جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی

ضابطه شماره ۷۲۳

معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی

امور نظام فنی و اجرایی کشور

nezamfanni.ir

وزارت نیرو

دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا

http://seso.moe.gov.ir

۱۳۹۵

باسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور
رییس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:**	**۹۵/۱۰۵۳۲۲۸**
	تاریخ:	**۱۳۹۵/۱۲/۰۴**

موضوع: راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست ضابطه شماره ۷۲۳ امور نظام فنی و اجرایی، با عنوان «راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۳۹۶/۰۴/۰۱ الزامی است.

امور نظام فنی و اجرایی این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.

محمد باقر نوبخت

ش‌ش: ۱۴۹۰۳۳۵

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایراد و اشکال نیست.

از این رو، از ***شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:***

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email:nezamfanni@mporg.ir **web: nezamfanni.ir**

باسمه تعالی

پیشگفتار

تهیه و تدوین ضوابط، معیارها و استانداردهای تخصصی با توجه به تجارب و توانمندی‌های حرفه‌ای بومی، شرایط خاص و امکانات طبیعی هر کشور و نیز با لحاظ نمودن سیاست‌گذاری‌های کلان نظام فنی اجرایی کشور برای میزان پذیرش ریسک خطر از اهمیت بسزایی برخوردار است. به کارگیری مناسب و مستمر این ضوابط و استانداردها، علاوه بر تحقق رویکرد طراحی و سطح ایمنی همسان در پروژه‌ها، آثار اقتصادی قابل توجهی نیز در پی خواهد داشت. نظر به ضرورت اجتناب‌ناپذیر این مهم، و با توجه به وسعت دامنه دانش‌های تخصصی در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی حرفه‌ای و ذیربط واگذار شده است.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه ضابطه «راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی» را با هماهنگی امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی و اجرایی کشور به این سازمان ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه، آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی و اجرایی کشور (مصوب شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷ هـ- مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این نشریه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن نشریه، با هم‌فکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع‌رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

بدین وسیله معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی و اجرایی کشور جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و اجرایی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس تقی عبادی و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این ضابطه، تشکر و قدردانی می‌نماید.

غلامرضا شافعی
معاون فنی و توسعه امور زیربنایی
زمستان ۱۳۹۵

تهیه و کنترل «راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی» [ضابطه شماره ۷۲۳]

مجری: شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس

مشاور پروژه: ناهید البهشتی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی سازه
اعضای گروه تهیه‌کننده:		
محمدتقی احمدی	شرکت مهندسی مشاور مهاب‌قدس - دانشگاه تربیت مدرس	دکترای مهندسی عمران - سازه
غلامرضا خوشرنگ	شرکت مهندسی مشاور سد و تونل پارس	لیسانس مهندسی عمران
محمدعلی کریمی	شرکت مهندسی مشاور آبان‌پژوه	فوق‌لیسانس مهندسی عمران - سازه
مهدی شکوری راد	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی عمران - زلزله
امیرکاوه امینی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی
محمدرضا جبروتی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	لیسانس مهندسی عمران
فرزاد منوچهری دانا	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی عمران – زلزله
مجتبی فرخ	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای مهندسی عمران – سازه
ناهید البهشتی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی سازه
آرمین منیرعباسی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس- دانشگاه پیام نور	دکترای مهندسی عمران – مدیریت ساخت
اعضای گروه نظارت:		
دالی بندار	کارشناس آزاد	دکترای مهندسی عمران
سیدمحمد علوی‌مقدم	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	فوق‌لیسانس سازه‌های هیدرولیکی
فرهاد قادری	دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل	دکترای مهندسی عمران
اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):		
مسعود حدیدی مود	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق لیسانس مهندسی مکانیک
رضا راستی اردکانی	دانشگاه شهید بهشتی	دکترای مهندسی عمران
سیدمهدی زندیان	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق‌لیسانس مدیریت پروژه و ساخت
محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسین مشاور توان‌آب	فوق‌لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
تقی عبادی	وزارت نیرو- دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی

محمدرضا عسکری	شرکت مهندسین مشاور بندآب	دکترای مهندسی عمران
نجمه فولادی	طـرح تهیـه ضـوابط و معیارهـای فنـی صنعت آب کشور – وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی عمران - آب
علی یوسفی	شرکت مهندسین مشاورزمین آب‌پی	فوق لیسانس مهندسی معدن و زمین‌شناسی مهندسی

اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی و اجرایی
سیّد وحیدالدین رضوانی	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول - کلیات	**۳**
۱-۱- دلایل رویکرد به سدهای وزنی بتن غلتکی	۵
۱-۲- مبانی طبقه‌بندی و طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی	۷
۱-۳- روند تغییرات طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی	۱۲
فصل دوم- مشخصات مصالح	**۱۷**
۲-۱- کلیات	۱۹
۲-۲- مصالح سیمانی	۱۹
۲-۲-۱- سیمان	۲۰
۲-۲-۲- مواد افزودنی معدنی (پوزولان‌ها)	۲۰
۲-۲-۳- سیمان پوزولانی (ASTM C150, Type IP) در ایران	۲۴
۲-۲-۴- مواد ریزدانه بی‌اثر (پودر سنگ)	۲۵
۲-۳- سنگ‌دانه	۲۶
۲-۳-۱- طبقه‌بندی و خواص سنگ‌دانه‌ها	۲۷
۲-۳-۲- ارزیابی کیفیت مصالح سنگی	۳۲
۲-۴- آب اختلاط بتن	۳۳
۲-۵- مواد افزودنی شیمیایی	۳۳
۲-۶- نوارهای آب‌بند	۳۴
فصل سوم- طرح اختلاط بتن غلتکی	**۳۷**
۳-۱- کلیات	۳۹
۳-۲- تاثیر رویکرد طراحی در مبانی طرح اختلاط بتن	۴۲
۳-۳- روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای خاکی	۴۷
۳-۴- روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای بتنی	۴۸
۳-۴-۱- مراحل گام به گام تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی در روش پیشنهادی USACE	۴۹
۳-۴-۲- روش تعیین طرح اختلاط در سدهای غلتکی کوبیده (RCD) و مراحل گام به گام آن	۵۳
۳-۴-۳- مراحل گام به گام تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی سدهای RCD	۵۴

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل چهارم- خواص مکانیکی بتن غلتکی	**۵۷**
۴-۱- کلیات	۵۹
۴-۲- مقاومت فشاری (f'_c)	۶۰
۴-۳- مقاومت کششی	۶۲
۴-۴- مدول الاستیسیته	۶۶
۴-۵- ضریب پواسون	۷۰
۴-۶- خزش	۷۰
۴-۷- ظرفیت کرنش کششی بتن	۷۲
۴-۸- مقاومت برشی	۷۳
۴-۹- تغییر حجم بتن	۷۷
۴-۹-۱- افت خشک‌شدگی	۷۷
۴-۹-۲- تغییر حجم ذاتی	۷۸
۴-۱۰- خواص حرارتی و افزایش دمای آدیاباتیک بتن	۷۸
۴-۱۱- وزن مخصوص	۷۹
۴-۱۲- نفوذپذیری و نشت در سدهای بتن غلتکی	۸۰
۴-۱۳- مقاومت در برابر ذوب و انجماد	۸۲
۴-۱۴- مقاومت در برابر سایش	۸۳
فصل پنجم- طراحی جانمایی و اجزای سد	**۸۵**
۵-۱- کلیات	۸۷
۵-۲- معیارها و فرایند طراحی بدنه سد	۸۷
۵-۳- جانمایی و محوریابی سد و سازه‌های جنبی	۸۸
۵-۴- طراحی هندسه بدنه سد	۹۱
۵-۴-۱- طراحی هندسه مقطع قائم سدهای کوتاه	۹۲
۵-۴-۲- طراحی هندسه مقطع قائم سدهای بلند	۹۵
۵-۴-۳- ناحیه‌بندی (Zoning) بتن بدنه سد	۱۰۰
۵-۴-۴- اجرای بتن با مقاومت بیش‌تر از نیاز طراحی	۱۰۰

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۴-۵- ملاحظات طراحی و جانمایی سازه‌های جنبی	۱۰۱
۵-۵- طراحی جزییات سد	۱۰۲
۵-۵-۱- کیفیت درزهای اجرایی و ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی	۱۰۲
۵-۵-۲- درزهای انقباضی قائم	۱۰۶
۵-۵-۳- گالری‌ها و شافت‌های داخل بدنه سد	۱۰۸
۵-۵-۴- گزینه‌های طراحی رویه بالادست بدنه سد	۱۰۹
۵-۵-۵- گزینه‌های طراحی رویه پایین‌دست بدنه سد	۱۱۶
فصل ششم- معیارهای ایمنی و پذیرش	**۱۱۹**
۶-۱- کلیات	۱۲۱
۶-۲- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های پایداری بدنه سد و پی	۱۲۲
۶-۲-۱- ترکیب‌های بارگذاری برای تحلیل پایداری	۱۲۳
۶-۲-۲- معیارهای پذیرش (ضرایب اطمینان) برای پایداری	۱۲۵
۶-۳- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های حرارتی بدنه سد	۱۲۸
۶-۳-۱- مشاهدات و نتایج غالب در خصوص ترک‌های حرارتی	۱۳۱
۶-۳-۲- توصیه‌های مهم برای کنترل ترک‌های حرارتی	۱۳۳
۶-۴- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های تنش بدنه سد	۱۳۴
۶-۴-۱- سطح عملکرد قابل پذیرش	۱۳۶
۶-۴-۲- شاخص‌های رفتاری بتن غلتکی	۱۳۶
۶-۴-۳- ضوابط و معیارهای ایمنی	۱۳۸
۶-۴-۴- ضوابط و معیارهای ایمنی طراحی سازه‌های وابسته به سد	۱۳۸
فصل هفتم- کنترل پایداری سدهای وزنی بتن غلتکی	**۱۴۱**
۷-۱- کلیات	۱۴۳
۷-۲- روش تحلیل تعادل حدی	۱۴۳
۷-۲-۱- مدهای گسیختگی	۱۴۳
۷-۲-۲- مبانی تحلیل تعادل حدی	۱۴۴
۷-۳- تحلیل پایداری در برابر لغزش	۱۴۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۷-۳-۱- انتخاب پارامترهای مقاومت برشی طراحی	۱۴۶
۷-۳-۲- روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای	۱۴۷
۷-۳-۳- روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای	۱۴۷
۷-۴- تحلیل پایداری در برابر سایر مدهای گسیختگی	۱۵۲
۷-۴-۱- تحلیل پایداری در برابر شناوری	۱۵۲
۷-۴-۲- تحلیل پایداری در برابر واژگونی	۱۵۲
۷-۴-۳- کنترل کفایت باربری پی	۱۵۳
۷-۵- ملاحظات مهم در محاسبه بارها در تحلیل‌های پایداری	۱۵۳
۷-۵-۱- بارهای ناشی از مخزن سد	۱۵۳
۷-۵-۲- فشار برکنش	۱۵۵
۷-۵-۳- بارهای ناشی از زلزله	۱۵۹
فصل هشتم - تحلیل حرارت بدنه سد	**۱۶۳**
۸-۱- کلیات	۱۶۵
۸-۲- مکانیزم ترک‌های حرارتی	۱۶۵
۸-۳- داده‌های پایه مورد نیاز	۱۶۶
۸-۴- تحلیل‌های حرارتی بتن غلتکی	۱۶۹
۸-۴-۱- تحلیل‌های حرارتی سطح ۱	۱۷۰
۸-۴-۲- تحلیل‌های حرارتی سطح ۲	۱۷۰
۸-۵- ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های حرارتی	۱۷۴
فصل نهم- تحلیل تنش بدنه سد، پی و مخزن	**۱۸۱**
۹-۱- کلیات	۱۸۳
۹-۲- روش تحلیلی ساده	۱۸۴
۹-۲-۱- روش تحلیلی ساده برای بارهای استاتیکی	۱۸۵
۹-۲-۲- روش تحلیلی ساده برای بارهای دینامیکی	۱۸۹
۹-۳- روش‌های تحلیل عددی	۱۹۳
۹-۳-۱- مدل تحلیلی اجزای محدود بدنه سد، پی، و مخزن	۱۹۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۹-۳-۲- تحلیل استاتیکی	۲۰۰
۹-۳-۳- تحلیل دینامیکی	۲۰۰
فصل دهم- طراحی سیستم ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی	**۲۰۷**
۱۰-۱- کلیات	۲۰۹
۱۰-۲- فلسفه و مبانی ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی	۲۱۰
۱۰-۳- فرایند طراحی سیستم ابزاردقیق	۲۱۲
۱۰-۳-۱- شناسایی و ارزیابی شرایط پروژه	۲۱۳
۱۰-۳-۲- تعیین اهداف سیستم ابزاردقیق	۲۱۳
۱۰-۳-۳- تعیین پارامترهای شاخص در سیستم ابزاردقیق	۲۱۴
۱۰-۳-۴- انتخاب نوع ابزار مناسب	۲۱۴
۱۰-۳-۵- جانمایی و تعداد ابزارهای لازم	۲۱۵
۱۰-۳-۶- برنامه‌ریزی پایش	۲۱۷
۱۰-۴- انواع متداول ابزارهای مورد استفاده	۲۲۰
۱۰-۴-۱- شبکه میکروژئودزی (Geodetic Network)	۲۲۰
۱۰-۴-۲- پاندول‌های مستقیم و معکوس (Direct & Inverted Pendulums)	۲۲۲
۱۰-۴-۳- شیب‌سنج (Inclinometer)	۲۲۴
۱۰-۴-۴- درزسنج (Jointmeter)	۲۲۴
۱۰-۴-۵- دماسنج (Thermometer)	۲۲۵
۱۰-۴-۶- شتاب‌نگار (Accelerometer)	۲۲۵
۱۰-۴-۷- ایستگاه‌های بده‌سنجی	۲۲۶
۱۰-۴-۸- اکستنسومتر (Extensometer)	۲۲۶
۱۰-۴-۹- پیزومترها (Piezometers)	۲۲۸
۱۰-۵- برنامه زمان‌بندی قرائت ابزارها	۲۳۰
۱۰-۶- روش‌های مختلف قرائت و گردآوری داده‌ها	۲۳۲
فصل یازدهم- ملاحظات اجرایی	**۲۳۳**
۱۱-۱- کلیات	۲۳۵

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱۱-۲- برنامه زمان‌بندی اجرای بتن غلتکی	۲۳۶
۱۱-۳- شرایط آب و هوایی	۲۳۶
۱۱-۴- تجهیزات تولید سنگ‌دانه	۲۳۷
۱۱-۵- تجهیزات تولید بتن	۲۳۸
۱۱-۶- تجهیزات انتقال بتن	۲۴۱
۱۱-۷- تجهیزات پخش بتن	۲۴۳
۱۱-۸- تجهیزات تراکم	۲۴۴
۱۱-۹- حفاظت و عمل‌آوری	۲۴۵
فصل دوازدهم- کنترل کیفیت بتن غلتکی	**۲۴۷**
۱۲-۱- کلیات	۲۴۹
۱۲-۲- رابطه مشخصات فنی با کنترل کیفیت	۲۵۱
۱۲-۳- الزامات کنترل کیفی موثر	۲۵۳
۱۲-۴- اجرای بستر آزمایشی بتن غلتکی (Test Pad)	۲۵۴
۱۲-۵- کنترل کیفیت مصالح	۲۵۴
۱۲-۶- کنترل کیفیت فرایند ساخت	۲۵۶
۱۲-۷- معیارهای پذیرش	۲۶۱
پیوست ۱- مشخصات سدهای وزنی بتن غلتکی	**۲۶۳**
منابع و مراجع	**۲۷۹**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- مزایا و محدودیت‌های سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سایر انواع سدها و کاربردهای خاص بتن غلتکی در سدسازی ۸

جدول ۱-۲- طبقه‌بندی متداول سدهای وزنی بتن غلتکی با توجه به میزان مواد سیمانی مصرفی ۹

جدول ۱-۳- تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی ساخته شده در سال‌های مختلف بر حسب نوع مصالح بتن غلتکی ۱۳

جدول ۱-۴- نتایج تحلیل آماری سدهای ساخته شده در دوره های منتهی به سال ۱۹۸۶، دوره ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۸، و دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰ ۱۴

جدول ۲-۱- معادن مواد پوزولانی و سیمانی طبیعی در ایران ۲۳

جدول ۲-۲- سیمان‌های پوزولانی تولید شده در کارخانه‌های سیمان ایران و سابقه کاربرد آن‌ها در سدهای وزنی بتن غلتکی ۲۵

جدول ۲-۳- حدود دانه‌بندی مناسب برای مخلوط‌های بتن غلتکی با توجه به حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌ها ۲۹

جدول ۲-۴- درصد مجاز مصالح بسیار ریز (کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ mm) با توجه به میزان چسبندگی آن‌ها ۳۰

جدول ۲-۵- میزان مواد سیمانی (Kg) و دانه‌بندی سنگدانه‌ها در نمونه‌های شاخص انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی ۳۰

جدول ۲- ۶- الزامات استاندارد نوارهای آب‌بند PVC ۳۵

جدول ۳-۱- مقایسه رویکردهای طراحی سدهای بتن غلتکی از بعد عوامل تاثیرگذار بر مبانی و الزامات طرح اختلاط بتن غلتکی ۴۳

جدول۳-۲- مقایسه میزان مواد خمیری در مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و زیاد ۴۷

جدول ۳-۳- حدود نسبی هر یک از اجزای مخلوط بتن برای تهیه مخلوط های آزمایشی بتن غلتکی با توجه به حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۵۰

جدول۳-۴- منحنی ایده‌آل دانه‌بندی درشت دانه ۵۱

جدول ۳-۵- منحنی ایده‌آل دانه‌بندی ریزدانه ۵۲

جدول ۴-۱- ضرایب کاهش مقاومت کششی بتن و درزهای اجرایی بر اساس میزان روانی مخلوط بتن و تمهیدات آماده‌سازی درز ۶۵

جدول ۴-۲- حدود مقاومت کششی بتن غلتکی بر اساس مقاومت فشاری و شرایط اجرایی بتن ۶۶

جدول ۴-۳- مقاومت برشی توده بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی با کیفیت مشابه با توده بتن ۷۴

جدول ۴-۴- میانگین نفوذپذیری نمونه‌های مغزه‌گیری شده در سدهای بتن غلتکی ۸۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱- حدود مدول تغییرشکل مناسب برای توده سنگ پی سدهای وزنی بتن غلتکی ۹۰

جدول ۵-۲- حدود ضریب رشد و تمهیدات پیشنهادی برای شرایط مختلف درزهای اجرایی در انواع سدهای وزنی بتن غلتکی ۱۰۴

جدول ۶-۱- احتمال وقوع شرایط محیطی و حالت‌های بارگذاری متناسب با آن‌ها برای تحلیل‌های پایداری ۱۲۴

جدول ۶-۲- حالت‌های مختلف بارگذاری برای تحلیل‌های پایداری ۱۲۴

جدول ۶-۳- حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز در مقابل لغزش در سازه‌های بحرانی و معمولی ۱۲۶

جدول ۶-۴- حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز در مقابل شناوری برای انواع سازه‌ها ۱۲۷

جدول ۶-۵- معیار پذیرش برای محل اثر برآیند نیروها در صفحه مستعد شکست (کنترل پایداری در برابر واژگونی) ۱۲۷

جدول ۶-۶- ترکیب بارهای استاتیکی و دینامیکی برای تحلیل تنش بدنه سد ۱۳۵

جدول ۶-۷- معیارهای پذیرش برای تحلیل تنش بدنه سد (ضرایب اطمینان برای تنش‌های حاصل از تحلیل‌های خطی) ۱۳۸

جدول ۶-۸- معیارهای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و اجزای وابسته به سد ۱۳۹

جدول ۹-۱- ترکیب‌های مختلف شتاب‌های افقی و قائم زلزله مبنای محاسبه نیروی استاتیکی معادل در روش شبه‌استاتیکی ۱۹۰

جدول ۱۰-۱- حداقل‌های سیستم ابزاردقیق و برنامه پایش برای سدهای موجود و در دست مطالعه ۲۱۸

جدول ۱۰-۲- برنامه زمان‌بندی پیشنهادی قرائت ابزارها در مقاطع زمانی و شرایط مختلف بهره‌برداری ۲۳۱

جدول ۱۱-۱- فاصله زمانی مجاز اجرای لایه‌های متوالی بدون ملات چسباننده ۲۴۶

جدول ۱۲-۱- شرح آزمایش، شماره استاندارد و تواتر انجام آزمایش‌های کنترل کیفی سنگ‌دانه‌های بتن غلتکی ۲۵۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- نمایش شماتیک طبقه‌بندی متداول سدهای وزنی بتن غلتکی با توجه به میزان مصرف مواد سیمانی و مقاومت بتن بدنه سد ۹

شکل ۱-۲- تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی ساخته شده در سال‌های مختلف بر حسب نوع مصالح بتن غلتکی ۱۴

شکل ۲-۱- دسته‌بندی مواد افزودنی معدنی بتن با توجه به منابع تامین و خواص واکنش‌زایی آن‌ها ۲۱

شکل ۳-۱- مقایسه وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری در بتن غلتکی بر اساس آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده (Yates) ۴۴

شکل ۳-۲- نمودار رابطه کلی بین مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان بتن (Neville 1981) ۴۵

شکل ۳-۳- رابطه بین مقدار سیمان معادل و مقاومت فشاری- میانگین تجربیات موجود طرح‌های RCC با پوزولان ۵۱

شکل ۳-۴- رابطه بین مقدار سیمان معادل و مقاومت فشاری- میانگین تجربیات موجود طرح های RCC بدون پوزولان ۵۱

شکل ۳-۵- رابطه بین میزان آب مصرفی در بتن و زمان VC استاندارد و زمان VC بزرگ برای مخلوط‌های RCD ۵۴

شکل ۳-۶- رابطه بین مقدار مواد سیمانی و مقاومت فشاری ۵۴

شکل ۳-۷- رابطه بین مقدار آب و مقاومت فشاری RCD ۵۵

شکل ۴-۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن غلتکی در مقایسه با نسبت آب به سیمان و میزان مصرف مواد سیمانی ۶۱

شکل ۴-۲- روند افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی با مقادیر متفاوت مواد سیمانی در طی زمان ۶۱

شکل ۴-۳- روند افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی بدون پوزولان در طی زمان ۶۳

شکل ۴-۴- روند افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی با سنگ‌دانه شکسته گرانیتی با درصدهای مختلف پوزولان در طی زمان ۶۳

شکل ۴-۵- تغییرات ضریب کاهش مقاومت کششی مستقیم نسبت به مدول گسیختگی و مقاومت کششی برزیلی ۶۴

شکل ۴-۶- روند تغییرات مقاومت کششی مستقیم به مقاومت فشاری بتن غلتکی ۶۴

شکل ۴-۷- حدود تغییرات مدول الاستیسیته بتن‌های غلتکی در مقایسه با بتن حجیم متعارف ۶۷

شکل ۴-۸- مدول الاستیسیته وتری و مدول الاستیسیته نهایی بتن غلتکی ۶۸

شکل ۴-۹- مدول الاستیسیته سکانت نمونه‌های تیپ بتن غلتکی (متناظر با ۲۵ درصد بار گسیختگی) ۶۹

شکل ۴-۱۰- مدول الاستیسیته نهایی نمونه‌های تیپ بتن غلتکی (متناظر با ۱۰۰ درصد بار گسیختگی) ۶۹

شکل ۴-۱۱- مقادیر ضریب خزش F(k) برای تعدادی از نمونه‌های بتن غلتکی و نحوه تغییرات آن نسبت به مقاومت فشاری ۷۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱۲- ظرفیت کرنش کششی و مدول الاستیسیته کششی مخلوط بتن غلتکی با میزان مواد سیمانی مختلف ۷۳

شکل ۴-۱۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک بتن غلتکی (با ۲۵٪ پوزولان) در سنین مختلف بدون استفاده از مواد افزودنی دیرگیر ۷۵

شکل ۴-۱۴- تاثیر میزان رشد سطح درز بر چسبندگی و زاویه اصطکاک درزهای اجرایی بدون استفاده از مواد افزودنی دیرگیر ۷۶

شکل ۴-۱۵- تاثیر میزان سیمان، رشد سطح درز، ملات بستر، و مواد افزودنی دیرگیر بر چسبندگی درزهای اجرایی در سد Miel I ۷۶

شکل ۴-۱۶- نفوذپذیری توده بتن غلتکی و بتن حجیم متعارف با میزان مواد سیمانی مختلف ۸۰

شکل ۵-۱- شکستگی (خمیدگی) مناسب و نامناسب در محور بدنه سد ۸۹

شکل ۵-۲- هندسه تیپ مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی کوتاه ۹۳

شکل ۵-۳- گزینه‌های طرح هندسی مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی با ارتفاع متوسط و بلند ۹۶

شکل ۵-۴- روش لایه شیب‌دار در سدهای بتن غلتکی (Sloped Layer Method - SLM) ۱۰۵

شکل ۵-۵- شمای کلی فرایند ایجاد درزهای انقباضی قائم در سدهای وزنی بتن غلتکی ۱۰۷

شکل ۵-۶- جزییات روش اجرای درزهای انقباضی قائم در سدهای وزنی بتن غلتکی ۱۰۸

شکل ۵-۷- گزینه‌های طراحی رویه بالادست در سدهای بتن غلتکی ۱۱۰

شکل ۵-۸- گزینه‌های طراحی رویه پایین‌دست در سدهای بتن غلتکی ۱۱۶

شکل ۶-۱- مکانیزم ترک‌خوردگی سطحی بتن در اثر تبادل حرارتی سریع بتن رویه با محیط اطراف (مکانیزم گیرداری داخلی) ۱۳۰

شکل ۶-۲- مکانیزم ترک‌خوردگی حجمی بتن در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری بتن در مجاور سطوح اتکایی (مکانیزم گیرداری خارجی) ۱۳۰

شکل ۶-۳- منحنی رفتاری بتن غلتکی در کشش و میزان آسیب وارد بر بتن در سطوح کرنش مختلف ۱۳۷

شکل ۷-۱- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر بدنه سد در روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای ۱۴۸

شکل ۷-۲- مکانیزم لغزشی قابل بررسی (شامل بدنه سد و گوه‌های بالادست و پایین‌دست) در روش تحلیل چند گوه‌ای ۱۴۹

شکل ۷-۳- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر هر گوه در روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای ۱۵۱

شکل ۷-۴- موقعیت نیروی برآیند و توزیع تنش در سطح گسیختگی در حالات مختلف بارگذاری ۱۵۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۷-۵- نمونه منحنی تداوم مخزن (بر اساس منحنی فوق، در ۵۰٪ اوقات سال تراز مخزن بالاتر از تراز ۶۶۰ می‌باشد) ۱۵۵

شکل ۷-۶- توزیع فشار برکنش در شرایط عدم وجود پرده تزریق و سیستم زهکش ۱۵۶

شکل ۷-۷- توزیع فشار برکنش در شرایط استفاده از پرده تزریق و سیستم زهکش ۱۵۶

شکل ۷-۸- توزیع فشار برکنش در شرایط وقوع بازشدگی محدود در سطح گسیختگی (عدم تلاقی ناحیه باز شده با پرده زهکش) ۱۵۷

شکل ۷-۹- توزیع فشار برکنش در شرایط وقوع بازشدگی گسترده در سطح گسیختگی (تلاقی ناحیه باز شده با پرده زهکش) ۱۵۸

شکل ۷-۱۰- توزیع فشار برکنش در مقاطع سرریز شونده با حوضچه آرامش ۱۵۸

شکل ۷-۱۱- توزیع فشار هیدرودینامیک در اثر شتاب افقی زلزله بر اساس رابطه وسترگارد ۱۶۱

شکل ۸-۱- مکانیزم ترک‌خوردگی سطحی بتن در اثر تبادل حرارتی سریع بتن رویه با محیط اطراف (مکانیزم گیرداری داخلی) ۱۶۷

شکل ۸-۲- مکانیزم ترک‌خوردگی حجمی بتن در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری بتن در مجاور سطوح اتکایی (مکانیزم گیرداری خارجی) ۱۶۷

شکل ۸-۳- مدل شماتیک محاسبه اثر گیرداری خارجی ۱۷۵

شکل ۸-۴- تغییرات ضریب گیرداری سازه‌ای بر اساس روابط پیشنهادی ACI– روابط ۸-۱۳ و ۸-۱۴ ۱۷۶

شکل ۸-۵- تغییرات ضریب گیرداری سازه‌ای بر اساس روابط پیشنهادی ACI – رابطه ۸-۱۵ ۱۷۶

شکل ۸-۶- شبیه‌سازی مکانیزم ضریب گیرداری داخلی با ضریب گیرداری سازه‌ای ۱۷۷

شکل ۸-۷- توزیع دما در ضخامت بدنه سد در زمان مبنا (سن یک روز) و در زمان مورد نظر (برای مثال در سن ۳۶۵ روز) ۱۷۸

شکل ۸-۸- دمای موثر مقطع در زمان مورد نظر (سن ۳۶۵ روز) ۱۷۹

شکل ۸-۹- اختلاف دمای موثر (dT) در مقطع در زمان مورد نظر (۳۶۵ روز) ۱۷۹

شکل ۹-۱- توزیع تنش های نرمال و برشی در امتداد مقطع سد بر مبنای تئوری تیرها (تئوری اولر- برنولی) در شرایط وقوع یا عدم وقوع ترک ۱۸۶

شکل ۹-۲- پارامترهای در نظر گرفته شده برای محاسبه طول ترک در بدنه سد در امتداد صفحه افقی بدون مقاومت کششی ۱۸۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۹-۳- محاسبات توزیع تنش در امتداد صفحه شیب‌دار در داخل بدنه سد (یا مرز بدنه سد و پی) ۱۸۸

شکل ۹-۴- توزیع فشار هیدرودینامیک وسترگارد در مقایسه با توزیع فشار متناظر با نسبت‌های مختلف پریود تحریک به پریود پایه مخزن ۱۹۱

شکل ۹-۵- محاسبه نسبت پریود R_r در گام دوم روش شبه دینامیکی چاپرا ۱۹۴

شکل ۹-۶- محاسبه نسبت پریود R_f در گام چهارم روش شبه دینامیکی چاپرا ۱۹۴

شکل ۹-۷- شکل مود اول ($\varphi(y)$) در گام پنجم روش شبه دینامیکی چاپرا ۱۹۵

شکل ۹-۸- توزیع فشار هیدرودینامیک ($p(y)$) در گام پنجم روش شبه دینامیکی چاپرا ۱۹۵

شکل ۹-۹- مدل هندسی سد وزنی به همراه شرایط مرزی مورد نیاز ۱۹۹

شکل ۹-۱۰- نمودار کارایی (عملکرد) دینامیکی بدنه سد بر اساس نتایج تحلیل‌های خطی ۲۰۵

شکل ۹-۱۱- مکانیزم‌های محتمل شکست در یک سد بتنی وزنی: ترک های افقی (۱ و ۲)، ترک مورب پایین‌دست (۳)، ترک‌های منحنی در مجاورت رویه بالادست (۴ و ۵)، ترک قائم پی (۶)، ایجاد ترک قائم در بدنه سد (۷)، لغزش در پی (۸)، کمانش لایه نازک پی (۹) ۲۰۶

شکل ۱۰-۱- سمت راست: لیست سمبل ابزارها، سمت چپ: شمای ابزاردقیق در مقطع طره مرکزی سد و پی (سد جگین) ۲۱۶

شکل ۱۰-۲- شمای ابزاردقیق در مقاطع مختلف سد و پی از نمای پایین‌دست (سد جگین) ۲۱۷

شکل ۱۰-۳- آرایش نمونه شبکه نقاط میکروژئودزی (سد جگین) ۲۲۱

شکل ۱۰-۴- شاخص نقاط نشانه‌روی (سمت راست) و نقاط ترازیابی (سمت چپ) ۲۲۲

شکل ۱۰-۵- شاخص نقاط پیمایش (سمت راست) و نقاط پیلار (سمت چپ) ۲۲۲

شکل ۱۰-۶- پاندول مستقیم (سمت راست) و پاندول معکوس (سمت چپ) ۲۲۳

شکل ۱۰-۷- میله اندازه‌گیری ابزار شیب‌سنج ۲۲۴

شکل ۱۰-۸- درزسنج تک‌بعدی و درزسنج سه‌بعدی به همراه گیج مکانیکی اندازه‌گیری ۲۲۵

شکل ۱۰-۹- ایستگاه بده‌سنجی با سرریز استاندارد V شکل ۲۲۶

شکل ۱۰-۱۰- اکستنسومتر (سمت راست)، گیج قرائت اتوماتیک و گیج قرائت دستی آن ۲۲۷

شکل ۱۰-۱۱- پیزومترهای باز یا کاساگراند ۲۲۸

شکل ۱۰-۱۲- پیزومتر لوله بسته (Closed Standpipe Piezometers) برای اندازه‌گیری فشار برکنش ۲۲۹

شکل ۱۰-۱۳- پیزومتر الکتریکی ۲۳۰

مقدمه

با توجه به گسترش فزاینده دانش فنی و تکنولوژی اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی به جهت سرعت اجرا، صرفه اقتصادی، و انطباق‌پذیری بسیار بهتر این نوع سدها با شرایط طبیعی و امکانات محلی پیمانکاران در کشورهای مختلف و نیز تجربیات و موفقیت‌های حاصل از اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی در ایران (پای پل کرخه، جگین، زیردان، ژاوه و کهیر)، تدوین راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی با هدف ساماندهی مطالعات طراحی و تحلیل و ارزیابی ایمنی این نوع سدها، در دستور کار دفتر تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور قرار گرفت. در این راستا، ضابطه حاضر با عنوان «راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی» با هدف ارائه و تشریح مبانی فلسفی، خواص و مشخصات مصالح بتن غلتکی، اصول طراحی، و ملاحظات اجرایی و کنترل کیفی انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی تهیه شده است.

مطالب این راهنما به نحوی تنظیم و ارائه شده است که ضمن ایجاد بستر لازم برای انتخاب نوع سد وزنی بتن غلتکی مناسب با هدف و ساختگاه مورد نظر، نکات مهم طراحی و ملاحظات اجرایی لازم را برای یک کارشناس آشنا با صنعت سدسازی فراهم آورد. اگرچه این راهنما به منزله یک استاندارد و یا آیین‌نامه طراحی نیست، ولی در تنظیم مطالب سعی شده است حتی‌الامکان رواداری‌ها و ضرایب اطمینان مجاز طراحی بر پایه استانداردهای ملی و بین‌المللی معتبر (با ذکر مرجع) ارائه گردند.

شایان ذکر است این راهنما صرفا در بر گیرنده بدنه سدهای بتن غلتکی بوده و شامل مبانی و ملاحظات طراحی سازه‌های جنبی این سدها نمی‌شود. درصورت نیاز به اطلاعات مربوطه، به ضابطه شماره ۳۱۲ سازمان برنامه و بودجه کشور تحت عنوان «ضوابط عمومی طراحی سازه‌های آبی بتنی» مراجعه گردد.

فصل ۱

کلیات

۱-۱- دلایل رویکرد به سدهای وزنی بتن غلتکی

با پیشرفت علم و صنعت سدسازی در جهان، و نیز با توجه به ضرورت روزافزون احداث سدها در شرایط و ساختگاه‌های نه چندان مناسب، مهم‌ترین چالش پیش‌روی صنعت سدسازی یافتن راهکارهایی برای غلبه بر محدودیت‌های فنی موجود برای انواع متعارف و کلاسیک سدها و همچنین ارائه راه‌حل‌هایی برای اقتصادی‌تر شدن هر چه بیش‌تر احداث سدها در شرایط طبیعی نامطلوب و با امکانات اجرایی محلی مطرح بود. در این راستا، توجه به مشکلات و محدودیت‌های فنی و اقتصادی گزینه‌های متعارف سدهای بتنی وزنی و سدهای خاکی می‌تواند بیانگر دلایل و زمینه‌های ابداع ایده طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی باشد.

در سدهای بتنی وزنی متعارف، بخش عمده‌ای از حجم بتن بدنه سد عملکرد سازه‌ای نداشته و صرفا تامین کننده وزن کافی برای پایداری بدنه سد می‌باشند این در حالی است که از دیدگاه طراحی، تفاوت محسوسی از نظر مشخصات فنی و اجرایی برای بخش‌های مختلف بتن بدنه سد لحاظ نمی‌گردد. از طرف دیگر، در ساختگاه‌هایی که توده سنگ پی از سختی نسبتا خوب و بالایی برخوردار نیست، سختی و شکنندگی قابل توجه بتن بدنه سد موجب افزایش ریسک شکست سدهای بتنی وزنی در اثر نشست‌های زیاد پی شده و این عامل به نوعی محدود کننده امکان‌پذیری این نوع سدها می‌گردد. به طور کلی، عوامل محدود کننده امکان‌پذیری سدهای بتنی وزنی متعارف را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- ضعف نسبی توده سنگ پی و تکیه‌گاه‌ها
- در دسترس نبودن مصالح قابل پذیرش برای بتن معمولی
- عدم توجیه اقتصادی در مقایسه با سدهای خاکی

از نظر اقتصادی، آیتم‌های اصلی هزینه در سدهای بتنی وزنی متعارف عباتند از:

- کیفیت مصالح لازم برای بتن
- میزان مصرف سیمان در بتن
- قالب‌بندی سطوح بالادست و پایین‌دست و قالب‌بندی سطوح درزهای قائم
- ملاحظات و تمهیدات لازم برای کنترل ترک‌های حرارتی (پیش‌سرمایش بتن و یا مصالح آن و پس‌سرمایش بتن سخت شده)
- تامین آب‌بندی و نفوذناپذیری بدنه سد
- نیاز به ماشین‌آلات خاص و پیشرفته اجرایی (نظیر جرثقیل کابلی و یا جرثقیل‌های برجی سنگین)
- تمهیدات لازم برای تامین ایمنی مطلوب در دوره اجرا

مجموعه عوامل فوق هم با تحمیل هزینه‌های مستقیم به پروژه و هم در پاره‌ای موارد با تطویل زمان اجرا سبب کاهش جذابیت اقتصادی نسبی سدهای بتنی وزنی متعارف گردید به‌گونه‌ای که در دهه‌های اخیر آمار ساخت سدهای بتنی وزنی متعارف به شدت تقلیل یافته است.

در مقابل، از بعد مسایل فنی، سد خاکی می‌تواند گزینه مناسبی در طیف وسیعی از ساختگاه‌ها، به خصوص در ساختگاه‌هایی که توده سنگ پی از سختی نسبتا خوب و بالایی برخوردار نیست، باشد. ولی از نظر اقتصادی، مخصوصا در حوضه‌هایی که سیلاب‌های بسیار بزرگی دارند، این گزینه الزاما راه حل مناسبی نخواهد بود چرا که هزینه‌های سیستم انحراف، سرریز، و سایر سازه‌های وابسته به سد می‌تواند در توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی پروژه کاملا تعیین کننده باشد.

در سدهای خاکی، علیرغم سهولت و سرعت قابل ملاحظه اجرای بدنه سد، وجود برخی مسایل و مشکلات سبب ایجاد عدم توجیه اقتصادی مناسب و عملکرد فنی نامطلوب (ریسک بالای خرابی و خسارت) در این نوع سدها می‌گردید. از جمله مهم‌ترین این عوامل عبارتند از:

- ضعف و خطرپذیری سدهای خاکی در برابر نفوذ آب به جسم بدنه سد
- عدم مقاومت و پایداری سدهای خاکی در برابر روگذری سیلاب
- تحمیل هزینه‌های بالاتر سیستم انحراف (سیلاب طراحی بزرگ‌تر، تونل طولانی‌تر، و فرازبند بلندتر)
- هزینه‌های زیاد (و در برخی موارد تعیین کننده) سرریز و سایر سازه‌های جنبی
- پیچیدگی و آسیب‌پذیری بیش‌تر سازه‌های جنبی (سرریزها و آبگیرهای مرتفع) در ساختگاه‌های با خطر لرزه‌خیزی زیاد
- عدم کاهش زمان اجرای کلی پروژه بخاطر ملاحظات اجرایی سازه‌های جنبی

مجموعه عوامل و محدودیت‌های فوق، طراحان سدهای بتنی و خاکی را به یافتن راه‌حل‌ها و راهکارهایی برای غلبه بر مشکلات فوق وامی‌داشت چرا که هم‌زمان با سخت‌تر شدن شرایط طبیعی و فنی ساختگاه‌های مطرح برای سدسازی، نیاز و ضرورت اجرای تعداد بیش‌تری از سدها با اهداف مختلف، با حفظ و بهبود جذابیت اقتصادی و کاهش هزینه تمام شده سدها، بیش‌تر می‌شد.

جستجو و تحقیق برای پاسخ به مجموعه مشکلات و محدودیت‌های فوق، منجر به ابداع طیف گسترده‌ای از راهکارها با محوریت مسایل فنی، اجرایی، و اقتصادی گردید که هدف همه آن‌ها تجمیع مزایای سدهای بتنی وزنی و سدهای خاکی و سعی بر انطباق بهتر و منطقی‌تر با هدف و عملکرد مورد انتظار از سد، شرایط طبیعی ساختگاه، و تکیه بر امکانات اجرایی ساده‌تر بوده است. از آنجا که وجه مشترک غالب این راه‌کارها استفاده از ماشین‌آلات اجرایی متعارف و نسبتا ارزان قیمت سدهای خاکی برای حمل، پخش، و تراکم مصالح (بتن) بدنه سد می‌باشد، نام «سدهای وزنی بتن غلتکی» به این طیف از گزینه‌های پیشنهادی اطلاق شده است.

واژه «بتن کوبیده غلتکی» یا به اختصار «بتن غلتکی» (Roller-Compacted Concrete – RCC) در واقع به بتنی اطلاق می‌گردد که در فرایند ساخت و اجرای آن از تکنیک‌ها و ماشین‌آلات اجرایی ارزان و سریع سدهای خاکی استفاده شده و از مقاومت و دوام مشابه با بتن متعارف برخوردار است. بر اساس این توضیحات مشخص می‌گردد که سدهای بتنی وزنی غلتکی به طور عام در بر گیرنده طیف وسیعی از سدهای وزنی حد فاصل سدهای بتنی وزنی متعارف و سدهای خاکی می‌باشند. بدیهی است معیارها و ضوابط طراحی گروه‌هایی از سدهای وزنی بتن غلتکی که نزدیکی بیش‌تری به

سدهای بتنی وزنی متعارف دارند مشابه سدهای بتنی وزنی بوده و معیارها و ملاحظات طراحی و اجرایی انواعی از سدهای بتنی وزنی غلتکی که به سدهای خاکی شبیه‌تر هستند، تواما متاثر از مبانی طراحی سدهای خاکی و سدهای بتنی وزنی می‌باشد.

شایان ذکر این‌که ارائه ایده‌های طراحی سدهای بتنی پایه‌دار (Buttress Dams) و سدهای بتنی وزنی توخالی (Hollow Gravity Dams) نیز در راستای پاسخ و غلبه بر مسایل و مشکلات فنی و اقتصادی سدهای بتنی وزنی (عمدتا با هدف کاهش احجام بتن بدنه سد) شکل گرفته است. ولی در این نوع سدها، اگرچه در احجام (غیرموثر) بتن بدنه سد صرفه‌جویی می‌گردد، ولی افزایش مقادیر و هزینه‌های قالب‌بندی و آرماتورگذاری سبب مشکل‌تر (و کندتر) شدن اجرای کار می‌گردید. از سوی دیگر با توجه به کاهش ضخامت اجزای بدنه سد در سدهای فوق‌الذکر، حساسیت این نوع سدها به بارهای حرارتی در دوره بهره‌برداری افزایش یافته و غالب سدهای بتنی پایه‌دار با مشکلاتی از این نوع مواجه می‌باشند. به همین دلیل، امروزه اقبال چندانی نسبت به این گروه از سدها وجود ندارد.

علیرغم مزایای متعددی که برای انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی مطرح می‌باشد، باید توجه داشت که در برخی موارد با توجه به شرایط طبیعی ساختگاه سد مورد نظر، محدودیت‌ها و معایبی هم برای این نوع سدها وجود دارد. در جدول (۱-۱) مزایای سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سایر انواع متعارف سدها به طور خلاصه ارائه شده است. همچنین در این جدول به موارد محدودیت‌ها و معایب انتخاب این نوع سد، و کاربردهای خاص بتن غلتکی در صنعت سدسازی نیز اشاره شده است.

۱-۲- مبانی طبقه‌بندی و طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی

هم‌زمان با پیشرفت و توسعه دانش و تکنولوژی سدهای وزنی بتن غلتکی، سازماندهی و طبقه‌بندی انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی با توجه ویژگی‌های آن‌ها مورد توجه بوده است. با توجه به خاستگاه و طیف انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی، این دسته‌بندی‌ها غالبا بر اساس میزان مصرف مواد سیمانی در واحد حجم مصالح (بتن) بدنه سد بوده‌اند. البته باید توجه داشت عواملی نظیر هدف، طول عمر مفید و ارتفاع سد، و نیز شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه سد در دسته‌بندی و تنظیم مبانی طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی تاثیرگذار هستند. طبقه‌بندی متداول سدهای وزنی بتن غلتکی در جدول (۱-۲) ارائه شده است [۱۳]. همچنین در شکل (۱-۱)، این طبقه‌بندی با توجه به میزان مصرف مواد سیمانی و نیز میزان مقاومت بتن بدنه سد به صورت شماتیک نشان داده شده است [۱۴].

