، یا در مواردی که ممکن است نتایج ابزاربندی به اصلاحات بیشتر طراحی‌های آینده منجر شوند، ابزاربندی لازم می‌گردد.

---

[120] Instrumentation

[121] Design concept

در هر پروژه بتنی حجیم که احتمال مطرح‌شدن سوالی در ارتباط با ایمنی سازه در آینده وجود داشته باشد، ابزاربندی باید بخشی از طراحی و ساخت آن باشد. همچنین، برای ارزیابی دقیق نتایج ابزاربندی باید آماده‌سازی‌های ضروری از طریق مطالعات بلندمدت نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین روابط، تغییرات ویژگی‌های بتن پروژه با گذشت زمان انجام شود (به فصل ۴ مراجعه گردد).

عوامل یا مقادیری که اغلب در سدهای بتنی حجیم و سایر سازه‌های حجیم پایش می‌شوند عبارتند از جابه‌جایی‌های سازه‌ای، تغییر دما در نقاط مختلف، تغییرشکل‌ها، نشست، تراوش و فشارهای برخاستی (برکنش) در پی و سازه. در یک برنامه پایش جامع می‌توان از طیف گسترده‌ای از ابزارهای دقیق استفاده کرد. ابزارهای دقیق نصب‌شده در سدهای ایالات متحده، عمدتا بصورت سیم مقاومتی غیرمقید[122] یا سنجش‌گرهای از نوع کارلسون[123] و سیم ارتعاشی[124] می‌باشد. چندین دستورالعمل در مورد ابزاربندی سدهای بتنی در دسترس هستند (USACE EM 1110-2-4300، ۱۹۸۵؛ USSD، ۲۰۰۲؛ USBR، ۱۹۸۷).

۵-۸-۱- ابزارهای اندازه‌گیری دما

برای پایش صحیح دمای محیط و درون یک بتن‌ریزی حجیم، اغلب به جمع‌آوری داده‌های ابزاربندی در دوره‌های زمانی طولانی نیاز است. تجهیزات پایش باید ساده، مستحکم و بادوام باشند و در شرایط عملکردی مطلوبی نگهداری شوند. پیش از بتن‌ریزی، ابزارهای ثبات داده‌های حرارتی[125] معمولا به منظور اندازه‌گیری حداکثر دمای بتن، در مرکز بتن‌ریزی نصب می‌شوند. این ابزارها همچنین در فاصله حدود ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر از سطوح بیرونی، محکم به آرماتور زیر سطح بتن بسته می‌شوند تا به منظور تعیین اختلاف دمای نقاط معرف رفتار بتن حجیم، دمای بتن را در نزدیکی سطح اندازه‌گیری کنند. حس‌گرهای دما باید از نظر الکتریکی و حرارتی از آرماتورها و سایر اجزای درونی بتن عایق‌بندی شوند. دماهای بتن به صورت روزانه (یا فواصل زمانی کوتاه‌تر) پایش و برداشت می‌شوند. پایش داده‌های حرارتی، امکان اصلاح اقدامات کنترل حرارتی در دوره محافظت بتن را فراهم می‌کند.

۵-۹- تزریق دوغاب در درزهای انقباض در سدها

سدهای قوسی بزرگ از گذشته به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا و با استفاده از ابزارهای پس‌سرمایش به منظور کاهش دمای بتن تا دمای کمتر از میانگین دمای هوا ساخته می‌شوند. این کار باعث بازشدن درزهای قائم بین بلوک‌ها می‌شود که پس از تزریق دوغاب، انتقال نیروهای وارده به تکیه‌گاه‌ها را تضمین می‌نماید. تزریق دوغاب همچنین تنش‌های بهره‌برداری را به طور یکنواخت در سراسر سازه توزیع می‌کند. به منظور بازشدن درزهای قائم حداقل به میزان ۱ میلی‌متر برای اطمینان از پرشدن کامل