جدول ۱-۱- مزایا و محدودیت‌های سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سایر انواع سدها و کاربردهای خاص بتن غلتکی در سدسازی [۱۳]

۱- مزایای سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سدهای بتنی وزنی متعارف:
- سرعت بیش‌تر اجرای سد. در سدهای وزنی بتن غلتکی بزرگ نرخ پیشرفت ارتفاعی عملیات اجرای بتن‌ریزی بدنه سد به ۱۰ تا ۱۲ متر در ماه می‌رسد. این نرخ پیشرفت در سدهای کوچک‌تر، سریع‌تر بوده و در فرازبندهای بتن غلتکی نرخ پیشرفت ارتفاعی بتن‌ریزی به ۳۰ متر در ماه نیز رسیده است.
- استفاده موثر از ماشین‌آلات متعارف و ساده‌تر در بتن‌ریزی (نظیر کامیون، بلدوزر، غلتک و ...)
- هزینه کم‌تر اجرا با توجه به موارد فوق
- افزایش ایمنی در زمان اجرا با توجه به کاهش اختلاف ارتفاع سطح کار بخاطر اجرای بتن در لایه‌های پیوسته و نازک‌تر
- بهبود شرایط ایمنی در کارگاه با توجه به کاربرد کم‌تر و محدودتر قالب
- خسارت و آسیب کم‌تر به محیط زیست با توجه به سیستم انحراف نسبتا کوچک‌تر و عدم نیاز به حفاری تکیه‌گاه‌ها برای نصب جرثقیل‌های کابلی
۲- مزایای سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سدهای خاکی:
- کاهش زمان اجرای سد با توجه به سرعت اجرای تقریبا مشابه ولی حجم به‌مراتب کم‌تر بدنه سد
- امکان اجرا و استقرار سرریز بر روی بدنه سد
- کاهش ارتفاع فرازبند و ابعاد تونل انحراف (هم طول تونل و هم قطر تونل) با توجه به کاهش ابعاد بدنه سد و کاهش سیلاب طراحی متناسب با ریسک آسیب‌پذیری کم‌تر و زمان اجرای کوتاه‌تر سد
- طول کم‌تر مجاری آب‌بر و پنستاک‌های فلزی
- کاهش ابعاد برج‌های آبگیر و کاهش ریسک و آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر بار زلزله
- هزینه کلی قابل رقابت پروژه
- خسارت و آسیب کم‌تر به محیط زیست بخاطر حجم به‌مراتب کم‌تر مصالح مورد نیاز که منجر به کاهش احجام منابع قرضه، کاهش ترافیک کامیون‌ها و سایر ماشین‌آلات بارگیری و حمل مصالح و متناسبا کاهش میزان تولید گاز مضر دی اکسید کربن و ... در طبیعت می‌گردد.
- قابلیت روگذری سیلاب از روی بدنه سد بدون ریسک خرابی
- افزایش دوره زمانی مناسب برای اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سدهای خاکی
۳- موارد محدودیت و معایب سدهای وزنی بتن غلتکی:
- در ساختگاه‌هایی که منابع قرضه مناسب در دسترس نباشد.
- در ساختگاه‌هایی که توده سنگ بسیار ضعیف و ناهمسان است و پتانسیل نشست‌های بیش از حد و ریسک انهدام سد وجود داشته باشد.
- در ساختگاه‌هایی که دره محل احداث سد بسیار باریک و با دیواره‌های پرشیب باشد به‌گونه‌ای که فضای کافی برای احداث دسترسی‌ها و استقرار و تردد ماشین‌آلات وجود نداشته باشد (البته رفع این محدودیت با استفاده از سیستم‌های اجرایی خاص نظیر Tower Belt ممکن می‌باشد).
۴- سایر کاربردهای خاص بتن غلتکی در صنعت سدسازی:
- مقاوم‌سازی و افزایش ارتفاع سدهای موجود
- تقویت رویه پایین‌دست سدهای خاکی به‌منظور تامین قابلیت روگذری سیلاب در این سدها
- ترمیم و تقویت نقاط ضعف محلی و ناحیه‌ای پی و تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی (نظیر سد Ohkawa در ژاپن)
- پر کردن حفرات آب‌کند و شسته شدن مصالح پی ناشی از تخلیه سیلاب یا روگذری سیلاب در سدهای خاکی و بتنی
- تقویت سازه‌های جنبی سدها نظیر مجاری تخلیه آب و ...

جدول ۱-۲- طبقه‌بندی متداول سدهای وزنی بتن غلتکی با توجه به میزان مواد سیمانی مصرفی [۱۳]

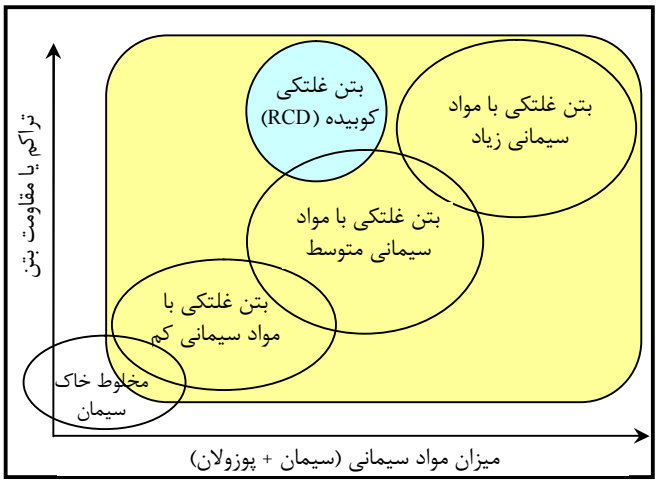
طبقه‌بندی		سد با مواد سیمانی کم Low Cementitious [2]	سد غلتکی کوبیده RCD (Rolled-Concrete Dam)	سد با مواد سیمانی متوسط Medium Cementitious	سد با مواد سیمانی زیاد High Cementitious
میزان مواد سیمانی [1]	kg/m3	≤ ۹۹	۱۲۰ ~ ۱۳۰	۱۰۰ ~ ۱۴۹	≥ ۱۵۰
درصد مواد پوزولانی	(%)	۰ ~ ۴۰	۲۰ ~ ۳۵	۲۰ ~ ۶۰	۳۰ ~ ۸۰
حداکثر ابعاد سنگ‌دانه [3]	(mm)	۳۸ - ۷۵	۱۲۰ - ۱۵۰	۳۸ - ۷۵	۳۸ - ۷۵
ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی	(mm)	۳۰۰	۷۵۰ ~ ۱۰۰۰	۳۰۰	۳۰۰
فواصل درزهای انقباضی قائم	(m)	۳۰ ~ ∞	۱۵	۱۵ ~ ۵۰	۲۰ ~ ۷۵
المان آب‌بند بالادست		دارد	دارد	غالبا دارد	ندارد
نمونه‌های شاخص سد		-Willow Creek - Concepcion - Jordao 4	- Shimajigawa - Tamagawa - Miyagase	- Copperfield - De Mist Kraal - Les Olivettes - Joumoua	- Upper Stillwater - Santa Eugenia - Wolwedans - New Victoria - Puding - Platanovryssi - Jiangya

۱- میزان کل مواد سیمانی شامل سیمان و مواد پوزولانی (افزودنی‌های معدنی)

۲- در این طبقه‌بندی، سدهای با «مواد سیمانی خیلی کم» نیز در زیرمجموعه رده «سدهای با مواد سیمانی کم» لحاظ شده‌اند. سدهای با مواد سیمانی خیلی‌کم شامل سدهای خاک سیمان یا CSG (Cemented Sand and Gravel) و سدهای (Face Symmetrical Hardfill Dam) FSHD می‌گردد.

۳- به‌دلیل استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت‌تر (با حداکثر اندازه ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر)، مقاومت سدهای RCD با میزان سیمان مشابه بیش‌تر از سدهای RCC می‌باشد.

۴- سد Jordao نمونه سدهای با مواد سیمانی کم حاوی «مصالح ریزدانه زیاد» (“high-fine” low-cementitious RCC dam) می‌باشد.



شکل ۱-۱- نمایش شماتیک طبقه‌بندی متداول سدهای وزنی بتن غلتکی با توجه به میزان مصرف مواد سیمانی و مقاومت بتن بدنه سد [۱۴]

شایان ذکر این‌که علاوه بر دسته‌بندی ارائه شده در جدول (۱-۲)، در دو دهه اخیر کاربرد بتن غلتکی در سدهای بتنی قوسی - وزنی و حتی سدهای بتنی قوسی، به خصوص در کشور چین مطرح شده و تعدادی از این نوع سد نیز در دست مطالعه و اجرا می‌باشد. با توجه به هدف و محدوده شمول تعریف شده، این راهنمای طراحی در برگیرنده مسایل و

تکنیک‌های طراحی و اجرایی خاص سدهای قوسی و قوسی- وزنی بتن غلتکی و همچنین سدهای وزنی با مواد سیمانی خیلی کم (سدهای خاک سیمان یا CSG) نمی‌باشد.

از آنجا که دانش و تکنولوژی سدهای وزنی بتن غلتکی در حال رشد و تکامل می‌باشد، کشورهای مختلف در مواجهه با مشکلات و محدودیت‌های غالب ساختگاه‌های سدسازی خود، امکانات و منابع در دسترس، و متناسب با سطح ایمنی و استاندارد مد نظر، راهکارها و تکنیک‌های خاصی را پیشنهاد داده‌اند که البته این تکنیک‌ها در بوته عمل و آزمایش مستمرا پایش و به‌روز شده و می‌شوند. گاهی اوقات تکنیک‌های طراحی و اجرایی تقریبا مشابه به‌دلیل ارائه و تجربه در کشورهای مختلف، با نام‌ها و یا تحت عنوان و روش منتسب به کشورهای پیشرو در این زمینه (چین، ژاپن، برزیل، اسپانیا و آمریکا) ارائه شده‌اند. در این خصوص باید توجه داشت که الگو گرفتن از تجربیات صرفا یک کشور، یا اتکا به یک روش و تکنیک ارائه شده در این زمینه صحیح نبوده و با توجه به این‌که شرایط هر پروژه سدسازی بسته به اهداف، وضعیت طبیعی ساختگاه، ابعاد (ارتفاع و حجم) و سطح ایمنی عملکرد مورد انتظار از سد، و مصالح و امکانات بومی و در دسترس در منطقه پروژه، منحصر به‌فرد می‌باشد، راه حل و تکنیک مناسب برای هر پروژه باید انتخاب گردد.

رویکرد طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی تا حد زیادی متاثر از شرایط و نحوه اجرای سد می‌باشد. با توجه به روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی، تعداد زیادی درز اجرایی افقی بین لایه‌های نسبتا نازک بتن‌ریزی در بدنه سد ایجاد می‌شوند. تعداد این درزها و نحوه آماده‌سازی و کنترل کیفی آن‌ها تاثیر تعیین‌کننده‌ای در نفوذپذیری آن‌ها و ایجاد و توسعه فشار برکنش در بدنه سد و همچنین مقاومت کششی و برشی (چسبندگی) درزهای اجرایی مذکور داشته و بر این اساس نحوه رفتار و پایداری کلی بدنه سد تا حد زیادی متاثر از کیفیت و نحوه اجرای درزهای اجرایی افقی خواهد بود. طبیعتا اعمال مبانی و مشخصات اجرایی و کنترل کیفی سخت‌گیرانه برای آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی، با توجه به تعداد زیاد آن‌ها در بدنه سد، نسبتا زمان‌بر بوده و به نوبه خود می‌تواند مزایای سرعت اجرا و کم‌هزینه بودن سدهای وزنی بتن غلتکی را تا حدی تحت‌الشعاع قرار دهد. از سوی دیگر، در شرایطی که تمهید خاصی در آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی بدنه سد لحاظ نگردد، با توجه به کاهش مقاومت کششی و برشی درزهای اجرایی افقی و هم‌زمان ایجاد و توسعه فشار برکنش در جسم بدنه سد، مقطع سد باید برای تامین شرایط پایداری عریض‌تر طراحی گردد. در این شرایط، اجرای یک المان آب‌بند در رویه بالادست سد می‌تواند برای کنترل نفوذ آب و حذف فشار برکنش در جسم بدنه سد موثر باشد.

در هر حال، در شرایطی که تمهید خاصی در آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی بدنه سد لحاظ نگردد نیز برنامه زمان‌بندی اجرا و هزینه سدهای وزنی بتن غلتکی متاثر از ضرورت افزایش احجام بدنه سد، افزایش خواهد یافت. بر اساس شرایط فوق، به طور کلی دو رویکرد مختلف زیر در طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی رایج می‌باشد:

- **رویکرد مبتنی بر «طراحی همسان بدنه سد»**: در این رویکرد طراحی، کیفیت اجرا و طرح اختلاط بتن غلتکی و تمهیدات اجرایی و کنترل کیفی درزهای اجرایی افقی به‌نحوی در نظر گرفته می‌شود که «جسم سد به طور یکپارچه نفوذناپذیر» گردد.

- **رویکرد مبتنی بر «طراحی ناهمسان بدنه سد»**: در این رویکرد طراحی، مشابه با تکنیک طراحی سدهای خاکی با رویه بتنی، یک «المان آب‌بند» در رویه بالادست سد برای تامین آب‌بندی بدنه سد طراحی شده و ضوابط و تمهیدات طراحی و اجرایی بسیار ساده‌تری برای کیفیت اجرای بتن غلتکی (از بعد تراکم و نفوذپذیری) و تمهیدات آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی لحاظ می‌گردد. در این روش طراحی، عملا جسم بدنه سد به صورت ناهمسان طراحی و اجرا می‌گردد. حالت حدی این رویکرد طراحی منجر به طرح ایده طراحی سدهای خاک - سیمان یا CSG (Cemented Sand and Gravel) و سدهای FSHD (Face Symmetrical Hardfill Dam) گشته است.

در قالب دو رویکرد کلی فوق، روش‌های طراحی و اجرایی متعددی در کشورهای مختلف، به خصوص برای سدهای با ارتفاع کم و متوسط، ابداع و ارائه شده‌اند. بر اساس تجربیات بین‌المللی، این تنوع و انعطاف‌پذیری تکنیک‌های اجرایی در سدهای وزنی بتن غلتکی بستر بررسی و ارائه گزینه‌ها و راهکارهای اجرایی مناسب را در مرحله برگزاری مناقصه توسط پیمانکاران حرفه‌ای فراهم آورده و در غالب موارد پیشنهادهای بهینه پیمانکاران می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و اقتصادی‌تر شدن پروژه گردد.

با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود در کشورها، بعضی از روش‌های اجرایی سدهای وزنی بتن غلتکی به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند به‌گونه‌ای که این روش‌ها با نام این کشورها شناخته می‌شوند. برای نمونه، به تکنیک اجرایی سدهای با مواد سیمانی کم حاوی «مصالح ریزدانه زیاد» (low-cementitious RCC dam "high-fine") می‌توان اشاره کرد که با توجه به نبود یا حجم کم معادن پوزولان‌های طبیعی (و بعد مسافت‌های حمل این مصالح) در کشور برزیل، توسط مهندسین و پیمانکاران این کشور طراحی و توسعه یافته است. در این تکنیک، با هدف جبران کمبود مصالح خمیری در بتن، به‌جای افزودن سیمان یا پوزولان، حجم مصالح ریزدانه به‌نحوی افزایش می‌یابد که نهایتا درصد مصالح خمیری بهینه در بتن حاصل گردد.

ابداع و توسعه روش طراحی و اجرای سدهای غلتکی کوبیده (Rolled-Concrete Dam-RCD) نیز یک نمونه بارز از تکنیک‌های ویژه توسعه یافته متناسب با شرایط کشور ژاپن می‌باشد. قبل از توسعه فراگیر سدهای وزنی بتن غلتکی، متخصصین و پیمانکاران حرفه‌ای کشور ژاپن به‌منظور کاهش احجام قالب‌بندی درزهای انقباضی قائم و بهبود شرایط ایمنی کار در زمان اجرای سدهای بتنی وزنی متعارف، روش اجرای پیوسته بتن بدنه سد (Extended Layer Construction Method - ELCM) را ابداع نموده و در تعدادی از سدهای بتنی وزنی کوتاه (و یا در ترازهای فوقانی سدهای بلند) از این روش استفاده می‌کردند. در این روش بتن بدنه سد در بلوک‌های مجاور (در لایه‌هایی با ضخامت حدود ۱/۵ متر) به صورت یکپارچه اجرا شده و پس از تراکم بتن، برای به حداقل رساندن ریسک ترک‌های حرارتی در بدنه سد درزهای انقباضی در فواصل حدود ۱۵ تا ۲۰ متر با ابزارهای مناسب ایجاد می‌گردید. با این حال در این روش برای دستیابی به تراکم مطلوب و بهینه بتن، از تکنیک‌ها و ابزارهای متعارف ویبره استفاده می‌گردید. با مطرح شدن ایده سدهای وزنی بتن غلتکی در سطح بین‌المللی، پیمانکاران و متخصصین کشور ژاپن با تلفیق مبانی طراحی و اجرایی سدهای وزنی بتن غلتکی با روش اجرایی ELCM در سدهای بتنی وزنی متعارف، تکنیک و روش طراحی و

اجرایی سدهای غلتکی کوبیده (RCD) را ابداع و تجربه نمودند. در این روش، مزیت اجرایی و تکنولوژیکی موجود در کشور ژاپن؛ که صرفه اقتصادی استفاده از ماشین‌آلات سنگین برای حمل، پخش بتن در حجم بالا و گسترده و تراکم بتن با سنگ‌دانه‌های درشت‌تر (با حداکثر ابعاد ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر) می‌باشد؛ و همچنین شرایط طبیعی نسبتا سخت و خشن این کشور از بعد پتانسیل لرزه‌خیزی و تغییرات زیاد دمایی در فصل‌های سرد و گرم سال، توأما لحاظ شده است. صرفه اقتصادی استفاده از ماشین‌آلات نسبتا پیشرفته و سنگین در عملیات اجرایی سبب می‌گردید که اجرای چند لایه بتن بدنه سد به صورت بدون وقفه و در یک بازه زمانی مناسب امکان‌پذیر شده و سپس تراکم بتن در این چند لایه به صورت هم‌زمان میسر گردد. در این شرایط عملا فواصل درزهای اجرایی افقی، که مهم‌ترین صفحات ضعیف در بدنه سد می‌باشند، از مقدار متداول ۳۰ سانتی‌متر در سدهای RCC به حدود ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر در سدهای RCD افزایش یافته و تعداد این درزها نیز به همان نسبت کم‌تر می‌گردید. از سوی دیگر، با توجه به شرایط محیطی سخت و پتانسیل لرزه‌خیزی بالا، در سدهای RCD تمهیدات نسبتا سختگیرانه‌ای برای آماده‌سازی سطوح درزهای اجرایی افقی، و آب‌بندی درزهای انقباضی قائم در نظر گرفته شده و علاوه بر این بتن رویه‌های بالادست و پایین‌دست با ضخامت حدود ۲/۰ تا ۳/۰ متر به صورت متعارف اجرا می‌گردد. با توجه به این تمهیدات و تکنیک‌ها، نمای ظاهری نهایی سدهای غلتکی کوبیده مشابه سدهای وزنی متعارف بوده و سرعت اجرای آن‌ها حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد در مقایسه با سدهای وزنی متعارف افزایش می‌یابد [۱۳].

۱-۳- روند تغییرات طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی

بررسی روند تغییرات و اقبال طراحان به انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی در سطح دنیا می‌تواند در انتخاب نوع و رویکرد طراحی مناسب در طرح‌ها مفید و راهگشا باشد. در جدول (۱-۳) تعداد و نوع سدهای وزنی بتن غلتکی ساخته شده در دنیا بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده در جدول (۱-۲)، ارائه شده‌اند. همچنین نحوه تغییرات آمار انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [۱۳ و ۱۵].

سدهای وزنی بتن غلتکی طراحی و ساخته شده تا انتهای سال ۱۹۸۶ را، که شامل ۱۵ سد می‌گردد، می‌توان نسل اول سدهای وزنی بتن غلتکی در نظر گرفت. در جدول (۱-۴) نتایج تحلیل آماری تعداد سدهای ساخته شده در دوره‌های منتهی به سال ۱۹۸۶، دوره ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۸، و دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰، بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

بر اساس بررسی آماری فوق مشخص می‌گردد که در فرایند رشد و توسعه تکنولوژی سدهای بتن غلتکی، تمایل طراحان به سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد به نحو بارزی افزایش یافته و متناسبا درصد سدهای با مواد سیمانی کم و متوسط کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در خصوص این تغییر رویکرد در گذر زمان و گرایش بیش‌تر به سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد چهار دلیل زیر را می‌توان برشمرد [۱۳]:

۱- **درک و تجربه بیش‌تر نسبت به مشخصات و شاخص‌های کیفی بتن غلتکی**. بر اساس نتایج آزمایشات انجام

یافته بر روی نمونه‌های اخذ شده از انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی، مشخص شده است که مشخصات رفتاری و شاخص‌های کیفیت بتن در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد بسیار مطلوب بوده و با گذشت زمان کیفیت این نوع بتن غلتکی بهبود می‌یابد.

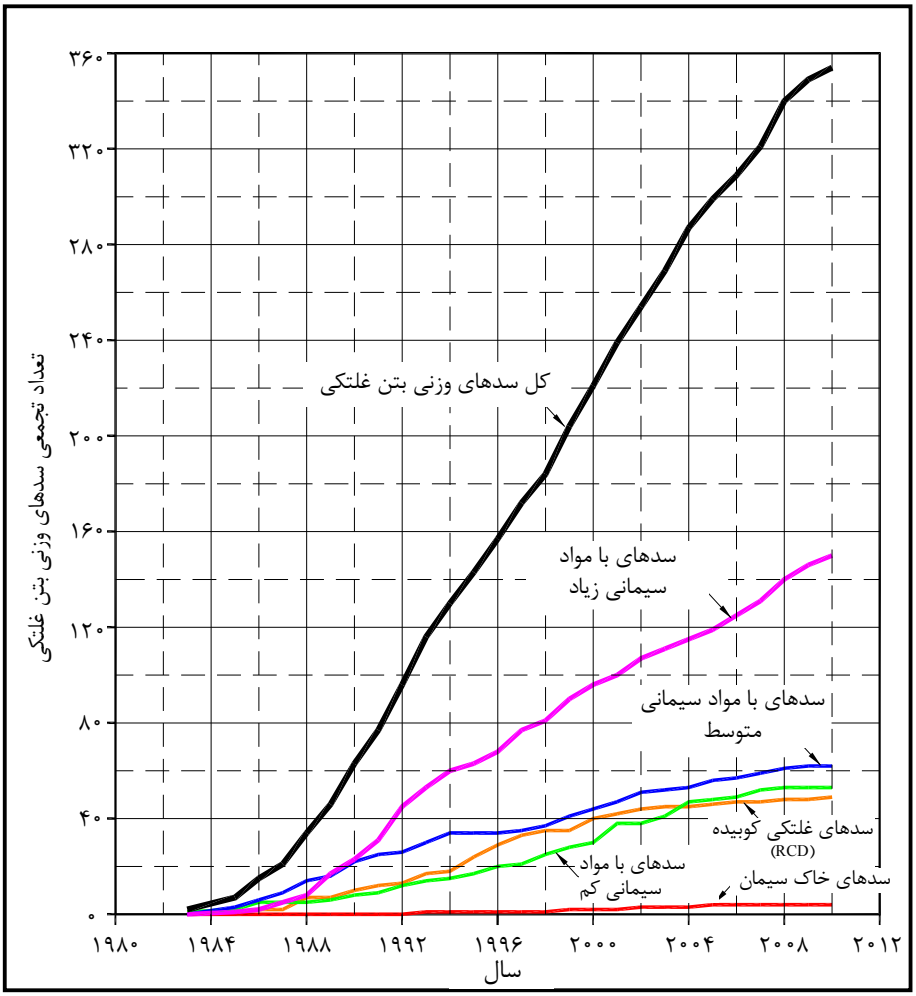
۲- **افزایش ارتفاع و اهمیت سدهای وزنی بتن غلتکی.** تا پایان سال ۱۹۹۰ فقط یک سد وزنی بتن غلتکی با ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر در دنیا ساخته شده بود (سد Tamagawa)، در حالی که تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی بلند در سال‌های بعد به نحو بارزی افزایش یافته است. طبیعتا با افزایش فزاینده تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی با ارتفاع زیاد، سطح عملکرد کیفی و استاندارد کارایی مد نظر برای این سدها نیز افزایش یافته است.

جدول ۱-۳- تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی ساخته شده در سال‌های مختلف بر حسب نوع مصالح بتن غلتکی [۱۳]

سال تکمیل	سد خاک سیمان (Hardfill)		سد غلتکی کوبیده (RCD)		سد وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی						تعداد کل	
					کم		متوسط		زیاد			
	در سال	تجمعی	در سال	تجمعی	در سال	تجمعی	در سال	تجمعی	در سال	تجمعی	در سال	تجمعی
۱۹۸۱ / ۱۹۸۳	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۲
۱۹۸۴ / ۱۹۸۵	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۳	۳	۱	۱	۵	۷
۱۹۸۶	۰	۰	۱	۲	۳	۵	۳	۶	۱	۲	۸	۱۵
۱۹۸۷	۰	۰	۰	۲	۰	۵	۳	۹	۳	۵	۶	۲۱
۱۹۸۸	۰	۰	۵	۷	۰	۵	۵	۱۴	۳	۸	۱۳	۳۴
۱۹۸۹	۰	۰	۰	۷	۱	۶	۲	۱۶	۹	۱۷	۱۲	۴۶
۱۹۹۰	۰	۰	۳	۱۰	۲	۸	۶	۲۲	۶	۲۳	۱۷	۶۳
۱۹۹۱	۰	۰	۲	۱۲	۱	۹	۳	۲۵	۸	۳۱	۱۴	۷۷
۱۹۹۲	۰	۰	۱	۱۳	۳	۱۲	۱	۲۶	۱۴	۴۵	۱۹	۹۶
۱۹۹۳	۱	۱	۴	۱۷	۲	۱۴	۴	۳۰	۸	۵۳	۲۰	۱۱۶
۱۹۹۴	۰	۱	۱	۱۸	۱	۱۵	۴	۳۴	۷	۶۰	۱۴	۱۳۰
۱۹۹۵	۰	۱	۶	۲۴	۲	۱۷	۰	۳۴	۳	۶۳	۱۳	۱۴۳
۱۹۹۶	۰	۱	۵	۲۹	۳	۲۰	۰	۳۴	۵	۶۸	۱۴	۱۵۷
۱۹۹۷	۰	۱	۴	۳۳	۱	۲۱	۱	۳۵	۹	۷۷	۱۵	۱۷۲
۱۹۹۸	۰	۱	۲	۳۵	۴	۲۵	۲	۳۷	۴	۸۱	۱۲	۱۸۴
۱۹۹۹	۱	۲	۰	۳۵	۳	۲۸	۴	۴۱	۹	۹۰	۲۰	۲۰۴
۲۰۰۰	۰	۲	۵	۴۰	۲	۳۰	۳	۴۴	۶	۹۶	۱۷	۲۲۱
۲۰۰۱	۰	۲	۲	۴۲	۸	۳۸	۳	۴۷	۴	۱۰۰	۱۸	۲۳۹
۲۰۰۲	۱	۳	۲	۴۴	۰	۳۸	۴	۵۱	۷	۱۰۷	۱۵	۲۵۴
۲۰۰۳	۰	۳	۱	۴۵	۳	۴۱	۱	۵۲	۴	۱۱۱	۱۵	۲۶۹
۲۰۰۴	۰	۳	۰	۴۵	۶	۴۷	۱	۵۳	۴	۱۱۵	۱۸	۲۸۷
۲۰۰۵	۱	۴	۱	۴۶	۱	۴۸	۳	۵۶	۴	۱۱۹	۱۲	۲۹۹
۲۰۰۶	۰	۴	۱	۴۷	۱	۴۹	۱	۵۷	۶	۱۲۵	۱۰	۳۰۹
۲۰۰۷	۰	۴	۰	۴۷	۳	۵۲	۲	۵۹	۶	۱۳۱	۱۲	۳۲۱
۲۰۰۸	۰	۴	۱	۴۸	۱	۵۳	۲	۶۱	۹	۱۴۰	۱۹	۳۴۰
۲۰۰۹	۰	۴	۰	۴۸	۰	۵۳	۱	۶۲	۶	۱۴۶	۹	۳۴۹
۲۰۱۰	۰	۴	۱	۴۹	۰	۵۳	۰	۶۲	۴	۱۵۰	۵	۳۵۴

جدول ۱-۴- نتایج تحلیل آماری سدهای ساخته شده در دوره‌های منتهی به سال ۱۹۸۶، دوره ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۸، و دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰ [۱۳]

دوره	تعداد سدهای RCC ساخته شده در دوره	درصد سدهای Hardfill	درصد سدهای RCD	درصد سدهای با مواد سیمانی کم	درصد سدهای با مواد سیمانی متوسط	درصد سدهای با مواد سیمانی زیاد
تا انتهای ۱۹۸۶	۱۵	۰	۱۳	۳۳	۴۰	۱۳
۱۹۸۷ تا ۱۹۹۸	۱۶۹	۱	۲۰	۱۲	۱۸	۴۷
۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰	۱۸۵	۲	۹	۱۸	۱۷	۳۸



شکل ۱-۲- تعداد سدهای وزنی بتن غلتکی ساخته شده در سال‌های مختلف بر حسب نوع مصالح بتن غلتکی [۱۳]

۳- **تفاوت کاربری سدهای وزنی بتن غلتکی.** تعداد کمی از سدهای وزنی بتن غلتکی اولیه با هدف تولید انرژی برق‌آبی احداث شده بودند در حالی که در دهه‌های اخیر تعداد قابل توجهی از سدهای وزنی بتن غلتکی با هدف تولید انرژی برق‌آبی احداث شده‌اند. در این نوع سدها، مخزن سد در دوره بهره‌برداری غالبا پر بوده و نتیجتا کارایی و قابلیت اعتماد بالاتری از بعد نفوذناپذیری بدنه سد مد نظر می‌باشد.

۴- **شاخص‌های اقتصادی بهتر.** با توجه به مشخصات رفتاری و مقاومتی مطلوب‌تر بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد در مقایسه با بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، هندسه مقطع عرضی سد را در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد، به خصوص در ساختگاه‌های با خطر لرزه‌خیزی قابل توجه، می‌توان کم‌عرض‌تر و کوچک‌تر طراحی

نمود. در این شرایط بررسی‌ها و تجربیات بین‌المللی به‌دست آمده نشان داده است که با یک سطح اطمینان یکسان، سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد، علیرغم هزینه واحد بیش‌تر بتن غلتکی، غالبا هزینه کلی کم‌تری (با در نظر گرفتن هزینه بتن، هزینه آماده‌سازی نمای ظاهری، هزینه آب‌بندی بدنه و ...) داشته‌اند.

نتایج فوق نشان می‌دهد که بر خلاف تصور اولیه، کاهش میزان مصرف مواد سیمانی در سدهای وزنی بتن غلتکی در همه موارد الزاما منجر به اقتصادی‌تر شدن (کاهش هزینه‌ها) و کاهش زمان اجرای پروژه نخواهد شد. این موضوع به نوبه خود بر اهمیت توجه به شرایط ویژه هر پروژه، شامل هدف و نوع کاربری مورد انتظار، شرایط ژئوتکنیکی و محدودیت‌های فنی ساختگاه، نوع مصالح و منابع قرضه در دسترس، ارتفاع و احجام سد، و ... در انتخاب نوع سد مناسب بتن غلتکی تاکید می‌نماید.

در پیوست ۱ این راهنما، مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان به منظور آشنایی با حدود مقادیر و رویکردهای مختلف در طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی ارائه شده است.

فصل ۲

مشخصات مصالح

۲-۱- کلیات

مصالح مصرفی در بتن غلتکی شامل مصالح سیمانی (سیمان پرتلند و پوزولان یا افزودنی‌های معدنی)، سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه)، آب و مواد افزودنی می‌گردد. مهم‌ترین ویژگی بتن غلتکی در مقایسه با بتن متعارف، ضرورت ایستایی و انسجام آن در برابر وزن غلتک‌های متراکم کننده بتن می‌باشد. همچنین دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و میزان مصالح خمیری بتن غلتکی باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که تراکم‌پذیری مطلوب در بتن تحت شرایط فوق حاصل گردد.

معیار اصلی در انتخاب نوع مصالح و طرح اختلاط بتن غلتکی، تولید یک بتن پایدار می‌باشد که در شرایط اجرایی و بهره‌برداری (و نه صرفا در آزمایشگاه) از کارایی‌ها و رواداری‌های تعیین شده در خصوص مقاومت، دوام، و نفوذپذیری برخوردار باشد. در انواع مختلف سدهای بتن غلتکی، با توجه به ماهیت و فلسفه طراحی آن‌ها، طیف وسیعی از سنگ‌دانه‌ها شامل سنگ‌دانه‌های با حداقل دانه‌بندی و کنترل کیفی (در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم) تا سنگ‌دانه های کاملا دانه‌بندی شده و با کیفیت مشابه با مشخصات مورد نظر در بتن‌های متعارف (در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط و زیاد) مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر این اساس، با توجه به فلسفه پایه سدهای بتن غلتکی مبنی بر کاهش هزینه‌ها و سهولت اجرا، در خصوص سنگ‌دانه ها (و سایر مصالح) مصرفی در بتن غلتکی باید منابع قرضه (و یا تامین) مختلف مصالح در محدوده منطقه پروژه شناسایی شده و متناسب با شرایط مذکور و سایر اهداف و ملاحظات مربوط به هر پروژه، بهترین و اقتصادی‌ترین منابع تامین مصالح انتخاب گردند.

۲-۲- مصالح سیمانی

بتن غلتکی را می‌توان با انواع مختلف سیمان و یا به طور معمول‌تر، با ترکیبی از سیمان و پوزولان تولید کرد. حجم مصالح سیمانی مورد استفاده در سدهای بتن غلتکی از حدود حداقل ۶۰ kg/m^3 (در سد Urugua-i در آرژانتین) تا حدود حداکثر ۲۴۸ kg/m^3 (در سد Upper Stillwater در آمریکا) متغیر می‌باشد. در سدهای بتن غلتکی کوبیده (RCD) در ژاپن، تغییرات میزان مصالح سیمانی مورد استفاده در بتن غلتکی محدودتر بوده و به طور معمول حدود ۱۲۰ تا ۱۳۰ kg/m^3 می‌باشد.

در بسیاری از سدهای بتن غلتکی، درصد قابل توجهی از مصالح سیمانی مصرفی را انواع مختلف پوزولان یا افزودنی‌های معدنی، به خصوص پوزولان‌های با میزان آهک کم (low-lime fly ash)، تشکیل داده‌اند. استفاده از پوزولان (افزودنی‌های معدنی) به‌عنوان بخشی از مصالح سیمانی در بتن غلتکی، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه، موجب کاهش نرخ تولید حرارت هیدراتاسیون در سنین اولیه بتن (به دلیل کاهش میزان مصرف سیمان) می‌گردد. در این شرایط تنش‌ها (کرنش‌ها)ی حرارتی اولیه در بتن کاهش یافته و متناسبا ریسک ایجاد ترک‌های حرارتی در بتن در سنین اولیه به‌مراتب کم‌تر خواهد بود. علاوه بر این، با توجه به طولانی‌تر شدن فرایند واکنش هیدراتاسیون (رشد تدریجی مقاومت بتن)،

شرایط مناسب‌تری برای ایجاد چسبندگی شیمیایی در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی فراهم شده و یکپارچگی بتن بهتر تامین می‌گردد.

افزودن پوزولان یا افزودنی‌های معدنی به طرح اختلاط بتن غلتکی ممکن است به صورت مستقیم و یا با استفاده از «سیمان پوزولانی» انجام گیرد. درصد وزنی مواد پوزولانی نسبت به کل مواد سیمانی مورد استفاده در بتن‌های غلتکی در سدهای ساخته شده از حدود ۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر بوده است ولی مقادیر معمول‌تر این نسبت در انواع مختلف سدهای بتن غلتکی حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. علاوه بر این، بررسی طرح اختلاط سدهای بتن غلتکی ساخته شده نشان می‌دهد که درصد وزنی مواد پوزولانی یا افزودنی‌های معدنی (نسبت به کل مواد سیمانی) در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، کم‌تر بوده و در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط و زیاد، این نسبت به تدریج بیش‌تر می‌گردد. به بیان دیگر، میزان حداکثر مصرف سیمان در طیف وسیعی از سدهای بتن غلتکی تقریبا مشابه بوده و افزایش میزان مواد سیمانی در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط و زیاد، با افزایش انواع مختلف مواد پوزولانی یا افزودنی‌های معدنی تامین می‌گردد.

۲-۲-۱- سیمان

استفاده از انواع مختلف سیمان در ساخت بتن غلتکی امکان‌پذیر می‌باشد ولی استفاده از سیمان‌های با نرخ تولید حرارت کم‌تر نظیر سیمان پرتلند با گرمازایی متوسط (ASTM C150, Type II)، سیمان پرتلند پوزولانی (ASTM C150, Type IP)، و سیمان پرتلند با سرباره کوره آهن‌گدازی (ASTM C150, Type IS) در تولید بتن غلتکی در مصارف حجیم نظیر سدها سودمندتر می‌باشد. بر همین اساس، استفاده از سیمان زودگیر (ASTM C150, Type III) در سدهای بتن غلتکی (مشابه با سایر انواع سدهای بتنی) به دلیل نرخ حرارت‌زایی اولیه بالای آن و نیز کوتاه شدن فاصله زمانی بین اجرای لایه‌های متوالی بتن، معمول نبوده و توصیه نمی‌گردد. با این حال در انتخاب نوع سیمان علاوه بر ملاحظات فنی، ملاحظات اقتصادی تهیه سیمان نیز باید در نظر گرفته شود. در برخی موارد در نظر گرفتن یک سیمان ویژه با حرارت هیدراتاسیون پایین که به صورت محلی در دسترس نیست، به خصوص در پروژه‌های کوچک و متوسط، ممکن است به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نگردد [۱۶، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۱۹].

در شرایط محیطی مواجه با حملات شیمیایی سولفات و پتانسیل واکنش قلیایی با سنگ‌دانه‌های معین، انتخاب نوع مناسب سیمان باید بر اساس روش‌ها و ضوابط استانداردهای بتن معمولی صورت پذیرد.

۲-۲-۲- مواد افزودنی معدنی (پوزولان‌ها)

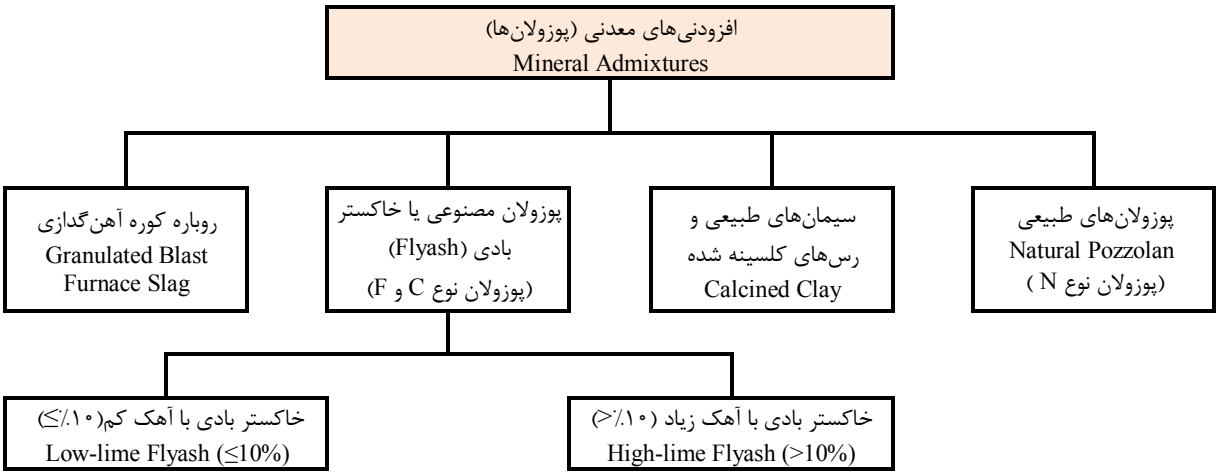
مواد افزودنی معدنی (Mineral Admixtures) که به صورت طبیعی و یا از بازیافت محصولات زائد کارخانجات صنعتی قابل تهیه می‌باشند، موادی هستند که پس از آسیاب و پودر شدن برای بهبود خواص بتن در حالت خمیری یا سخت

شده به‌کار می‌روند. از نظر پتانسیل واکنش شیمیایی، برخی از این مواد «بی‌اثر» هستند، گروهی دارای خاصیت «پوزولانی»، گروهی دارای خاصیت «سیمانی»، و برخی نیز به طور توام دارای خواص سیمانی و پوزولانی هستند.

مواد افزودنی معدنی «بی‌اثر» قابلیت هیچ‌گونه واکنش شیمیایی نداشته و اثر آن‌ها به صورت افزایش خاصیت خمیری و کارایی بتن می‌باشد. این مواد در واقع «پودر سنگ» حاصل از آسیاب سنگ‌های کوارتز، دولومیت، سنگ آهک، مرمر، گرانیت و ... هستند.

مواد افزودنی معدنی که دارای خاصیت «پوزولانی» هستند (پوزولان‌ها) بنا به تعریف ASTM C618 موادی سیلیسی یا سیلیسی آلومینیومی هستند که به تنهایی قابلیت سیمانته کردن ناچیزی دارند ولی در صورت وجود رطوبت، واکنش شیمیایی با هیدروکسید کلسیم در درجه حرارتهای معمولی انجام داده و به ترکیباتی با خواص سیمانته کننده تبدیل می‌گردند.

مواد افزودنی معدنی که دارای خاصیت «سیمانی» هستند موادی هستند که به تنهایی در صورت وجود رطوبت، قابلیت سیمانته کردن دارند. از همین تعاریف مشخص می‌گردد که با توجه به نیاز به رطوبت برای انجام واکنش، پوزولان‌ها و سیمان‌های طبیعی در مخلوط‌های بتن با درصد رطوبت بیش‌تر، عملکرد بهتری دارند. دسته‌بندی مواد افزودنی معدنی بتن با توجه به منابع تامین و خواص واکنش‌زایی آن‌ها (بر اساس استانداردهایی نظیر ASTM C686) در شکل (۲-۱) نشان داده شده و توضیحات مختصری در هر مورد در ادامه ارائه شده است.



شکل ۲-۱- دسته‌بندی مواد افزودنی معدنی بتن با توجه به منابع تامین و خواص واکنش‌زایی آن‌ها [۱۳]

الف- پوزولان‌های طبیعی یا نوع N

غالب پوزولان‌های طبیعی دارای منشا آتشفشانی هستند. این مواد (خاکسترهای) آتشفشانی عموما شامل پامیس‌ها، توف‌ها، چرت‌های اپال، و شیل‌ها می‌شوند. گروهی از مواد آتشفشانی که اسیدی هستند، حالت شیشه‌ای دارند و حاوی کانی‌های زئولیت می‌باشند، معمولا خاصیت پوزولانی دارند.

علاوه بر رسوبات آتشفشانی، مواد (سنگ‌های) رسوبی که میل ترکیبی با آهک دارند شامل رس‌ها و خاک‌های دیاتمه‌ای می‌باشند. خاک‌های دیاتمه‌ای منشا آلی داشته و متشکل از اسکلتون‌های سیلیسی بسیار ریز هستند که به‌تدریج در اعماق آب دریاها رسوب کرده و شکل گرفته‌اند.

ب- سیمان‌های طبیعی و رس‌های کلسینه (یا تکلیس) شده

سیمان‌های طبیعی مواد سیمانی هستند که از کلسینه کردن (یا تکلیس) سنگ آهک آرژیلی تا قبل از نقطه ذوب و سپس نرم‌آسیاب نمودن آن به‌دست می‌آیند. از کلسینه کردن (یا تکلیس) خاک رس در درجه حرارت پایین نیز پوزولان نسبتا مرغوبی به‌دست می‌آید که به آن متاکائولین (Metakaolin) می‌گویند. متاکائولین را می‌توان مرز میان پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در نظر گرفت.

ج- پوزولان مصنوعی نوع F و C یا خاکستر بادی

پوزولان مصنوعی نوع F یا خاکستر بادی نوعی پوزولان مصنوعی است که از خاکستر باقی‌مانده از احتراق پودر زغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی به‌دست می‌آید. پوزولان مصنوعی نوع C نوعی خاکستر بادی است که از احتراق لیگنیت به‌دست می‌آید و علاوه بر خاصیت پوزولانی، به علت داشتن اکسید کلسیم بیش‌تر، خاصیت سیمانی نیز دارد.

د- روباره کوره آهن‌گدازی

روباره کوره آهن‌گدازی از سرد شدن ناگهانی تفاله‌های مذاب کوره‌های ذوب آهن به‌دست می‌آید که معمولا حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد اکسید کلسیم دارد و به همین علت دارای خواص توام سیمانی و پوزولانی می‌باشد. مشخصات فنی لازم برای مصرف روباره کوره آهن‌گدازی نرم آسیاب شده در بتن و ملات در استاندارد ASTM C989 ارائه شده است.

علاوه بر مواد فوق، مواد پوزولانی فعال‌تری نظیر دوده سیلیسی و خاکستر پوست برنج نیز وجود دارند. دوده سیلیسی ماده پوزولانی بسیار فعالی است که محصول فرعی حاصل از کوره‌های الکتریکی در فرایند تولید آلیاژهای سیلیسیم (به خصوص آلیاژ فروسیلیس) می‌باشد. همچنین با توجه به ارزش حرارتی پوست برنج، در برخی موارد از این ماده به‌عنوان جایگزین سوخت در نیروگاه‌های حرارتی استفاده می‌گردد. خاکستر حاصل از اشتعال پوست برنج نیز حاوی مقادیر زیادی سیلیسیم بوده و خاصیت پوزولانی بسیار زیادی دارد. با توجه به پتانسیل واکنش‌زایی نسبتا بالای این گروه از مواد پوزولانی، استفاده از این مواد در بتن محدود به موارد خاص بوده و در بتن‌های حجیم غلتکی معمولا از آن‌ها استفاده نمی‌شود.

تحقیقات و مطالعات نسبتا قابل توجهی برای شناسایی و استحصال منابع انواع مختلف مواد پوزولانی و سیمانی در ایران انجام یافته است. بر اساس یافته‌های ارائه شده در این مراجع، کیفیت پوزولان‌های طبیعی ایران به طور کلی نسبتا مطلوب بوده و در اکثر نواحی ایران معادن پوزولان نسبتا مناسب در دسترس می‌باشند که مهم‌ترین آن‌ها در جدول (۲-۱) ارائه شده‌اند.

جدول ۲-۱- معادن مواد پوزولانی و سیمانی طبیعی در ایران [۶]

شرح	منطقه
دیاتمیت، معمولا از سیلیس بی‌شکل (کانی اوپال)	ممقان اذر شهر
پامیس با ترکیب ریولیت تا تراکیت	سبلان
توف آتشفشانی حاوی کانیهای بیوتیت، کلریت و همچنین فلدسپاتها با منشا توف سبز کرج و پتاسیم تجزیه شده	تراس (جاجرود)
سنگ آذرین درونی	میانه
توف آتشفشانی با ترکیب تراکیتی تا ریولیتی	بستان آباد
پامیس متخلخل و سبک	تفتان
سنگ‌های آذر آواری	تفتان- بزمان
بوکسیت	کهکیلویه و بویر احمد
سنگ‌های آذر آواری کوه‌های هزار و لاله‌زار	اطراف جیرفت
زئولیت	قلعه عسگر کرمان

از نظر استفاده در بتن، مناسب‌ترین گزینه مواد افزودنی معدنی، خاکستر بادی با آهک کم (Low-Lime Flyash) می‌باشد به شرط این‌که این ماده با یک هزینه مناسب و در نزدیکی محل پروژه قابل تامین باشد. در صورت در دسترس نبودن خاکستر بادی با آهک کم، استفاده ترکیبی از روباره کوره آهن‌گدازی و مقداری خاکستر بادی با آهک زیاد مناسب‌ترین گزینه خواهد بود. در صورت نبود این مواد، استفاده از پوزولان‌های طبیعی باید مد نظر قرار گیرد. در شرایطی که هیچ یک از مواد پوزولانی فوق در دسترس نباشد، می‌توان با فرایند حرارت‌دهی و کلسینه کردن رس، مواد پوزولانی مورد نیاز را تولید نموده و در بتن استفاده کرد. آخرین گزینه نیز برای تکمیل مواد ریزدانه لازم در بتن، استفاده از مواد ریزدانه سنگی (بی‌اثر) غنی شده با سیلیس حاصل از نرم آسیاب کردن ماسه سنگ‌های کوارتزی، می‌باشد.

مواد افزودنی معدنی در بتن، از نظر کیفی به طور معمول سه شاخص «افت سرخ شدن»، «نرمی»، و «اندیس فعالیت پوزولانی» بررسی و کنترل می‌شوند. مراجع و استانداردهای ذیربط در این زمینه در تشریح هر یک از رده‌های مواد افزودنی معدنی معرفی شده‌اند.

بر اساس مراجع فوق، افت سرخ شدن، که میزان هیدراته شدن ماده افزودنی معدنی مورد نظر را نشان می‌دهد نباید از حدود ۵ تا ۶ درصد وزنی بیش‌تر باشد.

خواص فیزیکی ماده افزودنی معدنی، نظیر شکل و بافت و اندازه (نرمی) ذرات این مواد، تاثیر به سزایی در پتانسیل مشارکت این مواد در واکنش هیدراتاسیون در بتن دارند. بر اساس تجربه مشخص شده است ذرات با قطر بزرگ‌تر از الک شماره ۳۲۵ (۴۵ میکرون) معمولا نمی‌توانند مشارکت موثری در واکنش هیدراتاسیون در شرایط معمولی داشته باشند. بر این اساس، میزان نرمی یا دانه‌بندی ماده افزودنی معدنی باید به‌گونه‌ای باشد که حداکثر مواد باقی مانده آن بر روی الک شماره ۳۲۵ (۴۵ میکرون) بیش‌تر از ۲۰ درصد نباشد.

اندیس فعالیت پوزولانی ماده افزودنی معدنی در واقع نسبت مقاومت ملات تهیه شده با استفاده از مخلوط سیمان و ماده افزودنی معدنی مورد نظر به مقاومت ملات تهیه شده با سیمان می‌باشد. نتایج این آزمایش ها در تعیین و نهایی کردن طرح اختلاط بتن غلتکی با مشخصات و کارایی مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲-۳- سیمان پوزولانی (ASTM C150, Type IP) در ایران

با توجه به رشد سریع صنعت سدسازی و سایر صنایع زیربنایی در کشور از دهه ۱۳۷۰، نیاز به انواع مختلف سیمان بسیار افزایش یافت. در این خصوص، با توجه به تعدد سدهای در حال ساخت کشور در این دوره و نیاز این صنعت به مواد سیمانی با حرارات زایی پایین و همچنین به دلیل وجود شرایط شدید محیطی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان، و به دلیل کارایی مناسب پوزولان‌ها در کاهش حرارت‌زایی و مقاومت در برابر عوامل شیمیایی، تولید و استفاده از «سیمان پوزولانی» در کشور مورد توجه قرار گرفت. با این حال، مهم ترین چالش پیش‌روی این نیاز، نگرانی از عدم یکنواختی کیفیت پوزولان و در نتیجه نوسانات کیفیت سیمان پوزولانی تولید شده بود.

از دیدگاه تولید سیمان، استفاده از پوزولان با توجه به این‌که نیازی به پخت آن در داخل کوره نمی‌باشد و نیز به دلیل تسهیل فرایند آسیاب کردن سیمان، موجب کاهش هزینه مصرف انرژی (و کاهش تبعات زیست محیطی) و صرفه اقتصادی فرایند تولید می‌گردد. با توجه به شرایط فوق، و با توجه به این‌که در کارخانه‌های تولید سیمان حجم تولید زیاد می‌باشد، مطالعات شناسایی انواع مختلف و در دسترس پوزولان (که غالبا از منابع و معادن طبیعی استحصال می‌گردند) و نیز استقرار یک سیستم کنترل کیفی مناسب برای آن‌ها در کارخانه صرفه اقتصادی داشته و حتی در پاره‌ای موارد با توجه به حجم و کیفیت مناسب معادن طبیعی در دسترس، کارخانه‌های تولید سیمان می‌توانند امکان ارائه مستقیم پوزولان طبیعی با کیفیت مناسب و یکنواخت را داشته باشند (نظیر کارخانه سیمان خاش).

از سوی دیگر، با توجه به این که در تعداد قابل توجهی از کارگاه‌های سدسازی امکان تهیه پوزولان با کیفیت یکنواخت و مناسب و استفاده از آن در بتن غلتکی به صورت جداگانه وجود نداشته و یا ممکن است استقرار سیستم کنترل کیفی پوزولان های استحصال شده از معادن طبیعی از صرفه اقتصادی برخوردار نباشد، گزینه استفاده از سیمان پوزولانی برای تامین میزان پوزولان مناسب در بتن غلتکی راهکار بسیار مناسب از نظر فنی و اقتصادی خواهد بود.

با توجه به شرایط و ضرورت‌های فوق، استاندارد سیمان پوزولانی در ایران تدوین گردید و بر مبنای آن جایگزینی پوزولان تا ۴۰ درصد وزن سیمان در سیمان پوزولانی مجاز دانسته شد. بر این اساس، تولید سیمان‌های پوزولانی در ایران از دهه ۱۳۷۰ آغاز گردید و پس از افت و خیزهایی از سال‌های نخستین دهه ۱۳۸۰ رشد فزاینده‌ای یافت. در جدول (۲-۲) خلاصه‌ای از مشخصات سیمان‌های پوزولانی تولید شده در کارخانه‌های سیمان ایران و سابقه کاربرد آن‌ها در سدهای وزنی بتن غلتکی ارائه می‌گردد. شایان ذکر این‌که با توجه به تنوع منابع تامین پوزولان، کیفیت و مشخصات سیمان پوزولانی تولیدی در کارخانه‌ها در طی زمان یکسان نبوده و در مورد هر پروژه با توجه به احجام سیمان مورد نیاز، بررسی‌ها و مطالعات ویژه و مستقلی در خصوص منابع تامین سیمان پوزولانی (و پوزولان) باید به‌عمل آید.

جدول ۲-۲- سیمان‌های پوزولانی تولید شده در کارخانه‌های سیمان ایران و سابقه کاربرد آن‌ها در سدهای وزنی بتن غلتکی [۶]

کارخانه سیمان	نوع و معادن مواد افزودنی معدنی مورد استفاده	در صد پوزولان در سیمان تولیدی	خواص ویژه سیمان	موارد استفاده در سدها
آبیک	توف شیشه‌ای ریولیتی- ریوداسیتی، توف شیشه‌ای کرسیتال‌دار، توف سیلیسی متبلور، توف شیلی، توف کربناته، تراکی آندزیت، آهک توفی، بیومیکرایت	۱۵ تا ۳۰ درصد	افزایش مقاومت در برابر واکنش قلیایی- سیلیسی	
کردستان	توف برشی پامیس دار	۷ تا ۴۰ درصد		
ارومیه	توف سبز سازند کرج	۱۵ درصد		
خاش	پامیس در منطقه تفتان	ارائه پوزولان به صورت مجزا و سیمان پوزولانی تا ۳۰٪	پایداری در برابر واکنش قلیایی- سیلیسی	سد جگین
ایلام	توف شیشه‌ای			
غرب	توف بِرِشی پامیس دار در معدن دهگلان	۱۰ تا ۴۰ درصد	مقاوم در برابر حمله سولفات‌ها	
استهبان		۱۰ تا ۴۰ درصد	کاهش حرارت‌زایی	چشمه عاشق

۲-۲-۴- مواد ریزدانه بی‌اثر (پودر سنگ)

بنا به تعریف مواد ریزدانه به مصالح سنگی نرم آسیاب شده عبوری از الک ۲۰۰ (۷۵ میکرون) اطلاق می‌گردد. میزان مواد ریزدانه تاثیر تعیین‌کننده‌ای در تامین مصالح خمیری و تراکم‌پذیری بتن دارد. استفاده از مواد ریزدانه سبب پرشدن فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها شده و به همین جهت هم نفوذپذیری بتن سخت شده کاهش می‌یابد و هم پایداری مخلوط بتن را افزایش داده و مانع جداشدگی سنگ‌دانه ها از خمیر بتن می‌گردد. همچنین استفاده از مواد ریزدانه می‌تواند موجب افزایش خمیر بتن در حد لازم (بدون افزایش مواد سیمانی یا پوزولانی) شده و تراکم‌پذیری بتن را بهبود بخشد.

با این حال، افزایش بیش از حد لزوم مواد ریزدانه در بتن موجب کاهش کارایی، افت مقاومت بتن، افزایش آب مورد نیاز و متعاقب آن افزایش جمع‌شدگی بتن (که می‌تواند سبب ترک‌خوردن بتن گردد) و همچنین روانی بیش از حد مخلوط بتن گردد به‌گونه‌ای که فرایند متراکم کردن بتن را با مشکل مواجه سازد.

در مخلوط های بتن غلتکی برای جبران کمبود مواد ریزدانه سیمانی معمولا میزان بیش‌تری از مصالح ریزدانه (مواد ریزدانه سنگی) برای پرکردن تمامی فضای خالی سنگ‌دانه ها لازم می‌باشد. میزان مناسب مواد ریزدانه سنگی در مخلوط های بتن غلتکی به طور معمول حدود ۳ تا ۸ درصد حجم کل سنگ‌دانه‌های بتن است ولی در مواردی که به هر دلیل امکان استفاده از مواد پوزولانی در بتن غلتکی وجود نداشته یا مد نظر نباشد، میزان مصالح ریزدانه سنگی (پودر سنگ و ماسه ریزدانه) را می‌توان تا ۵ درصد افزایش داد.

عامل محدود کننده دیگر در استفاده از مصالح ریزدانه در بتن، جنس این ریزدانه ها و میزان چسبندگی و پلاستیسیته آن‌ها می‌باشد. ریزدانه‌های رسی (ریزدانه‌های دارای پلاستیسیته بالا) می‌توانند سبب افزایش آب مورد نیاز و افت مقاومت

شده و با ایجاد یک مخلوط چسبناک، اختلاط و تراکم بتن را با مشکل مواجه نمایند، به همین دلیل باید از افـزودن مـواد ریزدانه رسی و با پلاستیسیته بالا به بتن پرهیز نموده و یا میزان استفاده از این مواد در بتن را به حداقل ممکن تقلیل داد.

۲-۳- سنگ‌دانه

سنگ‌دانه‌ها بیش از ۷۵ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند و به همین جهت انتخاب منبع قرضه (تامین) با کیفیـت و دانه‌بندی مناسب برای سنگ‌دانه‌ها تاثیر به‌سزایی در شاخص‌های دوام و مقاومت بتن خواهد داشت. البتـه در شناسـایی منابع قرضه سنگ‌دانه‌ها باید به تناسب حجم سنگ‌دانه مورد نیاز با حجم منابع قرضه شناسایی شده توجه داشت زیرا هـر نوع تغییر در کیفیت یا دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در فرایند تولید و اجـرای بـتن مـی‌توانـد موجـب تغییـر میـزان آب و مـواد سیمانی لازم (برای دستیابی به مقاومت مورد نظر) شده و اثرات نامطلوبی بر روانی و شـاخص‌هـای مقاومـت بـتن داشـته باشد. سنگ‌دانه‌های لازم برای بتن را می‌توان از منابع قرضه طبیعی موجود در آبرفت‌های کنـار رودخانـه‌هـا، تـراس‌هـای آبرفتی مرتفع‌تر، معادن سنگ کوهی یا مخلوطی از آن‌ها تامین نمود.

مشخصات فنی و کیفیت مطلوب برای سنگ‌دانه‌ها در هر پروژه بستگی به کیفیت و پارامترهـای مقـاومتی مـورد نظـر برای بتن غلتکی نیز دارد. در اغلب موارد، مشخصات فنی ساده‌تر و پارامترهای مقاومتی کم‌تری برای حجم قابـل تـوجهی از بتن بدنه سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و متوسط (در بخش داخلی جسم بدنه سد) مورد نیاز مـی‌باشـد در حالی که در بتن رویه این نوع سدها و یا در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد (مبتنی بر رویکـرد طراحـی همسان بدنه سد) مشخصات بتن و متناسبا مشخصات فنی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده بایـد مشـابه بـا سـطح اسـتاندارد بتن‌های متعارف در نظر گرفته شده و با دقت کنترل گردد. بر این اساس، در شرایطی که تولید بتن غلتکی با پارامترهای مقاومتی بالا، نفوذپذیری کم و دوام مناسب مد نظر باشد، مشخصات فنی و کیفی سخت‌گیرانه و مشابه با مشخصات فنـی سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن حجیم متعارف باید در نظر گرفته شود و در مقابل، در شرایطی که پارامترهـای مقـاومتی و دوام برای بتن غلتکی از اهمیت و حساسیت کم‌تری برخوردار باشد، به شرط تـامین معیارهـای فنـی اصـلی و کلـی بـرای سنگ‌دانه‌ها، از طیف وسیع‌تری از منابع قرضه (که ممکن است همه مشخصـات فنـی متعـارف سـنگ‌دانـه‌هـا را بـرآورده ننمایند) در بتن غلتکی می‌توان استفاده نمود.

با توجه به حجم بالای سنگ‌دانه مورد نیاز در پروژه‌های سدسازی، هزینه‌های مربوط به استحصال، حمل، آماده‌سـازی و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بخش مهمی از هزینه تمام شده بتن را به خود اختصاص می‌دهد و به طور معمول سعی بر تامین سنگ‌دانه‌های مصرفی از نزدیک‌ترین و در عین حال مناسب‌ترین منابع قرضه موجود در اطراف ساختگاه می‌باشد. با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی فوق مشخص می‌گردد که شناسایی منبع (یا منابع قرضه) مناسب برای بتن غلتکـی حجـیم مستلزم بررسی‌های توام فنی و اقتصادی بر روی منابع قرضه مختلف می‌باشد و حتی در برخی مـوارد، درصـورتی‌کـه یـک منبع قرضه با حجم کافی و با مشخصات فنی نه چندان مطلوب در نزدیکی محل پروژه در دسـترس باشـد، ممکـن اسـت تغییر و انطباق رویکرد طراحی سد وزنی بتن غلتکی با شرایط موجود ضروری و بهینه باشد.

علاوه بر مشخصات فنی اصلی مطرح برای سنگ‌دانه‌ها نظیر مقاومت، دوام، و وزن مخصوص بالا، در انتخاب و ارزیابی منابع قرضه باید به مشخصاتی از سنگ‌دانه‌ها که در پارامترهای حرارتی بتن تاثیرگذار بوده و ریسک ترک‌خوردگی حرارتی را در بتن کاهش می‌دهند، مورد توجه قرار گیرند. از این دیدگاه، سنگ‌دانه‌های با مدول تغییرشکل (الاستیک) کوچک‌تر و با ضریب انبساط حرارتی کم‌تر، مناسب‌تر خواهند بود.

۲-۳-۱- طبقه‌بندی و خواص سنگ‌دانه‌ها

در مطالعه و ارزیابی منابع قرضه مختلف برای تامین سنگ‌دانه مناسب برای بتن حجیم، طبقه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر اساس جنس سنگ‌دانه، فرایند شکل‌گیری منبع قرضه مورد نظر برای سنگ‌دانه (نظیر سنگ‌دانه های رودخانه‌ای و یا کوهی)، وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها، یکنواختی کیفیت و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و ... می‌تواند برای انتخاب منبع قرضه مناسب و بهینه مفید و موثر باشد. با این حال پس از تعیین منبع قرضه و انتقال مصالح سنگ‌دانه به کارگاه، طبقه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در کارگاه عموما با هدف دستیابی و کنترل دانه‌بندی مناسب و یکنواخت برای سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن و بر مبنای اندازه آن‌ها صورت می‌پذیرد. بر این اساس سنگ‌دانه‌ها به دو طبقه اصلی شن و ماسه و حسب لزوم رده‌های با بازه‌های کوچک‌تر طبقه‌بندی می‌شوند. ماسه به دانه‌های کوچک‌تر از ۴/۷۶ میلی‌متر و شن به دانه‌های بزرگ‌تر از آن اطلاق می‌گردد.

در برخی پروژه‌های سد بتن غلتکی، در شرایطی که شاخص‌های کیفی و مقاومتی بالایی برای بتن غلتکی مد نظر نباشد، با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت بتن‌ریزی، مصالح سنگی بدون تفکیک و به صورت مخلوط شن و ماسه (All in one) و صرفا با همگن کردن مصالح به کمک پیش مخلوط کردن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه این بخش، مشخصات فنی مختلف سنگ‌دانه‌ها که بر خواص بتن تاثیرگذار هستند و رواداری‌های و ملاحظات مربوط به آن‌ها در مخلوط‌های بتن غلتکی ارائه می‌گردد.

الف- دانه‌بندی

بنا به تعریف، توزیع دانه‌های یک مخلوط سنگ‌دانه یا یکی از طبقات سنگ‌دانه در اندازه‌های متفاوت بر اساس درصد وزنی آن‌ها را دانه‌بندی می‌نامند. تعیین و انتخاب بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه مصرفی در بتن، یکی از عوامل مهم در طراحی و تعیین دانه‌بندی مناسب برای سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. به طور معمول در بتنهای حجیم سعی بر به حداقل رساندن میزان آب و سیمان مصرفی برای دستیابی به یک کارایی، مقاومت و دوام مطلوب در بتن می‌باشد. در این راستا هر چه ابعاد سنگ‌دانه‌های بتن بزرگ‌تر انتخاب شود، مجموع سطوح سنگ‌دانه‌ها و میزان تخلخل در بتن کاهش یافته و متناسبا خمیر سیمان (آب و سیمان) کم‌تری در بتن مورد نیاز خواهد بود. همچنین با بزرگ‌تر شدن ابعاد سنگ‌دانه‌ها، هزینه و انرژی کم‌تری برای خرد کردن سنگ‌دانه‌ها صرف می‌گردد.

از سوی دیگر، حفظ یکپارچگی مخلوط سیمان (و جلوگیری از جدایی سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان - Segregation) در فرایند تولید، حمل، پخش و متراکم کردن بتن یک نیاز و ضرورت اساسی برای تولید یک بتن همگن و مطلوب است. این ضرورت، با توجه به این‌که ریسک و پتانسیل جدایی سنگ‌دانه‌ها در مخلوط بتن مستقیما با افزایش ابعاد سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد، مهم‌ترین عامل محدود کننده ابعاد سنگ‌دانه‌ها و متناسبا بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه مصرفی در بتن می‌باشد. البته انتخاب یک دانه‌بندی مناسب برای سنگ‌دانه‌ها و کنترل دقیق مراحل آماده‌سازی و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در فرایند تولید بتن، در کنترل و جلوگیری از پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن بسیار مفید است.

در سدهای بتنی وزنی متعارف، که مشخصات فنی و سیستم‌های کنترل کیفی دقیقی برای انتخاب، آماده‌سازی و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها اعمال می‌گردد، حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن به طور معمول حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. ولی از آنجا که فلسفه طراحی و اجرا در سدهای وزنی بتن غلتکی، مبتنی بر سهولت و سرعت (نرخ بالای) اجرا و دستیابی به یک بتن متناسب با نیازهای طراحی (و نه الزاما ایده‌آل) می‌باشد، اعمال مشخصات فنی و سیستم‌های کنترل کیفی مشابه با سدهای بتنی متعارف در غالب موارد امکان‌پذیر و اقتصادی نمی‌باشد. بر این اساس، مهم‌ترین عامل در انتخاب و تعیین دانه‌بندی مناسب و حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن‌های غلتکی، پرهیز از پدیده جدایی سنگ‌دانه‌ها و تامین کارایی مناسب در مخلوط بتن است.

تجربیات به‌دست آمده در این زمینه نشان می‌دهد که استفاده از مصالح سنگ‌دانه شکسته کوهی، ریسک جداشدگی سنگ‌دانه‌های بتن را در مقایسه با مصالح سنگ‌دانه گردگوشه رودخانه‌ای، کاهش می‌دهد. بر این اساس، در صورت استفاده از منابع قرضه شکسته کوهی، می‌توان حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن را بزرگ‌تر انتخاب نمود.

در سدهای وزنی بتن غلتکی طیف وسیعی از حداکثر ابعاد سنگ‌دانه برای بتن شامل سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر نیز در نظر گرفته شده‌اند، ولی حداکثر ابعاد سنگ‌دانه بتن در این نوع سدها عموما ۷۵ تا ۸۰ میلی‌متر بوده که البته با توجه به ضرورت کنترل جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن، با گذشت زمان و کسب تجربه، تمایل به استفاده از سنگ‌دانه‌های با حداکثر اندازه کوچک‌تر بیش‌تر شده است.

امروزه در سدهای وزنی بتن غلتکی، درصورتی‌که از سنگ‌دانه‌های شکسته استفاده شود حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌ها برابر ۵۰ تا ۶۰ میلی‌متر، و درصورتی‌که از سنگ‌دانه‌های گردگوشه طبیعی در بتن استفاده شود حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌ها برابر ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر انتخاب می‌گردد.

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریزدانه (ماسه) مصرفی در بتن نیز تاثیر زیادی در میزان خمیر مورد نیاز و دستیابی به تراکم‌پذیری مناسب در مخلوط بتن غلتکی دارد. دانه‌بندی منطبق بر حدود متعارف برای سدهای بتنی وزنی معمولی برای سدهای وزنی بتن غلتکی هم مناسب بوده و به طور گسترده در این سدها مورد استفاده قرار گرفته است، با این تفاوت که درصد سنگ‌دانه‌های ریزدانه (ماسه) مصرفی در مخلوط‌های بتن غلتکی عموما بیش‌تر از بتن متعارف بوده است. تجربه نشان داده است که در مخلوط‌های بتن غلتکی، به خصوص در بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های ریزدانه (ماسه)، ریسک و تمایل جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن متناسبا کاهش می‌یابد.

به‌عنوان یک معیار کلی، دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های هر مخلوط بتن باید به گونه‌ای باشد که حداقل مساحت سطوح دانه‌ها و مقدار تخلخل در واحد حجم مصالح حاصل شود تا با حداقل ممکن مقدار آب و سیمان بتوان کارآیی، مقاومت و دوام بتن را به‌دست آورد. حصول چنین هدفی بیش از هر چیز وابسته به دانه‌بندی واقعی طبقات مختلف شن و ماسه و درصد اختلاط آن‌ها و مهم‌تر از همه یکنواختی دانه‌بندی این مصالح در تمام نوبت‌های تحویل آن‌ها به محل تولید بتن است.

بر اساس تجربیات موجود در خصوص دانه‌بندی سنگ‌دانه ها در بتن حجیم، حدود دانه‌بندی مناسب برای مخلوط‌های بتن غلتکی با توجه به حداکثر ابعاد سنگ‌دانه، مطابق جدول (۲-۳) پیشنهاد می‌گردد. حد مجاز مصالح بسیار ریزدانه (کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ mm) با توجه به میزان پلاستیسیته آن‌ها به طور معمول کاهش می‌یابد. بر اساس تجربیات موجود، میزان مجاز مصالح بسیار ریزدانه چسبنده با توجه به حد روانی (LL) و دامنه خمیری (PI) مطابق جدول (۲-۴) پیشنهاد شده است. همچنین دانه‌بندی سنگ‌دانه ها و میزان مواد ریزدانه سیمانی مورد استفاده در نمونه‌های شاخصی از انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی در جدول (۲-۵) ارائه شده است.

جدول ۲-۳- حدود دانه‌بندی مناسب برای مخلوط‌های بتن غلتکی با توجه به حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌ها [۱]

شماره الک	اندازه الک (mm)	درصد رد شده (وزنی)	
		حداکثر اندازه دانه سنگی ۷۵ میلی‌متر	حداکثر اندازه دانه سنگی ۵۰ میلی‌متر
۳ in	۷۵	۹۸-۱۰۰	-
۲ in	۵۰	۸۶-۹۶	۱۰۰
$1\frac{1}{2}$ in	۳۸	۷۵-۹۰	۹۷-۱۰۰
۱ in	۲۵	۶۳-۷۷	۷۶-۹۰
$\frac{3}{4}$ in	۱۹	۵۶-۶۹	۶۶-۸۰
$\frac{3}{8}$ in	۹/۵	۴۳-۵۳	۴۲-۵۶
۴	۴/۷۵	۳۳-۴۳	۳۴-۴۶
۸	۲/۴	۲۵-۳۵	۲۶-۳۷
۱۶	۱/۲	۱۹-۲۹	۲۱-۳۱
۳۰	۰/۶	۱۴-۲۴	۱۵-۲۴
۵۰	۰/۳	۱۰-۱۸	۸-۱۶
۱۰۰	۰/۱۵	۶-۱۳	۵-۱۲
۲۰۰	۰/۰۷۵	۴-۱۰	۳-۷

توضیح: میزان رد شده از الک نمره ۲۰۰ با این فرض تعیین شده است که مصالح رد شده از الک ۴۰ (سایز ۰/۴۲ میلی‌متر) پلاستیسیته قابل ملاحظه‌ای ندارند.

جدول ۲-۴- درصد مجاز مصالح بسیار ریز (کوچک‌تر از mm ۰/۰۷۵) با توجه به میزان چسبندگی آن‌ها [۱۸]

حد روانی Liquid Limit	دامنه خمیری (Plastic Index)				
	۰ – ۵	۵ – ۱۰	۱۰ – ۱۵	۱۵ – ۲۰	۲۰ – ۲۵
۰ - ۲۵	۱۰	۸	۶	۳.۵	۲
۲۵ - ۳۵	۸	۶	۴.۵	۳	۱.۵
۳۵ - ۴۵	۷	۵	۴	۲.۵	۱.۵
۴۵ - ۵۵	۵	۴	۳	۲	۱

جدول ۲-۵- میزان مواد سیمانی (Kg) و دانه‌بندی سنگدانه‌ها در نمونه‌های شاخص انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی [۱۳]

	نام سد	Zintel Canyon	Jordao	Shimaji-gawa	Miyagase	Copper-field	Petit Saut	De Mist Kraal	Upper Stillwater	Santa Eugenia	New Victoria	Pangue	Platanov-ryssi
	نوع سد	با مواد سیمانی کم	با مواد سیمانی کم	غلتکی کوبیده (RCD)	غلتکی کوبیده (RCD)	با سیمان متوسط	با سیمان متوسط	با سیمان متوسط	با مواد سیمانی زیاد	با مواد سیمانی زیاد	با مواد سیمانی زیاد	با مواد سیمانی زیاد	با مواد سیمانی زیاد
	سیمان	۷۴	۶۵	۸۴	۹۱	۸۰	۰	۵۸	۷۹	۸۸	۷۹	۸۰	۵۰
	پوزولان	۰	۱۰	۳۶	۳۹	۳۰	۱۳۰	۵۸	۱۷۳	۱۵۲	۱۶۰	۱۰۰	۲۲۵
	کارایی بتن [۱]	متوسط	کم	زیاد	زیاد	کم	کم	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد
	اندازه الک (mm)	درصدهای وزنی رد شده سنگدانه											
سنگدانه‌های درشت دانه (شن)	۱۵۰				۱۰۰								
	۱۰۰				۸۲								
	۷۵			۱۰۰	۷۶			۱۰۰		۱۰۰			
	۶۲	۱۰۰	۱۰۰		۷۴			۹۱		۹۴			
	۵۰	۹۸	۹۸		۷۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۱	۱۰۰	۸۴		۱۰۰	
	۳۸	۹۱	۸۹	۷۶	۶۵	۹۰	۹۰	۶۷	۹۵	۷۴	۱۰۰	۹۹	۱۰۰
	۲۵	۷۷	۷۸		۵۸		۷۳	۵۴		۶۱		۸۶	
	۱۹	۷۰		۵۸	۵۱	۶۸	۶۷	۴۶	۶۶	۵۲	۷۰	۷۶	۶۶
	۹.۵	۵۰	۶۲	۴۳	۳۹	۵۴	۵۲	۳۵	۴۵	۳۴	۴۸	۶۱	۴۸
سنگدانه‌های ریز دانه (ماسه)	۴.۷۵	۳۹	۵۱	۳۳	۳۰	۴۴	۳۷	۲۹	۳۵	۲۴	۳۳	۴۱	۳۷
	۲.۴	۲۵	۴۰	۳۰	۲۶	۳۶	۳۰	۲۲	۲۶	۱۲	۲۶	۲۴	۲۹
	۱.۲	۱۸	۲۶	۲۳	۱۹	۲۸	۲۵	۱۸	۲۱	۶	۲۱	۲۰	۲۱
	۰.۶	۱۵	۱۸	۱۴	۱۱	۲۱	۲۰	۱۶	۱۷	۳	۱۵	۱۵	
	۰.۳	۱۲	۱۵	۸	۶	۱۵	۱۴	۱۴	۱۰	۲	۷	۶	۸
	۰.۱۵	۱۱	۱۰	۳	۲	۱۰	۱۱	۶	۲	۱	۳	۲	
	۰.۰۷۵	۹	۸	۰	۰	۷	۷	۲	۰	۰	۰	۱	

توضیح [۱]: کارایی کم= عدم امکان انجام آزمایش Vebe، کارایی متوسط = زمان Vebe بیش‌تر از ۲۵ ثانیه، کارایی متوسط = زمان Vebe کم‌تر از ۲۵ ثانیه. زمان تراکم ارتعاشی (VC یا Vebe) مدت زمان لازم برای ارتعاش وزنی مخلوط بتن به‌منظور پر کردن فضاهای خالی بین سنگدانه‌ها توسط خمیر موجود در مخلوط می‌باشد.

ب- بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها

مهم‌ترین تاثیر بافت سطوح سنگ‌دانه‌ها بر روی چسبندگی بین خمیر سیمان و سطح سنگ‌دانه‌ها است. این بهبود در چسبندگی فقط بر روی مقاومت خمشی مخلوط‌های بتن سازه‌ای با مقاومت بسیار زیاد اثر خود را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها بر کیفیت بتن غلتکی تاثیر محسوسی ندارد.

ج- شکل سنگ‌دانه‌ها

شکل سنگ‌دانه‌ها می‌تواند بر روی مقاومت، کارایی، تراکم بتن تاثیرگذار باشد. سنگ‌دانه‌هایی که به مرور زمان در بستر رودخانه‌ها و دریاها غلت خورده‌اند، عموما کروی شکل و گردگوشه هستند، درحالی که سنگ‌دانه هایی که از طریق شکستن سنگ‌های کوهی حاصل می‌شوند، اغلب تیز گوشه‌اند. همان‌گونه که ذکر شد استفاده از سنگ‌دانه های شکسته کوهی در مخلوط بتن، به دلیل این‌که ریسک وقوع پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن را کاهش می‌دهد، نسبت به سنگ‌دانه‌های رودخانه‌ای ارجح می‌باشد.

استفاده از سنگ‌دانه‌های ورقه‌ای و سوزنی نیز معمولا اثر نامطلوبی در کیفیت و کارایی بتن دارد. با این حال، تجربه نشان داده است مخلوط‌های بتن غلتکی در مقایسه با مخلوط‌های بتن حجیم متعارف، به دلیل صرف انرژی بیش‌تر برای تراکم بتن و حجم کم‌تر مصالح خمیری، حساسیت کم‌تری نسبت به وجود این سنگ‌دانه ها در مخلوط بتن دارند. بر اساس نتایج آزمایش های کارگاهی در پروژه‌های مختلف، استفاده از سنگ‌دانه های ورقه‌ای و سوزنی تا حداکثر ۳۰ الی ۴۰ درصد کل مصالح سنگ‌دانه‌ای نیز در مخلوط‌های بتن غلتکی، بدون ایجاد اثرات نامطلوب قابل توجه، امکان‌پذیر می‌باشد. با این حال حداکثر این نوع مصالح سنگ‌دانه‌ای در مخلوط‌های بتن غلتکی در استانداردها و مراجع مختلف (نظیر USACE) به حدود ۲۵ درصد محدود می‌گردد.

د- تمیزی سنگ‌دانه‌ها

تمیزی سنگ‌دانه‌ها با عدم آلودگی آن‌ها به رس (Clay)، سیلت (Silt) و غبار تعریف می‌شود. رس، سیلت و غبار سنگ‌دانه‌ها بر اساس تعریف استاندارد BS 812 موادی با اندازه کوچک‌تر از ۷۵ میکرومتر هستند، بنابراین با شستن سنگ‌دانه ها بر روی الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر)، مواد ریزدانه رسی از الک گذشته و از سنگ‌دانه ها جدا می‌شوند. وجود مواد ریزدانه رسی و پلاستیک در مخلوط بتن سبب جذب آب بیش‌تر مخلوط و متناسبا افزایش جمع‌شدگی بتن می‌شود. این فرایند سبب افزایش ریسک ترک‌خوردن بتن می‌گردد. به همین جهت در مخلوط‌های بتن حجیم متعارف با شستن سنگ‌دانه‌ها از کاربرد مواد ریزدانه رسی در بتن پرهیز می‌گردد.

در مخلوط‌های بتن غلتکی، با توجه به نیاز به درصد بیش‌تری از مصالح ریزدانه و نیز حساسیت کم‌تر نسبت به مواد ریزدانه رسی در بتن، در غالب موارد استفاده از مصالح سنگی شسته نشده در مخلوط بتن امکان‌پذیر می‌باشد. البته به‌منظور کنترل اثرات نامطلوب مواد ریزدانه رسی، درصد این مواد به کل مواد ریزدانه (رسی و سیلتی) موجود در مخلوط بتن باید

محدود گردد. در دستورالعمل‌های مراجع مختلف نظیر USACE، میزان مواد ریزدانه رسی به ۴ تا ۱۰ درصد مواد ریزدانه غیر پلاستیک مصرفی در بتن محدود شده است. البته با افزایش پلاستیسیته مواد ریزدانه رسی، درصد مجاز این مواد در مخلوط بتن کاهش می‌یابد، برای نمونه در شرایطی که حد روانی (LL) مواد ریزدانه رسی بیش از ۲۵ و شاخص پلاستیسیته (PI) بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، میزان مجاز این مواد در مخلوط بتن به ۵ درصد تقلیل می‌یابد (جدول ۲-۴).

هـ- آب موجود در سنگ‌دانه‌ها

آب موجود در سنگ‌دانه‌ها ممکن است به دلیل رطوبت موجود در منابع قرضه، آب شستشوی سنگ‌دانه‌ها، بارندگی‌ها، پودر آب که برای خنک کردن سنگ‌دانه‌ها بر آن‌ها افشانده می‌شود و یا دلایل دیگری از این دست در سنگ‌دانه‌ها وجود داشته باشد. حالتی که سنگ‌دانه‌ها اشباع با سطح خشک هستند (SSD)، حالتی نسبتا پایدار است که در آن آب منافذ سنگ‌دانه را پرکرده اما سطوح سنگ‌دانه خشک است.

در محاسبات طراحی مخلوط، سنگ‌دانه ها در حالت اشباع با سطح خشک مد نظر هستند، بنابراین باید در زمان بتن‌ریزی درصورتی‌که آب سنگ‌دانه ها بیش‌تر از اشباع با سطح خشک است، از آبی که در تولید بتن به مخلوط بتن اضافه می‌شود مقداری کاسته شود و اگر آب سنگ‌دانه‌ها کم‌تر از حالت اشباع با سطح خشک باشد، باید کمبود آب به بتن اضافه شود. به همین دلیل اندازه‌گیری درصد رطوبت آب سنگ‌دانه‌ها قبل از تولید بتن ضروری است.

و- خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها

خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها عمدتا در مرحله طراحی یا انتخاب منبع قرضه مورد بررسی قرار می‌گیرند ولی در پروژه‌های بزرگ به‌منظور پایش یکنواختی کیفیت سنگ‌دانه‌ها، غالبا در زمان اجرا نیز کنترل کیفیت سنگ‌دانه‌ها ضروری می‌گردد. به طور کلی خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه (شن) باید به گونه‌ای باشند که خردشدن و تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در عملیات تولید و حمل سنگ‌دانه‌ها و همچنین تولید، حمل، ریختن، و تراکم بتن اتفاق نیافتد. ضمنا خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها باید در حدی باشد که پارامترهای مقاومتی مورد انتظار از بتن تامین گردد.

۲-۳-۲- ارزیابی کیفیت مصالح سنگی

به طورکلی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط‌های بتن غلتکی باید حداقل الزام‌های (مشخصات فیزیکی و شیمیایی، و دوام) سنگ‌دانه‌ها مندرج در فصل دوم آیین‌نامه سازه‌های بتنی حجیم ایران (ضابطه شماره ۳۴۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور) را برآورده نمایند. البته در مواردی که حساسیت و اهمیت برخی الزام‌های آیین‌نامه برای مخلوط بتن غلتکی، با توجه به ملاحظات اجرایی و یا ماهیت عملکرد مورد انتظار از بتن، کم‌تر باشد، می‌توان با انجام بررسی‌ها و آزمایش‌های لازم رواداری‌های بزرگ‌تری را در نظر گرفت.

برای بررسی و ارزیابی کلی کیفیت منابع قرضه مورد نظر، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های اخذ شده از نقاط مختلف منبع قرضه ضروری است. نحوه نمونه‌برداری، روش انجام آزمایش های لازم بر روی سنگ‌دانه ها، و تواتر تکرار آزمایش‌ها نیز باید بر اساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه سازه‌های بتنی حجیم ایران صورت پذیرد.

۲-۴- آب اختلاط بتن

آب مورد استفاده برای شستشو و عمل‌آوری مصالح سنگی و نیز آب مورد استفاده در مخلوط بتن غلتکی باید تازه، تمیز و عاری از آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی، روغن، اسید، نمک، مواد قلیایی، مواد آلی و دیگر مواد زیان‌آور باشد. در صورت استفاده از آب رودخانه برای این منظور، پیش‌بینی تمهیدات لازم (نظیر حوضچه‌های ته‌نشینی) برای کاهش گل و لای و مواد معلق در آب به خصوص در مواقع سیلابی، ضروری است. به طور کلی آب مورد استفاده در مخلوط‌های بتن غلتکی و فرایند شستشو و عمل‌آوری مصالح سنگی می‌بایست الزامات آیین‌نامه سازه‌های بتنی حجیم ایران (و آیین‌نامه بتن ایران) را برآورده نماید [۳] و [۲].

۲-۵- مواد افزودنی شیمیایی

استفاده از مواد افزودنی شیمیایی در مخلوط‌های بتن غلتکی عموما با هدف کاهش میزان آب مصرفی و افزایش کارایی مخلوط بتن، و همچنین تاخیر در زمان گیرش بتن بوده است. استفاده از مواد افزودنی دیرگیر در مخلوط‌های بتن غلتکی بیش‌تر در مناطق با آب و هوای گرم تجربه شده است. در برخی موارد، مواد افزودنی شیمیایی با اهداف متفاوتی در سدهای بتن غلتکی استفاده شده‌اند، برای نمونه در سدهای بتن غلتکی به‌منظور افزایش کارایی مخلوط بتن از مواد افزودنی هوازا استفاده می‌گردد درصورتی‌که استفاده از مواد افزودنی هوازا در بتن حجیم متعارف بیش‌تر با هدف افزایش مقاومت بتن در برابر سیکل‌های تکراری ذوب و انجماد می‌باشد.

با توجه به این‌که مواد افزودنی شیمیایی برای انجام واکنش نیاز به آب دارند، کارایی و اثربخشی مواد افزودنی شیمیایی در مخلوط‌های بتن غلتکی متناسب با افزایش مصالح خمیری و آب مخلوط، بهتر و مناسب‌تر بوده است. همچنین تجربه استفاده از مواد افزودنی شیمیایی نشان داده است که در مقایسه با بتن حجیم متعارف، در مخلوط‌های بتن غلتکی به‌منظور دستیابی به کارایی و اثربخشی مورد نظر باید مقادیر بسیار بیش‌تری از مواد افزودنی شیمیایی (در برخی موارد ۵ تا ۱۲ برابر) در مخلوط بتن استفاده گردد.

علیرغم مشکلات و هزینه‌های نسبتا قابل توجه کاربرد مواد افزودنی شیمیایی در مخلوط‌های بتن غلتکی، تقریبا در ۵۰ درصد سدهای بتن غلتکی (ساخته شده تا سال ۱۹۹۶) از مواد افزودنی شیمیایی استفاده شده است. در این بین، ماده افزودنی دیرگیر کننده تنها در تعداد نسبتا کمی از سدهای بتن غلتکی به‌کار رفته است (۷/۱ درصد با در نظر

گرفتن مواد کاهنده آب - دیرگیر کننده). در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از مواد افزودنی شیمیایی جدید در بتن غلتکی به ویژه در اسپانیا و چین افزایش یافته است.

با توجه به این‌که کارایی و اثربخشی برخی مواد افزودنی شیمیایی وابسته به نوع و حتی کارخانه تولید مصالح سیمانی می‌باشد، انتخاب و نحوه استفاده از هر ماده افزودنی شیمیایی باید توسط مخلوط‌های آزمایشی آزمایشگاهی و به طور ایده‌ال بعد از اجرای مقطع آزمایشی (full-scale trials) بررسی و کنترل گردد. [۱۶، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۱۹].

۲-۶- نوارهای آب‌بند

نوارهای آب‌بندها عموما از مصالح پلاستیکی با خاصیت ارتجاعی، که ماده اصلی آن پلی وینیل کلراید (PVC) می‌باشد، در اشکال و ابعاد مختلف ساخته می‌شوند. نوارهای آب‌بند باید متراکم، همگن، فاقد خلل و فرج، خراش و سایر نواقص بوده و همواره دارای گواهی انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام شده توسط سازنده باشند. به طور کلی نوارهای آب‌بند پلاستیکی باید الزام‌های استاندارد را مطابق جدول (۲-۶) برآورده نمایند.

اتصال نوارهای آب‌بند در امتداد و یا در تقاطع آب‌بندها به کمک حرارت دادن سطوح مجاور هم بر طبق توصیه‌های سازنده آن انجام می شود. درجه حرارت لازم برای اتصال نوارهای آب‌بند باید برای ذوب کردن نوار آب‌بند کافی بوده ولی نباید آن را بسوزاند. نحوه اتصال باید به شکلی انجام شود که فصل مشترک جوش داده شده نوار آب‌بند، حداقل ۸۰ درصد مقاومت کششی مصالح یکپارچه را داشته باشد. با این حال تعداد اتصالات نوارهای آب‌بند در طول یک درز باید به حداقل ممکن تقلیل یابد.

به منظور جلوگیری از نشت آب از درزهای بدنه سد، در فرایند نصب نوارهای آب‌بند باید تمهیدات و کنترل های لازم به‌عمل آید به‌گونه‌ای که در فرایند بتن‌ریزی و تراکم بتن، نوارهای آب‌بند از محل خود جابجا نشده و کاملا با بتن محاط گردند. برای نمونه هرجا که لازم باشد، نوارهای آب‌بند را باید توسط مفتول‌های به فواصل ۲۰ سانتی‌متر با میلگردهای ۱۶ میلی‌متر که در هر طرف درز نصب می‌شوند تثبیت نمود.

نیمه‌های متقارن آب‌بند باید به طور یکسان در بتن لایه‌های هم جوار بتن‌ریزی، تعبیه شوند به طوری‌که قسمت میانی نوار آب‌بند کاملا در بازشدگی درز قرار گیرد و بتن در مجاورت درزها باید با عملیات ویبره کردن، حداکثر وزن مخصوص و نفوذناپذیری را داشته باشد [۸، ۲۰].

جدول ۲- ۶- الزامات استاندارد نوارهای آب‌بند PVC

مشخصات فنی مورد نیاز	استاندارد آزمایش
حداقل مقاومت کششی برابر ۱۲/۵ مگاپاسکال	ASTM D 412
حداقل ازدیاد طول در نقطه پارگی ۳۰۰ درصد	ASTM D 412
سختی خمشی به طور متوسط ۵ Mpa	ASTM D 747
درصد جذب آب	ASTM D 570
شکنندگی در سرما	ASTM D 746
افت روان کننده	ASTM D 1203
مقاومت در برابر پارگی	ASTM D 624
سختی shore A	ASTM D 2240
اثرات قلیایی‌ها	CRD C 572
Accelerated Extraction	CRD C 572
وزن مخصوص در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد	ASTM D 792

فصل ۳

طرح اختلاط بتن غلتکی

۳-۱- کلیات

هدف از مطالعه و تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی، انتخاب مقادیر هر یک از اجزای متشکله مخلوط بتن می‌باشد به‌گونه‌ای که با حداقل هزینه، دستیابی به مخلوطی با کم‌ترین مقدار سیمان و حداکثر مقدار سنگ‌دانه و در عین حال با ارضای الزامات بتن در وضعیت تازه و سخت شده، میسر گردد.

ویژگی‌ها و الزامات بتن‌های معمولی با توجه به روش اجرای آن ها، شامل کارایی و روانی در حالت تازه، و کسب مقاومت و دوام لازم در حالت سخت شده با توجه به نیازهای طراحی سازه و شرایط محیطی پروژه است. هر چند در بتن‌های غلتکی نیز الزاماتی کم و بیش مشابه موارد فوق مد نظر می‌باشند، لیکن با توجه به روش اجرای خاص این نوع بتن‌ها، رواداری‌ها و حدود الزاماتی نظیر روانی و کارایی در بتن غلتکی کاملا متفاوت با بتن‌های معمولی بوده و علاوه بر موارد فوق رعایت الزامات دیگری نیز در مرحله تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی ضرورت می‌یابد. از جمله مهم‌ترین این الزامات، قابلیت تراکم‌پذیری، کنترل پدیده جداشدگی سنگ‌دانه ها و حفظ انسجام مخلوط در بتن تازه، و محدود کردن نفوذپذیری بتن و دستیابی به اتصال مناسب بین لایه‌ها در بتن سخت شده می‌باشند.

مبانی طرح اختلاط بتن غلتکی ارتباط تنگاتنگی با رویکرد مورد نظر در طراحی سد بتن غلتکی دارد. درصورتی که در طراحی سد، بتن غلتکی به عنوان عامل اصلی ایجاد آب‌بندی در نظر گرفته شده باشد (رویکرد طراحی همسان بدنه سد)، دستیابی به حد نفوذناپذیری قابل قبول در جسم بتن غلتکی یک الزام و ضرورت بوده و همچنین مخلوط بتن باید به نحوی طراحی گردد که در فرایند اجرای بدنه سد، امکان اتصال مناسب بین لایه‌ها و کاهش نفوذپذیری درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی به نحو مطلوب فراهم گردد. لیکن درصورتی که رویکرد طراحی سد بر پایه تامین آب‌بندی بدنه سد از طریق ایجاد یک غشاء (یا لایه) نفوذناپذیر در رویه بالادست سد باشد (رویکرد طراحی ناهمسان بدنه سد)، الزاماتی نظیر میزان نفوذپذیری جسم بتن غلتکی و یا تمهیدات لازم برای درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی تا حد زیادی تقلیل خواهد یافت.