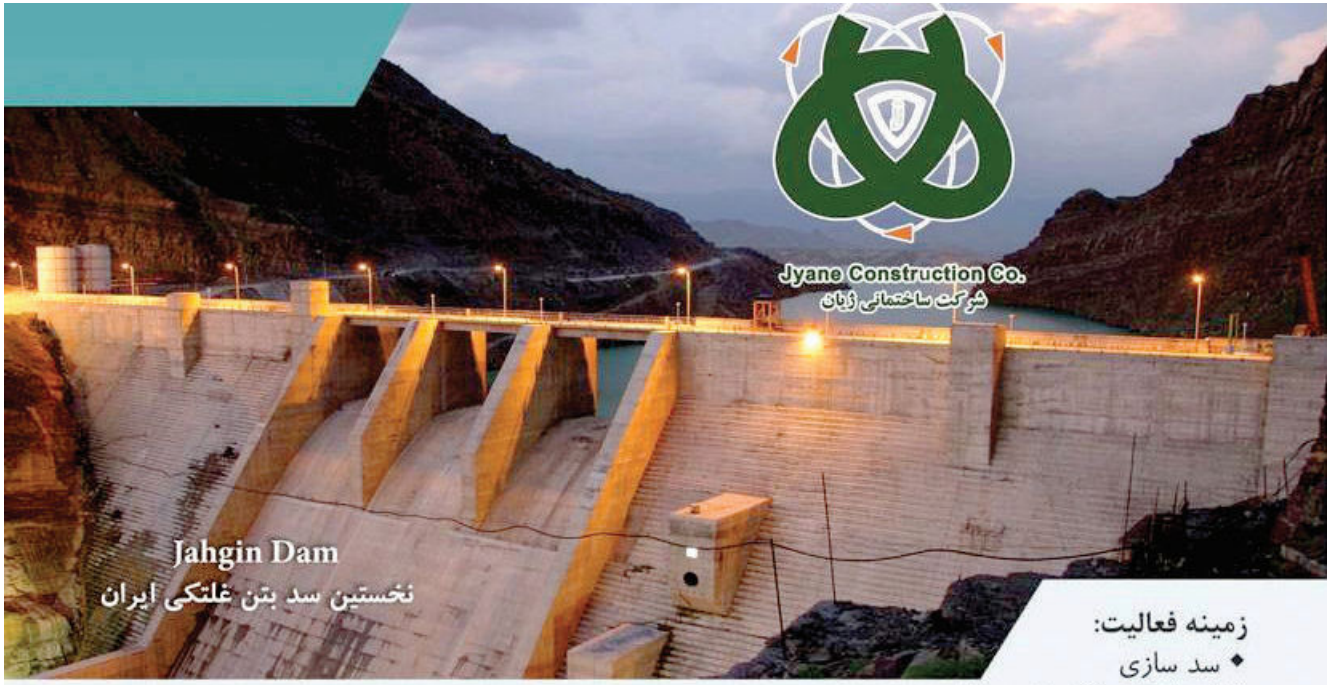
---

[122] Unbonded resistance wire
[123] Carlson-type meter
[124] Vibrating wire
[125] Thermal data loggers

با دوغاب سیمان، بتن باید پیش از تزریق دوغاب، با پس‌سرمایش خنک‌سازی شود. Warner (۲۰۰۴)، به تشریح سامانه‌های عملیات تزریق دوغاب در درزهای انقباض پرداخته است. Silveira و همکاران (۱۹۸۲)، به تشریح یک سامانه تزریق دوغاب می‌پردازد که در آن برای بکارگیری مجدد سامانه لوله‌کشی، از ابزار مسدودکننده (پکر)[۱۲۶] استفاده می‌شود. نصب ابزارهای دقیق مدفون در محل درز، تنها راه تعیین دقیق میزان بازشدگی درز است (Carlson، ۱۹۷۹؛ Silveira و همکاران، ۱۹۸۲).

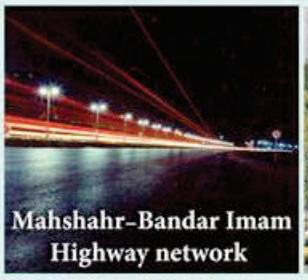
درزهای انقباض قائم در برخی از سدهای وزنی، تزریق نشده‌اند. در این سدها، به عنوان اقدامی برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها تصمیم گرفته شد که استفاده از یک نوارآب‌بند[۱۲۷] در بالادست که توسط زهکش قائم پشتیبانی می‌شود، از نشتی چشم‌گیر جلوگیری کند و بنابراین به دلیل عدم وجود انتقال عرضی تنش، تزریق دوغاب غیرضروری خواهد بود. با این حال در سال‌های اخیر، پیدایش ترک‌های عمودی به موازات درزهای انقباض، باعث تجدیدنظر در این روش شده است.

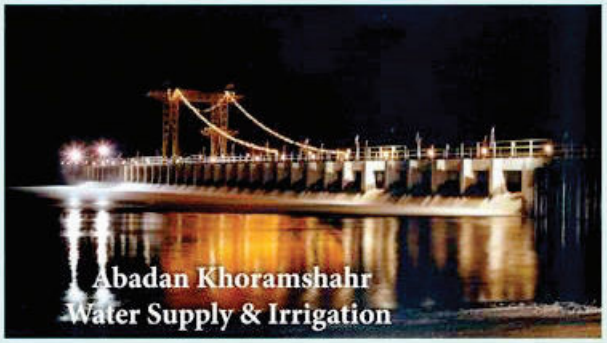
[126] Packers
[127] Waterstop

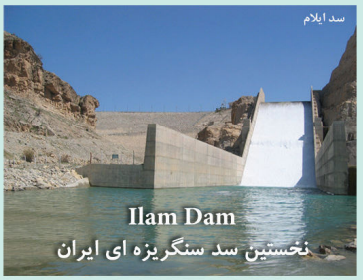


زمینه فعالیت:

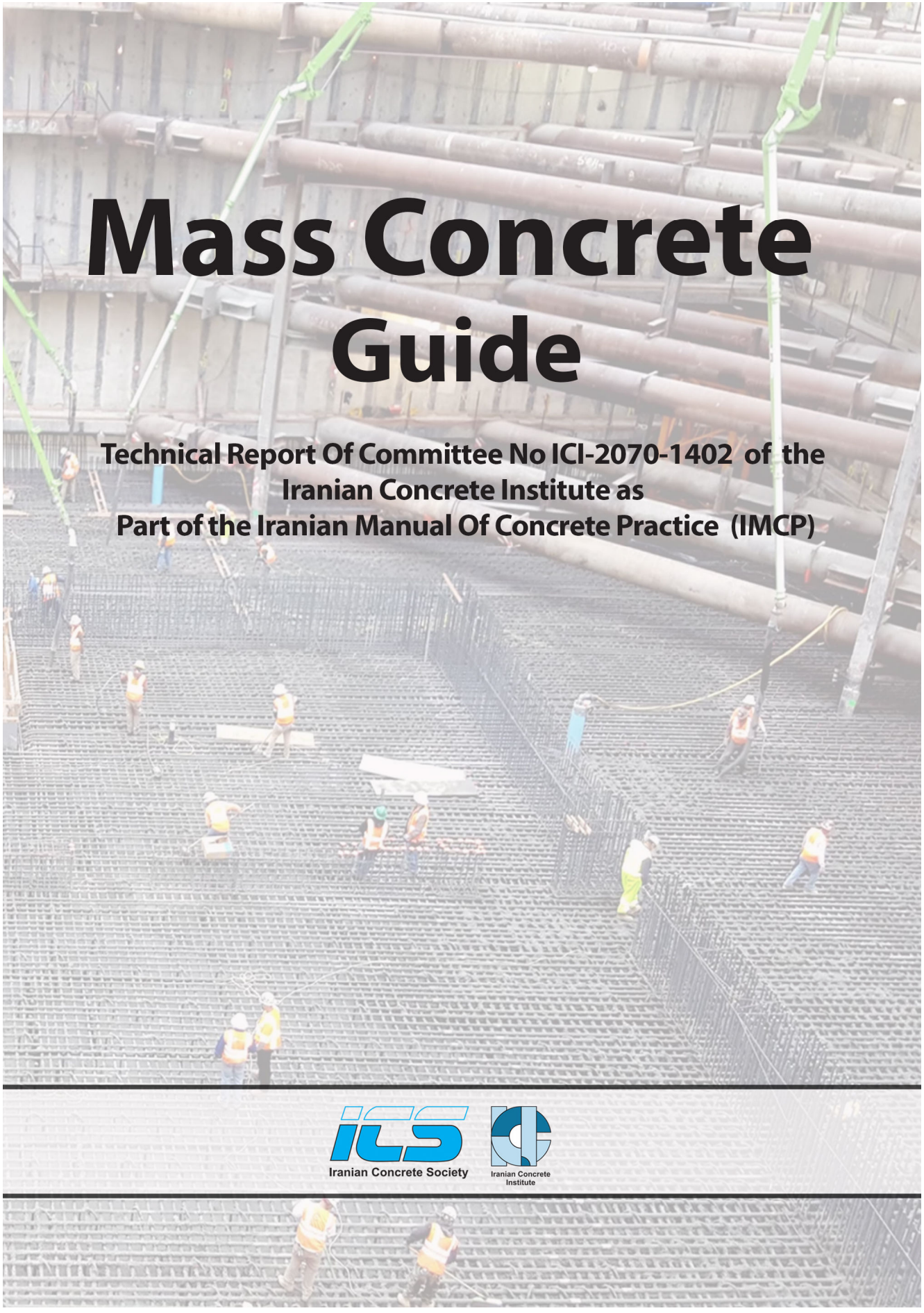
- سد سازی
- احداث ایستگاه های پمپاژ و تصفیه خانه
- اجرای خطوط لوله آب و فاضلاب
- احداث شبکه های آبیاری و زهکشی
- حفر تونل و کارهای زیر زمینی
- احداث اسکله و بندر
- راه سازی و پل سازی
- تاسیسات زیربنایی شهری
- احداث فرودگاه
- احداث سازه های فراساحلی
- احداث خطوط راه آهن و مترو
- اجرای عملیات ژئوتکنیک و شمع کوبی
- نیروگاه های آبی و بادی







آدرس: تهران، ولیعصر، باغ فردوس، کوچه عارف‌نسب، پلاک۶
تلفن: ۲۲۷۱۶۰۰۷-۱۰ فاکس: ۲۶۲۱۹۷۶۹
ایمیل: info@jyane.ir سایت:www.jyane.ir



Mass Concrete Guide

Technical Report Of Committee No ICI-2070-1402 of the Iranian Concrete Institute as Part of the Iranian Manual Of Concrete Practice (IMCP)

Iranian Concrete Society

Iranian Concrete Institute