به طور کلی الزامات و پارامترهای مد نظر در مطالعه طرح اختلاط بتن‌های غلتکی به شرح زیر می‌باشند:

الف- کارایی بتن تازه

مخلوط تازه بتن غلتکی باید با توجه به روش و امکانات اجرایی، دارای کارایی کافی برای دستیابی به تراکم مورد نظر باشد. همچنین کارایی مخلوط تازه بتن باید به‌گونه‌ای باشد که در سطوحی از بتن غلتکی که در مجاورت قالب اجرا می‌شوند، کیفیت و ظاهر بتن قابل قبول باشد. کارایی مخلوط تازه بتن غلتکی کاملا متاثر از میزان بخش خمیری (Paste) در مخلوط بتن غلتکی است که متشکل از سیمان، مواد پوزولانی، آب، مواد بسیار ریز موجود در سنگ‌دانه‌ها یا پودر سنگ اضافه شده به مخلوط بتن و حباب‌های هوا می‌باشد.

ب- کنترل پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها و خمیر بتن

با توجه به روش اجرای مخلوط‌های بتن غلتکی، یکی از ویژگی‌های متفاوت این نوع بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی، کاهش قابل توجه میزان بخش خمیری در بتن غلتکی است به‌گونه‌ای که امکان حمل، پخش و تراکم بتن با ماشین‌آلات خاکی فراهم گردد. در این شرایط ریسک وقوع پدیده جداشدگی سنگ‌دانه ها و بخش خمیری بتن در فرایند حمل، ریختن و متراکم کردن مخلوط‌های بتن غلتکی افزایش یافته و لذا یکی از اهداف و الزامات مهم و تعیین‌کننده در مطالعه طرح اختلاط بتن غلتکی، دستیابی به یک مخلوط همگن و منسجم با حداقل تمایل به وقوع پدیده جداشدگی می‌باشد. عدم توجه به کنترل این پدیده می‌تواند کیفیت و خواص به‌دست آمده برای یک مخلوط بتن غلتکی مشخص در مطالعات آزمایشگاهی را در زمان اجرا کاملا تغییر دهد. کاهش حداکثر ابعاد سنگ‌دانه‌ها، کاربرد سنگ‌دانه‌های با دانه‌بندی مناسب، و قدری افزایش در درصد ماسه (نسبت به بتن‌های معمولی با اندازه حداکثر سنگ‌دانه مشابه) می‌تواند در کنترل پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن موثر باشد.

ج- چگالی بتن سخت شده

چگالی بتن غلتکی عمدتا متاثر از چگالی سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن و میزان فضاهای خالی محبوس در بتن می‌باشد. میزان فضاهای خالی محبوس در سدهای بتن‌های غلتکی اجرا شده در حدود ۰/۵ تا ۵ درصد متغیر بوده است. جهت به حداقل رساندن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، طرح اختلاط بتن غلتکی باید به نحوی تعیین گردد که بخش خمیری بتن فضای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده و بخش ملات بتن (شامل ماسه و خمیر) بتواند به نحو مطلوبی فضاهای خالی بین مصالح سنگی درشت‌دانه را پر نماید.

د- مقاومت بتن سخت شده

در سدهای وزنی بتن غلتکی نیز مشابه با سدهای بتنی وزنی متعارف، پارامترهای مقاومتی ویژه‌ای برای بتن نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت برشی، و دوام بتن سخت شده با توجه به نیازهای طراحی و شرایط محیطی مد نظر می‌باشند. مهم ترین تفاوت در سدهای بتن غلتکی، رفتار و مقاومت مکانیکی کم‌تر درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی در مقایسه با جسم بتن غلتکی است که با توجه به تعداد زیاد این درزهای اجرایی در سدهای بتن غلتکی، معمولا نیازهای سازه‌ای (به خصوص مقاومت کششی و برشی) لازم برای درزهای اجرایی بتن‌ریزی به صورت جداگانه تعیین می‌گردد.

از آنجا که اکثر پارامترهای مقاومتی بتن را می‌توان با توجه به روابط و تناسبات تجربی موجود بر مبنای مقدار مقاومت فشاری بتن تخمین یا تعیین نمود، و نیز با توجه به سهولت بیش‌تر آزمایش های تعیین مقاومت فشاری، معمولا پارامتر مقاومت فشاری بتن به‌عنوان یک الزام در مطالعه طرح اختلاط بتن‌های غلتکی مد نظر قرار می‌گیرد. پارامترهای مقاومتی بتن غلتکی به عواملی نظیر نسبت های سیمان، پوزولان و آب، درصد تراکم، و کیفیت و دانه‌بندی سنگ‌دانه ها بستگی دارد. برای مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط تا زیاد، همانند بتن‌های معمولی، مقاومت فشاری بتن

تابعی از نسبت آب به کل مواد سیمانی ($W/(c+p)$) می‌باشد. برای مخلوط‌های خشک بتن غلتکی (بتن غلتکی با مواد سیمانی کم) که حجم خمیر بتن در آن‌ها برای پرکردن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها کافی نیست، مقاومت بتن غلتکی، مشابه ضوابط مربوط به سدهای خاکی، به روابط چگالی ـ رطوبت مخلوط بتن بستگی دارد.

معمولا بارگذاری‌های اصلی در سدهای وزنی با یک فاصله زمانی قابل توجه (چند ماه) پس از بتن‌ریزی بخش‌های مختلف بدنه سد محقق می‌گردد. بر همین اساس انتخاب سن بتن برای تامین نیازهای سازه‌ای (مقاومت بتن) در سدهای وزنی بتن غلتکی بستگی به نوع مخلوط (روند افزایش مقاومت مخلوط بتن طی زمان)، طول دوره اجرا، نحوه اعمال بارگذاری، و ... دارد، لیکن با توجه به شرایط غالب سدهای وزنی بتن غلتکی، سن بتن برای تامین نیازهای سازه‌ای عموما حدود ۳ یا ۶ ماه در نظر گرفته می‌شود.

- نفوذپذیری بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی

با توجه به نیازها و رویکرد طراحی بدنه سد، نفوذپذیری بتن غلتکی (و همچنین نفوذپذیری درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی) یکی از مهم ترین الزاماتی است که در مطالعه طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی باید در نظر گرفته شود. درصورتی‌که مخلوط مناسبی برای تحقق و تامین این الزام تعیین نگردد، نفوذپذیری بدنه سد، خصوصا در درزهای اجرایی بتن‌ریزی به دلیل عدم چسبندگی مناسب بین لایه‌ها، به نحو قابل توجهی افزایش یافته و ایمنی، کارایی، دوام، و شرایط ظاهری سد را کاملا متاثر و نامطلوب می‌سازد.

- حرارت‌زایی مخلوط بتن تازه

در مطالعه و انتخاب مقادیر اجزای مخلوط‌های بتن غلتکی برای سازه‌های حجیم نظیر سدها، پارامتر حرارت‌زایی مواد سیمانی نیز باید به‌عنوان یک الزام مد نظر قرار گیرد. برای به حداقل رساندن نرخ حرارت‌زایی بتن غلتکی لازم است نوع و مقدار سیمان و مواد پوزولانی از نقطه نظر حرارت‌زایی مورد ارزیابی قرار گرفته و مقدار مصرف مواد سیمانی در بتن به حداقل لازم برای دستیابی به مقاومت یا دوام مورد نیاز محدود گردد. همچنین از طریق انتخاب دانه‌بندی و حداکثر ابعاد مناسب برای سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن می‌توان مقدار مواد سیمانی لازم و در نتیجه حرارت‌زایی مخلوط بتن تازه را تا اندازه‌ای کاهش داد.

- شرایط ساخت

تجهیزات ساخت و شرایط و امکانات دسترسی و محیطی ساختگاه از دیگر پارامترهایی هستند که در مطالعه و تعیین طرح اختلاط بتن باید مد نظر قرار گیرند. به عنوان مثال کیفیت منابع تامین سیمان و منابع قرضه سنگ‌دانه مختلف در دسترس، شرایط محیطی و آب و هوایی منطقه پروژه، کیفیت و موقعیت استقرار تجهیزات سنگ‌شکن و بچینگ، و ... از جمله پارامترهایی هستند که در فرایند تهیه مصالح، و تولید و اجرای بتن موثر بوده و باید در نظر گرفته شوند.

۳-۲- تاثیر رویکرد طراحی در مبانی طرح اختلاط بتن

رویکرد طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی تا حد زیادی متاثر از شرایط و نحوه اجرای سد می‌باشد. با توجه به روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی، تعداد زیادی درز اجرایی افقی بین لایه‌های نسبتا نازک بتن‌ریزی در بدنه سد ایجاد می‌شوند. تعداد این درزها و نحوه آماده‌سازی و کنترل کیفی آن‌ها تاثیر تعیین‌کننده‌ای در نفوذپذیری آن‌ها و ایجاد و توسعه فشار برکنش در بدنه سد و همچنین مقاومت کششی و برشی (چسبندگی) درزهای اجرایی مذکور داشته و بر این اساس نحوه رفتار و پایداری کلی (و ابعاد لازم برای مقطع) بدنه سد تا حد زیادی متاثر از کیفیت و نحوه اجرای درزهای اجرایی افقی خواهد بود. بر اساس رویکردها و روش‌های اجرایی مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی که عموما متاثر از روش‌های اجرایی سدهای خاکی و سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشند، همان‌گونه که در فصل اول این راهنما اشاره گردید، روش‌ها و مبانی طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی را به طور کلی در غالب دو رویکرد مختلف زیر می‌توان دسته‌بندی نمود:

- **رویکرد مبتنی بر «طراحی همسان بدنه سد»**: در این رویکرد طراحی، کیفیت اجرا و طرح اختلاط بتن غلتکی و تمهیدات اجرایی و کنترل کیفی درزهای اجرایی افقی به‌نحوی در نظر گرفته می‌شود که «جسم سد به طور یکپارچه نفوذناپذیر» گردد.
- رویکرد مبتنی بر «طراحی ناهمسان بدنه سد»: در این رویکرد طراحی، مشابه با تکنیک طراحی سدهای خاکی با رویه بتنی، یک «المان آب‌بند» در رویه بالادست سد برای تامین آب‌بندی بدنه سد طراحی شده و ضوابط و تمهیدات طراحی و اجرایی بسیار ساده‌تری برای کیفیت اجرای بتن غلتکی (از بعد تراکم و نفوذپذیری) و تمهیدات آماده‌سازی درزهای اجرایی افقی لحاظ می‌گردد. در این روش طراحی، عملا جسم بدنه سد به صورت ناهمسان طراحی و اجرا می‌گردد. حالت حدی این رویکرد طراحی منجر به طرح ایده طراحی سدهای خاک - سیمان یا CSG (Cemented Sand and Gravel) و سدهای FSHD (Face Symmetrical Hardfill Dam) گشته است.

مقایسه دو رویکرد و فلسفه طراحی فوق از بعد عوامل مختلف تاثیرگذار بر مبانی و الزامات طرح اختلاط بتن غلتکی در جدول (۳-۱) ارائه شده است.

در رویکرد طراحی ناهمسان بدنه سد (سدهای با مواد سیمانی کم)، مبانی طرح اختلاط بتن غلتکی مشابه فلسفه سدهای خاکی و بر پایه روابط رطوبت و وزن مخصوص (Density) است. بر این اساس هدف اصلی در طرح اختلاط، دستیابی به یک مخلوط مصالح سنگ‌دانه‌ای و سیمان با درصد رطوبت بهینه می‌باشد و برای این منظور از آزمایش‌های تراکم مطابق با انرژی تراکم اعمال شده توسط غلتک‌ها در کارگاه استفاده می‌شود. در این رویکرد طراحی (در سدهای با مواد سیمانی کم) مصالح خمیری بتن (سیمان، پوزولان و آب) الزاما همه فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها را پس از اتمام فرایند تراکم بتن، پر نمی‌کنند.

جدول ۳-۱- مقایسه رویکردهای طراحی سدهای بتن غلتکی از بعد عوامل تاثیرگذار بر مبانی و الزامات طرح اختلاط بتن غلتکی [۲۱]

عوامل تاثیرگذار بر طرح اختلاط	رویکرد طراحی ناهمسان سد (سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم)	رویکرد طراحی همسان سد (سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط و زیاد)
مبانی طرح اختلاط	دستیابی به رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک (فلسفه طراحی سدهای خاکی)	کاهش نسبت آب به سیمان و تحکیم (فلسفه طراحی سدهای بتنی متعارف)
ویژگی‌های فضاهای خالی	الزاما همه فضاهای خالی پر نمی‌شوند	فضاهای خالی باید تا حداکثر ممکن با خمیر بتن پر شوند
درصد تئوریک چگالی بدون هوا	معمولا کم‌تر از ۹۸٪	بیش‌تر از ۹۸ درصد
روانی (زمان VC یا زمان Vebe)[1]	۴۵ ثانیه یا بیش‌تر	۴۵ ثانیه یا کم‌تر
مصالح سنگ‌دانه‌ای	اعمال حداقل اصلاحات بر دانه‌بندی مصالح استحصال شده از منابع قرضه	طراحی و رعایت دانه‌بندی مناسب برای کمینه کردن حجم فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها
میزان مواد ریزدانه سنگی یا پودر سنگ (عبوری از الک نمره ۲۰۰)	تا ۱۰ درصد وزنی کل سنگ‌دانه‌های بتن	استفاده محدودتر از مواد ریزدانه سنگی (در صورت کمبود مواد پوزولانی مناسب)
مقدار مواد سیمانی (سیمان + پوزولان)	کم‌تر از $۱۰۰ kg/m^3$	بیش‌تر از $۱۰۰ kg/m^3$
چسبندگی بتن	کم‌تر از ۱/۴ MPa	بیش‌تر از ۱/۴ MPa
نفوذپذیری بتن	به میزان فضاهای خالی در بتن بستگی دارد (درجه تراکم و میزان جداشدگی مصالح)	بستگی به خواص و مقدار مصالح خمیری بتن دارد
مقاومت فشاری بتن	متناسب با افزایش عیار سیمان افزایش می‌یابد و معمولا در قسمت فوقانی لایه‌های بتن بیش‌تر است	متناسب با افزایش آب کاهش می‌یابد و معمولا در قسمت تحتانی لایه‌های بتن بیش‌تر است
کنترل تراوش	با استفاده از غشاء یا لایه نفوذناپذیر بالادست	با کنترل نفوذپذیری بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی
نحوه اختلاط مخلوط بتن	اغلب با مخلوط‌کن پیوسته (Pugmill)	مخلوط‌کن پیوسته (Pugmill) یا Drum
نحوه تراکم بتن	غلتک ارتعاشی یا لاستیکی	غلتک ارتعاشی
عمل اصلی غلتک	تراکم	تحکیم
ریسک پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها	ریسک جدایی سنگ‌دانه‌های بتن بیش‌تر می‌باشد	ریسک جدایی سنگ‌دانه‌های بتن کم‌تر می‌باشد
ضخامت لایه کوبیده شده	عموما ۳۰ سانتی‌متر (با احتمال بیش‌تر وجود فضاهای خالی در قسمت تحتانی هر لایه بتن)	عموما ۳۰ سانتی‌متر – در سدهای RCD: تا ۷۵ سانتی‌متر (احتمال وجود خمیر بیش‌تر در سطح هر لایه بتن)

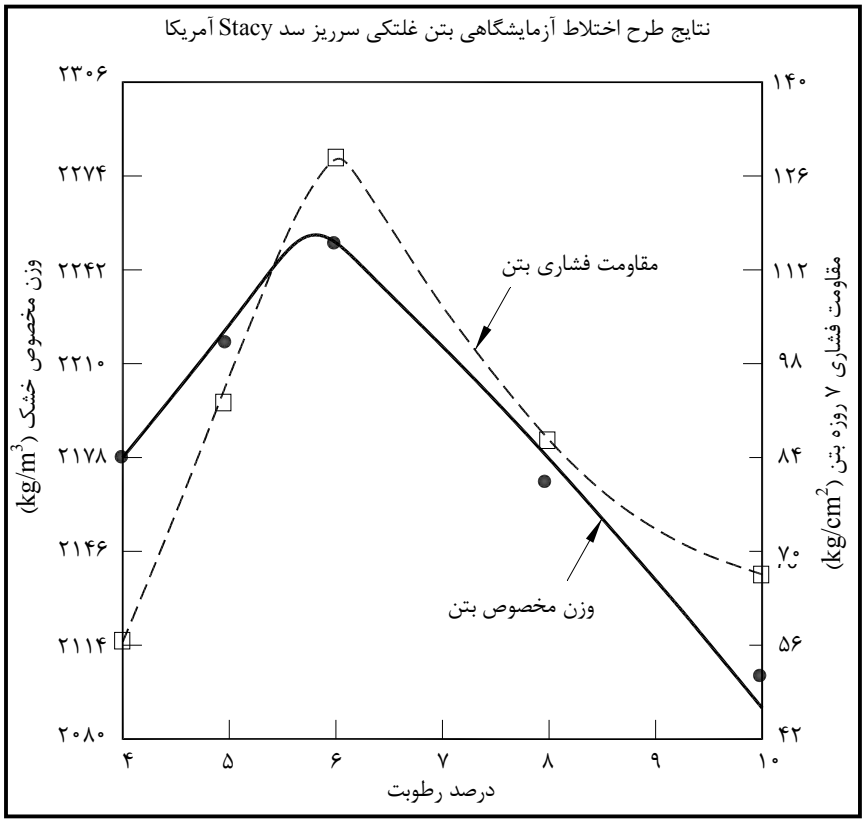
۱- زمان تراکم ارتعاشی (VC یا Vebe) ۴۵ ثانیه یعنی برای پر کردن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها توسط خمیر موجود در مخلوط، ۴۵ ثانیه ارتعاش وزنی مخلوط کفایت می‌کند.

بر اساس اصول تراکم خاک‌ها (که توسط Procter در اوایل سال ۱۹۳۰ توسعه یافته است)، برای انرژی تراکم معین، درصد رطوبت بهینه‌ای وجود دارد که وزن مخصوص خشک (Dry Density) حداکثر را ایجاد می‌کند. با افزایش انرژی تراکم، درصد رطوبت بهینه کاهش یافته و حداکثر وزن مخصوص خشک بیش‌تری امکان‌پذیر است. بنابراین در رویکرد طراحی مشابه با سدهای خاکی، دستیابی به وزن مخصوص خشک حداکثر، با توجه به نحوه عملکرد غلتک‌ها و انرژی تراکم، معیار اصلی طرح اختلاط بتن غلتکی خواهد بود. وزن مخصوص خشک بنا به تعریف برابر وزن خشک مصالح در واحد حجم بتن، با صرف‌نظر از آب مصرفی، می‌باشد:

$$P_d = P_w / (1 + w)$$

در این رابطه: P_d وزن مخصوص خشک، P_w وزن مخصوص مرطوب، و w درصد رطوبت در کل مخلوط می‌باشند. بر اساس تجربیات به‌دست آمده، وزن مخصوص خشک رابطه مستقیم با مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه بتن غلتکی دارد (شکل ۳-۱). بنابراین، برای یک انرژی تراکم ثابت و معین، درصد رطوبت کم‌تر یا بیش‌تر از رطوبت بهینه، وزن مخصوص

خشک (و مقاومت فشاری) کم‌تری به‌دست می‌دهد. همچنین با کاهش انرژی تراکم در مقایسه با آنچه که در تعیین درصد رطوبت بهینه مد نظر بوده است، مقاومت فشاری کم‌تری برای بتن غلتکی متراکم شده انتظار می‌رود.



اندازه نمونه: ۶ in × ۱۲ in (۱۵cm × ۳۰cm)
وزن چکش: ۱۰ lb
ارتفاع سقوط: ۱۸ in (۴۵ cm)
حداکثر اندازه سنگ‌دانه: ۲/۵ in (۶۲ mm)
میزان سیمان: ۴٪ وزن خشک سنگ‌دانه‌ها
میزان خاکستر بادی: ۳٪ وزن خشک سنگ‌دانه‌ها

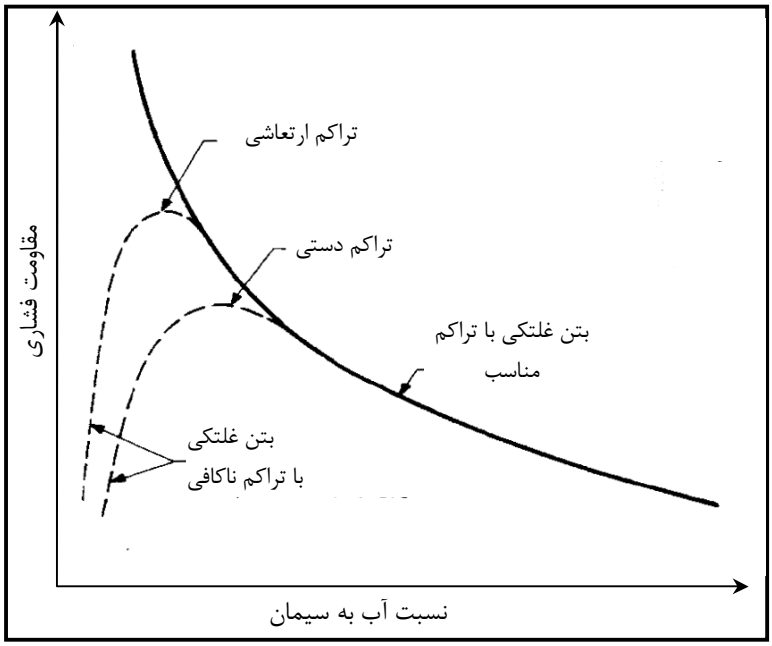
شکل ۳-۱- مقایسه وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری در بتن غلتکی بر اساس آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده (Yates) [۲۱]

در رویکرد طراحی همسان بدنه سد (سدهای با مواد سیمانی متوسط و زیاد)، مخلوط بتن غلتکی مشابه یک مخلوط بتن متعارف در نظر گرفته می‌شود که مقاومت و دیگر خواص آن از روابط آب و سیمان، که توسط Abrams در سال ۱۹۱۸ مشخص گردیده، تبعیت می‌کنند. بنابراین، با فرض مصالح سنگ‌دانه (شن و ماسه) تمیز و سالم، مقاومت بتن کاملا متراکم شده رابطه معکوس با نسبت آب به سیمان دارد، به بیان دیگر، با مقدار ثابت سیمان، کاهش آب مصرف شده بتنی با مقاومت فشاری بیش‌تر به‌دست خواهد داد.

در سدهای با مواد سیمانی متوسط و زیاد، فرض بر آن است که در مخلوط بتن غلتکی خمیر کافی برای پرکردن همه فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها و تهیه یک مخلوط کاملا متراکم و بدون اسلامپ وجود دارد. البته توجه به این نکته ضروری است که افزایش بیش از حد مواد خمیری در بتن غلتکی به طوری‌که مخلوط بتن تازه اسلامپ قابل اندازه‌گیری

به‌دست دهد و یا پس از چند عبور غلتک ارتعاشی، خمیر بیش از معمول درسطح بالایی لایه بتن ظاهر گردد، اثرات نامطلوبی بر کیفیت و همسانی بتن داشته و مجاز نمی‌باشد.

از نظر تئوریک و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، در مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد (و بتن متعارف) با کاهش هر چه بیش‌تر مقدار آب مصرفی به ازای یک مقدار سیمان ثابت، مقاومت بتن به شرط ایجاد تراکم کافی و تحقق کامل واکنش هیدراتاسیون سیمان، افزایش می‌یابد (شکل ۳-۲). اما در عمل و در شرایط کارگاهی، با توجه به عدم امکان ایجاد تراکم کافی و نیز تحقق ناقص واکنش هیدراتاسیون سیمان در مخلوط‌های بتن با میزان آب کم، نرخ افزایش مقاومت بتن سخت شده از حدود قابل انتظار کم‌تر می‌گردد. با کاهش بیش‌تر میزان آب در مخلوط بتن، حتی در شرایط اعمال ابزارهای تراکم مناسب، روند افزایشی مقاومت بتن متوقف شده و مقاومت بتن سخت شده به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۲- نمودار رابطه کلی بین مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان بتن (Neville 1981) [۲۱]

دلیل اصلی توقف روند افزایشی و ایجاد روند کاهش مقاومت در شرایط کاهش بیش از حد آب در مخلوط بتن، عدم تشکیل خمیر بتن به اندازه کافی و پر نشدن کامل فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌های بتن می‌باشد. بررسی روند کاهش مقاومت بتن سخت شده در شرایط کاهش بیش از حد میزان آب (شکل ۳-۲) نشان می‌دهد که این روند کاملا مشابه با نمودار تغییرات مقاومت «بتن غلتکی با مواد سیمانی کم» با «درصد رطوبت مخلوط بتن» بوده و به‌نحوی ارتباط بین دو فلسفه و رویکرد طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی را مشخص می‌سازد. همچنین با بررسی نمودارهای متناظر با روش‌های تراکم دستی (با انرژی تراکم کم) و تراکم ارتعاشی (با انرژی تراکم زیاد) در شکل (۳-۲) مشخص می‌گردد که اولا متناظر با «درصد رطوبت بهینه» در رویکرد طراحی مشابه با سدهای خاکی، «نسبت آب به سیمان بهینه» در روند تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد (ولی با میزان آب کم و تراکم ناکافی) قابل مشاهده بوده و با افزایش انرژی تراکم، مقاومت بتن سخت شده افزایش یافته و نسبت آب به سیمان بهینه کاهش می‌یابد.

به دلیل عوامل متعدد تاثیرگذار بر مقاومت مخلوط بتن غلتکی، بر قراری یک رابطه کلی بین مقاومت فشاری بتن و درصد آب مورد استفاده در مخلوط بتن بسیار مشکل و پیچیده است. مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر مقاومت بتن غلتکی، دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای، کیفیت تراکم مخلوط بتن، و تاخیر در شروع فرایند تراکم می‌باشند. در شرایطی که دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای یکنواخت نبوده و یا کمبودی در مقدار ماسه وجود داشته باشد، علیرغم تحقق تراکم مناسب برای مخلوط بتن، ممکن است سنگ‌دانه های درشت به‌نحوی با هم تماس داشته باشند که فضاهای خالی بین آن‌ها ایجاد شده و بتن متخلخل گردد. از سوی دیگر، هر گونه تاخیر در شروع فرایند تراکم مخلوط بتن تازه از زمانی که آب به سیمان اضافه می‌شود، موجب کاهش وزن مخصوص و متناسبا مقاومت بتن می‌گردد. بر اساس برخی مشاهدات مشخص شده است که حدود یک ساعت تاخیر در شروع تراکم مخلوط بتن، سبب ۲۰ درصد کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های آزمایشگاهی بتن خواهد شد.

در برخی تجربیات برای غلبه بر مشکلات فوق و بهبود کیفیت مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، مقادیر قابل توجهی (۸ تا ۱۲ درصد و یا گاهی بیش‌تر) ذرات و سنگ‌دانه های بسیار ریز (پودر سنگ) به عنوان پرکننده خلل و فرج بین سنگ‌دانه‌ها در مخلوط بتن استفاده شده است (“high-fine” low-cementitious RCC dam). این تکنیک بیش‌تر در کشور برزیل، به دلیل نبود معادن کافی پوزولان‌های طبیعی و نیز عدم نیاز به مقاومتهای بالای بتن با توجه به سطح لرزه‌خیزی پایین این کشور، مورد توجه قرار گرفته و نمونه شاخص کاربرد حجم قابل توجه سنگ‌دانه های بسیار ریز (پودر سنگ) در بتن غلتکی سد Jordao (در برزیل) می‌باشد. با اعمال این تکنیک، با افزایش محدود در هزینه‌های بتن، میزان مواد خمیری بتن تا حد مناسبی افزایش یافته و نتیجتا به دلیل پر شدن بهتر فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، نفوذپذیری جسم بتن کاهش و مقاومت فشاری آن نیز تا حدی افزایش می‌یابد.

بر اساس تجربیات و نتایج فوق به تدریج موضوع «ضرورت تامین حجم مناسب مواد خمیری» به‌عنوان یک معیار تعیین طرح اختلاط انواع مختلف مخلوط‌های بتن‌های غلتکی (با مواد سیمانی کم، متوسط و زیاد) مطرح و مرسوم گردید. دلیل تمایل به این رویکرد، توجه به ضرورت دستیابی به اطمینان بیش‌تر در فرایند تراکم مخلوط بتن تازه و وجود مواد خمیری لازم برای پرکردن و به حداقل رساندن حجم فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها در پایان عملیات تراکم بتن می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعات و تجربیات آزمایشگاهی و کارگاهی، میزان مناسب مواد خمیری در انواع مختلف مخلوط‌های بتن غلتکی در حدود ۱۴ درصد وزنی (۲۰ درصد حجمی) کل مصالح مصرفی در بتن می‌باشد. مواد خمیری مخلوط بتن تازه متشکل از آب، مواد افزودنی شیمیایی، سیمان، پوزولان، و کلیه ذرات سنگ‌دانه کوچک‌تر از ۷۵ میکرون (عبوری از الک ۲۰۰) است. برای نمونه، در جدول (۳-۲) میزان مواد خمیری مورد استفاده در یک مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی کم (در سد Willow Creek آمریکا) و یک مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد (در سد Upper Stillwater آمریکا) به صورت مقایسه‌ای ارائه شده است. البته باید توجه داشت که افزایش بیش از اندازه مصالح خمیری بتن سبب ایجاد مشکلاتی در عملیات تراکم مخلوط بتن و نیز افزایش حجم عملیات تمیزکاری سطوح بتن در زمان اجرا خواهد شد.

جدول۳-۲- مقایسه میزان مواد خمیری در مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و زیاد [۱۸]

مصالح خمیری بتن	بتن غلتکی با مواد سیمانی کم		بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد	
	kg/m^3	m^3	kg/m^3	m^3
سیمان	۵۹	۰/۰۱۸۸	۸۹	۰/۰۲۸۱
پوزولان	۰	۰	۱۴۸	۰/۰۵۹۳
آب	۱۱۰	۰/۱۱۰۰	۱۰۷	۰/۱۰۷۰
هوا (۰.۵ درصد)	۰	۰/۰۰۵۰	۰	۰/۰۰۵۰
سنگ‌دانه بسیار ریز یا پودر سنگ (۸٪)	۱۶۶	۰/۰۶۶۷	۰	۰
وزن (حجم) کل مصالح خمیری	۳۳۵	۰/۲۰۰۵	۳۴۴	۰/۱۹۹۴
درصد مصالح خمیری بتن	۱۴ درصد	۲۰ درصد	۱۴ درصد	۲۰ درصد

۳-۳- روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای خاکی

هدف از مطالعه و تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی، انتخاب مقادیر هر یک از اجزای متشکله مخلوط بتن می‌باشد به‌گونه‌ای که با حداقل هزینه، دستیابی به مخلوطی با کم‌ترین مقدار سیمان و حداکثر مقدار سنگ‌دانه و در عین حال با ارضای الزامات بتن در وضعیت تازه و سخت شده، میسر گردد. یکی از معیارهای مهم برای تحقق هدف فوق، دستیابی به نسبت هایی از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه است که در نهایت کم‌ترین حجم فضاهای خالی (یا بیش‌ترین چگالی) را در بتن به‌دست دهد. جهت به حداقل رساندن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه ها، طرح اختلاط بتن غلتکی باید به نحوی تعیین گردد که بخش خمیری بتن فضای خالی بین مصالح سنگ‌دانه‌ای ریز (ذرات ماسه) را پر کرده و بخش ملات بتن (شامل ماسه و خمیر) بتواند به نحو مطلوبی فضاهای خالی بین مصالح سنگی درشت‌دانه را پر نماید.

به طور معمول دامنه میزان فضای خالی بین سنگ‌دانه‌های ریز که توسط وزن نمونه ماسه میله خورده خشک اندازه‌گیری می شود حدود ۳۴ تا ۴۲ درصد می‌باشد. در روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای خاکی برای تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی، برای تعیین حداقل میزان لازم سیمان، مصالح پوزولانی، و آب برای پر کردن فضای خالی بین ذرات ماسه، با تعیین طرح های اختلاط آزمایشی و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، منحنی(های) تغییرات وزن مخصوص در مقابل میزان مواد خمیری ترسیم می‌گردد و بر اساس آن با توجه به شرایط متناظر با وزن مخصوص حداکثر، حجم و نسبت اختلاط بهینه مصالح خمیری بتن تعیین می‌گردد.

بر اساس رویکرد فوق، مراحل تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی در روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای خاکی به شرح زیر می‌باشند:

- تهیه طرح‌های اختلاط آزمایشی ملات با رعایت الزامات نسبت آب به سیمان و افزودن سنگ‌دانه‌های ریز (ماسه) با گام‌های مساوی تغییر نسبت‌های مصالح
- تراکم نمونه‌های آزمایشی ملات با روش‌های تراکم خاک یا لرزاندن و اندازه‌گیری وزن مخصوص آن‌ها پس از تراکم
- ترسیم منحنی تغییرات وزن مخصوص در برابر میزان مصالح خمیری در نمونه‌های آزمایشی ملات
- تعیین میزان مصالح خمیری متناظر با حداکثر وزن مخصوص نمونه‌های ملات

در فرایند تولید و اجرای بتن در کارگاه، حجم مصالح خمیری مخلوط بتن باید ۵ تا ۱۰ درصد بیش‌تر از حجم مصالح خمیری بهینه به‌دست آمده در نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شود. همچنین برای طرح اختلاط مخلوط‌های ویژه، نظیر ملات بستر برای درزهای اجرایی بتن‌ریزی، حجم نسبی مصالح خمیری بهینه آزمایشگاهی باید ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش یابد.

۳-۴- روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای بتنی

در فرایند توسعه و رشد دانش و تکنولوژی سدهای بتن غلتکی، گرایش بیش‌تری به طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد، با توجه به مزایای فنی و اقتصادی این نوع سدها در موارد مختلف، ایجاد شده است. همچنین در طراحی مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی کم نیز رویکرد تامین حجم مصالح خمیری لازم در مخلوط بتن با افزایش سنگ‌دانه‌های بسیار ریز (پودر سنگ) با توجه به مزایای آن کاملا پذیرفته شده است. بر همین اساس، در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای بتنی متعارف در مطالعه و تعیین طرح اختلاط انواع مخلوط‌های بتن غلتکی متداول‌تر می‌باشد. به دلیل این‌که در اکثر قریب به اتفاق ایستگاه‌های اختلاط و تولید بتن (Batching Plant)، میزان هر یک از اجزای تشکیل دهنده بتن با جرم آن‌ها اندازه‌گیری می‌گردد، در مطالعه طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی نیز به طور معمول وزن مصالح تشکیل دهنده برای واحد حجم بتن متراکم شده تعیین می‌گردد.

در استفاده از فلسفه طراحی سدهای بتنی برای تعیین طرح اختلاط بتن‌های غلتکی باید به این نکته توجه داشت که در مخلوط‌های بتن معمولی، روانی مخلوط‌های بتن بدون اسلامپ که نسبت‌های اختلاط آن برای نمونه بر اساس روش پیشنهادی آیین‌نامه ACI 211 تعیین می‌گردد، به‌گونه‌ای است که به دلیل حجم مصالح خمیری اضافه بر حجم فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، مخلوط بتن تازه تحمل وزن غلتک‌های لرزاننده بزرگ را نخواهد داشت. بنابراین برای برآورده شدن الزامات مخلوط‌های بتن غلتکی، اعمال تغییراتی در روش‌های متعارف تعیین طرح اختلاط بتن‌های معمولی ضروری می‌باشد. مهم‌ترین شاخص کنترل و ارزیابی میزان روانی و تراکم‌پذیری مناسب در مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش زمان تراکم ارتعاشی Vebe می‌باشد. زمان تراکم ارتعاشی (Vebe) مدت زمان لازم برای ارتعاش وزنی مخلوط بتن غلتکی به‌منظور پر کردن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها توسط خمیر موجود در مخلوط می‌باشد.

در روش‌های مطالعه طرح اختلاط مبتنی بر فلسفه طراحی سدهای بتنی، به طور معمول میزان بهینه هر یک از اجزاء متشکله بتن با ثابت نگه داشتن سایر مصالح مصرفی، و با انجام آزمایش‌های لازم محاسبه می‌گردد. با تکرار این روند برای اجزای اصلی تشکیل دهنده بتن در مراحل مختلف، در نهایت ترکیب و نسبت اختلاط بهینه بتن بر اساس الزامات و شاخص‌های مد نظر، تعیین می‌گردد [۴، ۱۳، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای مطالعه و تعیین طرح اختلاط بتن بر اساس فلسفه طراحی مخلوط‌های بتن معمولی وجود دارد ولی با توجه به این‌که رویکرد کلی غالب روش‌های مذکور در تعیین طرح اختلاط بتن کم و بیش مشابه می‌باشد، مراحل گام به گام تعیین طرح اختلاط بتن در این روش‌ها را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

- بهینه نمودن دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت و ریز برای حداقل کردن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها

- افزودن مصالح سنگی بسیار ریزدانه (پودر سنگ) به‌عنوان پرکننده اضافی به مصالح سنگی ریزدانه در صورت نیاز
- انتخاب نسبت مناسب مصالح خمیری به ملات، به‌گونه‌ای که مصالح خمیری فضاهای خالی مصالح سنگی ریزدانه را به نحو مطلوب پرکند. بر اساس تجربیات موجود، این نسبت در حدود ۳۸ تا ۴۶ درصد متغیر می‌باشد. مصالح خمیری شامل آب و کلیه مصالح کوچک‌تر از ۷۵ میکرون می‌باشد.
- تعیین میزان سیمان و افزودنی‌های معدنی (در صورت امکان)، آب، و افزودنی‌های شیمیایی (در صورت نیاز) برای دستیابی به مقاومت بتن تعیین شده
- تعیین حجم مصالح درشت‌دانه برای حصول کارایی مورد نظر بر اساس آزمایش زمان تراکم ارتعاشی Vebe
- کنترل کفایت مصالح سیمانی و یا ریزدانه (در صورت استفاده) برای تامین نفوذ ناپذیری مورد نظر
- کنترل بهینه بودن نسبت مصالح ریزدانه به مصالح درشت‌دانه
- کنترل میزان حرارت‌زایی بتن با توجه به حدود مجاز تعیین شده
- تدقیق نهایی و بازنگری اوزان اجزا در صورت لزوم

از بین روش‌های مختلف موجود برای تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی، نتایج کاربرد روش پیشنهاد شده توسط گروه مهندسین ارتش آمریکا (USACE) برای محدوده وسیعی از مصالح بتن و نیز برای طیف گسترده‌ای از الزامات مختلف طراحی، مطلوب و رضایت‌بخش بوده است. روش پیشنهاد شده توسط گروه مهندسین ارتش آمریکا (USACE) برای طرح اختلاط بتن غلتکی بر اساس نتایج و تجربیات حاصل از پروژه‌های متعدد بتن غلتکی اجرا شده توسط این گروه تدوین شده است. اصول این روش از روشی که استاندارد ACI 211.3 برای طرح اختلاط بتن با اسلامپ صفر عنوان نموده تبعیت می‌کند. در این روش، جهت حصول اطمینان از پر شدن فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، نسبت مصالح خمیری به ملات حداقل برابر ۴۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴-۱- مراحل گام به گام تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی در روش پیشنهادی USACE

گام ۱- تعیین کلیه الزمات طراحی مد نظر برای بتن غلتکی شامل:

- مقاومت طراحی، مقاومت میانگین و سن بتن که برای آن مقاومت تعیین شده است
- شرایط محیطی که بتن در معرض آن خواهد بود
- محدودیت‌های نسبت آب به سیمان (W/C)
- الزامات مربوط به مواد افزودنی
- اندازه حداکثر اسمی سنگ‌دانه، منبع و کیفیت مصالح
- مدت زمان ارتعاشی Vebe اصلاح شده (تعیین زمان Vebe اصلاح شده بر اساس روش استاندارد CRD-C53 صورت می‌گیرد. در این استاندارد از سربار به وزن ۱۲/۵ kg استفاده می‌شود و معمولا محدوده مناسب برای زمان ارتعاشی Vebe بین ۱۲ تا ۲۴ ثانیه می‌باشد).

گام ۲- تعیین خواص اصلی مصالح، شامل:

- دانه‌بندی کلیه سنگ‌دانه‌ها
- جرم حجمی اشباع با سطح خشک (SSD) و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌های ریز و درشت
- خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان، پوزولان و یا سرباره
- کیفیت سنگ‌دانه‌ها

گام ۳- تعیین مقدار آب و نیز مقدار هوای بتن با توجه به اندازه حداکثر سنگ‌دانه‌ها و بر اساس زمان ارتعاشی Vebe اصلاح شده با استفاده از جدول (۳-۳)

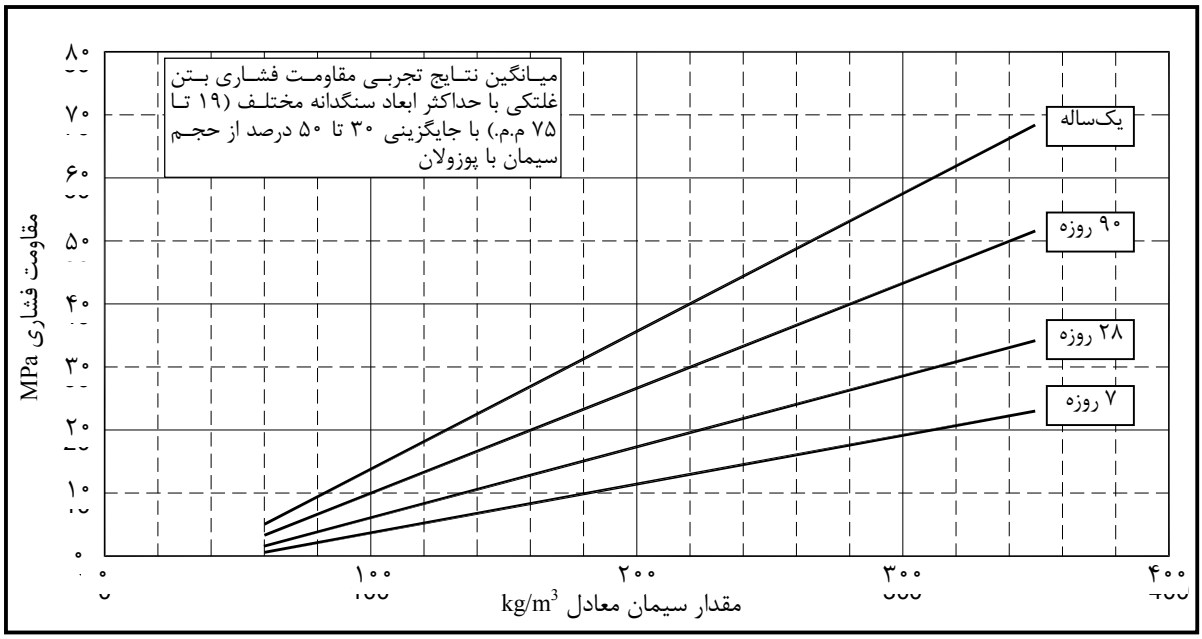
جدول ۳-۳- حدود نسبی هر یک از اجزای مخلوط بتن برای تهیه مخلوط‌های آزمایشی بتن‌غلتکی با توجه به حداکثر اندازه سنگ‌دانه [۱۹]

اجزای مخلوط بتن	حداکثر اسمی ابعاد سنگدانه‌های بتن					
	۱۹۰ mm		۵۰ mm		۷۵ mm	
	میانگین	حدود تغییرات	میانگین	حدود تغییرات	میانگین	حدود تغییرات
آب [۱] (کیلوگرم بر مترمکعب)						
الف- وی بی کم‌تر از ۳۰ ثانیه	۱۵۰	۱۳۳-۱۸۱	۱۲۲	۱۰۷-۱۴۰	۱۰۷	۷۵-۱۲۸
ب- وی بی بیش‌تر از ۳۰ ثانیه	۱۳۴	۱۱۰-۱۵۴	۱۱۹	۱۰۴-۱۲۵	۱۰۰	۹۷-۱۱۲
ماسه (درصد حجم نسبت به حجم کل سنگدانه)						
الف- مصالح سنگی شکسته	۵۵	۴۹-۵۹	۴۳	۳۲-۴۹	۳۴	۲۹-۳۵
ب- مصالح سنگی رودخانه‌ای	۴۳	۳۸-۴۵	۴۱	۳۵-۴۵	۳۱	۲۷-۳۴
درصد حجم دوغاب سیمان						
الف- مصالح سنگی شکسته	۷۰	۶۳-۷۳	۵۵	۴۳-۶۷	۴۵	۳۹-۵۰
ب- مصالح سنگی رودخانه‌ای	۵۵	۵۳-۵۷	۵۱	۴۷-۵۹	۴۳	۳۹-۴۸
	۰/۴۱	۰/۲۷-۰/۵۵	۰/۴۱	۰/۳۱-۰/۵۶	۰/۴۴	۰/۳۳-۰/۵۹
درصد حجم هوا (در ۳۷/۵ میلی‌متر)	۱/۵	۰/۱-۴/۲	۱/۱	۰/۲-۴/۱	۱/۱	۰/۵-۳/۳
(۱) مقادیر کمینه ذکر شده برای مصالح رودخانه‌ای طبیعی و مخلوط‌های بتن با مواد سیمانی کم یا مواد ریزدانه کم مناسب می‌باشند.						

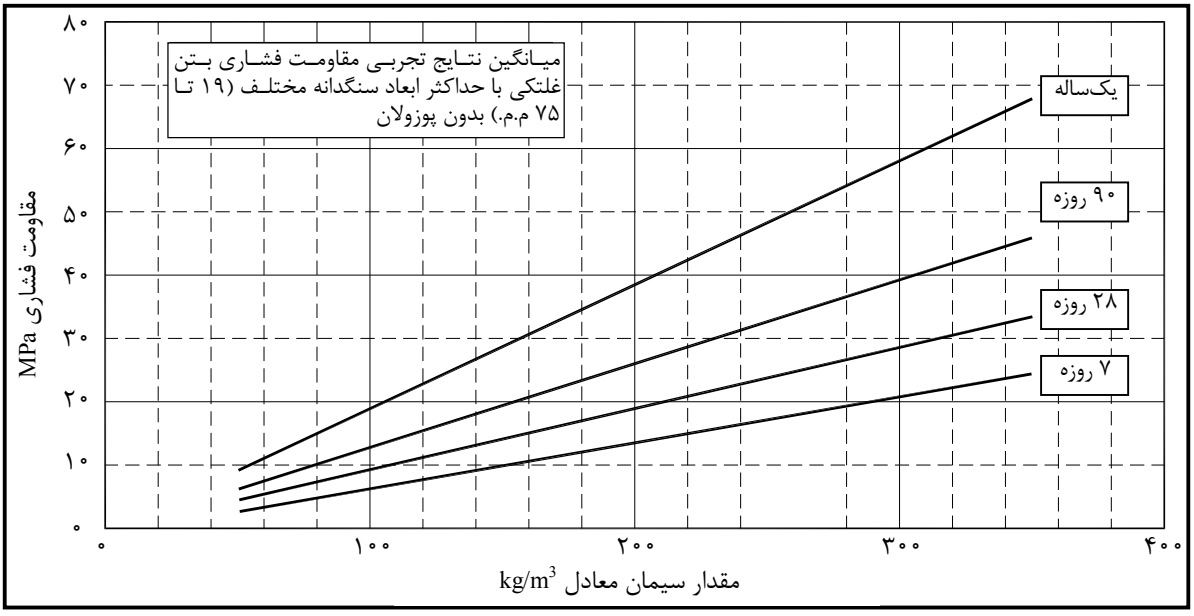
گام ۴- محاسبه جرم سیمان معادل بر اساس مقاومت فشاری مورد نیاز از شکل‌های (۳-۳) و (۳-۴). در صورت استفاده از مواد پوزولانی، کل وزن سیمان و پوزولان باید برابر وزن سیمان معادل تعیین شده باشد. درصد بهینه مصرف مواد پوزولانی با توجه به میزان فعالیت مواد پوزولانی و همچنین نوع سیمان با انجام آزمایش‌های لازم تعیین می‌گردد.

گام ۵- تعیین نسبت‌های بخش‌های مختلف اندازه‌ای درشت‌دانه به طوری‌که دانه‌بندی ترکیبی آن‌ها از دانه‌بندی ایده‌ال ارائه شده در جدول (۳-۴) تبعیت نماید.

گام ۶- کنترل دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) موجود با حدود تعیین شده در جدول (۳-۵)؛ در صورتی‌که مصالح سنگی ریزدانه موجود دارای مقادیر کافی از ذرات عبوری از الک‌های کوچک نباشد، می‌توان از مواد پوزولانی و یا مصالح سنگی بسیار ریزدانه نظیر پودر سنگ برای جبران ذرات بسیار ریز مورد نیاز در ماسه استفاده کرد. نسبت سنگ‌دانه ریز به کل سنگ‌دانه‌ها با توجه به اندازه حداکثر اسمی سنگ‌دانه با استفاده از جدول (۳-۴) تعیین می‌شود.



شکل ۳-۳- رابطه بین مقدار سیمان معادل و مقاومت فشاری- میانگین تجربیات موجود طرح‌های RCC با پوزولان [۱۹]



شکل ۳-۴- رابطه بین مقدار سیمان معادل و مقاومت فشاری- میانگین تجربیات موجود طرح‌های RCC بدون پوزولان [۱۹]

جدول۳-۴- منحنی ایده‌آل دانه بندی درشت دانه[۱۹]

سایز الک	درصد تجمعی عبوری از الک		
	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۷۵ میلی‌متر	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۵۰ میلی‌متر	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۱۹ میلی‌متر
۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ)	۱۰۰		
۶۳ میلی‌متر (۲/۵ اینچ)	۸۸		
۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ)	۷۶	۱۰۰	
۳۷/۵ میلی‌متر (۱/۵ اینچ)	۶۱	۸۱	
۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ)	۴۴	۵۸	

ادامه جدول۳-۴- منحنی ایده‌آل دانه بندی درشت دانه[۱۹]

سایز الک	درصد تجمعی عبوری از الک		
	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۷۵ میلی‌متر	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۵۰ میلی‌متر	۴/۷۵ (الک شماره ۴) تا ۱۹ میلی‌متر
۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ)	۳۳	۴۴	۱۰۰
۱۲/۵ میلی‌متر (۰/۵۰ اینچ)	۲۱	۲۸	۶۳
۹/۵ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ)	۱۴	۱۸	۴۱
۴/۷۵ میلی‌متر (الک شماره ۴)	-	-	-

جدول ۳-۵- منحنی ایده‌آل دانه‌بندی ریزدانه [۱۹]

سایز الک	درصد تجمعی عبوری از الک
۹/۵ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ)	۱۰۰
۴/۷۵ میلی‌متر (الک شماره ۴)	۹۵-۱۰۰
۲/۳۶ میلی‌متر (الک شماره ۸)	۷۵-۹۵
۱/۱۸ میلی‌متر (الک شماره ۱۶)	۵۵-۸۰
۶۰۰ میکرومتر (الک شماره ۳۰)	۳۵-۶۰
۳۰۰ میکرومتر (الک شماره ۵۰)	۲۴-۴۰
۱۵۰ میکرومتر (الک شماره ۱۰۰)	۱۲-۲۸
۷۵ میکرو متر (الک شماره ۲۰۰)	۶-۱۸
ماسه بادی	۲/۱۰-۲/۷۵

گام ۷- با توجه به مقادیر به‌دست آمده از گام های ۳ تا ۶، حجم مطلق و جرم اشباع با سطح خشک کلیه اجزای بتن برای یک مترمکعب محاسبه می‌شود.

گام ۸- مقدار ملات مخلوط با جمع نمودن احجام مواد سیمانی، سنگ‌دانه‌های ریزتر از mm ۴/۷۵ (ماسه)، آب و همچنین هوای بتن محاسبه می‌شود. این مقدار با مقادیر ارائه شده در جدول (۳-۳) مقایسه شده و در صورت نیاز مقدار ریزدانه به‌نحوی تصحیح می شود که مقدار ملات به مقدار متوسط عنوان شده برای نوع و اندازه حداکثر اسمی سنگ‌دانه، نزدیک شود.

گام ۹- حجم خمیر سیمان با جمع نمودن احجام مواد سیمانی، سنگ‌دانه‌های ریزتر از mm ۰/۷۵ (عبوری از الک شماره ۲۰۰)، آب و همچنین هوای بتن محاسبه شده و نسبت حجم خمیر سیمان به حجم ملات محاسبه می‌گردد. برای اطمینان از کافی بودن حجم خمیر برای پرکردن فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، نسبت حجم خمیر سیمان به حجم ملات باید از ۴۲ درصد کم‌تر باشد. درصورت نیاز برای رسیدن به این نسبت حداقل، می‌توان مقدار مواد سیمانی، مقدار ذرات ریزتر از mm ۰/۰۷۵، و یا مقدار آب را افزایش داد.

گام ۱۰- با ساخت مخلوط‌های آزمایشی کارایی و مقاومت بتن غلتکی ارزیابی می‌گردد. مخلوط تازه بتن غلتکی برای تعیین مدت زمان ارتعاشی Vebe اصلاح شده و مقدار هوا آزمایش شده و در صورت لزوم مقدار آب برای دستیابی به زمان ارتعاشی مورد نظر تنظیم می‌گردد. برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن با ابعاد ۳۰ × ۱۵ سانتی‌متر مطابق روش استاندارد ASTM C39 تهیه شده و در سن مورد نظر مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

۳-۴-۲- روش تعیین طرح اختلاط در سدهای غلتکی کوبیده (RCD) و مراحل گام به گام آن

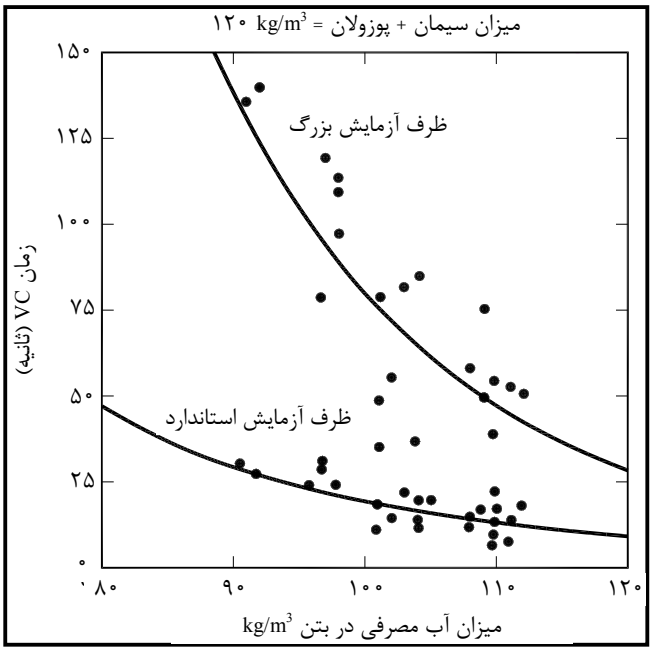
معیارهای تعیین طرح اختلاط سدهای غلتکی کوبیده (RCD – Rolled Concrete Dam) با توجه به الزامات خاص تجهیزات آزمایش روانی و ویژگی‌های اجرایی سدهای RCD با سایر سدهای بتن غلتکی متفاوت می‌باشد. تکنیک اجرای این سدها عموما در کشور ژاپن ابداع و توسعه یافته است و با توجه به تمهیدات و ماشین‌آلات خاص مورد نیاز برای این تکنیک، اجرای این سدها در خارج از کشور ژاپن چندان با اقبال مواجه نشده است.

ویژگی‌های خاص مخلوط بتن غلتکی در سدهای غلتکی کوبیده (RCD) عبارتند از:

- مقدار سیمان حتی‌المقدور پایین نگه داشته می‌شود تا ضمن کنترل مسایل حرارتی، الزامات مقاومت نیز برآورده گردد. برای جبران کمبود سیمان از مواد پوزولانی (خاکستر بادی) استفاده می‌شود که حرارت‌زایی کم‌تری دارند.
- به منظور کاهش ریسک پدیده جداشدگی مصالح سنگ‌دانه‌ای و سهولت تراکم توسط غلتک‌های ویبره‌ای، نسبت ماسه به سنگ‌دانه بیش‌تر از مقداری که برای بتن حجیم معمولی به‌کار می‌رود، در نظر گرفته می‌شود.

در طرح اختلاط بتن سدهای RCD نیز یکی از مبانی طرح اختلاط دستیابی به مخلوطی است که دارای کارایی مناسب جهت تراکم لرزه‌ای تحت سربار باشد. آزمایشی که برای بتن سدهای RCD برای تعیین مدت زمان تراکم لرزه‌ای مورد نیاز برای ایجاد تراکم کامل انجام می‌شود، آزمایش VC (Vibrating Compaction) نام دارد. دستگاه آزمایش VC دارای دو نوع استاندارد و بزرگ‌تر از استاندارد می‌باشد. در آزمایش VC استاندارد، بتن RCD که سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۴۰mm آن از طریق عبور از سرند جدا شده‌اند داخل قالب ریخته شده و سپس عمل ویبره تحت سربار صورت می‌گیرد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا خمیر سیمان روی سطح قالب بیاید، به‌عنوان نرخ VC استاندارد تعریف می‌شود. دستگاه VC فرکانس ارتعاش ۴۰۰۰ دور در دقیقه (در روش VB اصلاح شده فرکانس ۳۶۰۰ دور در دقیقه می‌باشد) دارد و ابعاد استوانه آزمایش VC دارای قطر ۲۴۰mm و ارتفاع ۲۰۰mm بوده و وزن سربار به‌کار رفته ۲۰kg می‌باشد.

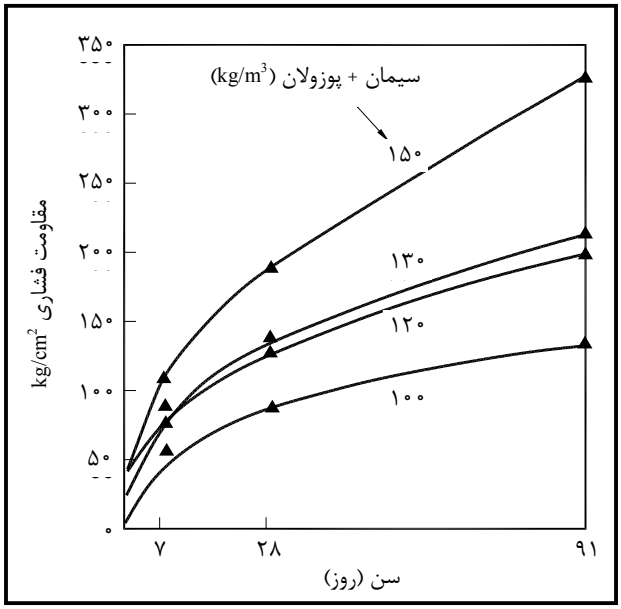
برای آزمایش مخلوط کامل RCD، دستگاه VC بزرگ‌تر از استاندارد استفاده می‌شود و نرخ VC محاسبه شده را نرخ VC بزرگ (Large Sized VC) می‌نامند. مدت زمان ارتعاش بهینه حدود ۲۰ ثانیه برای دستگاه VC استاندارد و حدود ۶۰ ثانیه برای دستگاه VC بزرگ می‌باشد. ابعاد استوانه آزمایش VC بزرگ دارای قطر ۴۸۰mm و ارتفاع ۴۰۰mm است و امکان آزمایش مخلوط‌های با اندازه حداکثر سنگ‌دانه تا ۱۵۰mm را فراهم می‌آورد. رابطه بین نتایج آزمایش VC استاندارد و VC بزرگ در شکل (۳-۵) ارائه شده است.



شکل ۳-۵- رابطه بین میزان آب مصرفی در بتن و زمان VC استاندارد و زمان VC بزرگ برای مخلوط‌های RCD [۲۱]

۳-۴-۳- مراحل گام به گام تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی سدهای RCD

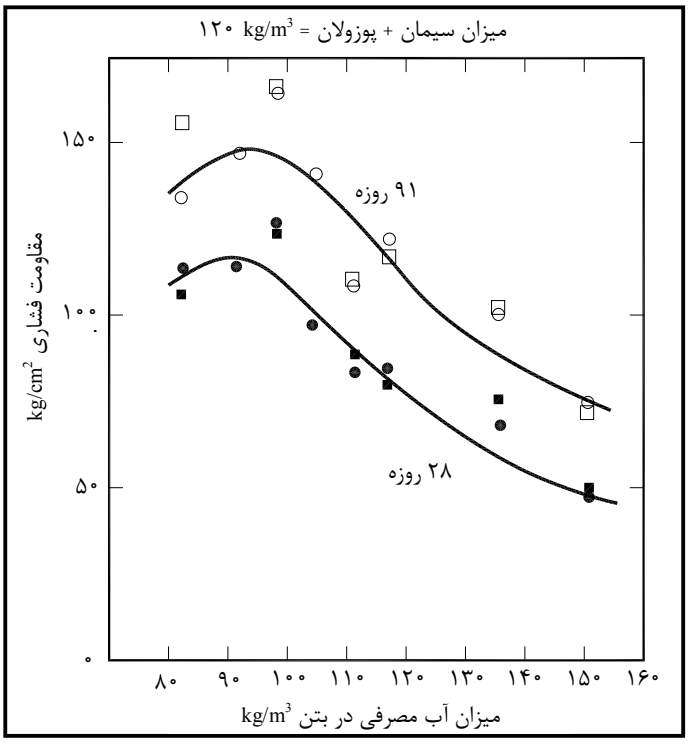
گام ۱- ابتدا مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت (به طور مقاومت ۹۰ روزه حدود ۲۰۰kg/cm^2) با استفاده از نمودار شکل (۳-۶) تعیین می‌شود. در غالب موارد، مقدار سیمان به‌کار رفته در سدهای RCD برابر ۱۲۰kg/m^3 انتخاب شده است. برای سدهای مرتفع‌تر و در مناطقی که مقاومت یا دوام بیش‌تری مورد نیاز بوده است، مقدار سیمان در این سدها برابر ۱۳۰ kg/m^3 در نظر گرفته می‌شود. مقدار مواد پوزولانی (خاکستر بادی - Flyash) نیز بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی مواد سیمانی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۶- رابطه بین مقدار مواد سیمانی و مقاومت فشاری [۲۱]

گام ۲- در این مرحله حدود دانه‌بندی مناسب برای مصالح درشت‌دانه با توجه به تقلیل فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها تعیین می‌گردد. درصد ماسه به کل سنگ‌دانه نیز مقداری حدود ۳۰ تا ۳۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.

گام ۳- با مقادیر مشخص شده سیمان، پوزولان و نسبت‌های سنگ‌دانه‌ها از گام‌های قبلی، مخلوط‌های آزمایشی با مقادیر مختلف آب ساخته شده و جرم حجمی ملات، مقاومت فشاری بتن و مقدار VC مخلوط بتن به ازای مقادیر مختلف آب تعیین می‌گردد. با رسم منحنی تغییرات مقاومت فشاری و نیز منحنی تغییرات مقدار VC به ازای مقادیر مختلف آب، مقدار آبی که متناظر با زمان VC حدود ۲۰ ثانیه است تعیین شده و مخلوط آزمایشی که با این مقدار آب، مقاومت مورد نظر را نیز به‌دست دهد، انتخاب می‌گردد. در مخلوط آزمایشی منتخب، مقدار آب تعیین شده باید نزدیک و قدری در سمت راست نقطه حداکثر منحنی تغییرات مقاومت فشاری نسبت به مقدار آب قرار گیرد (شکل شماره ۳-۷).



شکل ۳-۷- رابطه بین مقدار آب و مقاومت فشاری RCD [۲۱]

گام ۴- پس از مشخص شدن مقدار آب، دانه‌بندی مصالح سنگی درشت‌دانه به طوری‌که حداکثر چگالی بتن را ایجاد کند تنظیم می‌شود. برای این منظور آزمایش‌های تعیین چگالی بتن با استفاده از میز VC بزرگ و با ترکیب‌های مختلف از هر رده اندازه‌ای سنگ‌دانه‌ها انجام شده، و بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، درصدهای بهینه رده‌های اندازه‌ای سنگ‌دانه‌ها که بیش‌ترین چگالی بتن را به‌دست می‌دهند، تعیین می‌شوند.

گام ۵- در این گام با مشخص بودن مقادیر سیمان، خاکستر بادی، آب و دانه‌بندی درشت‌دانه، چندین مخلوط با نسبت‌های مختلف ماسه به سنگ‌دانه ساخته می‌شود و مدت زمان VC بزرگ برای هر مخلوط اندازه‌گیری می‌شود. نسبتی که کم‌ترین مقدار VC را حاصل نماید به عنوان نسبت ماسه به سنگ‌دانه انتخاب می شود. برای انتخاب نسبت ماسه به

سنگ‌دانه همچنین می‌توان نمودار چگالی نمونه‌ها را به ازای نسبت‌های مختلف ماسه به سنگ‌دانه رسم کرد و مقداری که بیش‌ترین چگالی را نتیجه می‌دهد به‌عنوان مقدار بهینه ماسه به سنگ‌دانه انتخاب نمود.

گام ۶- نهایتا یک سری مخلوط‌های آزمایشی برای بهینه‌سازی مقدار مواد سیمانی تهیه و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. برای این منظور مخلوط‌های آزمایشی بتن RCD با مقادیر متغیر مواد سیمانی ساخته شده و مقاومت مخلوط‌ها تعیین می‌گردد. طرح اختلاط مخلوطی که با کم‌ترین مقدار مواد سیمانی مقاومت تعیین شده را در سن مورد نظر به‌دست می‌دهد، به‌عنوان طرح اختلاط نهایی در نظر گرفته می‌شود [۴، ۱۳، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹].

فصل ۴

خواص مکانیکی بتن غلتکی

۴-۱- کلیات

پارامترها و مشخصات رفتاری بتن غلتکی بستگی به کیفیت مصالح مصرفی، نسبت‌های اختلاط و میزان تراکم یا تحکیم مخلوط بتن غلتکی در حین اجرا دارد. به طور کلی مشخصات و خواصی از بتن غلتکی که به کیفیت مصالح سنگ‌دانه‌ها بستگی دارند، نظیر خواص مکانیکی و حرارتی، مشابه خواص متناظر در بتن حجیم معمولی است. با این حال، از آنجا که خواص کیفی و اندازه سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن غلتکی، و همچنین کیفیت و روش اجرای بتن غلتکی تنوع و گستردگی بیش‌تری دارند، دامنه تغییرات خواص بتن غلتکی نسبت به بتن حجیم متعارف بیش‌تر می‌باشد.

علاوه بر این، با توجه به روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی، تعداد زیادی درز اجرایی افقی بین لایه‌های نسبتا نازک بتن‌ریزی در بدنه سد ایجاد می‌شوند. نحوه آماده‌سازی و کنترل کیفی این درزها تاثیر تعیین‌کننده‌ای در نفوذپذیری و پارامترهای مقاومت برشی درزهای اجرایی مذکور دارد. وجود تعداد زیاد درزهای اجرایی بتن‌ریزی و متراکم نمودن مخلوط بتن غلتکی بدون اسلامپ با استفاده از غلتک، به خصوص در مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، محصولی را به‌وجود می‌آورد که بسیاری از خواص آن غیرهمگن است. برای نمونه نفوذپذیری بتن غلتکی در راستای عمود بر لایه‌های بتن‌ریزی (راستای قائم) به میزان قابل توجهی کم‌تر از نفوذپذیری در راستای افقی (و در امتداد درزهای اجرایی بتن‌ریزی) می‌باشد.

با توجه به شرایط فوق، خواص رفتاری بتن غلتکی، به خصوص مدول الاستیسیته، خزش و ظرفیت کرنش کششی، حتی‌الامکان باید با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های بتن غلتکی در پروژه مورد نظر تعیین گردند. فرایند تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های بتن غلتکی و انجام آزمایش‌ها باید به نحوی انجام پذیرند که نتایج حاصل حتی‌المقدور معرف ویژگی‌های واقعی مخلوط بتن غلتکی مورد استفاده در پروژه باشد. با این حال، از آنجا که به طور معمول انجام همه آزمایش‌های لازم به خصوص در زمان مطالعات و طراحی میسر نمی‌گردد، برای تخمین پارامترهای رفتاری بتن غلتکی استفاده از نتایج تجربیات انتشار یافته در مراجع معتبر مانند ACI 207.5R [۱۶]، USACE EM 1110-2-2006 [۱۹]، و تجربیات پروژه‌های مشابه ضروری می‌گردد.

خواص مکانیکی بتن غلتکی نیز مشابه با بتن معمولی نسبت به نرخ کرنش حساس می‌باشند و این تاثیر در تحلیل دینامیکی سازه سد می‌بایست در نظر گرفته شود. با توجه به محدوده فرکانس غالب بارهای لرزه‌ای، نرخ کرنش ایجاد شده در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ معمولا ۱۰۰۰ برابر بزرگ‌تر از نرخ بارگذاری در شرایط آزمایشگاهی است.

با توجه به پارامترهای رفتاری و مقاومتی ضعیف‌تر درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی در مقایسه با توده بتن غلتکی، و با در نظر گرفتن تاثیر تعیین‌کننده رفتار این درزهای اجرایی در طراحی و تحلیل سدهای وزنی بتن غلتکی، به طور معمول پارامترهای رفتاری مختلف درزهای اجرایی به طور مستقل مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

مقاومت کششی و برشی درزهای اجرایی بتن‌ریزی متاثر از درجه تراکم، کیفیت سنگ‌دانه‌ها، مواد سیمانی موجود و همچنین نحوه آماده‌سازی درز می‌باشد. بسته به این شرایط، دامنه تغییرات پارامترهای مقاومتی درزهای اجرایی در سد بتن غلتکی شامل مقادیر خیلی کم تا مقادیر زیاد (مشابه با درزهای اجرایی آماده‌سازی شده در سدهای بتنی وزنی معمولی) می‌باشد.

۴-۲- مقاومت فشاری (f'_c)

در سدهای وزنی، در غالب موارد مقاومت کششی و برشی توده بتن و یا درزهای اجرایی بتن‌ریزی کنترل کننده طراحی بدنه سد می‌باشند. با این وجود، نظر به سهولت انجام آزمایش مقاومت فشاری و نیز با توجه به روابط و تناسبات تجربی به‌دست آمده بین مقاومت فشاری و سایر پارامترهای رفتاری و مقاومتی بتن، نیازهای طراحی عموما بر اساس پارامتر مقاومت فشاری بیان می‌گردد. متناسب با نیازهای طراحی تعیین شده، مطالعات آزمایشگاهی و کارگاهی نیز غالبا بر اساس اندازه‌گیری پارامتر مقاومت فشاری بتن برنامه‌ریزی و تنظیم می‌شوند. بر اساس رویکردها و تجربیات طراحی، مقاومت فشاری مورد نیاز برای بتن مغزه و بتن رویه در سدهای وزنی بتن غلتکی در بازه ۷ تا ۲۸ مگاپاسکال متغیر می‌باشد.

مقاومت فشاری بتن غلتکی با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای و یا نمونه‌های مغزه‌گیری شده از بتن بدنه سد تعیین می‌شود. ابعاد مناسب نمونه‌های آزمایشی و سایر جزییات فرایند انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن غلتکی با توجه به اندازه حداکثر سنگ‌دانه در بتن و استانداردهای متداول مشخص می‌گردد.

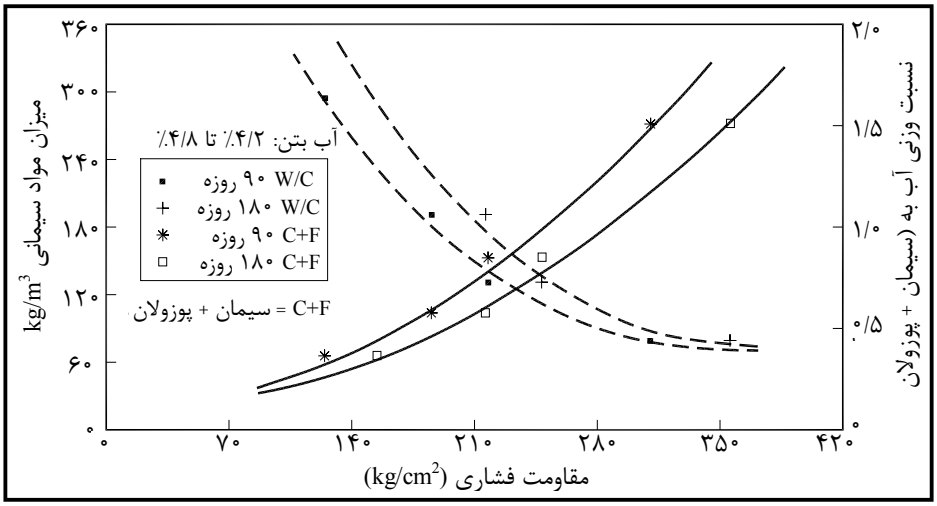
مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی با تراکم نامناسب و یا خمیر ناکافی برای پرکردن فضاهای خالی، متاثر از درجه تراکم بتن خواهد بود. ولی در شرایطی که بتن غلتکی دارای طرح اختلاط و میزان تراکم مناسب باشد، مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی به طور معمول با بهبود کیفیت سنگ‌دانه‌ها و افزایش میزان مواد سیمانی مصرفی در بتن افزایش می‌یابد. با توجه به کاهش میزان مواد سیمانی در بتن غلتکی، نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های بتن غلتکی در بازه ۱ تا ۲ تغییر می‌کند در حالی که این نسبت در مخلوط‌های بتن متعارف در حدود ۰/۴ تا ۰/۶ متغیر می‌باشد. مقادیر بالای نسبت آب به سیمان در بتن غلتکی (به خصوص در بتن غلتکی با مواد سیمانی کم) نتیجه کاهش میزان مواد سیمانی در مخلوط بتن غلتکی (و نه افزایش مقدار آب) می‌باشد.

شکل (۴-۱) روند تغییرات مقاومت فشاری بتن غلتکی را در مقایسه با نسبت آب به سیمان، و میزان مصرف مواد سیمانی در مخلوط بتن غلتکی نشان می‌دهد (در این شکل W معرف آب، C معرف سیمان، و F معرف Flyash می‌باشند). همچنین، بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری در تعدادی از سدهای بتن غلتکی، روند افزایش مقاومت بتن غلتکی با مقادیر متفاوت مواد سیمانی در طی زمان نیز در شکل (۴-۲) ارائه شده است [۱۸]. شایان ذکر این‌که این منحنی‌ها صرفا برای حصول یک تخمین اولیه از مقدار مواد سیمانی لازم برای یک مخلوط بتن غلتکی با مقاومت معین در سن مورد نظر، و نیز نحوه رشد مقاومت فشاری بتن در طی زمان کاربرد دارند و در مورد هر پروژه برای دستیابی به مقاومت مورد نظر باید آزمایش‌ها و مطالعات ویژه صورت پذیرد.

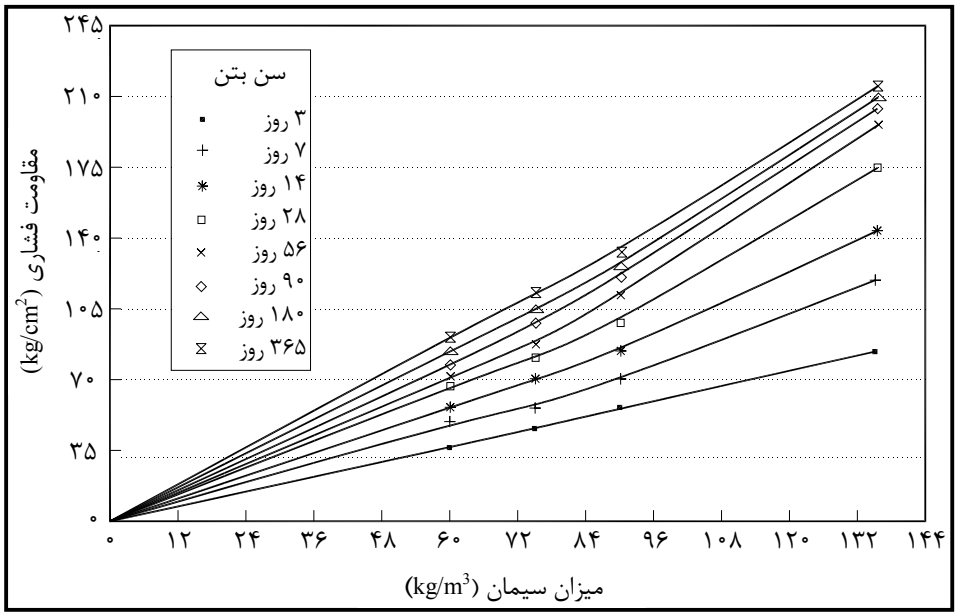
با توجه به استفاده گسترده از مخلوط بتن غلتکی با مقاومت کم در سدهای وزنی بتن غلتکی، به‌منظور بررسی و کنترل روند تغییرات مقاومت بتن عموما به‌جای پارامتر انحراف معیار از پارامتر آماری ضریب تغییرات (Coefficient of Variation - CV)، نسبت انحراف معیار به مقدار متوسط، استفاده می‌شود. هر چه مقدار ضریب تغییرات مقاومت بتن کم‌تر باشد، کارایی و کیفیت بتن مطلوب‌تر و یکنواخت‌تر خواهد بود. در مخلوط بتن غلتکی، مشابه با بتن متعارف، به طور معمول با افزایش سن آزمایش،

ضریب تغییرات مقاومت بتن کاهش می‌یابد. در سدهای وزنی بتن غلتکی، مقدار ضریب تغییرات مقاومت فشاری مخلوط بتن در روند عملیات اجرایی در بازه ۱۰ تا ۲۸ درصد متغیر می‌باشد و بر اساس تجربیات موجود درصورتی‌که مقدار ضریب تغییرات مقاومت بتن کم‌تر از ۲۰ درصد باشد، کارایی و کیفیت مخلوط بتن در حد مناسب و مطلوب خواهد بود.

اگر چه آزمایش‌های کمی بر روی بتن غلتکی در شرایط بارگذاری دینامیکی (ضربه‌ای) انجام یافته است ولی دلیلی برای رفتار متفاوت آن با رفتار بتن حجیم متعارف تحت اثر بارهای دینامیکی وجود ندارد. بر اساس نتایج مطالعات انجام یافته، مقاومت فشاری بتن حجیم در شرایط بارگذاری دینامیکی به طور متوسط تا ۳۰ درصد نسبت به شرایط استاتیکی افزایش نشان می‌دهد [۱۹].



شکل ۴-۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن غلتکی در مقایسه با نسبت آب به سیمان و میزان مصرف مواد سیمانی [۱۸]



شکل ۴-۲- روند افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی با مقادیر متفاوت مواد سیمانی در طی زمان [۱۸]

۴-۳- مقاومت کششی

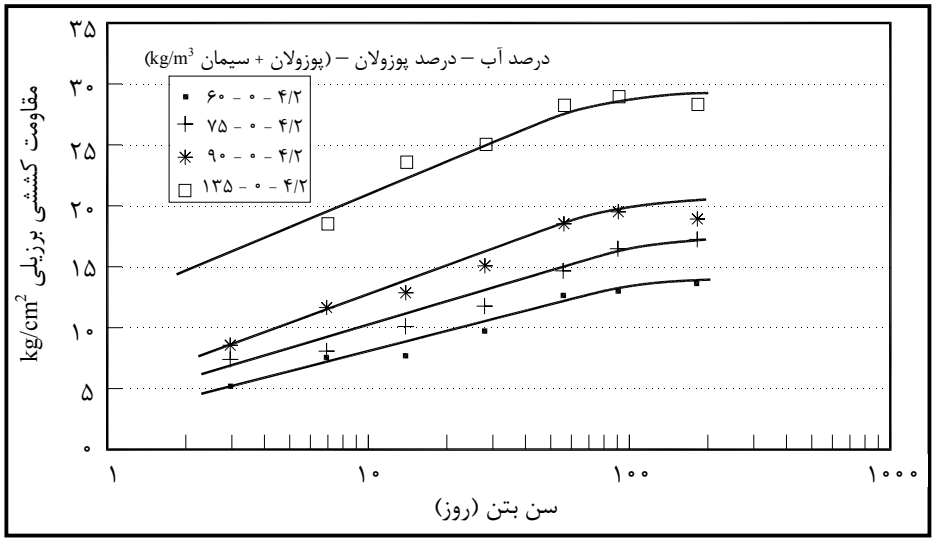
مقاومت کششی بتن غلتکی در سدها را می‌توان با آزمایش کشش مستقیم (CRD-C 164)، آزمایش کشش برزیلی (ASTM C 496) و آزمایش مدول گسیختگی (ASTM C 78) تعیین نمود. مقاومت کششی بتن غلتکی متاثر از میزان مواد سیمانی مصرفی، میزان آب، درجه تراکم مخلوط بتن، مقاومت سنگ‌دانه‌ها، شکل و بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها، و نیز میزان چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به مصالح خمیری، تغییر می‌کند. حساسیت و تاثیرپذیری مقاومت کششی به بافت سطحی و چسبندگی سنگ‌دانه‌ها بیش‌تر از مقاومت فشاری می‌باشد و با افزایش میزان مواد سیمانی، کاهش میزان آب و استفاده بیش‌تر از سنگ‌دانه‌های شکسته کوهی، مقاومت کششی بتن غلتکی افزایش خواهد یافت.

انجام آزمایش کشش مستقیم در مقایسه با سایر روش‌های آزمایش مقاومت کششی مشکل‌تر و حساس‌تر بوده و پراکندگی نتایج حاصل از این آزمایش بیش‌تر می‌باشد، به همین دلیل کاربرد آزمایش کشش برزیلی برای ارزیابی مقاومت کششی بتن، که انجام آن ساده‌تر می‌باشد، متداول‌تر است. در آزمایش کشش برزیلی، گسیختگی کششی بتن اجبارا باید در امتداد صفحه قطری نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش صورت پذیرد و از آنجا که این صفحه الزاما ضعیف‌ترین صفحه گسیختگی بتن نیست، به طور کلی مقادیر مقاومت کششی برزیلی (f_{st} - Split Tensile Strength) از مقاومت کششی مستقیم بتن (f_{dt} - Direct Tensile Strength) بیش‌تر است. با توجه به شرایط فوق، نتایج آزمایش کشش برزیلی برای ارزیابی و تخمین مقاومت درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی، به دلیل مشکلات تهیه نمونه مناسب برای این آزمایش (به نحوی که درز اجرایی دقیقا در صفحه اجباری گسیختگی قرار گیرد)، با عدم قطعیت همراه بوده و برای این منظور انجام آزمایش کشش مستقیم مناسب‌تر خواهد بود.

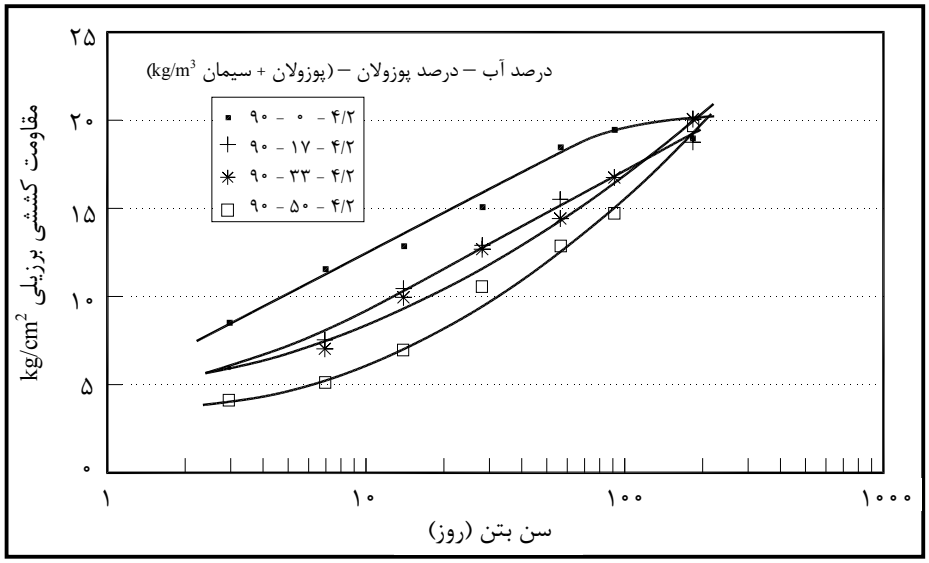
مقاومت (کششی) خمشی یا مدول گسیختگی نیز شاخص مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی بتن می‌باشد. در این روش، نمونه مورد آزمایش تحت اثر یک خمش خالص قرار گرفته و خمش وارد بر آن تا مرحله گسیختگی (کششی) نمونه افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که در محاسبه مقاومت کششی ناشی از گسیختگی خمشی (مدول گسیختگی)، تغییرات تنش در ضخامت نمونه آزمایشی به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود (درصورتی‌که در واقعیت این‌گونه نیست)، مقادیر محاسبه شده برای مدول گسیختگی همواره از مقاومت کششی واقعی بتن بیش‌تر است و به همین دلیل مدول گسیختگی بتن با عنوان مقاومت کششی ظاهری بتن (Apparent Tensile Strength) نیز نامیده می‌شود.

بر اساس نتایج برخی بررسی‌ها و تحقیق‌های انجام یافته، مقادیر مدول گسیختگی بتن با بزرگ‌تر شدن ابعاد نمونه آزمایشی کاهش می‌یابد (Size Effect) به‌گونه‌ای که مقدار مدول گسیختگی در بدنه سدهای بتنی به مقاومت کششی واقعی بتن (مقاومت کششی برزیلی) نزدیک می‌گردد. در هر حال بر اساس فرضیات محاسباتی فوق، در تحلیل‌های تنش خطی بدنه سد که بر پایه رابطه خطی تنش و کرنش استوار می‌باشند، می‌توان مدول گسیختگی بتن را مستقیما با نتایج تحلیل مقایسه نمود. به دلیل وجود مشکلات ساخت نمونه برای آزمایش مدول گسیختگی، انجام این آزمایش در سدهای بتن غلتکی معمول نمی‌باشد.

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی برزیلی در بتن غلتکی با سنگ‌دانه شکسته گرانیتی در شرایط عدم استفاده و استفاده از مقادیر مختلف پوزولان (خاکستر بادی) در شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) ارائه شده است [۱۸]. در این شکل‌ها، درصد استفاده از پوزولان (از کل مواد سیمانی مصرفی) و نیز درصد وزنی آب نسبت به کل مصالح مصرفی در مخلوط بتن غلتکی مشخص شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی، روند افزایش مقاومت کششی در سنین کم کندتر می‌گردد ولی در سنین بالاتر، نرخ افزایش مقاومت کششی بتن (نسبت به شرایطی که از پوزولان استفاده نشود) به نحو بارزی تندتر می‌باشد.



شکل ۴-۳- روند افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی بدون پوزولان در طی زمان [۱۸]

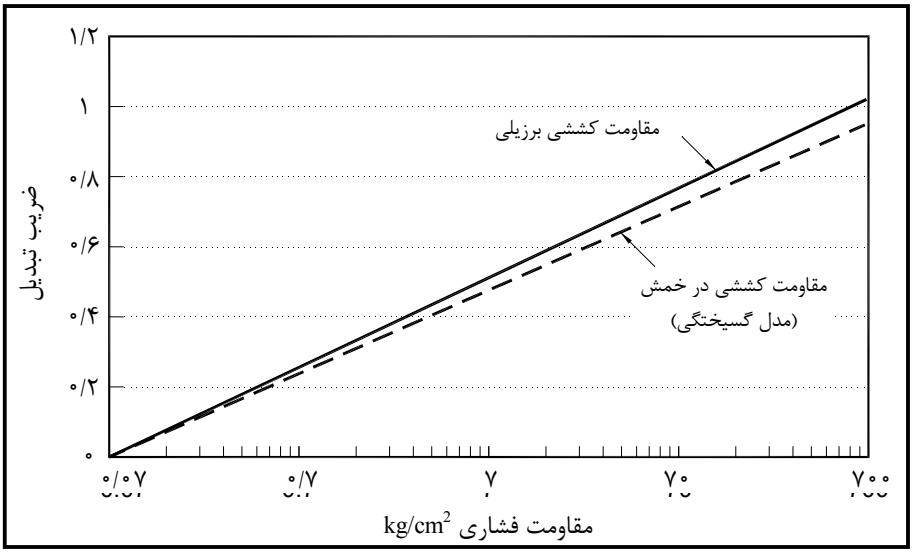


شکل ۴-۴- روند افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی با سنگ‌دانه شکسته گرانیتی با درصدهای مختلف پوزولان در طی زمان [۱۸]

بر اساس نتایج آزمایش‌ها و تجربیات موجود، مقاومت کششی مستقیم بتن از مقادیر مقاومت کششی برزیلی (و یا مقادیر مدول گسیختگی) بتن کم‌تر می‌باشد. نتایج بررسی‌های انجام یافته در این خصوص (توسط Schrader, 1995) به

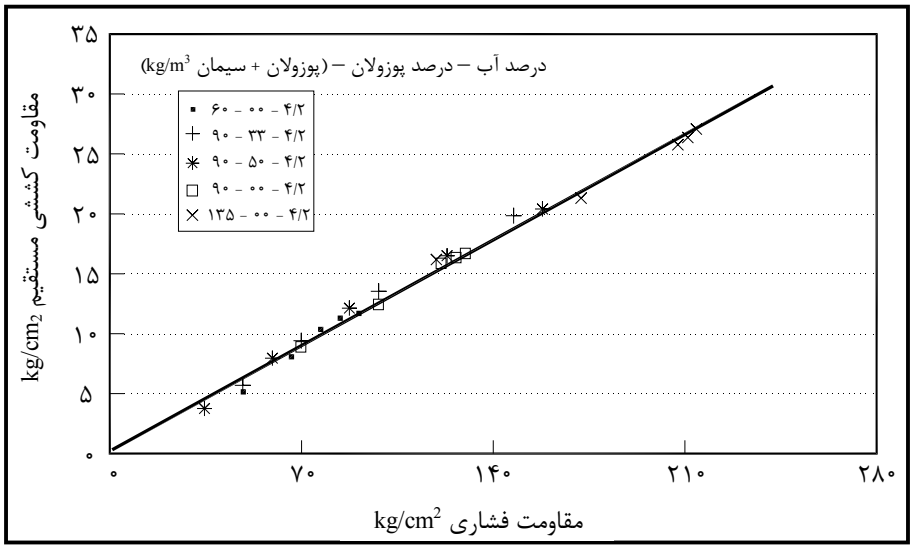
ازای مقادیر مختلف مقاومت فشاری بتن در شکل (۴-۵) ارائه شده است [۱۸]. بر اساس این نمودار، متناسب با افزایش لگاریتم مقاومت فشاری بتن، نسبت مقاومت کششی مستقیم به مقاومت کششی برزیلی به صورت خطی افزیش می‌یابد. علاوه بر این بررسی شکل (۴-۵) مؤید این موضوع نیز می‌باشد که مقادیر مقاومت کششی برزیلی و مدول گسیختگی در بتن بدنه سد (مستقل از میزان مقاومت بتن) نزدیک به هم می‌باشند. نتایج به‌دست آمده در نمودار شکل (۴-۶) را به صورت رابطه زیر نیز می‌توان بیان نمود (در این رابطه تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال هستند):

$$f_{dt} = 0.30 \times \log(10 \times f'_c) \times f_{st} \qquad (۱-۴)$$



شکل ۴-۵- تغییرات ضریب کاهش مقاومت کششی مستقیم نسبت به مدول گسیختگی و مقاومت کششی برزیلی [۱۸]

بر اساس رابطه فوق، منحنی تغییرات مقاومت کششی مستقیم بتن غلتکی در مقایسه با مقاومت فشاری در شکل (۴-۶) رسم شده است [۱۸]. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، روند تغییرات مقاومت کششی مستقیم نسبت به مقاومت فشاری بتن غلتکی (در بازه مورد بررسی) تقریبا خطی است.



شکل ۴-۶- روند تغییرات مقاومت کششی مستقیم به مقاومت فشاری بتن غلتکی [۱۸]

مقاومت کششی درزهای اجرایی بتن‌ریزی کاملا متاثر از میزان تراکم و تمهیدات اجرایی در نظر گرفته شده برای آماده‌سازی سطح درز می‌باشد. تمیز کردن ناکافی سطح درز، جداشدگی و تحکیم (یا تراکم) ضعیف بتن می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کششی مستقیم درزهای اجرایی بتن‌ریزی را کاهش دهد. در مقابل، استفاده از مخلوط‌های بتن با کارایی مناسب، اعمال تحکیم (تراکم) کافی در حین اجرا، استفاده از ملات بستر و اجرای سریع لایه‌های متوالی بتن سبب ایجاد مقاومت کششی خوب (و نزدیک به توده بتن) برای درزهای اجرایی بتن‌ریزی می‌گردد. راهنمای طراحی USACE EM 1110-2-2006 برای تخمین مقاومت کششی درزهای اجرایی بتن‌ریزی بر اساس مقادیر مقاومت کششی برزیلی توده بتن، میزان روانی مخلوط بتن، و تمهیدات آماده‌سازی درز اجرایی، ضرایب کاهنده مطابق جدول (۴-۱) را پیشنهاد می‌دهد [۱۹]. در این جدول بتن‌های غلتکی از بعد ضرایب کاهش مقاومت به دو گروه بتن با روانی کم (با زمان ارتعاشی بیش‌تر از ۳۰ ثانیه در آزمایش VB) و بتن با روانی زیاد (با زمان ارتعاشی کم‌تر از ۳۰ ثانیه در آزمایش VB) دسته‌بندی شده‌اند و فرض بر این می‌باشد که در بتن با روانی زیاد، سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی از تمهیدات و تراکم کافی برخوردار هستند. در خصوص بتن با روانی کم، که مخلوط‌های بتن غلتکی کم‌سیمان عموما در این رده قرار می‌گیرند، ضرایب کاهش مقاومت کششی درزهای اجرایی بتن‌ریزی در شرایط استفاده و یا عدم استفاده از ملات بستر به تفکیک پیشنهاد شده است. در همین مرجع حدود مقاومت کششی بتن‌های غلتکی در شرایط مختلف مطابق مقادیر جدول (۴-۲) پیشنهاد شده است. توجه به این نکته ضروری است که مقادیر پیشنهادی مذکور جنبه راهنما داشته و استفاده از آن‌ها صرفا در مواردی که نتایج آزمایش‌های مقاومت (فشاری و کششی) برای پروژه مورد نظر در دسترس نباشد، قابل توصیه است.

جدول ۴-۱- ضرایب کاهش مقاومت کششی بتن و درزهای اجرایی بر اساس میزان روانی مخلوط بتن و تمهیدات آماده‌سازی درز [۱۹]

پارامترهای موثر (اندازه سنگ‌دانه، نحوه آماده‌سازی درز، و ...)	ضریب کاهش مقاومت نسبت به مقاومت کششی برزیلی توده بتن	
	بتن غلتکی با روانی کم (VB>30sec)	بتن غلتکی با روانی زیاد (VB≤30sec)
مقاومت کششی مستقیم توده بتن	۰/۷۵	۰/۷۵
مقاومت کششی درز اجرایی با شرایط مطلوب	----	۰/۷۵×۰/۷۰
مقاومت کششی درز اجرایی با ملات بستر	۰/۷۵×۰/۷۰×۰/۶۷	----
مقاومت کششی درز اجرایی بدون ملات بستر	۰/۷۵×۰/۷۰×۰/۳۳	----

در صورت استفاده از سنگ‌دانه‌های با حداکثر ابعاد بیش از ۳۸ میلی‌متر، یک ضریب کاهنده معادل ۰/۹علاوه بر ضرایب فوق باید در نظر گرفته شود.

رفتار بتن غلتکی تحت اثر بارگذاری سریع (دینامیکی) کششی مشابه با بتن معمولی بوده و در این شرایط مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. اگرچه تجربه آزمایش مقاومت کششی روی بتن غلتکی در شرایط بارگذاری سریع محدود می‌باشد ولی با توجه به مشابهت رفتاری آن با بتن معمولی، می‌توان از نتایج تحقیقات رافائل در سال ۱۹۸۴ در خصوص تاثیر بارگذاری دینامیکی بر مقاومت کششی بتن متعارف، برای تخمین مقاومت کششی دینامیکی بتن غلتکی استفاده کرد. بر اساس نتایج تحقیقات مذکور، مقاومت کششی بتن در شرایط اعمال بارگذاری با نرخ کرنش بالا، حداقل ۵۰ درصد بیش‌تر از مقاومت کششی بتن در شرایط اعمال بارگذاری با نرخ کرنش پایین می‌باشد [۲۲]. بر این اساس مقاومت کششی دینامیکی بتن غلتکی

۱/۵ برابر مقاومت کششی استاتیکی آن خواهد بود. این ضریب افزایشی را می‌توان هم برای مقاومت کششی مستقیم، مقاومت کششی برزیلی، و مدول گسیختگی توده بتن غلتکی و هم برای مقاومت کششی درزهای اجرایی بتن‌ریزی در نظر گرفت.

جدول ۴-۲- حدود مقاومت کششی بتن غلتکی بر اساس مقاومت فشاری و شرایط اجرایی بتن [۱۹]

حداکثر ابعاد سنگ‌دانه در بتن	پارامتر مقاومت		بتن با روانی کم (VB > 30sec)		بتن با روانی زیاد (VB ≤ 30sec)	
			$f'_c \le 24.1MPa$	$f'_c > 24.1MPa$	$f'_c \le 24.1MPa$	$f'_c > 24.1MPa$
----	مقاومت کششی برزیلی توده بتن	حداقل	$0.08\ f'_c$	$0.4565\ (f'_c)^{1/2}$	$0.08\ f'_c$	$0.4565\ (f'_c)^{1/2}$
		حداکثر	$0.17\ f'_c$	$0.7055\ (f'_c)^{1/2}$	$0.17\ f'_c$	$0.7055\ (f'_c)^{1/2}$
		متوسط	$0.125\ f'_c$	$0.581\ (f'_c)^{1/2}$	$0.125\ f'_c$	$0.581\ (f'_c)^{1/2}$
≤ 38 mm	مقاومت کششی درز اجرایی بتن‌ریزی (با استفاده از ملات بستر)	حداقل	$0.03\ f'_c$	$0.1577\ (f'_c)^{1/2}$	----	----
		حداکثر	$0.06\ f'_c$	$0.2490\ (f'_c)^{1/2}$	----	----
		متوسط	$0.045\ f'_c$	$0.2034\ (f'_c)^{1/2}$	----	----
	مقاومت کششی درز اجرایی بتن‌ریزی (بدون استفاده از ملات بستر)	حداقل	$0.015\ f'_c$	$0.0830\ (f'_c)^{1/2}$	$0.04\ f'_c$	$0.2407\ (f'_c)^{1/2}$
		حداکثر	$0.03\ f'_c$	$0.1245\ (f'_c)^{1/2}$	$0.09\ f'_c$	$0.3735\ (f'_c)^{1/2}$
		متوسط	$0.023\ f'_c$	$0.1038\ (f'_c)^{1/2}$	$0.065\ f'_c$	$0.3071\ (f'_c)^{1/2}$
> 38 mm	مقاومت کششی درز اجرایی بتن‌ریزی (با استفاده از ملات بستر)	حداقل	$0.025\ f'_c$	$0.1411\ (f'_c)^{1/2}$	$0.04\ f'_c$	$0.2158\ (f'_c)^{1/2}$
		حداکثر	$0.055\ f'_c$	$0.2241\ (f'_c)^{1/2}$	$0.08\ f'_c$	$0.3220\ (f'_c)^{1/2}$
		متوسط	$0.04\ f'_c$	$0.1826\ (f'_c)^{1/2}$	$0.06\ f'_c$	$0.2689\ (f'_c)^{1/2}$
	مقاومت کششی درز اجرایی بتن‌ریزی (بدون استفاده از ملات بستر)	حداقل	$0.015\ f'_c$	$0.0747\ (f'_c)^{1/2}$	----	----
		حداکثر	$0.025\ f'_c$	$0.1162\ (f'_c)^{1/2}$	----	----
		متوسط	$0.02\ f'_c$	$0.0955\ (f'_c)^{1/2}$	----	----

۴-۴- مدول الاستیسیته

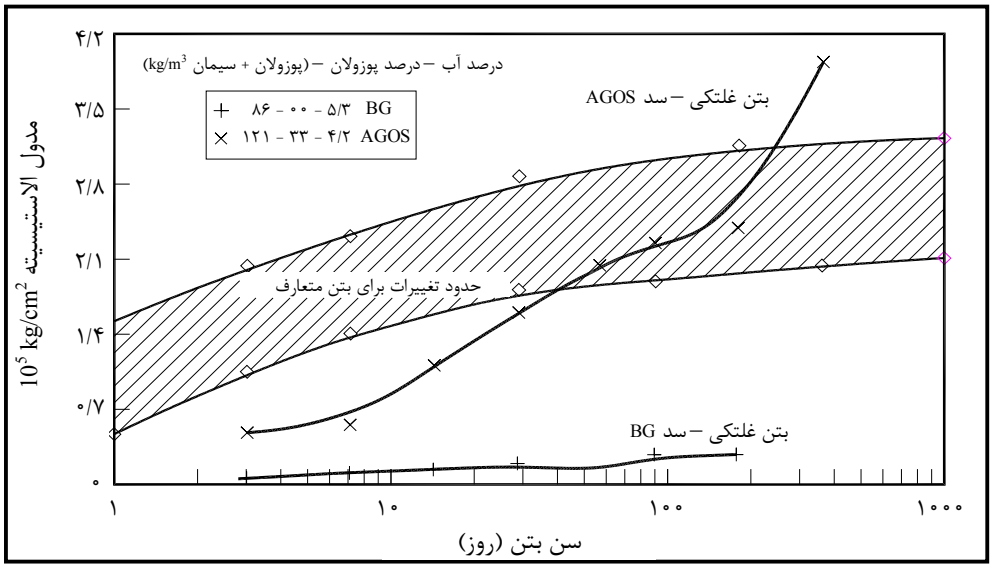
مدول الاستیسیته (Modulus of Elasticity "E") بنا به تعریف، نسبت تنش محوری (نرمال) به کرنش معادل آن اطلاق می‌شود. به طور معمول در محاسبه مدول الاستیسیته فقط کرنش‌هایی که در هنگام بارگذاری اتفاق می‌افتند، مد نظر قرار می‌گیرند و به کرنش‌های پس‌آیند که در اثر ماندگاری بارگذاری و خواص رفتاری ویژه مصالح اتفاق می‌افتد، خزش گفته می‌شود.

مدول الاستیسیته وتری (Chord Modulus of Elasticity "Ec") بتن غلتکی را می‌توان با استفاده از استانداردهای ASTM C 469 (CRD-C 19) (مدول فشاری) و CRD-C 166 (مدول کششی) تعیین نمود. در شرایط عادی فرض بر این است که مدول الاستیسیته کششی و فشاری بتن برابر می‌باشند ولی در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های مهم، با توجه به این‌که تنش‌های کششی ایجاد شده به مقاومت کششی بتن نزدیک می‌گردد، این فرض باید با دقت بیش‌تری مورد توجه قرار گیرد زیرا رابطه تنش کرنش بتن در سطوح تنش بالاتر از ۶۰ درصد مقاومت کششی غیرخطی می‌شود. در اثر راستای قرارگیری ذرات درشت سنگ‌دانه، مدول الاستیسیته بتن تا حدی ناهمسانگرد می‌باشد ولی به طور معمول تاثیر این ناهمسانگردی ناچیز و قابل صرف‌نظر است.

حدود تغییرات مقادیر مدول الاستیسیته و خزش در بتن‌های غلتکی بسیار گسترده می‌باشد. مدول الاستیسیته و خزش بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد و نسبت آب به سیمان تقریبا مشابه با بتن حجیم معمولی، در بلندمدت به حدود مقادیر متناظر در بتن معمولی، مدول الاستیسیته حدود 28~21 گیگاپاسکال و ضریب خزش حدود 7.1~2.8 میکروکرنش (1×10^{-6} mm/mm) بر مگاپاسکال برای بارگذاری ۲۸ تا ۹۰ روزه، می‌رسد. در بتن‌های غلتکی که دارای درصد مواد پوزولانی بالایی هستند، مقادیر مدول الاستیسیته در سنین پایین، کم‌تر، و در سنین بالا بیش‌تر از بتن حجیم با میزان مواد سیمانی مشابه (بدون پوزولان) خواهد بود.

بتن‌های غلتکی با مواد سیمانی کم دارای مدول الاستیسیته کم‌تر و نرخ خزش بالاتر می‌باشند. اگرچه خواص رفتاری مخلوط‌های مختلف بتن غلتکی متفاوت می‌باشد ولی به طور کلی بر اساس تجربیات موجود، در بتن‌های غلتکی کم‌سیمان با مقاومت فشاری کم‌تر از ۱۱ مگاپاسکال، روند کاهش مدول الاستیسیته و افزایش نرخ خزش به صورت نمایی نسبت به مقاومت بتن تغییر می‌کند. برای نمونه، مدول الاستیسیته استاتیکی بتن غلتکی با مواد سیمانی ۶۰ تا ۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب در سنین ۳ و ۹۰ روز، به ترتیب حدود ۰/۷ و ۱۰/۵ گیگاپاسکال می‌باشد.

در شکل (۴-۷) حدود تغییرات مدول الاستیسیته بتن حجیم معمولی در مقایسه با دو نمونه حدی (کمینه و بیشینه) مدول الاستیسیته بتن غلتکی نشان داده شده است. در سد وزنی بتن غلتکی Agos (شکل ۴-۷)، نرخ افزایش مدول الاستیسیته بتن غلتکی در بلندمدت بخاطر فعالیت مواد پوزولانی کاملا بارز می‌باشد. نقطه قابل ذکر این‌که نرخ افزایش مقاومت فشاری در بلندمدت در مورد سد Agos (و موارد مشابه) کندتر از نرخ افزایش مدول الاستیسیته بوده و در این شرایط بخاطر عملکرد مواد پوزولانی، بتن غلتکی در بلندمدت شکننده‌تر شده و ریسک ترک‌خوردن آن تحت اثر تغییرمکان‌های اعمالی (و بارهای حرارتی) افزایش خواهد یافت. در مقابل در سد بتن غلتکی Burton Gorge (BG) استرالیا، مدول الاستیسیته بلندمدت بتن غلتکی، عموما بخاطر نوع دانه‌بندی و کیفیت و مقاومت پایین سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن، فقط به حدود ۱/۰۵ تا ۲/۱۰ گیگاپاسکال رسیده است.

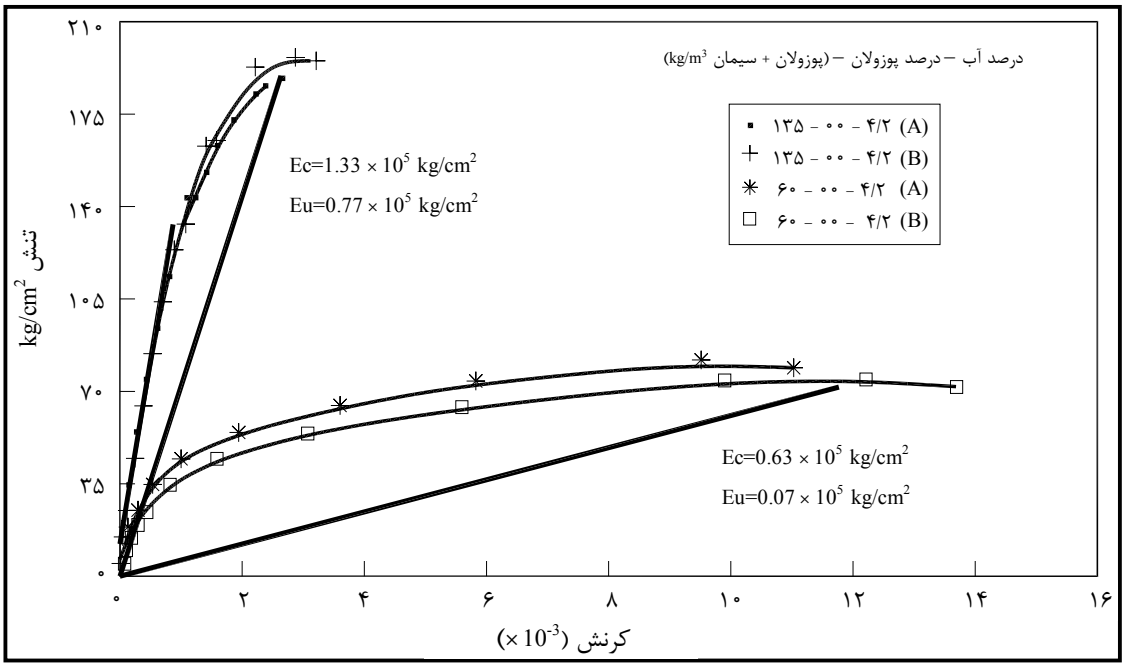


شکل ۴-۷- حدود تغییرات مدول الاستیسیته بتن‌های غلتکی در مقایسه با بتن حجیم متعارف [۱۸]

برای بیان بهتر خواص رفتاری بتن غلتکی، شریدر و راشد (Schrader and Rashed) در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۰۲، پارامتر جدیدی به نام «مدول الاستیسیته نهایی» (Ultimate Modulus – "Eu") را مطرح نمودند که در واقع شیب خط واصل (Secant) مبدا به متوسط مقادیر مقاومت فشاری حداکثر نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش در زمان گسیختگی می‌باشد (این پارامتر تقریبا مشابه پارامتر مدول الاستیسیته بلندمدت – "Esus" Sustained Elastic Modulus- در آیین‌نامه ACI است). بر اساس مطالعات و آزمایش‌های انجام یافته توسط این محققین، مدول الاستیسیته نهایی کششی بتن نیز تقریبا مساوی مدول الاستیسیته نهایی فشاری بتن می‌باشد. بنابراین، مدول الاستیسیته نهایی کم‌تر مبین لزوم تغییرمکان بیش‌تر بتن تا مرحله گسیختگی فشاری و یا ترک‌خوردن بتن تحت اثر کشش خواهد بود.

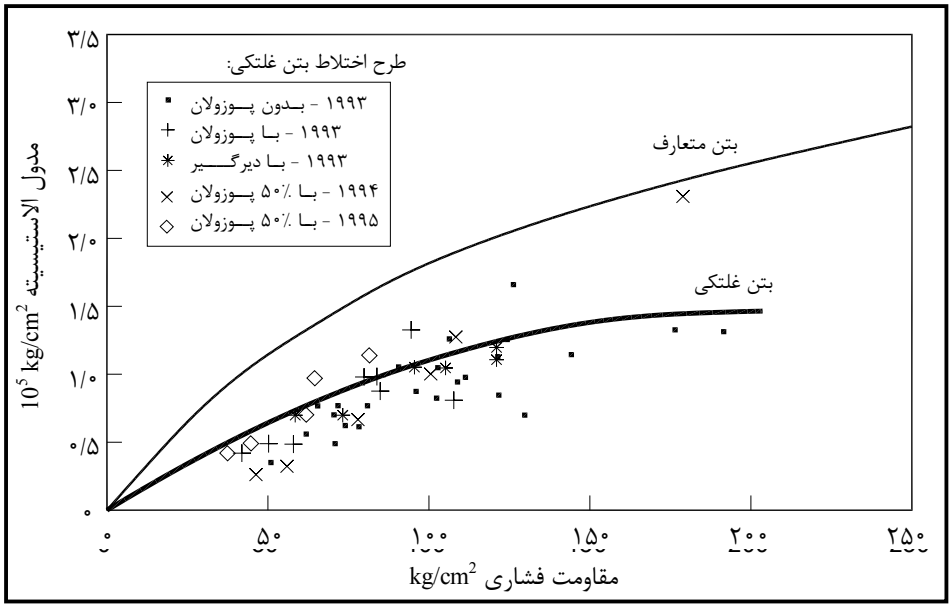
در شکل (۴-۸) مدول الاستیسیته وتری و مدول الاستیسیته نهایی دو بتن غلتکی با مقاومت کم و مقاومت زیاد که از یک نوع سنگ‌دانه، سیمان یکسان، و میزان مشابه رطوبت تهیه گردیده، نشان داده شده است. میزان سیمان در بتن غلتکی با مقاومت کم، ۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، و در بتن غلتکی با مقاومت زیاد ۱۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. با توجه به منحنی رفتاری این دو بتن کاملا مشخص است که برای گسیختگی (و ترک‌خوردگی) بتن غلتکی با مقاومت کم، تغییرمکان و انرژی بسیار بیش‌تری در مقایسه با بتن غلتکی با مقاومت زیاد، لازم می‌باشد.

علاوه بر این، با توجه به شکل (۴-۸) و نتایج سایر آزمایش‌های انجام یافته، در بتن با مقاومت بیش‌تر، مقادیر مدول الاستیسیته وتری و مدول الاستیسیته نهایی به هم نزدیک می‌باشند (بر اساس آیین‌نامه ACI، مدول الاستیسیته بلندمدت حدود $\frac{۲}{۳}$ مدول الاستیسیته آنی بتن است) ولی با کاهش مقاومت بتن، نسبت مدول الاستیسیته وتری به مدول الاستیسیته نهایی بتن به شدت افزایش می‌یابد.

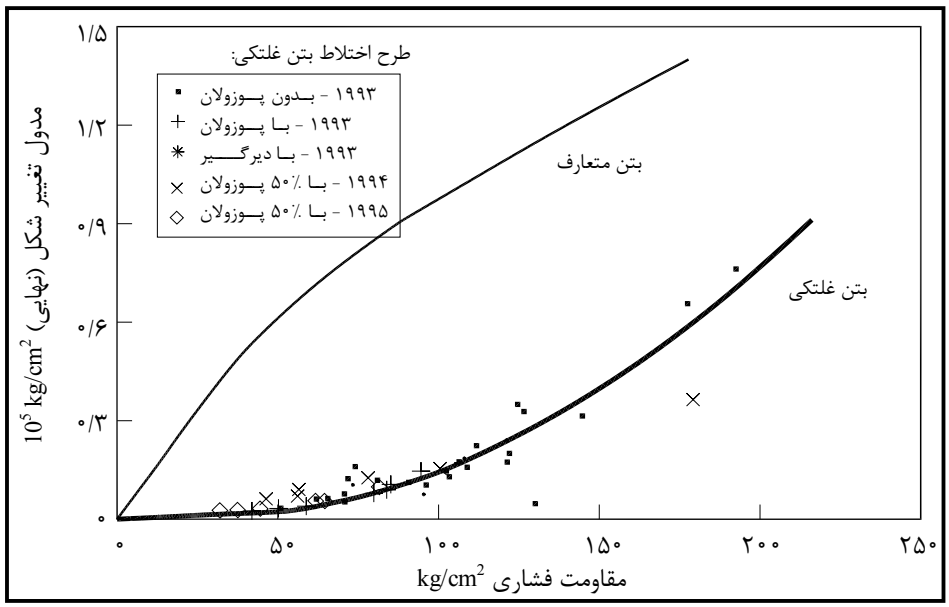


شکل ۴-۸- مدول الاستیسیته وتری و مدول الاستیسیته نهایی بتن غلتکی [۱۸]

رابطه مدول الاستیسیته (متناظر با ۲۵ درصد نیروی گسیختگی) و مقاومت فشاری نمونه‌های تیپ بتن غلتکی با سنگ‌دانه‌های با کیفیت مناسب و حدود ۵ درصد پودر سنگ در شکل (۴-۹)، و نمودار تغییرات مدول الاستیسیته نهایی نمونه‌های مذکور نسبت به مقاومت فشاری در شکل (۴-۱۰) ارائه شده‌اند.



شکل ۴-۹- مدول الاستیسیته سکانت نمونه‌های تیپ بتن غلتکی (متناظر با ۲۵ درصد بار گسیختگی) [۱۸]



شکل ۴-۱۰- مدول الاستیسیته نهایی نمونه‌های تیپ بتن غلتکی (متناظر با ۱۰۰ درصد بار گسیختگی) [۱۸]

در تحلیل ترک‌خوردگی بتن حجیم سدها، علاوه بر پارامترهای رفتاری کوتاه مدت بتن نظیر مدول الاستیسیته آنی (وتری)، خواص رفتاری بلندمدت بتن نیز مهم و تعیین‌کننده خواهند بود. این موضوع در بتن‌های با مقاومت زیاد، که در آن‌ها مدول الاستیسیته وتری و مدول الاستیسیته نهایی بتن در حدود یکدیگر می‌باشند چندان مهم به‌نظر نمی‌رسد ولی در بتن‌های با مقاومت کم، رفتار ارتجاعی متفاوت بتن در بلندمدت در فرایند ترک‌خوردن بتن بسیار تاثیرگذار خواهد

بود. بر همین اساس، در شرایط بارگذاری طولانی مدت در مواردی کـه اثـر خـزش مهـم باشـد (نظیـر بارهـای حرارتـی) می‌توان از مدول الاستیسیته نهایی، که متناسب با مقاومت فشاری بتن تعیین می‌گردد، استفاده نمود.

در صورت عدم انجام هر نوع آزمایش، برای تخمین مدول الاستیسیته بتن غلتکی، صرفا برای مقاصد طراحی می‌تـوان از نتایج تجربیات مشابه نظیر نتایج ارائه شده در شکل (۴-۹)، و یا رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه ACI، به شرح زیر، کـه مدول الاستیسیته سکانت متناظر با $0.4f'_c$ را ارائه می‌دهد، استفاده نمود (در این رابطه E بر حسـب گیگاپاسـکال و f'_c بـر حسب مگاپاسکال می‌باشند):

$$E = 4.73f'^{\frac{1}{2}}_c \qquad (۲-۴)$$

برای تخمین مدول الاستیسیته نهایی بتن در زمان طراحی نیز (در صورت عدم انجام هـر نـوع آزمـایش) مـی‌تـوان از نتایج تجربیات مشابه نظیر نتایج ارائه شده در شکل (۴-۱۰) اسـتفاده نمـود. در مـورد بـتن غلتکـی بـا مـواد سـیمانی (و مقاومت) بالا، مشابه با بتن حجیم معمولی می‌توان بر اساس آیین‌نامه ACI، مدول الاستیسیته نهایی یا بلندمـدت بـتن را حدود $\frac{۲}{۳}$ مدول الاستیسیته آنی بتن در نظر گرفت.

همچنین برای مقاصد طراحی در شرایط اعمال بارهای لرزه‌ای، مدول الاستیسیته دینامیکی بتن را می‌توان ۱۵ درصـد بالاتر از مدول الاستیسیته استاتیکی بتن در نظر گرفت [۱۹].

۴-۵- ضریب پواسون

طبق تعریف ضریب پواسون، نسبت کـرنش جـانبی بـه کـرنش طـولی در بارگـذاری محـوری مـی‌باشـد و بـر اسـاس دستورالعمل آزمایش ASTM C 469 می‌توان ضریب پواسون بتن را تعیین نمود. ضریب پواسون بـتن غلتکـی، مشـابه بـا بتن حجیم معمولی، در حدود ۰/۱۷ تا ۰/۲۲ متغیر بوده و مقدار متوسـط ۰/۲۰ بـرای ایـن ضـریب در شـرایط بارگـذاری استاتیکی و دینامیکی قابل توصیه است [۱۹].

۴-۶- خزش

خزش به طور معمول از دو دیدگاه قابل تعریف است؛ در دیدگاه اول خزش به معنی تغییرشکل (یا کرنش) وابسـته بـه زمان در اثر اعمال یک بار ثابت ماندگار است، و در دیدگاه دوم خزش به صورت کاهش تنش در طی زمان تحت اثـر یـک تغییرمکان یا کرنش ثابت تعریف می‌گردد. به طور معمول با گذشت زمان نرخ افـزایش کـرنش خزشـی (تحـت اثـر تـنش ثابت) کاهش می‌یابد. مقدار خزش را می‌توان بر اساس دستورالعمل آزمایش ASTM C 512 تعیین نمـود. آزمـایش‌هـای خزش برای بتن حجیم باید بر روی نمونه‌های موم اندود شده به منظور جلـوگیری از اثـرات جمـع‌شـدگی در اثـر خشـک شدن، انجام گیرد. استاندارد ASTM C 512 کرنش خزشی بتن را مطابق رابطه زیر پیشنهاد می‌دهد. در این رابطه، ε کل کرنش تحت اثر تنش واحد (1.0 MPa)، E مدول الاستیسیته، F(k) ضریب خزش (Creep Factor)، و t زمـان بـر حسـب

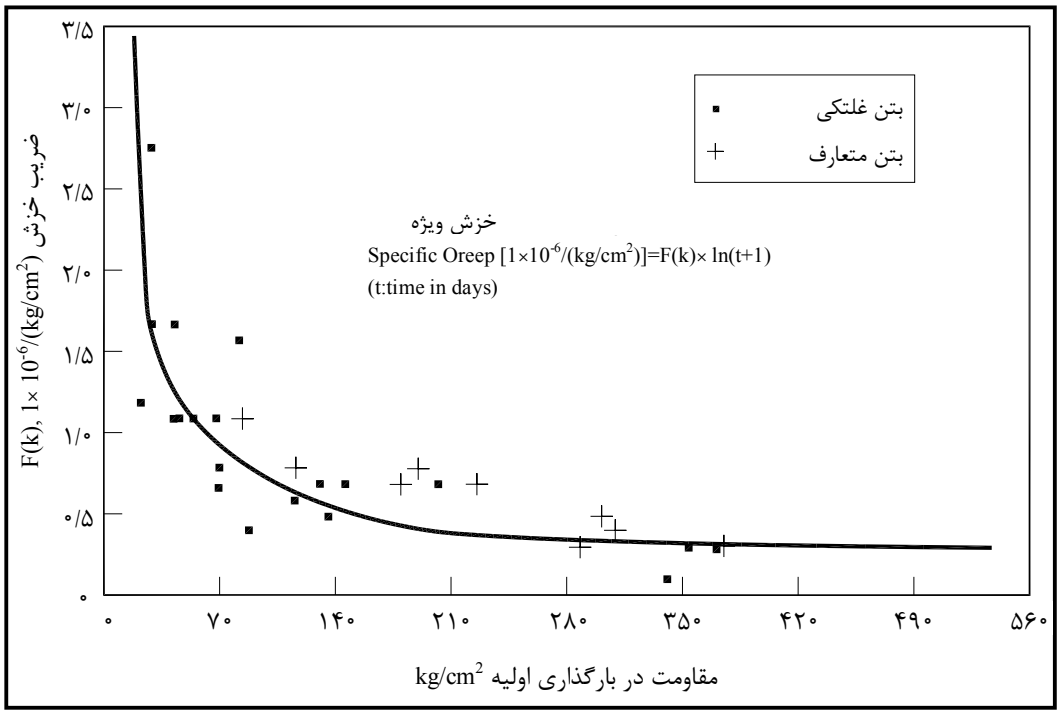
روز می‌باشند. بخش اول این رابطه (1/E) معرف کرنش الاستیک اولیه و بخش دوم آن معرف کرنش خزشی بعد از بارگذاری تحت اثر تنش واحد یا «خزش ویژه (Specific Creep)» است.

$$\varepsilon = (1/E) + F(k)\ln(t+1) \qquad (۳-۴)$$

با کاهش مقاومت فشاری بتن، ضریب خزش F(k) افزایش می‌یابد. بر اساس آیین‌نامه ACI، حدود مقادیر ضریب خزش از ۱/۵ تا ۲۹ میکروکرنش بر مگاپاسکال $(1\times10^{-6}\ {}^{mm}/_{mm}\ /\ MPa)$ (معادل $0.15\sim2.9\times10^{-6}\ /\ ({}^{kg}/_{cm^2})$) تغییر می‌کند [۱۶].

در شکل (۴-۱۱) مقادیر ضریب خزش F(k) برای تعدادی از نمونه‌های بتن غلتکی و نحوه تغییرات آن نسبت به مقاومت فشاری بتن ارائه شده است. بر اساس نتایج مذکور، در بتن غلتکی با مواد سیمانی و مقاومت کم، نرخ بسیار بالای کرنش خزشی و در نتیجه کاهش قابل توجه تنش‌های وابسته به تغییرمکان قابل انتظار می‌باشد. با توجه به این ویژگی، در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، مقاومت بسیار مناسبی در برابر تنش حرارتی و سایر تنش‌های وابسته به تغییرمکان (ناشی از پی‌های انعطاف‌پذیر) وجود دارد.

در هر حال در مواردی که رفتار خزشی بتن غلتکی مهم و تعیین‌کننده باشد، آزمایش خزش با استفاده از مصالح و طرح اختلاط مد نظر در سنین مختلف بارگذاری باید انجام گیرد.



شکل ۴-۱۱- مقادیر ضریب خزش F(k) برای تعدادی از نمونه‌های بتن غلتکی و نحوه تغییرات آن نسبت به مقاومت فشاری [۱۸]

۴-۷- ظرفیت کرنش کششی بتن

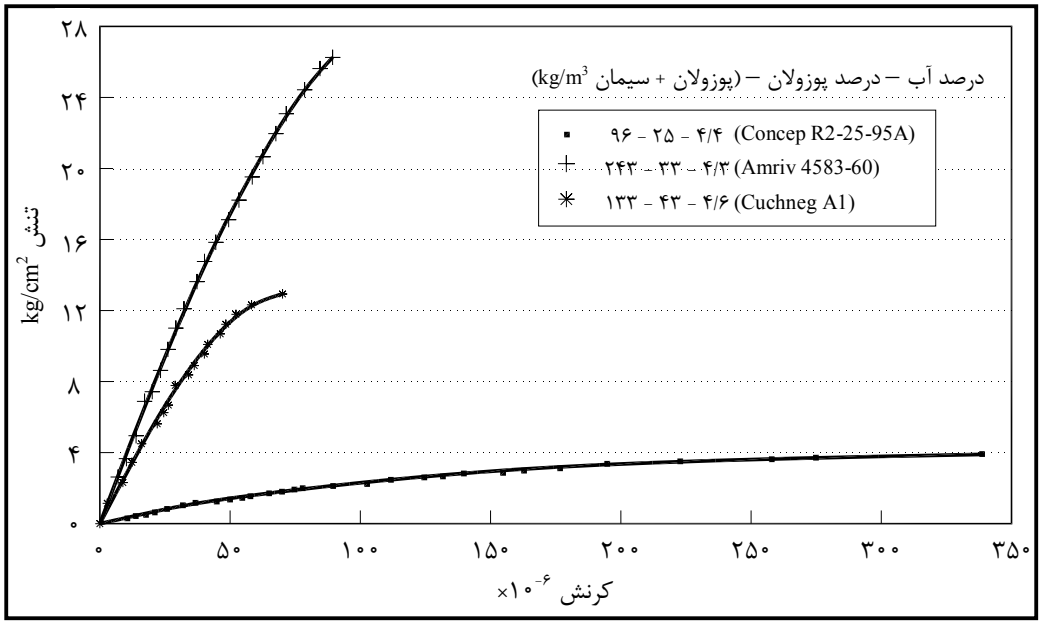
در ارتباط با تاب کششی بتن، علاوه بر پارامتر «مقاومت کششی»، باید به پارامتر مهم «ظرفیت کرنش کششی بتن» نیز توجه داشت. با افزایش سختی بتن، خاصیت شکنندگی بتن افزایش یافته و ریسک ترک خوردن آن تحت اثر تغییرمکانهای اعمالی افزایش می‌یابد، به همین دلیل در برخی موارد، به خصوص تحت اثر بار حرارتی شدید و یا در ساختگاه‌های با توده سنگ نرم، یک بتن تغییرشکل‌پذیر با مدول الاستیسیته پایین در مقایسه با یک بتن سخت با مقاومت زیاد، شرایط مطلوب‌تری دارد.

ظرفیت کرنش کششی بتن (Tensile-Strain Capacity) تابعی از مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن است و بنا به تعریف معرف تغییر طول قابل تحمل توسط نمونه بتن با طول واحد تا قبل از ترک‌خوردگی می‌باشد. ظرفیت کرنش کششی را می‌توان مستقیما بر اساس دستورالعمل آزمایش CRD-C 71 تعیین نمود. ظرفیت کرنش کششی در شرایط بارگذاری سریع مربوط به زمانی است که بار در مدت زمان کوتاهی (چند ثانیه و دقیقه) به بتن اعمال گردد. ظرفیت کرنش کششی تحت بارگذاری سریع معمولا برای برآورد ترک‌های سطحی حرارتی بتن در سنین اولیه کاربرد دارد. با این حال دغدغه اصلی در سدها و دیگر سازه‌های حجیم، ظرفیت کرنش کششی تحت بارگذاری تدریجی و آهسته می‌باشد چرا که کرنش ناشی از بارها یا تغییرمکان‌های خارجی، و کرنش ناشی از کاهش دمای داخلی بتن در اثر سرمایش طبیعی، غالبا در بلندمدت اتفاق می‌افتند.

حدود مقادیر ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی تحت بارگذاری تدریجی از ۹۰ تا ۱۵۰ میکروکرنش ($1\times10^{-6}\,mm/mm$) متغیر می‌باشد [۱۶]. ظرفیت کرنش کششی تحت بارگذاری تدریجی را می‌توان به صورت غیرمستقیم با توجه به مطالعات مربوط به مدول الاستیسیته و خزش نیز محاسبه نمود. نسبت مقاومت کششی به مدول الاستیسیته نهایی (یا مدول الاستیسیته ماندگار) بتن را می‌توان به‌عنوان ظرفیت کرنش کششی تحت بارگذاری تدریجی در نظر گرفت. با توجه به پتانسیل تماس سنگ‌دانه‌های بتن با یکدیگر، نرخ خزش بتن در فشار غالبا از نرخ خزش بتن در کشش، به خصوص در مورد مخلوط‌هایی با حجم قابل توجه سنگ‌دانه‌های درشت، کم‌تر می‌باشد، به همین دلیل برآورد غیرمستقیم ظرفیت کرنش کششی تدریجی بتن تا حدی محافظه‌کارانه است.

در مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، کاهش میزان مواد سیمانی از یکسو باعث کاهش مقاومت کششی و همچنین کاهش مدول الاستیسیته بتن، و از سوی دیگر باعث افزایش کرنش‌های خزشی در بتن خواهد شد. با توجه به این‌که نرخ کاهش مدول الاستیسیته بتن بالاتر از نرخ کاهش مقاومت کششی بتن می‌باشد، برایند اثرات فوق منجر به افزایش ظرفیت کرنش کششی بتن با کاهش میزان مواد سیمانی می‌گردد. بنابراین، افزایش بیش از حد نیاز مواد سیمانی در بتن (حد لازم برای تامین مقاومت مورد نیاز طراحی) منجر به کاهش تاب و استحکام (Toughness) بتن در مقابل ترک‌خوردگی خواهد شد. شکل (۴-۱۲) ظرفیت کرنش کششی و مدول الاستیسیته کششی چند نمونه مخلوط بتن غلتکی با میزان مواد سیمانی مختلف را نشان می‌دهد. در مخلوط بتن غلتکی با میزان مواد سیمانی ۲۴۰ کیلوگرم بر متر

مکعب (که ۳۳ درصد آن مواد پوزولانی است)، مقاومت کششی ۲/۶۷ مگاپاسکال و ظرفیت کرنش کششی ۹۰ میکروکرنش می‌باشد. در حالی که مقاومت کششی مخلوط بتن غلتکی با میزان مواد سیمانی ۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب که ۲۵ درصد آن مواد پوزولانی است و با استفاده از سنگ‌دانه‌های با مقاومت پایین ساخته شده است، فقط در حدود ۰/۳۸ مگاپاسکال است ولی ظرفیت کرنش کششی این بتن بسیار بالا بوده و به حد ۳۴۰ میکروکرنش می‌رسد. این مخلوط بتن غلتکی در سد Concepcion مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس نتایج پایش ۸ سال پس از بهره‌برداری، هیچ ترکی در آن رخ نداده است. همچنین با توجه به ظرفیت کرنش کششی بالای بتن، در فرایند ساخت این سد هیچ نوع سرمایشی برای کنترل ترک‌های حرارتی در نظر گرفته نشده است [۱۸].



شکل ۴-۱۲- ظرفیت کرنش کششی و مدول الاستیسیته کششی مخلوط بتن غلتکی با میزان مواد سیمانی مختلف [۱۸]

بنا به تعریف تاب یا استحکام (Toughness) توان جذب انرژی مصالح در محدوده رفتار غیر ارتجاعی تا قبل از گسیختگی و انهدام می‌باشد. با توجه به اهمیت این پارامتر در رفتار و عملکرد مطلوب سدهای بتن غلتکی، تاثیر آن در فرایند طراحی سد باید به نحو مناسب در نظر گرفته شود. در این راستا ویژگی بارز مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی کم که تاب و استحکام (Toughness) بسیار بالای آن می‌باشد، می‌تواند هم در کاهش هزینه‌ها و اقتصاد پروژه موثر باشد و هم به رفتار و کارایی مطلوب بدنه سد کمک نماید.

۴-۸- مقاومت برشی

مقاومت برشی توده بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی به طور معمول با استفاده از رابطه پوش موهر، به صورت ترکیبی از دو پارامتر چسبندگی و مقاومت اصطکاکی، بیان می‌شود:

$$S = C + \sigma \tan \phi \qquad (۴-۴)$$

در این رابطه، S مقاومت برشی، C چسبندگی، σ تنش نرمال، و ϕ زاویه اصطکاک (درجه) می‌باشند. مقاومت برشی توده بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی را می‌توان بر اساس دستورالعمل آزمایش CRD-90 در سطح تنش نرمال مورد نظر تعیین نمود.

مقاومت برشی توده بتن غلتکی، درزهای اجرایی بتن‌ریزی با کیفیت مشابه با توده بتن، و درزهای اجرایی تحت اثر نیروی فشاری را غالبا می‌توان معادل درصدی از مقاومت فشاری بتن، به شرح جدول (۴-۳)، در نظر گرفت. از نقطه نظر مقاومت برشی، درزهای اجرایی بتن‌ریزی ضعیف‌ترین سطوح در بدنه سدهای بتن غلتکی می‌باشند که البته با اجرای تمهیداتی نظیر استفاده از ملات بستر در سطح درزهای اجرایی، استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد، و یا اجرای سریع لایه‌های متوالی بتن، مقاومت برشی سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی بهبود می‌یابد. بدیهی است اعمال این تمهیدات مستلزم افزایش هزینه و زمان اجرای پروژه بوده و ضرورت به‌کارگیری آن‌ها منوط به مبانی و نیازهای طراحی و روش اجرای مورد نظر خواهد بود.

جدول ۴-۳- مقاومت برشی توده بتن غلتکی و درزهای اجرایی بتن‌ریزی با کیفیت مشابه با توده بتن [۱۸]

مقاومت فشاری بتن غلتکی (f'_c)	مقاومت برشی توده بتن غلتکی
بزرگ‌تر از 17.5 MPa	0.10~0.20 f'_c
حدود 14.0 MPa	0.15~0.25 f'_c
حدود 7.0 MPa	0.25~0.30 f'_c

مقاومت برشی سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی متاثر از عوامل متعددی از جمله روانی و میزان رطوبت مخلوط بتن تازه، خواص سنگ‌دانه مصرفی، میزان تراکم سطوح درزهای اجرایی، میزان مواد سیمانی در بتن، میزان رشد یا پختگی (maturity) بتن سطح درز اجرایی در زمان اجرای لایه بعدی بتن، میزان اثربخشی مواد افزودنی دیرگیر، شرایط سطح درز اجرایی، و تمهیدات اجرایی به‌کار رفته در سطح درز می‌باشد. بر اساس تجربیات موجود، اثر عوامل فوق را به طور خلاصه می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

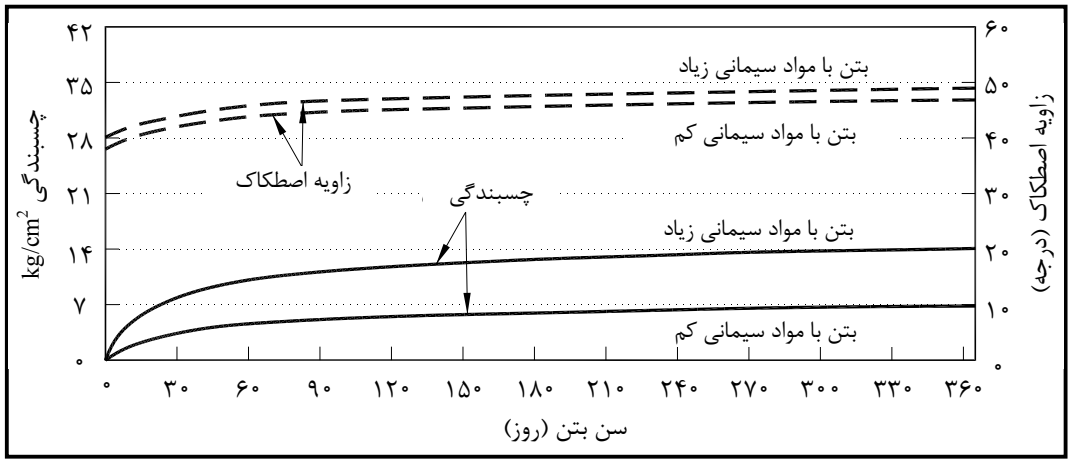
- مقاومت برشی بتن و درزهای اجرایی با افزایش سن بتن افزایش می‌یابد.
- با یک حجم مواد سیمانی یکسان، افزایش رطوبت (آب) بتن منجر به کاهش محدود چسبندگی بتن و درزهای اجرایی خواهد شد.
- افزایش مواد سیمانی می‌تواند باعث افزایش چسبندگی بتن و درزهای اجرایی گردد ولی تاثیر محسوسی بر زاویه اصطکاک ندارد. زاویه اصطکاک عموما متاثر از کیفیت سنگ‌دانه‌های بتن بوده و نسبت به سایر عوامل حساسیت زیادی ندارد.
- میزان رشد یا پختگی سطح درز (exposure maturity = exposure time × surface temperature) تاثیر تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و مقاومت سطوح درزهای اجرایی دارد.

برای ارزیابی و کمّی کردن اثر هر یک از عوامل فوق، شریدر در سال ۱۹۹۹یک روال نسبتا تفصیلی و کاملی را ارائه نموده است که در نهایت منجر به یک شاخص امتیاز به نام LJQD (Lift-Joint Quality Index) برای سطح درز

می‌گردد. در این طبقه‌بندی، امتیاز صفر متناظر با شرایط پایه طراحی، امتیاز مثبت معرف شرایط اجرایی و مقاومت بهتر درز، و امتیازهای منفی بیانگر شرایط کیفی ضعیف‌تر از فرضیات پایه طراحی خواهند بود [۱۸]. استفاده از این روش برای کنترل کیفی و نظارت بر شرایط اجرایی بتن‌ریزی مناسب بوده و بر اساس آن می‌توان معیارهای کمّی برای جریمه پیمانکار و معیاری حدی (برای نمونه امتیاز منفی حدی ۴-) برای پذیرش اجرا تعیین نمود.

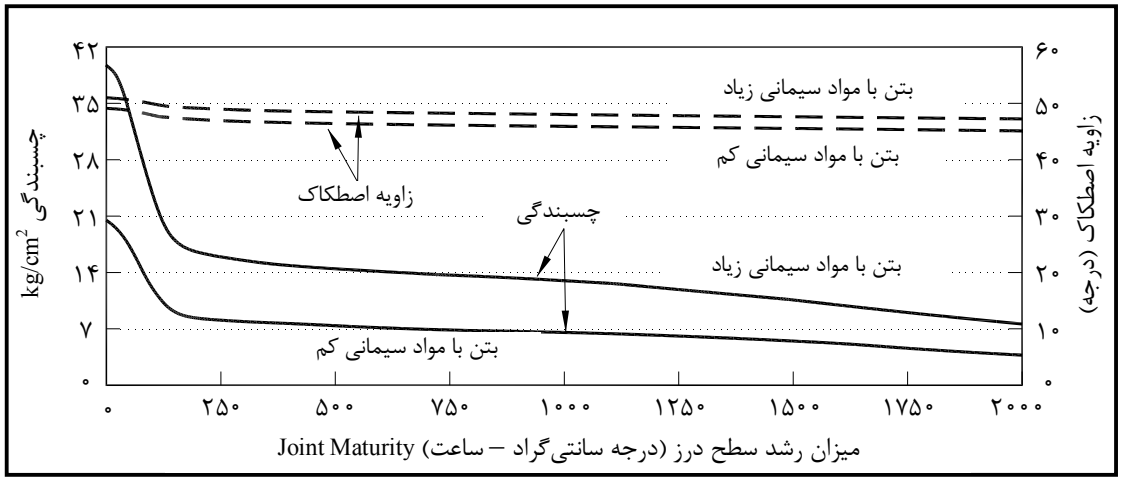
بر اساس نتایج بررسی‌ها و آزمایشات انجام یافته در شرایط اجرایی و در پروژه‌های مختلف، چسبندگی سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی در بازه وسیع صفر تا ۲/۸ مگاپاسکال، و زاویه اصطکاک این سطوح در بازه ۳۰ تا ۶۰ درجه متغیر بوده و مقدار متوسط چسبندگی در حدود ۱/۰ مگاپاسکال، و مقدار متوسط زاویه اصطکاک در حدود ۵۰ درجه بوده است. در سدهای با مواد سیمانی کم، درصورتی‌که از سنگ‌دانه با کیفیت خوب، و دانه‌بندی و طرح اختلاط مناسب برای بتن استفاده شده و کنترل‌های اجرایی نیز به نحو مناسبی اعمال گردند، می‌توان زاویه اصطکاک حدود ۴۵ درجه و چسبندگی حدود ۰/۳ تا ۰/۷۵ مگاپاسکال را برای سطوح درزهای اجرایی انتظار داشت. با افزایش میزان مواد سیمانی و رطوبت بتن، زاویه اصطکاک درزهای اجرایی بتن‌ریزی به طور جزئی کاهش می‌یابد ولی چسبندگی این سطوح به حدود ۰/۷۵ تا ۲/۱ مگاپاسکال افزایش می‌یابد [۱۸].

برای اندازه‌گیری و تخمین پارامترهای مقاومت برشی درزهای اجرایی در سدهای بتن غلتکی، آزمایش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین مختلف انجام یافته است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها آزمایش‌های انجام یافته توسط Schrader و Rizzo بر روی سد Saluda در سال ۲۰۰۳ می‌باشد. در این سد، آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی نمونه‌های بزرگ مقیاس درزهای اجرایی ناپیوسته و ترک‌خورده بتن، با تاکید بر اندازه‌گیری مقاومت برشی پسماند سطوح درز انجام پذیرفت. بر اساس این نتایج و سایر مطالعات انجام یافته در این زمینه، روند تیپ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک بتن غلتکی در طی زمان در شکل (۴-۱۳) ارائه شده است. در شکل (۴-۱۴) نیز تاثیر میزان بلوغ (maturity) سطح درز بر روی پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک نشان داده شده است.

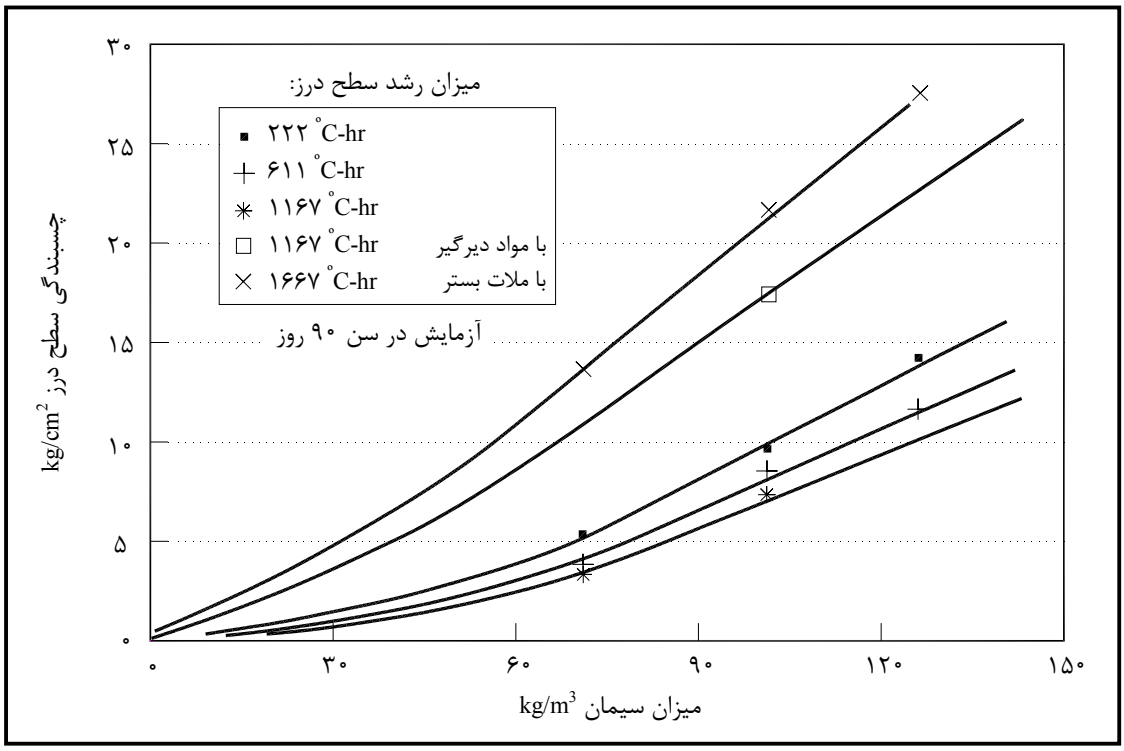


شکل ۴-۱۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک بتن غلتکی (با ۲۵٪ پوزولان) در سنین مختلف بدون استفاده از مواد افزودنی دیرگیر

نتایج آزمایش‌های انجام یافته در سد Miele I برای مقادیر چسبندگی درزهای اجرایی بتن‌ریزی به ازای میزان سیمان مختلف در بتن غلتکی، استفاده یا عدم استفاده از مواد افزودنی دیرگیر، و میزان رشد یا پختگی سطح درزهای اجرایی در شکل (۴-۱۵) ارائه شده است. زاویه اصطکاک سطوح درزهای اجرایی در این سد مستقل از همه عوامل مذکور، حدود ۴۵ درجه اندازه‌گیری شده است. مخلوط‌های بتن سد Miele I دارای حدود ۴/۸ درصد آب، حدود ۶ درصد پودر سنگ، و بدون پوزولان بوده‌اند. همچنین در این سد برای بهبود مقاومت برشی از یک لایه ملات بستر با اسلامپ بالا و ضخامت حدود ۲/۰ سانتی‌متر، با ۴۵ درصد ماسه و عیار سیمان زیاد، در سطوح درزهای اجرایی (قبل از شروع بتن‌ریزی لایه بعدی) استفاده شده است [۱۸].



شکل ۴-۱۴- تاثیر میزان رشد سطح درز بر چسبندگی و زاویه اصطکاک درزهای اجرایی بدون استفاده از مواد افزودنی دیرگیر [۱۸]



شکل ۴-۱۵- تاثیر میزان سیمان، رشد سطح درز، ملات بستر، و مواد افزودنی دیرگیر بر چسبندگی درزهای اجرایی در سد Miel I [۱۸]

نتیجه جالبی که در آزمایش‌های سد Miele I و آزمایش‌های بزرگ مقیاس انجام یافته در سایر سدها به‌دست آمده، این‌که بر خلاف روال متعارف در اجرای بتن حجیم معمولی، خشک شدن سطح درز اجرایی در بتن غلتکی بلافاصله قبل از بتن‌ریزی لایه بعدی هیچ تاثیر منفی بر روی مقاومت برشی درز نشان نداده است. علاوه بر این، از آنجا که خشک شدن سطح درز (بلافاصله قبل از بتن‌ریزی لایه بعدی) امکان تمیز کردن سطح درز را با جریان هوای فشرده فراهم می‌آورد، می‌تواند در بهبود پارامترهای مقاومتی درز نیز موثر باشد [۱۸].

با توجه به تنوع عوامل اثرگذار بر مقاومت برشی درزهای اجرایی، انجام آزمایش‌های لازم برای تعیین دقیق پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی در هر پروژه، با توجه به ملاحظات طراحی و اجرایی مورد نظر، ضروری خواهد بود. با این حال صرفا برای مقاصد طراحی می‌توان با توجه به ویژگی‌های خاص پروژه مورد نظر، از تجربیات پروژه‌های مشابه، نظیر مقادیر و روندهای ارائه شده در شکل‌های فوق، و یا مقادیر نسبتا محافظه‌کارانه پیشنهادی توسط مراجع معتبر استفاده نمود.

گروه مهندسین ارتش آمریکا (USACE) زاویه اصطکاک درزهای اجرایی را برای مقاصد طراحی حدود ۴۵ درجه پیشنهاد می‌دهد. این مرجع، تخمین اولیه چسبندگی درزهای اجرایی را در صورت عدم استفاده از ملات بستر در حدود $0.03 \sim 0.06f'c$ و در شرایط استفاده از ملات بستر و اعمال تمهیدات اجرایی مناسب، در حدود $0.09 \sim 0.15f'c$ پیشنهاد می‌نماید. در مراحل مقدماتی طراحی، به خصوص در سدهای بتن غلتکی کوچک و یا سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، زاویه اصطکاک درزهای اجرایی بتن‌ریزی ۴۵ درجه، و چسبندگی سطوح درز در شرایط استفاده و یا عدم استفاده از ملات بستر به ترتیب معادل $0.05f'c$ و صفر قابل توصیه است [۱۹].

در شرایط بارگذاری سریع (دینامیکی)، بر اساس برخی بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام یافته، روند افزایش مقاومت برشی را می‌توان تقریبا مشابه روند افزایش مقاومت کششی در نظر گرفت، با این حال با توجه به پراکندگی نتایج آزمایش‌های انجام یافته در این زمینه، تا زمانی که آزمایش‌های مقاومت برشی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی برای پروژه مورد نظر انجام نشده باشد، افزایش پارامترهای مقاومت برشی در شرایط بارگذاری دینامیکی توصیه نمی‌گردد [۱۹].

۴-۹- تغییر حجم بتن

۴-۹-۱- افت خشک‌شدگی

افت خشک‌شدگی (Drying Shrinkage) به افت (انقباض) یا جمع‌شدگی بتن در اثر از دست دادن آب، اطلاق می‌گردد. میزان افت خشک‌شدگی را می‌توان بر اساس دستورالعمل آزمایش ASTM C157 تعیین نمود. افت خشک‌شدگی بتن غلتکی، بخاطر حجم آب کم‌تر در مخلوط بتن، به طور معمول از بتن حجیم متعارف کم‌تر است. معمولا اثرات افت خشک‌شدگی بتن در رفتار کلی سازه‌های بتنی حجیم، به دلیل این‌که بتن بخش مرکزی این سازه‌ها

عموما رطوبت خود را حفظ می‌کند، ناچیز بوده و در تحلیل این سازه‌ها از اثر آن صرف‌نظر می‌شود. با این حال اثر افت خشک‌شدگی بتن در تحلیل و ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های سطحی در سازه‌های بتنی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱۹].

۴-۹-۲- تغییر حجم ذاتی

تغییر حجم یا جمع‌شدگی ذاتی (Autogenous Volume Change or Autogenous Shrinkage) تغییر حجم بتن بخاطر هیدراته شدن مواد سیمانی بدون از دست دادن و یا به‌دست آوردن رطوبت و بدون اعمال هیچ بار خارجی می‌باشد. این نوع از افت در همه قسمت‌های سازه، حتی در بخش‌های داخلی بتن حجیم اتفاق می‌افتد و می‌تواند در ایجاد ترک‌های حجمی در سازه تاثیرگذار باشد. تغییرحجم ذاتی بتن در مدت طولانی‌تری نسبت به افت خشک‌شدگی اتفاق می‌افتد و معمولا میزان آن به مشخصات مصالح، طرح اختلاط و خصوصا به نوع سنگ‌دانه بستگی دارد. ماهیت تغییر حجم (جمع‌شدگی) ذاتی بتن شبیه جمع‌شدگی بتن در اثر از دست دادن حرارت (انقباض) می‌باشد و چون تغییر حجم ذاتی بتن تقریبا به طور هم‌زمان با تغییر حرارت اتفاق می‌افتد، باید در تحلیل و بررسی پتانسیل ترک‌های حجمی در بتن، اثر این دو نوع افت را با هم لحاظ نمود. به طور معمول میزان تغییر حجم ذاتی بتن اثرات قابل توجه و محسوسی در بتن ندارد ولی کنترل این پارامتر به خصوص در مواردی که از سنگ‌دانه و یا مواد پوزولانی غیرمتعارف در بتن استفاده می‌شود، ضروری است [۱۸].

به دلیل دامنه گسترده تغییرات میزان جمع‌شدگی ذاتی بتن، تخمین قابل اعتماد این پارامتر بدون انجام آزمایش میسر نمی‌باشد و اگر چه هنوز روش آزمایش خاصی برای اندازه‌گیری این نوع افت وجود ندارد ولی تغییر حجم ذاتی بتن را می‌توان با استفاده از آزمونه‌های موم‌اندود استوانه‌ای خزش، بدون اعمال بار مطابق دستورالعمل ASTM C512 تعیین نمود [۱۹].

۴-۱۰- خواص حرارتی و افزایش دمای آدیاباتیک بتن

خواص حرارتی بتن غلتکی شامل گرمای ویژه، هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و افزایش دمای آدیاباتیک عموما مشابه با خواص متناظر در بتن حجیم متعارف می‌باشند. خواص حرارتی مخلوط بتن تابعی از خواص حرارتی اجزای تشکیل دهنده آن به خصوص سنگ‌دانه‌های بتن است، بنابراین با توجه به استفاده از طیف وسیع‌تری از سنگ‌دانه‌ها در بتن غلتکی، دامنه تغییرات خواص حرارتی آن‌ها گسترده‌تر از بتن حجیم متعارف می‌باشد. با توجه به استفاده از پوزولان در مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش مربوط به اندازه‌گیری خواص حرارتی در این نوع بتن باید برای دوره‌های زمانی ۵۶ روزه و ۹۰ روزه هم انجام شود [۱۹].

افزایش دمای آدیاباتیک بتن ناشی از حرارت ایجاد شده در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان و مواد پوزولانی در بتن تازه می‌باشد. بنابراین، میزان افزایش دمای آدیاباتیک بتن در سنین مختلف تابع نوع و میزان مصرف سیمان و مواد پوزولانی و نرخ حرارت‌زایی این مواد در فرایند واکنش هیدراتاسیون خواهد بود. علاوه بر این، دمای پخش و نحوه اجرا و

عمل‌آوری بتن نیز در سرعت انجام واکنش هیدراتاسیون و نرخ حرارت‌زایی مواد سیمانی تاثیرگذار هستند. میزان افزایش دمای آدیاباتیک بتن را می‌توان بر اساس دستورالعمل آزمایش CRD-C 38 تعیین نمود. در این آزمایش دمای پخش بتن باید متناظر با دمای پخش بتن در پروژه باشد [۱۹].

با توجه به ملاحظات فوق، مقدار افزایش دمای آدیاباتیک در بتن غلتکی و روند تغییرات آن در طی زمان بسته به نوع و نرخ واکنش‌زایی مواد سیمانی و پوزولانی، و شرایط اجرایی و عمل‌آوری بتن در پروژه‌های مختلف ممکن است کاملا متفاوت باشد. به همین دلیل محاسبه میزان و نرخ افزایش دمای آدیاباتیک بتن بر اساس نرخ گرمای هیدراتاسیون مواد سیمانی و خواص سنگ‌دانه‌ها در برخی موارد منجر به نتایج قابل اعتمادی نشده و توصیه بر انجام آزمایش‌های مناسب بر روی مخلوط کامل بتن غلتکی برای برآورد میزان افزایش دمای آدیاباتیک بتن غلتکی می‌باشد [۱۹].

میزان و روند افزایش دمای آدیاباتیک بتن پارامتر بسیار مهم و تاثیرگذاری بر تحلیل ریسک ترک‌خوردگی بتن در سنین اولیه، میزان تمهیدات و کنترل‌های حرارتی حین اجرا، و متناسبا برنامه‌زمان‌بندی و هزینه اجرای پروژه است و لذا مطالعه و بررسی دقیق نحوه افزایش دمای آدیاباتیک بتن در پروژه‌های مختلف کاملا ضروری و توجیه‌پذیر می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام یافته در چندین پروژه، در شرایط استفاده از سیمان نوع ۲، حدود افزایش دمای آدیاباتیک بتن به ازای هر کیلوگرم سیمان در یک مترمکعب مخلوط بتن، از ۰/۰۱ تا $^{\circ}C$ ۰/۰۹ در یک روز، از $^{\circ}C$ ۰/۰۸ تا $^{\circ}C$ ۰/۱۷ در هفت روز، و از $^{\circ}C$ ۰/۱۲ تا $^{\circ}C$ ۰/۲۰ در ۲۸ روز متغیر می‌باشد [۱۸]. به طور کلی میزان افزایش دمای آدیاباتیک ۲۸ روزه ناشی از پوزولان‌ها، به‌عنوان مثال پوزولان کلاس F، را می‌توان معادل افزایش دمای آدیاباتیک ناشی از نیمی از سیمان هم وزن پوزولان در نظر گرفت [۱۶].

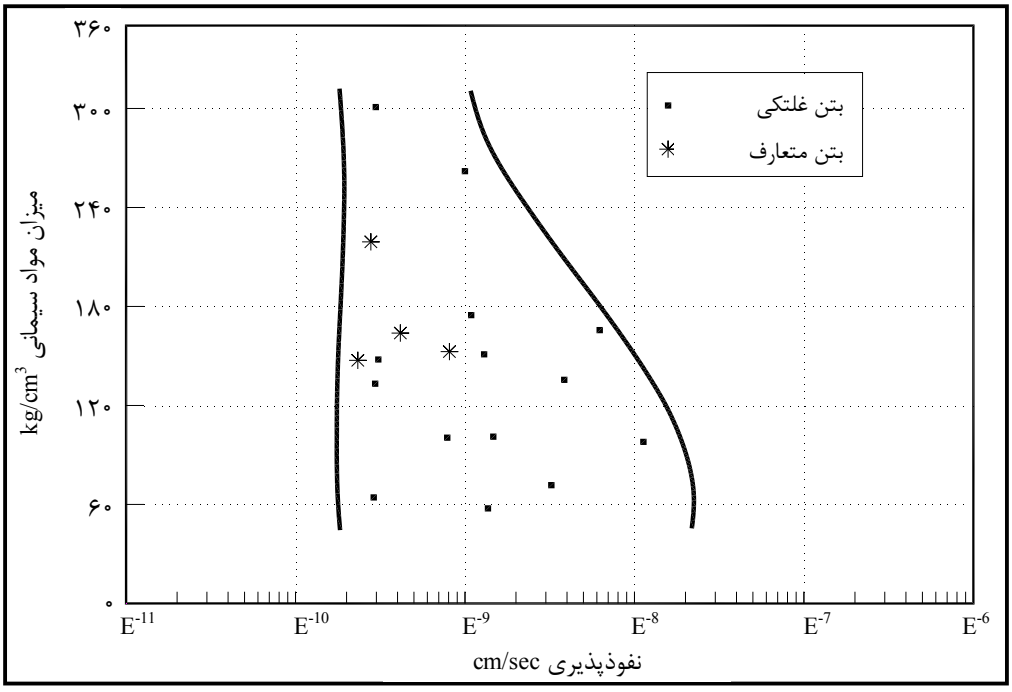
۴-۱۱- وزن مخصوص

وزن مخصوص عبارت است از جرم واحد حجم بتن سخت شده و می‌توان آن را بر اساس دستورالعمل آزمایش CRD-C 23 تعیین نمود. وزن مخصوص بتن غلتکی اصولا وابسته به وزن مخصوص سنگ‌دانه‌ها و درجه تراکم بتن می‌باشد. مقادیر معمول وزن مخصوص بتن حجیم متعارف از ۲۲۴۰ تا ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر می‌کند. وزن مخصوص بتن غلتکی با سنگ‌دانه یکسان به خاطر میزان آب و حباب هوای محبوس کم‌تر، درصورتی‌که به طور کامل متراکم گردد، اندکی بیش‌تر از بتن حجیم متعارف خواهد بود [۱۹]. از نظر اجرایی، تراکم بتن باید در حدی انجام یابد که وزن مخصوص بتن سخت شده در نواحی مختلف از ۹۳ درصد تراکم حداکثر تئوریک (Theoretical Air-Free Density) کم‌تر نبوده و متوسط وزن مخصوص بتن در حدود ۹۵ تا ۹۶ درصد وزن مخصوص حداکثر تئوریک باشد [۱۸].

۴-۱۲- نفوذپذیری و نشت در سدهای بتن غلتکی

در بتن‌های غلتکی، به خصوص در بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، درصورتی‌که حجم مواد خمیری مخلوط بتن (شامل مواد سیمانی، آب، حباب هوا و سنگ‌دانه‌های بسیار ریز کوچک‌تر از ۷۵ میکرون) در حدود ۲۰ درصد کل حجم بتن باشد، روانی و تراکم‌پذیری بتن مطلوب بوده و ریسک پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها از خمیر بتن به حداقل می‌رسد. در چنین شرایطی، نفوذپذیری جسم (توده) بتن غلتکی با دانه‌بندی و تراکم مناسب، مستقل از میزان مواد سیمانی مصرفی در بتن، عموما مشابه با بتن حجیم متعارف، ناچیز می‌باشد. برای نمونه مقادیر نفوذپذیری توده بتن در چند سد بتن غلتکی و تعدادی سدهای وزنی متعارف در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است [۱۸]. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، به ازای میزان مواد سیمانی یکسان، نفوذپذیری توده بتن غلتکی و بتن معمولی تقریبا در یک حدود قرار می‌گیرند.

نفوذپذیری نمونه استوانه‌ای بتن غلتکی را می‌توان بر اساس دستورالعمل آزمایش CRD-C163 اندازه‌گیری نمود. در جدول (۴-۴) میانگین نتایج نفوذپذیری بتن غلتکی در سدهای مختلف، که بر اساس میزان استفاده از مواد سیمانی در بتن مرتب شده‌اند، ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات نفوذپذیری بتن غلتکی عموما در حدود 1×10^{-9} cm/s تا 10×10^{-9} cm/s قرار می‌گیرد (این حدود برای بدنه سد مناسب و قابل پذیرش می‌باشند). با این حال توجه به این نکته ضروری است که میزان استفاده از مواد سیمانی به تنهایی تاثیری بر نفوذپذیری بتن غلتکی نداشته و هیچ تناسب و ارتباط مشخص و معنی‌داری بین میزان مواد سیمانی و نفوذپذیری بتن غلتکی وجود ندارد [۱۸].



شکل ۴-۱۶- نفوذپذیری توده بتن غلتکی و بتن حجیم متعارف با میزان مواد سیمانی مختلف [۱۸]

جدول ۴-۴- میانگین نفوذپذیری نمونه‌های مغزه‌گیری شده در سدهای بتن غلتکی

نام پروژه	مواد سیمانی (kg/m^3)			نفوذپذیری ($cm/s \times 10^{-9}$)
	سیمان	پوزولان	جمع	
Urugua-I	۵۹	۰	۵۹	۱/۴
Willow Creek	۴۷	۱۹	۶۶	۰/۳
Zintel	۷۳	۰	۷۳	۳/۳
Lost Creek	۵۵	۴۵	۱۰۰	۱۱/۳
Elk Creek	۶۹	۳۳	۱۰۲	۰/۸
Willow Creek	۱۰۳	۰	۱۰۳	۱/۵
Cuchillo Negro	۷۶	۵۹	۱۳۵	۰/۳
Lost Creek	۱۳۷	۰	۱۳۷	۳/۹
Willow Creek	۱۰۳	۴۷	۱۵۰	۳/۹
Lost Creek	۷۰	۸۲	۱۵۳	۱/۳
Zintel	۱۷۶	۰	۱۷۶	۱/۱
Willow Creek	۱۸۵	۷۹	۲۶۴	۱/۰
WES	۳۰۴	۰	۳۰۴	۰/۳

علیرغم نفوذپذیری تقریبا ناچیز توده بتن غلتکی، نفوذپذیری و نشت آب از درزهای اجرایی بتن‌ریزی، به خصوص در مواردی که تمهیدات مناسب برای کنترل نشت در درزهای اجرایی (شامل المان آب‌بند در بالادست، استفاده از ملات بستر در سطح درز، و یا اجرای سریع و متوالی لایه‌های بتن) در نظر گرفته نشوند، می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. این موضوع بویژه در سد بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، که مخلوط بتن نسبتا خشک می‌باشد، بسیار مهم بوده و نشت آب از درزهای اجرایی بتن‌ریزی حتی در مواردی که مقاومت برشی این درزها نسبتا مناسب بوده و سطح درزهای اجرایی نیز کاملا بسته به نظر می‌رسند، قابل توجه خواهد بود. توجه به این نکته ضروری است که اگرچه کل میزان نشت آب از درزهای اجرایی ممکن است قابل توجه و مهم نباشد ولی نرخ نشت آب از درزها می‌تواند تا حد 1×10^{-3} سانتی‌متر بر ثانیه افزایش یابد و در این حالت فشار برکنش در سطح درز ایجاد خواهد شد. بنابراین، درصورتی‌که این موضوع از بعد طراحی بدنه سد پذیرفته شده باشد، در تحلیل پایداری بدنه سد می‌بایست اثر فشار برکنش در سطح همه درزهای اجرایی بتن‌ریزی در بدنه سد در نظر گرفته شود [۱۸].

یک راهکار موثر و نسبتا ساده برای کنترل نشت و آب‌بندی درزهای اجرایی بتن‌ریزی در سدهای با مواد سیمانی کم (و متوسط) استفاده از ملات بستر در سطح درزهای اجرایی می‌باشد. برای این منظور، ملات بستر باید در سطح درز در مجاور رویه بالادست سد و تا عمقی حداقل در حدود ۸ درصد ارتفاع آب در بالای تراز درز، اجرا گردد. استفاده از ملات بستر علاوه بر کاهش نفوذپذیری و کنترل نشت، سبب بهبود مقاومت کششی و مقاومت برشی سطح درزهای اجرایی نیز خواهد شد. با این حال باید توجه داشت که عملا به دلیل عدم اجرا و پخش یکنواخت ملات بستر در سطح درزهای اجرایی، نشت از این درزها کاملا حذف نشده و در نظر گرفتن تمهیدات دیگری نظیر یک شبکه زهکشی در بدنه سد می‌تواند در کنترل و جمع‌آوری نشت‌های اتفاقی در بدنه سد موثر باشد [۱۸].

۴-۱۳- مقاومت در برابر ذوب و انجماد

با توجه به این‌که مواد افزودنی شیمیایی برای انجام واکنش نیاز به آب دارند، کارایی و اثربخشی مواد افزودنی شیمیایی در بتن غلتکی، به خصوص در مخلوط‌های بتن غلتکی با مواد سیمانی و آب کم، محدود خواهد بود. به همین جهت استفاده از مواد افزودنی هوازا برای افزایش مقاومت بتن غلتکی در برابر ذوب و انجماد در غالب موارد اثربخشی لازم و مطلوب را به همراه نداشته است. با این حال تجربه سدهای بتن غلتکی که بدون استفاده از مواد افزودنی هوازا ساخته شده و در معرض شرایط آب و هوایی شدید قرار داشته‌اند (نظیر سدهای Winchester، Willow Creek، Monksville و Middle Fork در آمریکا) غالبا مبین مقاومت مناسب بتن غلتکی در برابر شرایط آب و هوایی شدید و سیکل‌های ذوب و انجماد مکرر می‌باشند [۱۸].

در سدهای Monksville، Winchester و Willow Creek بتن رویه پایین‌دست سد به ترتیب با عیار مواد سیمانی ۶۲، ۱۰۴ و ۱۳۳ کیلوگرم بر متر مکعب بدون استفاده از قالب و بدون ایجاد یک تراکم مطلوب، در معرض شرایط آب و هوایی شدید (سیکل‌های ذوب و انجماد آب در اکثر روزهای فصل زمستان) قرار داشته‌اند. علاوه بر این، بتن رویه پایین‌دست سدهای Monksville و Willow Creek در معرض نشت آب از درزهای اجرایی بتن‌ریزی نیز بوده‌اند. سد Monksville در سال‌های اولیه بهره‌برداری مقاومت مناسبی در برابر ذوب و انجماد داشته است ولی بعد از گذشت چند سال، آثار فرسایش و تخریب سطحی بتن رویه پایین‌دست ناشی از اثر سیکل‌های متوالی ذوب و انجماد در آن پدیدار گشته است. در سدهای Winchester و Willow Creek بتن رویه پایین‌دست در ۲۵ سال اول بهره‌برداری مقاومت مناسبی در برابر ذوب و انجماد از خود نشان داده‌اند. در سد Middle Fork نیز که در یک شرایط اقلیمی سخت با دمایی که به ۴۰- درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد، قرار گرفته است، اجرای یک لایه بتن معمولی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در رویه پایین‌دست، بدنه سد را در برابر ذوب و انجماد مقاوم ساخته و هیچ تخریبی ناشی از این پدیده در سطح بتن رویه پایین‌دست سد مشاهده نشده است. بر اساس تجربیات و مشاهدات موجود، نرخ فرسایش سطحی رویه‌های بتن قالب‌بندی نشده و متراکم نشده در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد را برای بتن غلتکی با عیار موادسیمانی حدود ۵۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌توان معادل «عمق نفوذ یخزدگی در بتن» به ازای هر ۱۰۰ تا ۲۵۰ سیکل ذوب و انجماد در نظر گرفت. در بتن غلتکی متراکم شده (داخلی‌تر بدنه سد) میزان فرسایش مذکور تقریبا به ازای هر ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ سیکل ذوب و انجماد رخ خواهد داد [۱۸].

تجربه استفاده از مواد افزودنی مختلف هوازا در بتن غلتکی برای بهبود دوام و مقاومت بتن در برابر ذوب و انجماد نشان داده است که اثربخشی این مواد در مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی و رطوبت زیاد نسبتا رضایت‌بخش بوده است هر چند برای دستیابی به نتیجه مطلوب میزان استفاده از مواد افزودنی در مخلوط بتن غلتکی باید بسیار بیش‌تر از مخلوط بتن حجیم معمولی باشد. در این خصوص می‌توان به تجربیات موفق استفاده از مواد افزودنی هوازا در سدهای Tongue River، Nordlingaalda، Zintel Canyon، Nickajack، Lake Robertson و Santa Cruz اشاره نمود [۱۸] و [۱۹].

به منظور ارزیابی مقاومت بتن غلتکی در برابر ذوب و انجماد از آزمایش ASTM C 666 با عنوان «روش آزمایش استاندارد مقاومت در برابر ذوب و انجماد تسریع شده» استفاده می‌شود. این آزمایش دارای دو روش مختلف A و B می‌باشد. در روش A، ذوب و انجماد درون آب صورت می‌گیرد اما در روش B، انجماد در هوا و ذوب شدن در آب صورت می‌گیرد. در این آزمایش دمای نمونه باید ظرف مدت ۲ تا ۵ ساعت از ۴° C به ۱۸°- C رسیده و سپس به همان دمای قبلی باز گردد. حداقل زمان لازم برای ذوب شدن در روش A و B به ترتیب ۲۵٪ و ۲۰٪ زمان یک چرخه کامل می‌باشد. در این آزمایش هم می‌توان از نمونه های منشوری و هم از نمونه‌های استوانه‌ای استفاده نمود. در هر صورت عرض، عمق یا قطر نمونه‌ها باید بین ۷۵ mm تا ۱۲۵ mm، و طول یا ارتفاع آن‌ها نیز بین ۲۷۵ mm تا ۴۰۵ mm باشد. جهت اشباع شدن نمونه‌ها لازم است ۴۸ ساعت قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها در آب آهک اشباع غوطه‌ور شوند. استقرار نمونه‌ها در چرخه‌های ذوب و انجماد تا ۳۰۰ چرخه یا رسیدن مدول دینامیکی به ۶۰٪ مقدار اولیه آن و یا ایجاد انبساطی معادل ۰/۱۰ درصد (هر کدام که زودتر اتفاق بیفتد) ادامه می‌یابد.

۴-۱۴- مقاومت در برابر سایش

مقاومت در برابر سایش به طور عمده توسط مقاومت فشاری و کیفیت سنگ‌دانه‌های بتن کنترل می‌شود. تجربیات و مشاهدات موجود در خصوص بتن غلتکی بیانگر مقاومت مناسب و بیش از حد انتظار این نوع بتن در برابر سایش می‌باشد. بر اساس تجربیات و نیز آزمایش‌های بزرگ مقیاس انجام یافته در این خصوص، نظیر آزمایش‌های USACE بر روی مدل با مقیاس واقعی و با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه، استفاده از بتن غلتکی در رویه سرریزها با احتیاط امکان‌پذیر خواهد بود. بر این اساس به طور کلی در شرایطی که سرریز به طور متناوب مورد استفاده قرار می‌گیرد، رویه سرریز در سد بتن غلتکی باید با استفاده از بتن معمولی با کیفیت بالا اجرا گردد ولی در مواردی که سرریز بندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان از بتن غلتکی (با مواد سیمانی زیاد) برای رویه سرریز استفاده نمود (نظیر سرریز سدهای Willow Creek و Galesville) [۱۸] و [۱۹]. با این حال تجربه عبور جریان سیلاب فرساینده و نامنظم هیدرولیکی در سرریزهای با رویه بتن غلتکی، خساراتی را بهمراه داشته است. برای نمونه در سد Debris بتن غلتکی رویه سرریز پس از مواجهه با جریان بحرانی حاوی ذرات ساینده‌ای نظیر سنگریزه، چوب و تخته سنگ، دچار تخریب شده و پوشش سطحی آن از بین رفته است. در این سد، بتن غلتکی رویه سرریز حاوی ریزدانه با کیفیت خوب و عیار سیمان بیش‌تر از حد متعارف (۳۰۰ kg/m^3) بوده است. در سرریز سد Galesville نیز، عبور سیلاب‌های با جریان نامنظم هیدرولیکی در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ باعث کنده شدن بتن در بعضی از نقاط رویه سرریز گشته است [۱۹].

آزمایش ASTM C 1138 با عنوان «روش آزمایش استاندارد مقاومت سایشی بتن (روش زیر آب)» جهت ارزیابی مقاومت سایشی بتن‌های معمولی و غلتکی استفاده می‌شود. این استاندارد اثر سایشی ذرات درون آب مانند سیلت، ماسه، شن و سایر مواد جامد را شبیه‌سازی می‌نماید. آزمایش‌های شماره C418، C779 و C944 استاندارد ASTM نیز برای

تعیین مقاومت سایشی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند اما در این آزمایش‌ها فقط شرایط سایش خشک (سندبلاست و یا اثر اصطکاکی) شبیه‌سازی می‌گردد.

مطابق دستورالعمل آزمایش ASTM C 1138، نمونه بتن به شکل استوانه و به ارتفاع ۱۰۰ ±۱۳ mm و قطر ۶ mm کم‌تر از قطر داخلی دستگاه باید تهیه شده و ۴۸ ساعت قبل از آزمایش در آب آهک اشباع قرار گیرد. نمونه مورد آزمایش را می‌توان با ساخت قالب و ریختن بتن تازه درون آن و یا با مغزه‌گیری از سازه موجود تهیه نمود. پس از قرار دادن نمونه در محفظه دستگاه، تا ارتفاع حدود ۱۵۰ mm بالاتر از سطح نمونه آب ریخته می‌شود و سپس ذرات ساینده وارد محفظه شده و پدال دستگاه که در فاصله ۳۸ ±۵ mm از سطح نمونه واقع شده است، به منظور ایجاد تلاطم در آب و ذرات ساینده و شبیه‌سازی فرایند سایش، شروع به دوران می‌کند. این آزمایش در مجموع به مدت ۷۲ ساعت، در شش دوره ۱۲ ساعته، ادامه می‌یابد و پس از هر دوره ۱۲ ساعته نمونه از دستگاه خارج شده و مصالح ساییده شده آن از محفظه دستگاه خارج می‌گردد.

در پایان آزمایش میانگین ضخامت ساییده شده محاسبه می‌شود و انتظار می‌رود درصد افت سایشی بعد از ۷۲ ساعت در بتن غلتکی با کارایی مناسب و سنگ‌دانه‌های با کیفیت عالی تا متوسط به ترتیب در حدود ۳ تا ۱۵ درصد باشد. همچنین انتظار می‌رود مقاومت سایشی بتن غلتکی با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و افزایش ابعاد سنگ‌دانه‌ها افزایش یافته و به حدود متناظر در بتن حجیم معمولی نزدیک گردد [۱۹].

فصل ۵

طراحی جانمایی و اجزای سد

۵-۱- کلیات

معیار اصلی و اساسی در طراحی بدنه سد، تلاش برای تحقق اهداف تعریف شده و تامین شرایط عملکرد مطلوب و ایمن بدنه سد با حداقل هزینه ممکن است. شرایط عملکرد مطلوب و ایمن بدنه سد بسته به نوع و اهمیت اهداف تعریف شده برای سد، طول دوره بهره‌برداری از سد، ابعاد سد و مخزن، و ریسک خطر محتمل در صورت آسیب یا انهدام سد تعریف می‌گردد. ویژگی شاخص و مهم سدهای وزنی بتن غلتکی در انعطاف‌پذیری (و انطباق‌پذیری) آن‌ها با نیازها و عملکردهای مختلف مورد نظر می‌باشند، درصورتی‌که در بسیاری موارد، تحقق شرایط عملکرد ایده‌آلی بدنه سد (که در سدهای بتنی وزنی متعارف تقریبا الزامی می‌باشد) می‌تواند به اقتصاد پروژه لطمه زده و یا کلا سبب غیراقتصادی شدن آن گردد.

بنابراین، علیرغم این‌که اصول پایه و روش‌های تحلیل و طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی غالبا با سدهای بتنی وزنی متعارف یکسان و مشابه می‌باشند، ملاحظات و تمهیدات طراحی این نوع سدها و معیارهای پذیرش عملکرد آن‌ها متناسب با فلسفه طراحی و روش اجرا، بسیار متنوع‌تر و گسترده‌تر است. البته باید توجه داشت که به منظور تحقق هدف حداکثر سرعت و سهولت اجرا، طراحی جانمایی و هندسی سدهای وزنی بتن غلتکی باید به ساده‌ترین شکل ممکن صورت پذیرد. با توجه به این ملاحظات، تحقق اهداف مورد انتظار از یک سد وزنی بتن غلتکی، مستلزم وجود تجربه طراحی و اجرایی بالا و همکاری و هماهنگی تیم کارفرما، مشاور و پیمانکار می‌باشد.

در ارائه مطالب مرتبط با طراحی در این راهنما، فرض بر این است که مطالعات پایه هیدرولوژی و برنامه‌ریزی منابع آب، مطالعات مقایسه و انتخاب نوع سد، و همچنین بررسی و تعیین کیفیت عملکرد مطلوب بدنه سد قبلا انجام یافته و ساختگاه مورد نظر از حداقل شرایط ژئوتکنیکی لازم برای احداث یک سد وزنی بتن غلتکی برخوردار است. همچنین مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، طراحی پرده آب‌بند، و مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک سنگ جزء موضوعات این راهنما نمی‌باشند.

۵-۲- معیارها و فرایند طراحی بدنه سد

ایده و هدف کلی در جانمایی (انتخاب محور) و طراحی شکل هندسی یک سد، تامین رفتار مناسب و ایمنی کافی سد در برابر بارها و شرایط محیطی، و پرهیز از وقوع هر نوع شرایط نامطلوب در رفتار سد متناسب با نوع عملکرد تعریف شده برای آن می‌باشد. در روند طراحی، مکانیزم باربری و نحوه انتقال بارهای وارد بر بدنه سد تدوین شده و سعی می‌شود در طول دوره بهره‌برداری با حاشیه اطمینان مناسب از شرایطی که منجر به عملکرد نامطلوب و یا انهدام بدنه سد و پی می‌گردد، پرهیز شود.

در عمل، وضعیت‌ها و شرایط محیطی محتمل برای سد با انجام تحلیل‌های (حرارتی و سازه‌ای) لازم بررسی شده، و ظرفیت تحمل و باربری سازه به نحوی تعیین می‌گردد که نتایج تحلیل‌ها از مقادیر حدی متناظر با سطح ایمنی در نظر گرفته شده، کم‌تر باشند (برای مثال تنش‌های ایجاد شده در بدنه سد و پی کم‌تر از مقاومت مجاز مصالح باشند).

با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌هایی که در همه داده‌ها و مراحل کار (مقاومت مصالح، بارگذاری، فرضیات طراحی، روش‌های تحلیل، و کاستی‌های اجرایی) وجود دارند، ضرایب اطمینان متناسب با سطوح ایمنی مختلف، تعریف می‌شوند.

معیارهای طراحی در واقع شامل تعریف حالات حدی مختلف، ترکیبات بارگذاری، روش‌های تحلیل، و ضرایب اطمینان متناسب با هر یک از حالات حدی می‌گردد. به طور کلی در تدوین معیارهای طراحی بدنه سدهای وزنی بتن غلتکی، تامین اهداف اصلی زیر در دوره اجرا و در شرایط مختلف بهره‌برداری، با حاشیه اطمینان متناسب با فلسفه طراحی، مد نظر می‌باشند:

- تامین پایداری بدنه سد در برابر لغزش و واژگونی و پرهیز از وقوع لغزش‌های ناپایدارساز در توده سنگ پی، در سطح تماس بدنه سد و پی، و در امتداد درزهای اجرایی بتن‌ریزی
- پرهیز از وقوع تنش‌های کششی و ترک‌های حرارتی (ناشی از انقباض توده بتن) در دوره اجرا
- تلاش برای تامین الزامات و ملاحظات مرتبط با روش اجرای بتن‌ریزی بدنه سد
- پرهیز از ایجاد تنش‌های کششی (و ترک‌های) گسترش یابنده و ناپایدار در بدنه سد (در توده بتن و یا در امتداد درزهای اجرایی بتن‌ریزی) تحت اثر بارگذاری‌های محتمل در شرایط مختلف بهره‌برداری
- تامین شرایط ظاهری مطلوب در رویه‌های بالادست و پایین‌دست و پرهیز از وقوع نشت‌های بیش از حد انتظار و مخرب از بدنه سد (در توده بتن و درزهای اجرایی بتن‌ریزی)

با توجه به معیارها و اهداف فوق، عملا فرایند طراحی بدنه سد، به خصوص در سدهای وزنی بتن غلتکی، کاملا متاثر و مرتبط با مطالعات تحلیلی شامل تحلیل‌های حرارتی حین ساخت و تحلیل‌های پایداری بدنه سد، و نیز ملاحظات مربوط به فلسفه و روش اجرا می‌باشد. در این راستا، تعریف حدود و معیارهای پذیرش (Acceptance Criteria) یکی از مراحل مهم تدوین معیارهای طراحی برای هر پروژه بوده و بر اساس آن، بروز لغزش‌های محدود و موضعی (در شرایط وقوع زلزله‌های بسیار بزرگ)، بروز تنش‌های کششی و یا ترک‌های موضعی، و نیز وقوع نشت در بعضی نواحی بدنه سد، به شکلی که منجر به شرایط بحرانی یا نامطلوب (مطابق با مشخصات و نیازهای طراحی) نگردد، قابل پذیرش خواهد بود.

بر اساس ساختار تنظیم شده برای این راهنما، ملاحظات و مبانی کلی طراحی جانمایی و طرح هندسی بدنه سد در این فصل، و با توجه به اهمیت معیارهای ایمنی و پذیرش، این موضوع به طور مستقل در فصل ششم ارائه شده است. مطالب مربوط به تحلیل‌های پایداری، تحلیل‌های حرارتی، و تحلیل‌های تنش بدنه سد و پی نیز به ترتیب در فصل‌های هفتم، هشتم، و نهم و همچنین ملاحظات طراحی سیستم پایش و رفتارنگاری بدنه سد در فصل دهم این راهنما ارائه شده‌اند.

۵-۳- جانمایی و محوریابی سد و سازه‌های جنبی

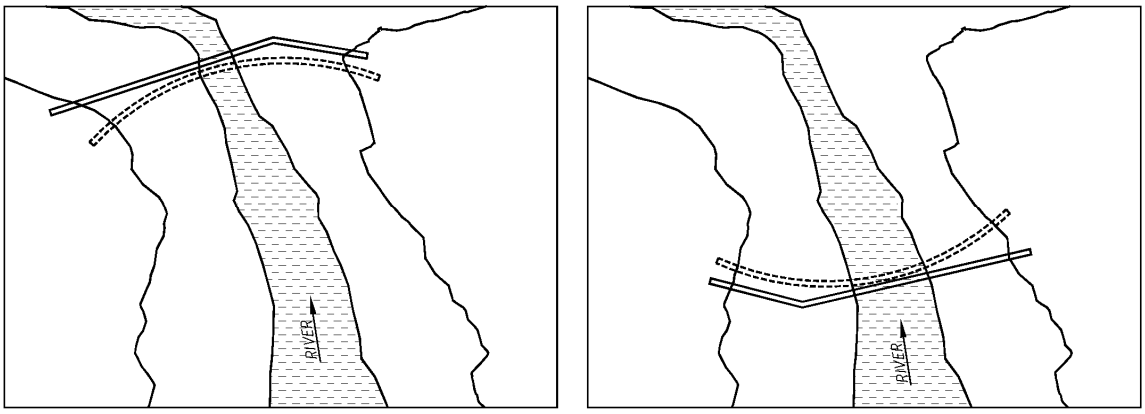
اولین مرحله در طراحی جانمایی بدنه سد انتخاب محور مناسب و بهینه برای بدنه سد می‌باشد. عوامل موثر زیر در انتخاب محور سد باید مد نظر قرار گیرند:

- توپوگرافی و مرفولوژی دره

- جنس و پارامترهای رفتاری توده سنگ تشکیل دهنده پی
- ساختار و نحوه استقرار واحدهای مختلف سنگ از بعد مشکلات یا پتانسیل‌های موجود برای آب‌بندی تکیه‌گاه‌ها
- ساختار و نحوه استقرار واحدهای مختلف سنگ از بعد پتانسیل ایجاد شرایط ناپایداری در توده سنگ
- موقعیت گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ در ساختگاه سد و میزان اهمیت آن‌ها
- موقعیت نواحی خرد شده سنگ، نواحی واریزه‌ای، و بلوک‌های ناپایدار در توده سنگ
- ملاحظات و محدودیت‌های اجرایی بدنه سد و سازه‌های جنبی
- وجود موقعیت‌های مناسب برای سازه‌های جنبی نظیر سیستم انحراف، سرریزها، حوضچه آرامش، و ساختمان نیروگاه

از بعد شرایط ژئوتکنیکی، محور سد باید به نحوی تعیین گردد که بدنه سد متکی بر توده سنگ سالم مقاوم و عاری از شکستگی‌های مهم، نواحی خردشده و واریزه‌ای بوده و امکان بروز لغزش و سقوط توده‌های ناپایدار سنگ بر روی بدنه سد، ساختمان نیروگاه، و سازه‌های جنبی وجود نداشته باشد (احتمال بروز لغزش‌های اینگونه در مخزن سد نیز باید به حداقل ممکن برسد).

برای بهبود شرایط پایداری کلی بدنه سد و توده سنگ پی، بدنه سد باید ترجیحا در محدوده‌هایی از دره که خطوط توپوگرافی دیواره‌های جناحین همگرا (و یا حداقل غیر واگرا) هستند، جانمایی گردد. از نظر هندسی، به طور معمول محور سد وزنی به صورت یک خط مستقیم و تقریبا عمود بر امتداد غالب خطوط توپوگرافی تعیین می‌گردد. با این حال در مواردی بسته به شرایط توپوگرافی و یا ضرورت‌های ناشی از جانمایی سازه‌های وابسته (نظیر ساختمان نیروگاه، آبگیرهای بزرگ، رسوب‌گیر و ...)، محور سد ممکن است به صورت چند خطی و یا منحنی تعریف گردد. در این موارد باید دقت نمود که خمیدگی و انحنای کلی محور سد ترجیحا به سمت پایین‌دست بوده و از ایجاد شکستگی‌های به سمت داخل مخزن، به دلیل این‌که این نوع شکستگی در محور سد در معرض کشش قرار داشته و می‌تواند مجرای مستعدی برای نشت آب نیز باشد، پرهیز گردد (شکل ۵-۱). البته به طور معمول اثر مثبت انحنا یا شکست محور سد در پایداری سدهای وزنی عملا در محاسبات تحلیل پایداری مقطع سد منظور نمی‌گردد [۲۴].



الف- خمیدگی یا شکستگی مناسب بدنه سد **ب- خمیدگی یا شکستگی نامناسب بدنه سد**

شکل ۵-۱- شکستگی (خمیدگی) مناسب و نامناسب در محور بدنه سد

از نظر پارامترهای رفتاری پی، توده سنگ مقاوم مناسب برای سدهای بتنی وزنی متعارف، برای سدهای وزنی بتن غلتکی هم مناسب می‌باشند. علاوه بر این، هزینه کم‌تر و ویژگی‌های رفتاری سدهای وزنی بتن غلتکی این امکان را فراهم می‌آورد که با عریض‌تر کردن مقطع سد و یا کاهش مدول تغییرشکل بدنه سد، تنش‌های اعمال شده به پی را کاهش داده و اثرات نامطلوب تغییرشکل‌های پی را کنترل نمود. بنابراین امکان احداث سدهای وزنی بتن غلتکی بر روی پی‌هایی که برای سدهای بتنی وزنی متعارف قابل پذیرش نیستند نیز، با در نظر گرفتن تمهیدات طراحی مناسب، وجود دارد. سدهای وزنی بتن غلتکی Concepcion، Big Haynes، Burton Gorge، Rompepicos، و Buckhorn نمونه سدهایی هستند که بر روی پی‌های نامناسب برای سدهای بتنی وزنی متعارف ساخته شده‌اند [۱۸]. هر چند ارائه یک معیار کمّی برای حدود مدول تغییرشکل مناسب برای توده سنگ پی سدهای وزنی (متعارف و بتن غلتکی) به سادگی میسر نمی‌باشد، ولی با توجه به تجربه طراحی و تحلیل سدهای بتنی وزنی مختلف، می‌توان در مرحله مطالعات امکان‌سنجی، حدود ارائه شده در جدول (۵-۱) را برای این منظور در نظر گرفت. در این جدول E_C معرف مدول تغییرشکل بتن، و E_R معرف مدول تغییرشکل توده سنگ پی می‌باشند. بر اساس حدود ارائه شده در جدول (۵-۱)، ملاحظه می‌گردد که با کاهش مدول تغییرشکل بتن (استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی کم)، احداث سد وزنی بتن غلتکی در توده‌های ضعیف‌تر سنگ پی امکان‌پذیر می‌گردد.

جدول ۵-۱- حدود مدول تغییرشکل مناسب برای توده سنگ پی سدهای وزنی بتن غلتکی [۲۳]

وضعیت توده سنگ	سد وزنی بتن غلتکی با ارتفاع کم تا متوسط	سد وزنی بتن غلتکی با ارتفاع متوسط تا زیاد
شرایط مطلوب و مناسب	$\frac{E_R}{E_C} \geq 0.10$	$\frac{E_R}{E_C} \geq 0.20$
شرایط حدی (نیاز به تحلیل‌های ویژه و تمهیدات طراحی خاص)	$0.05 \leq \frac{E_R}{E_C} < 0.10$	$0.10 \leq \frac{E_R}{E_C} < 0.20$
شرایط نامطلوب	$\frac{E_R}{E_C} < 0.05$	$\frac{E_R}{E_C} < 0.10$

درصورتی‌که توده سنگ پی سد از حداقل کفایت لازم برای احداث یک سد وزنی بتن غلتکی یا متعارف برخوردار باشد، هیچ محدودیتی از بعد شرایط هندسی و شکل دره برای احداث سد بتنی وزنی متعارف و یا سد وزنی بتن غلتکی وجود ندارد. با توجه به عدم امکان رقابت اقتصادی سدهای بتنی وزنی متعارف با سدهای بتنی قوسی و نیز سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، احداث سدهای بتنی وزنی متعارف در دره‌های V شکل و باریک (با نسبت عرض به ارتفاع کم‌تر از ۳) و در دره‌های بسیار عریض (با نسبت عرض به ارتفاع بیش‌تر از ۶) عموما از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نمی‌گردد. در این خصوص، با توجه به هزینه کم‌تر واحد حجم بتن غلتکی و تنوع تکنیک‌های طراحی و امکانات اجرایی قابل اعمال و استفاده در سدهای وزنی بتن غلتکی، این نوع سدها در طیف گسترده‌تری از دره‌ها، از دره‌های بسیار کم‌عرض تا دره‌های بسیار عریض، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌گردند. البته با توجه به مشکلات ترافیک و تردد ماشین‌آلات متعارف اجرایی سدهای وزنی بتن غلتکی در دره‌های کم‌عرض و طولانی، به طور معمول انتخاب گزینه سد وزنی بتنی غلتکی برای این نوع دره‌ها منطقی و

قابل توصیه نمی‌باشد مگر در شرایطی که احداث گزینه سد بتنی قوسی به‌دلایلی امکان‌پذیر نبوده و از ماشین‌آلات خاص اجرایی برای سد وزنی بتن غلتکی استفاده گردد.

با توجه به محوریت «سهولت و سرعت اجرا» در سدهای بتن غلتکی، در نظر گرفتن امکانات و شرایط اجرایی پروژه در مطالعات محوریابی (و جانمایی سازه‌های جنبی) سدهای وزنی بتن غلتکی ضروری بوده و تاثیر این عامل می‌تواند به سیمای طرح بهینه کاملا متفاوتی برای گزینه سد بتنی وزنی غلتکی در مقایسه با سد بتنی وزنی متعارف گردد. برای نمونه، با توجه به ماشین‌آلات و امکانات اجرایی پیمانکار در برخی موارد جانمایی محور سد در بخش عریض‌تر دره، علیرغم افزایش حجم بدنه سد، ممکن است به دلیل تسهیل و تسریع فرایند اجرا توجیه‌پذیر و اقتصادی گردد.

۵-۴- طراحی هندسه بدنه سد

پس از تعیین محور سد، طراحی هندسه بدنه سد با طراحی و تحلیل پایداری عمیق‌ترین (بحرانی‌ترین) مقطع عرضی بدنه سد صورت می‌پذیرد. در شرایطی که مقطع قائم سد با هندسه متغیر طراحی گردد، و یا کیفیت توده سنگ در نواحی مختلف پی متغیر باشد، تحلیل پایداری مقاطع با ارتفاع کم‌تر نیز بسته به مورد باید کنترل گردد. با توجه به این‌که در سدهای وزنی (متعارف یا بتن غلتکی) معمولا سرریز در بخش میانی تاج سد قرار می‌گیرد، توجه کافی به هندسه سرریز و حوضچه آرامش در جانمایی محور و طراحی مقطع عرضی بدنه سد ضروری می‌باشد.

با افزایش ارتفاع سد پیچیدگی و حساسیت رفتار بدنه سد در شرایط بارگذاری مختلف، به خصوص در شرایط بارگذاری دینامیکی زلزله افزایش می‌یابد. همچنین روش اجرا و ملاحظات اقتصادی مربوط به هزینه‌های پروژه نیز با افزایش ارتفاع سد تغییر یافته و فرایند بهینه اجرایی یک سد بلند می‌تواند کاملا متمایز از روش اجرای بهینه یک سد کوتاه باشد. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت بیش‌تر اهداف احداث سدهای با ارتفاع بیش‌تر، معمولا کیفیت عملکرد و کارایی مورد انتظار از این سدها بالاتر می‌باشد. بر همین اساس، از دیدگاه ملاحظات طراحی و اجرایی، می‌توان سدهای وزنی بتن غلتکی را در سه رده «سدهای کوتاه (با ارتفاع کم‌تر از حدود ۳۰ متر)»، «سدهای متوسط (با ارتفاع بین ۳۰ تا ۹۰ متر)» و «سدهای بلند (با ارتفاع بیش‌تر از ۹۰ متر)» دسته‌بندی نمود.

اصول کلی و ملاحظات طراحی مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی عموما شبیه سدهای وزنی متعارف می‌باشد و تفاوتی از نظر اصول پایه طراحی بین سدهای با ارتفاع مختلف وجود ندارد. با این حال، علیرغم اصول پایه طراحی یکسان، با توجه به تغییر حساسیتها و ملاحظات طراحی و اجرایی و نیز تغییر عملکرد و کارایی مورد انتظار نسبت به ارتفاع سد، می‌توان معیارهای طراحی مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی را برای دو رده «سدهای کوتاه» و «سدهای بلند» تفکیک نمود. معیارهای طراحی سدهای با ارتفاع متوسط بسته به شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه، فلسفه طراحی و روش اجرای مورد نظر، و همچنین نوع عملکرد مورد انتظار می‌تواند مشابه با معیارهای طراحی سدهای کوتاه یا معیارهای طراحی سدهای بلند، و یا تلفیق مناسبی از آن‌ها با نظر طراح، انتخاب گردد. با توجه به فلسفه طراحی نسبتا

محافظه‌کارانه‌تر سدهای بتن غلتکی RCD، ضوابط طراحی هندسی این سدها را می‌توان مشابه ضوابط طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی بلند در نظر گرفت.

با کاهش ارتفاع سد، مقاومت مورد نیاز برای بتن (و برای سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی) نیز کاهش می‌یابد. بر همین اساس، غالب «سدهای بتن غلتکی کوتاه»، با توجه به ملاحظات فنی، اجرایی، و اقتصادی از نوع «سد وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی کم» هستند. در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند، مقادیر بالاتر پارامترهای مقاومتی برای بتن و سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی مورد نیاز می‌باشد و علاوه بر این، این سدها معمولا با اهداف مهم‌تری نظیر تولید انرژی برق، تامین و ذخیره آب، وکنترل سیلاب‌های بزرگ احداث می‌گردند. بنابراین با توجه به نیازهای طراحی بالاتر و اهمیت و لزوم عملکرد ایمن سدهای با ارتفاع متوسط و بلند در طولانی مدت، و همچنین نظر به ریسک خطر بسیار بزرگ‌تر ناشی از ایراد خسارت یا انهدام آن‌ها، معمولا «سدهای با ارتفاع متوسط و بلند» از نوع «سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط تا زیاد» می‌باشند. البته قاعده فوق کلی نیست و در پاره‌ای موارد به‌منظور کنترل و ارزیابی روش اجرای سد بتن غلتکی اصلی، فرازبند با استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد و ضوابط مشابه با سد بلند اصلی طراحی و اجرا می‌گردد. همچنین در برخی موارد در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند، به دلیل شرایط ژئوتکنیکی (توده سنگ پی نسبتا ضعیف) و یا ملاحظات اجرایی و اقتصادی خاص، استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی کم (مدول تغییرشکل کم) الزام‌آور و موجه می‌گردد. در هر حال، تصمیم‌گیری برای نوع بتن غلتکی و فلسفه طراحی در مورد هر پروژه مستلزم بررسی همه‌جانبه نوع و طول دوره عملکرد مورد انتظار از سد، اهمیت و ارتفاع سد، ریسک خطر (یا ضرر اقتصادی) ناشی از ایراد خسارت یا انهدام بدنه سد، شرایط و محدودیت‌های فنی ساختگاه، کیفیت منابع قرضه و مواد سیمانی در دسترس، و ملاحظات اجرایی و اقتصادی می‌باشد.

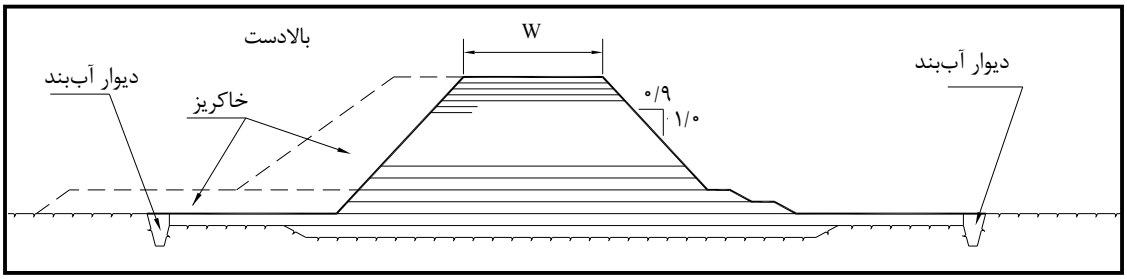
۵-۴-۱- طراحی هندسه مقطع قائم سدهای کوتاه

با توجه به شکل تیپ مقطع سدهای بتنی وزنی، نسبت سطح به حجم بدنه سد با کاهش ارتفاع سد افزایش می‌یابد. با توجه به این شرایط و با درنظر گرفتن هزینه‌های تجهیز اولیه برای عملیات قالب‌بندی، با کاهش ارتفاع سد، درصد هزینه‌های قالب‌بندی افزایش یافته و در سدهای بتنی وزنی کوتاه هزینه‌های مذکور درصد معنی‌داری از کل هزینه‌های سد را تشکیل می‌دهد. بر اساس این شرایط، امکان حذف عملیات قالب‌بندی در سدهای کوتاه به‌لحاظ صرفه‌جویی اقتصادی و نیز افزایش قابل توجه سرعت عملیات بتن‌ریزی، همواره مورد توجه طراحان و پیمانکاران بوده است.

برای حذف قالب‌بندی رویه‌های بالادست و پایین‌دست، شیب رویه‌های سد باید به‌نحوی کاهش یابد که پایداری نسبی مخلوط بتن تازه در آن شیب در شرایط بتن‌ریزی و تحکیم بتن، بدون استفاده از قالب، حفظ گردد. طبیعتا این الزام سبب افزایش سطح مقطع و حجم بتن بدنه سد خواهد شد و در سدهای بتنی وزنی متعارف، به دلیل هزینه نسبتا بالای واحد حجم بتن و نیز روانی مخلوط بتن تازه، از نظر اقتصادی و فنی این امکان وجود ندارد. در مقابل در سدهای وزنی بتن غلتکی، با توجه به هزینه نسبتا کم‌تر واحد حجم بتن و نیز روانی کم (یا نسبتا خشک بودن) مخلوط بتن تازه،

امکان حذف عملیات قالب‌بندی با طراحی شیب‌دار هر دو رویه بالادست و پایین‌دست وجود داشته و تجربیات موجود در این زمینه مبین اقتصادی بودن این نحوه طراحی در شرایط متعارف می‌باشد [۱۸]. با توجه به ملاحظات فوق، یکی از دلایل تمایل به استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی کم در سدهای کوتاه، علاوه بر کاهش حداکثری هزینه واحد حجم بتن، افزایش پایداری مخلوط بتن تازه با فراهم شدن امکان تولید «مخلوط بتن تازه خشک‌تر» می‌باشد.

با توجه به ملاحظات فوق، هندسه تیپ مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی کوتاه، با در نظر گرفتن ملاحظات و ضرورت‌های فنی و اجرایی مختلف در شکل (۵-۲) نشان داده شده است [۱۸]. شایان ذکر این‌که همه جزییات نشان داده شده در شکل (۵-۲) همواره الزامی نبوده و تمهیدات لازم برای هندسه مقطع سد باید بسته به شرایط انتخاب و طراحی گردد. از نظر فنی، طراحی متقارن مقطع بدنه سد سبب بهبود شرایط پایداری بدنه سد و نیز کاهش سطح تنش‌های ایجاد شده در بدنه سد در شرایط بارگذاری مختلف، و متناسبا کاهش مقاومت مورد نیاز بتن (و درزهای اجرایی بتن‌ریزی) خواهد شد. با کاهش مقاومت و مشخصات فنی مورد نیاز برای بتن، از حساسیت و ضرورت آزمایش‌های تفصیلی منابع قرضه و نیز کنترل طرح اختلاط بتن با ساخت نمونه‌های آزمایشی متعدد قبل از شروع بتن‌ریزی بدنه سد، کاسته شده و این امکان برای طراح فراهم می‌گردد که بر اساس تجربیات مشابه و قضاوت مهندسی منابع قرضه و طرح اختلاط مناسب برای بتن را تعیین نماید.



شکل ۵-۲- هندسه تیپ مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی کوتاه [۱۸]

با استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، سختی (مدول تغییرشکل) بتن بدنه سد کاهش یافته و در عین حال ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی بدنه سد افزایش می‌یابد. در نتیجه این فرایند، مقاومت بتن بدنه سد در برابر ترک‌خوردگی افزایش یافته و این امکان فراهم می‌گردد که فواصل درزهای انقباضی قائم بدنه سد بیش‌تر در نظر گرفته شود. این امکان نیز به نوبه خود در کاهش هزینه‌های واحد حجم بتن و افزایش سرعت بتن‌ریزی موثر خواهد بود.

علاوه بر این، در صورت استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و طراحی متقارن مقطع بدنه سد، با توجه به یکنواختی بیش‌تر و کاهش مقدار تنش‌های فشاری وارد بر پی، و نیز کاهش سختی و افزایش ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی بدنه سد، ظرفیت تحمل تغییرمکان‌های بزرگ‌تر در بدنه سد (ناشی از انعطاف‌پذیری زیاد در پی) ایجاد شده و عملکرد بسیار مناسبی برای بدنه سد بر روی پی‌های نرم و انعطاف‌پذیر (پی‌های غیرسنگی) حاصل می‌گردد. بنابراین در شرایطی که احداث سد وزنی بتن غلتکی (با ارتفاع کم یا متوسط) بر روی پی‌های نرم اجتناب‌ناپذیر گردد، تکنیک طراحی فوق راهکار مناسبی برای تامین رفتار مناسب و ایمن بدنه سد خواهد بود. بدیهی است در این شرایط متناسب با

ارتفاع سد و شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه مورد نظر، حساسیت و اهمیت منابع قرضه و طرح اختلاط بتن بدنه سد برای تحقق نیازها و الزامات طراحی افزایش یافته و بررسی‌ها و آزمایش‌های جامعی برای دستیابی به کیفیت و دانه‌بندی مناسب سنگ‌دانه‌ها و طرح اختلاط مناسب بتن باید انجام یابد.

در سدهای کوتاه، به خصوص در ترازهای فوقانی بدنه سد، مقاومت برشی (و مقاومت فشاری) لازم برای بتن و درزهای اجرایی از بعد الزامات سازه‌ای و پایداری بسیار کم و ناچیز می‌باشد. با این حال، در شرایطی که احتمال روگذری سیلاب از تاج سد در طول دوره بهره‌برداری وجود داشته باشد (نظیر شرایط فرازبندهای بتن غلتکی)، برای حفظ ایمنی و یکپارچگی بدنه سد، چسبندگی مناسبی در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی فوقانی سد باید تامین گردد. برای این منظور می‌توان از ملات بستر مناسب در سطح چند درز اجرایی بتن‌ریزی نزدیک تاج سد استفاده نمود [۱۸].

با توجه به مقاومت کم سازه‌ای مورد نیاز برای بتن در سدهای کوتاه، معمولا میزان مواد سیمانی مورد نیاز بتن در این سدها با توجه به الزامات تامین سطوح ظاهری مناسب برای بدنه سد، کارایی مناسب مخلوط بتن تازه، دانه‌بندی منابع قرضه موجود، کیفیت تجهیزات تولید و اجرای بتن، و نیز میزان کنترل و نظارت بر روند عملیات اجرایی، تعیین می‌گردد.

در صورت لزوم آب‌بندی بدنه سدهای وزنی بتن غلتکی کوتاه، می‌توان با اجرای سریع و پیوسته لایه‌های متوالی بتن، استفاده از ملات بستر در محدوده بالادست سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی، و یا استفاده از پوشش آب‌بند در رویه بالادست (upstream membrane)، آب‌بندی مطلوب بدنه سد را تامین نمود.

از دیدگاه سهولت اجرایی، شیب ۰/۹ افقی به ۱/۰ قائم (0.9V:1.0H) برای اجرا و تحکیم مخلوط‌های مختلف بتن غلتکی، بدون نیاز به قالب، مناسب و قابل توصیه می‌باشد. در این شرایط الزامات پایداری بدنه سد نیز با حاشیه اطمینان بالایی تامین شده و تحلیل پایداری بدنه سد، به جز برای کنترل شرایط خاص بارگذاری، ضرورت نمی‌یابد. از بعد تامین عرض عبور لازم در دوره بهره‌برداری، حداقل عرض حدود ۴/۰ متر در تاج سد کافی می‌باشد، ولی در تعیین عرض تاج سد باید به الزامات ماشین‌آلات اجرایی معمول برای سدهای کوچک نیز توجه گردد.

در برخی موارد از نظر اجرایی و اقتصادی، اجرای خاکریز در رویه بالادست (و یا پایین‌دست) سدهای وزنی بتن غلتکی به‌منظور کمک به ایستایی مخلوط بتن تازه و ایجاد امکان افزایش شیب رویه بالادست (و کاهش احجام) سد، تامین عرض عبور لازم از تاج سد در دوره بهره‌برداری (در صورت عبور ترافیک از تاج سد)، و تامین دسترسی به ترازهای مختلف بدنه سد در دوره اجرا، توجیه‌پذیر می‌گردد. علاوه بر این، اجرای خاکریز نفوذناپذیر در رویه بالادست سد می‌تواند در بهبود شرایط آب‌بندی بدنه سد نیز موثر باشد. همچنین اجرای خاکریز در رویه پایین‌دست می‌تواند در پوشاندن نشت‌های جزئی احتمالی از بدنه سد و حفاظت از بتن رویه پایین‌دست سد در برابر شرایط محیطی موثر باشد.

در صورت احداث سد بر روی پی‌های نفوذپذیر، اجرای تزریق‌های تحکیمی پی برای تامین پایداری بدنه سد و یا اجرای دیوار آب‌بند (Cutoff wall) برای کنترل تراوش از پی ضرورت می‌یابد. در این شرایط، معمولا تجربه نشان داده است که اجرای یک بالشتک بتنی (Apron) در بالادست (یا پایین‌دست) با گسترده کردن لایه‌های تحتانی بتن بدنه سد، راهکار سریع‌تر، ارزان‌تر، و آسان‌تری در مقایسه با تزریق‌های تحکیمی پی برای تامین پایداری بدنه سد و یا اجرای دیوار

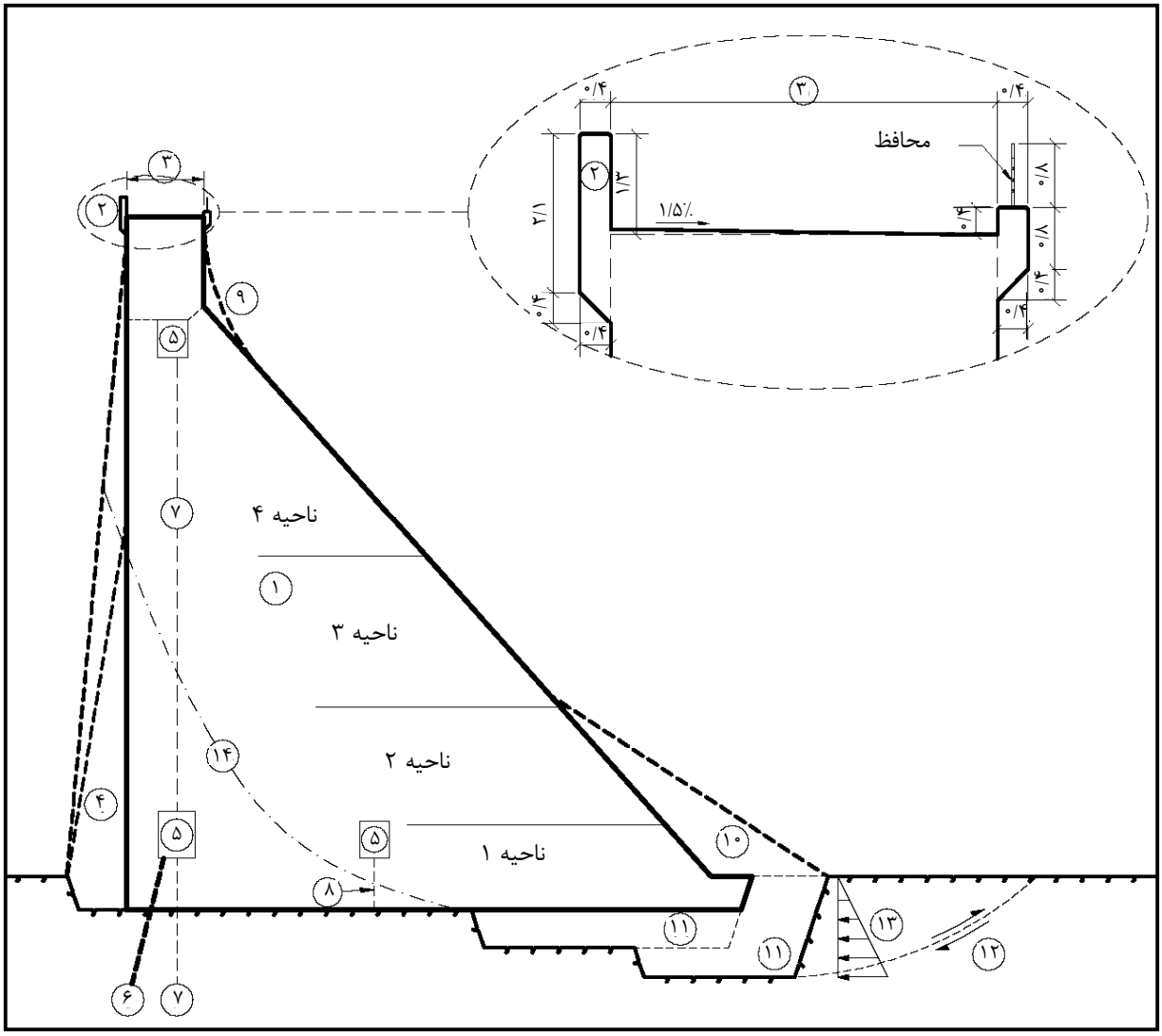
آب‌بند می‌باشد. اجرای یک دیوار آب‌بند کوتاه در منتهی‌الیه بالادست بالشتک بتنی نیز معمولا در پایداری و بهبود عملکرد آن موثر خواهد بود (شکل ۵-۲).

میزان گسترش (عرض) بالشتک بتنی بر اساس مطالعات تحلیل نشت و خطوط جریان آب در پی تعیین می‌گردد. البته کنترل نشست و فولادگذاری لازم برای بالشتک بتنی (بر اساس روابط سازه‌ای دال خمشی) نیز در تعیین عرض بهینه بالشتک بتنی موثر می‌باشد. در صورت طراحی بالشتک بتنی در پایین‌دست، پیش‌بینی گمانه‌های زهکش برای کنترل بلند شدن بالشتک در اثر فشار برکنش معمولا ضرورت می‌یابد [۱۸].

۵-۴-۲- طراحی هندسه مقطع قائم سدهای بلند

ملاحظات فنی و اقتصادی طراحی مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی بلند کاملا متفاوت با سدهای کوتاه می‌باشد. به طور معمول شرایط ظاهری رویه‌های بالادست و پایین‌دست در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و از نظر اقتصادی نیز هزینه قالب‌بندی رویه بالادست سد در مقایسه با هزینه حجم بتن اضافی ناشی از شیب‌دار اجرا کردن آن، کاملا توجیه‌پذیر می‌گردد. بنابراین به‌منظور بهینه شدن حجم بتن بدنه سد، رویه بالادست در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند بر اساس نیازهای پایداری و سازه‌ای به صورت قائم و یا با یک شیب تند طراحی می‌گردد. البته در شرایط خاصی که ضعف نسبی توده سنگ پی ایجاب می‌نماید، به‌منظور یکنواخت‌تر شدن و کاهش مقادیر تنش وارد بر پی، طراحی هندسه مقطع قائم سدهای با ارتفاع متوسط و بلند به شکل ذوزنقه و با شیب تقریبا مساوی در رویه‌های بالادست و پایین‌دست، ضروری می‌گردد.

با توجه به شرایط فوق، در غالب موارد ملاحظات مربوط به تامین پایداری بدنه سد عامل تعیین کننده در طراحی هندسه مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی می‌باشد. مقطع قائم بسیاری از سدهای وزنی بتن غلتکی بر اساس هندسه تیپ و کلاسیک سدهای بتنی وزنی، شامل رویه بالادست قائم، رویه پایین‌دست با شیب ثابت (0.8~0.9H:1.0V)، و یک بخش با ضخامت ثابت حدود ۴/۰ تا ۷/۰ متر در ترازهای فوقانی مقطع سد، طراحی شده است. با این حال، با توجه به هزینه واحد کم‌تر بتن غلتکی، این امکان وجود دارد که با کاهش شیب رویه پایین‌دست سد و یا با اعمال سایر تکنیک‌های طراحی که به طور شماتیک در شکل (۵-۳) ارائه شده است، تنش‌های وارده بر پی، مقاومت فشاری مورد نیاز برای بتن غلتکی، و یا پارامترهای مقاومت برشی مورد نیاز برای درزهای اجرایی بتن‌ریزی را کاهش داد. با کاهش مقاومت فشاری مورد نیاز برای بتن غلتکی، میزان مواد سیمانی لازم در بتن نیز کاهش یافته و متناسبا هزینه و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در بتن کاهش می‌یابند [۱۸]. در ادامه، موارد کاربرد تکنیک‌ها و گزینه‌های طراحی نشان داده شده در شکل (۵-۳)، با تفکیک ملاحظات طراحی هندسی بخش‌های مختلف مقطع سد، ارائه می‌گردد. در توضیح موارد کاربرد هر یک از تکنیک‌های طراحی، شماره لاتین متناظر در شکل (۵-۳) در داخل پرانتز ذکر شده است.



شکل ۵-۳- گزینه‌های طرح هندسی مقطع قائم سدهای وزنی بتن غلتکی با ارتفاع متوسط و بلند [۱۸]

۵-۴-۲-۱- ملاحظات طراحی رویه بالادست و تاج سد

اجرای یک دیوار جان‌پناه در محدوده تاج سد برای تامین بخشی از ارتفاع آزاد مورد نیاز برای سرریزها، هم منجر به کاهش حجم بتن در محدوده تاج سد می‌گردد و هم یک حفاظ برای پرسنل بهره‌بردار (و سایر افراد و وسایل نقلیه عبوری از تاج سد) فراهم می‌آورد (۲). در صورت استفاده از قطعات (یا پانل‌های) پیش‌ساخته بتنی در رویه بالادست، دیوار جان‌پناه تاج سد را نیز می‌توان با همان قطعات پیش‌ساخته و در ادامه پانل‌های رویه بالادست احداث نمود. ارتفاع دیوار جان‌پناه بالادست با توجه به ملاحظات سازه‌ای و ایمنی به طور معمول حدود ۱/۲۰ متر انتخاب می‌گردد. در شرایطی که احتمال پدیده روگذری آب از روی تاج سد در شرایط وقوع سیلاب‌های بزرگ قابل توجه باشد، می‌توان بخشی از دیوار جان‌پناه را به صورت «شسته شونده» اجرا نمود تا روگذری سیلاب فقط در بخش محدودی از بدنه سد رخ دهد. با این تکنیک می‌توان خطر ریزش آب بر روی سازه‌های حساس پایین‌دست (نظیر ساختمان نیروگاه) را تا حد زیادی برطرف نمود [۱۸].

ضخامت تاج سد با توجه به عوامل مختلفی از جمله عرض لازم برای تردد از تاج سد در دوره اجرا و بهره‌برداری، میزان تاثیر مثبت جرم اضافی تاج سد بر روی پایداری مقطع سد (در برابر لغزش و واژگونی)، اثر افزایش جرم محدوده تاج سد بر رفتار دینامیکی کلی و موضعی بدنه سد، و هزینه بتن اضافی لازم برای افزایش ضخامت محدوده تاج سد، تعیین می‌گردد (۳). ضخامت حداقل تاج در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند برای تامین عرض عبور لازم در دوره بهره‌برداری (مشابه با سدهای کوتاه)، برابر ۴/۰ متر می‌باشد، با این حال در غالب سدهای وزنی بتن غلتکی، عرض تاج سد کم‌تر از حدود ۵/۰ تا ۶/۰ متر در نظر گرفته نمی‌شود. اگرچه نیاز سازه‌ای برای مقاومت بتن غلتکی در محدوده تاج سد ناچیز می‌باشد، ولی از بعد الزامات نمای ظاهری بدنه سد و الزامات دوام (نفوذ ناپذیری، مقاومت در برابر سایش، و مقاومت در برابر شرایط محیطی)، حداقل مقاومت بتن غلتکی محدوده تاج سد حدود ۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع توصیه می‌شود [۱۸].

افزایش ضخامت پایه (کف) سد با شیب‌دار کردن رویه بالادست به نحو موثری سبب بهبود پایداری بدنه سد می‌گردد (۴). مزیت دیگر شیب‌دار کردن رویه بالادست سد، تغییر جهت فشار آب و ایجاد یک مولفه قائم رو به پایین (و پایدارساز) در نیروی هیدرواستاتیک وارد بر بدنه سد می‌باشد. شیب رویه بالادست مقطع سد در سدهای بلند به طور معمول در حدود 0.1~0.2H:1.0V در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نیازهای پایداری و سازه‌ای، نقطه شروع شیب در رویه بالادست سد را می‌توان از تاج سد و یا از ارتفاع‌های میانی رویه بالادست در نظر گرفت. در صورت شروع شیب از ارتفاع‌های میانی، پتانسیل ایجاد تمرکز تنش در محدوده نقطه تغییر شیب رویه بالادست در شرایط بارگذاری دینامیکی وجود دارد و به همین جهت از ایجاد تغییرات شیب و شکست‌های تند در رویه بالادست باید پرهیز گردد.

با توجه به رفتار کاملا طره‌ای سدهای وزنی بتن غلتکی، پتانسیل ایجاد تنش‌های کششی در پاشنه بالادست مقطع سد در اثر اعمال فشار آب و نیز در بارگذاری دینامیکی زلزله وجود دارد. به حداقل رساندن (و یا حذف) تنش‌های کششی در محدوده پاشنه بالادست مقطع سد، به خصوص برای بارهای استاتیکی عادی، یک معیار طراحی بهینه مقطع سدهای وزنی است. با این حال، از آنجا که ایجاد تنش‌های کششی در محدوده پاشنه بالادست سد در شرایط بارگذاری غیرعادی و فوق‌العاده تقریبا اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، استفاده از مخلوط بتن با مواد سیمانی زیاد و یا استفاده از ملات بستر در درزهای اجرایی در محدوده مجاور رویه بالادست برای اطمینان از تامین مقاومت کششی لازم در این ناحیه توصیه می‌گردد [۱۸].

۵-۴-۲-۲- ملاحظات طراحی کف و رویه پایین‌دست سد

فشار برکنش وارد بر کف سد یکی از مهم‌ترین بارهای ناپایدارساز مقطع سد است و به همین جهت در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش فشار برکنش در سدهای بلند کاملا ضروری می‌گردد. برای این منظور طراحی و اجرای پرده تزریق (۶) و پرده زهکش (۷) در پی سد (در نزدیکی رویه بالادست) یک راهکار موثر و متداول می‌باشد. در صورت لزوم، می‌توان با امتداد پرده زهکش در درون بدنه سد، فشار برکنش در درزهای اجرایی بدنه سد را نیز کاهش داد (۷). پرده تزریق متشکل از یک (یا چند) سری گمانه با فواصل و عمق مناسب (حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد ارتفاع آب) می‌باشد که پس از تزریق

توده سنگ پی از طریق گمانه‌های مذکور، یک پرده و مانع با نفوذپذیری خیلی کم در برابر نشت آب و ایجاد فشار برکنش در پی سد ایجاد می‌کند. در توده‌های سنگ نسبتا ضعیف و بسیار نفوذپذیر احداث یک دیوار آب‌بند، جایگزین پرده تزریق می‌گردد. به طور معمول در پایین‌دست پرده تزریق، یک شبکه گمانه زهکش (معمولا با فواصل حدود ۳ تا ۵ متر) برای اطمینان از عملکرد پرده تزریق و کاهش فشار برکنش احداث می‌گردد [۱۸]. شایان ذکر این‌که هدف از احداث پرده تزریق (و یا دیوار آب‌بند) علاوه بر کاهش فشار برکنش، کنترل و کاهش میزان نشت از پی و تکیه‌گاه‌های سد نیز می‌باشد. جزییات و مبانی طراحی پرده تزریق و پرده زهکش در دستورالعمل‌ها و مراجع ذیربط ارائه شده است.

در فرایند طراحی و تحلیل پایداری مقطع سد، در صورت عملکرد مناسب پرده تزریق و زهکش، فشار برکنش وارد بر کف سد در محل پرده تزریق به طور معمول به میزان $\frac{۲}{۳}$ اختلاف فشار در محل پرده تزریق و فشار پایاب کاهش داده می‌شود. با توجه به نحوه اثر پرده تزریق، هرچه پرده تزریق به رویه بالادست سد نزدیک‌تر باشد، فشار برکنش وارد بر کف سد کم‌تر خواهد بود، ولی در جانمایی پرده تزریق باید به این نکته توجه داشت که در صورت وجود پتانسیل تنش‌های کششی (و بازشدگی) در سطح تماس بدنه سد و پی در محل پرده تزریق در شرایط بارگذاری غیرعادی (و حتی فوق‌العاده)، ریسک ایجاد شکاف در پرده تزریق در محدوده سطح تماس بدنه سد و پی وجود داشته و در این حالت عملکرد پرده تزریق به شدت کاهش خواهد یافت.

بنابراین در تعیین محل پرده تزریق باید به نتایج تحلیل تنش و همچنین تحلیل‌های پایداری در برابر واژگونی توجه شده و محل پرده تزریق به‌گونه‌ای تعیین گردد که ریسک ایجاد شکاف (شکست) در پرده تزریق در محدوده تماس بدنه سد و پی حداقل برای بارگذاری‌های عادی و غیرعادی وجود نداشته باشد. بر اساس تجارب موجود حداقل فاصله مناسب پرده تزریق از رویه بالادست حدود ۱۵ درصد ارتفاع آب نسبت به تراز کف سد می‌باشد.

در سدهای بلند و با پی عریض، و یا در سدهایی که ریسک گرادیان حرارتی قابل توجه (به دلیل میزان زیاد مواد سیمانی، استفاده از سیمان با حرارت‌زایی بالا، و یا بتن‌ریزی در دمای نسبتا بالا) در بتن وجود دارد، به خصوص در شرایطی که مدول الاستیک بتن نیز زیاد باشد، ممکن است استفاده از درز اجرایی طولی در بخش‌های تحتانی (عریض) بدنه سد به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترک حرارتی طولی ضرورت یابد (۸). در این شرایط، درز طولی مذکور می‌بایست از طریق یک گالری، و یا در صورت امکان از خارج از بدنه سد تزریق گردد (در این حالت شبکه لوله‌های تزریق درز باید به نحو مناسبی در سطح درز تعبیه شده و ورودی این شبکه در رویه پایین‌دست سد پیش‌بینی گردد) [۱۸].

احداث یک گالری طولی در ترازهای فوقانی بدنه سد در اغلب موارد بدلایل مختلف ضرورت می‌یابد. با توجه به ضخامت نسبتا کم بدنه سد در ترازهای فوقانی، پیش‌بینی گالری در این ناحیه به نحو محسوسی سبب کاهش ضخامت موثر و کاهش مقاومت بدنه سد، به خصوص تحت اثر بارگذاری و تنش‌های دینامیکی، می‌گردد. طراحی یک ماهیچه بتنی در رویه پایین‌دست در ترازهای فوقانی (به شکل خطی یا منحنی) هم ضخامت بدنه سد را در این ناحیه افزایش می‌دهد و هم سبب کاهش شدت تمرکز تنش‌های کششی دینامیکی در نقطه تغییر شیب رویه پایین‌دست می‌گردد (۹).

جرم اضافی ناشی از این ماهیچه در شرایط بارگذاری استاتیکی نیز تاثیر مثبتی در خنثی کردن اثر فشار برکنش و یکنواخت‌تر کردن توزیع تنش در پی سد دارد. در شرایطی که مقاومت برشی لازم برای تامین پایداری مقاطع بلند سد در برابر لغزش (در سطوح درزهای اجرایی و در سطح تماس بدنه سد و پی) وجود نداشته باشد، می‌توان با ایجاد یک ماهیچه در پنجه (رویه پایین‌دست) سد این نیاز طراحی را تامین نمود (۱۰). با طراحی این ماهیچه، هم نیروی قائم (پایدارساز) بر روی سطوح لغزش اضافه می‌گردد و هم با افزایش طول سطح تماس، چسبندگی کل سطح لغزش افزایش می‌یابد [۱۸].

در شرایطی که مقطع سد در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی در داخل بدنه پایدار باشد ولی به دلیل ضعف نسبی توده سنگ پی، نیروی مقاوم کافی برای پایداری در سطح تماس بدنه سد و پی وجود نداشته باشد، با طراحی کلید برشی در کف سد می‌توان نیازهای پایداری را تامین نمود (۱۱). راهکار دیگری که در این شرایط می‌توان اتخاذ نمود، طراحی یک شیب ملایم به سمت بالادست در کف سد است به نحوی که تردد ماشین‌آلات اجرایی با دشواری مواجه نگردد. طراحی کلید برشی در نزدیکی لبه بالادست، به دلیل این‌که کلید برشی می‌تواند شبیه یک دیوار آب‌بند (Cutoff wall) نیز عمل کند، در ظاهر بهتر به‌نظر می‌رسد ولی باید توجه داشت در این ناحیه تنش فشاری وارد بر سطح پی حداقل بوده و از سویی عملکرد حتی محدود کلید برشی نزدیک لبه بالادست سبب ایجاد تنش‌های کششی در مقطع سد در راستای بالادست – پایین‌دست خواهد شد. با توجه به این شرایط بازدهی و عملکرد کلید برشی نزدیک لبه بالادست مطلوب نبوده و طراحی کلید برشی در منتهی‌الیه پایین‌دست مقطع سد، با توجه به حداکثر بودن تنش‌های فشاری وارد بر سطح پی در این محدوده، عملکرد بهتری از بعد تامین مقاومت برشی به‌دست می‌دهد. به‌منظور کمینه شدن عرض کلید برشی (در راستای بالادست – پایین‌دست) و به‌منظور اطمینان از انتقال نیروی برشی لازم به توده سنگ پی بدون ریسک وقوع لغزش بر روی درزهای اجرایی بتن‌ریزی، باید از ملات بستر در سطوح درزهای اجرایی بتن غلتکی در محدوده کلید برشی استفاده شود و یا کلید برشی با استفاده از بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد اجرا گردد.

کلید برشی با طولانی‌تر کردن سطح گسیختگی (۱۲) و با ایجاد یک نیروی افقی مقاوم رو به پایین‌دست (۱۳) در توده سنگ پی سبب بهبود شرایط پایداری مقطع سد می‌گردد. تزریق تحکیمی توده سنگ در محدوده کلید برشی و پایین‌دست آن سبب بهبود قابل توجه بازدهی و اطمینان از عملکرد مطلوب کلید خواهد شد [۱۸].

در شرایطی که بتن از ظرفیت لازم برای تحمل تنش‌های فشاری ایجاد شده در بدنه سد برخوردار بوده ولی مقاومت برشی مورد نیاز در درزهای اجرایی بتن‌ریزی وجود نداشته باشد، می‌توان با عریض‌تر کردن مقطع سد و افزایش موثر جرم بدنه سد نیازهای پایداری را تامین نمود. با افزایش مواد سیمانی بتن نیز، به شرط این‌که سبب افزایش تنش‌ها و ریسک ترک‌خوردگی حرارتی و همچنین افزایش ناخواسته مدول الاستیک بتن نگردد، می‌توان نیازهای پایداری در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی را تامین نمود. یک راهکار بسیار موثر دیگر برای افزایش مقاومت برشی سطوح درزهای اجرایی، به خصوص در سدهای با مواد سیمانی کم و متوسط و در شرایطی که پتانسیل ایجاد درز سرد (Cold Joint) در بدنه سد وجود دارد، استفاده از ملات بستر

در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی می‌باشد. محدوده استفاده از ملات بستر در درزهای اجرایی بتن‌ریزی را می‌توان با توجه به نیازهای طراحی و ملاحظات اجرایی در مقطع سد در زمان طراحی مشخص نمود (۱۴).

۵-۴-۳- ناحیه‌بندی (Zoning) بتن بدنه سد

در روال متعارف برای ناحیه‌بندی (Zoning) بتن بدنه سد با توجه به نیازهای سازه‌ای و الزامات دوام، بتن با مقاومت بیش‌تر در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست سد و بتن با مقاومت کم‌تر (و مشخصات فنی ساده‌تر) برای بخش‌های داخلی بدنه سد در نظر گرفته می‌شود. وجود این تفاوت نوع بتن در تمام لایه‌های بتن‌ریزی، مشکلات و محدودیت‌های اجرایی فراتر از حد انتظاری را در زمان اجرا به همراه دارد.

تجربه اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی نشان داده است که استفاده از یک طرح اختلاط بتن (یک نوع بتن) در کل سطح هر لایه بتن غلتکی از بعد سهولت اجرایی بسیار مطلوب و از بعد سرعت اجرا بهینه می‌باشد. به همین جهت در سدهای با ارتفاع کم‌تر از حدود ۳۰ تا ۴۰ متر، از نظر اجرایی و اقتصادی استفاده از یک طرح اختلاط برای کل بدنه سد بهینه خواهد بود. بر اساس این دیدگاه ناحیه‌بندی بهینه بتن در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند به صورت تفکیک بدنه سد به یک سری نوارهای افقی متناسب با نیازهای پایداری، سازه‌ای و دوام می‌باشد که طبیعتا بتن‌های با مقاومت بیش‌تر در ترازهای پایین‌تر و بتن‌های با مقاومت کم‌تر در ترازهای بالاتر استفاده می‌شوند (۱). حداقل ارتفاع مناسب هر ناحیه (Zone) حدود ۱۰ تا ۲۰ متر، و اختلاف مقاومت نوع‌های مختلف بتن حدود ۱۰ تا ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع توصیه می‌گردد. برای نمونه بدنه سد Binongan با ارتفاع ۱۰۴ متر، از نظر مقاومت بتن به ۴ ناحیه (نوار) افقی و سد Miel I با ارتفاع ۱۹۰ متر به ۸ ناحیه (نوار) افقی تقسیم شده‌اند [۱۸].

۵-۴-۴- اجرای بتن با مقاومت بیش‌تر از نیاز طراحی

بر اساس توصیه‌ها و الزامات رویه‌ها و دستورالعمل‌های اجرایی سدهای بتنی وزنی متعارف، به دلیل تغییرات و نوسانات کیفیت و مقاومت بتن در فرایند تولید و اجرا، به طور معمول هدف‌گذاری طرح اختلاط بتن برای مقاومتی بیش از مقاومت مورد نیاز طراحی صورت می‌پذیرد تا بر مبنای ضوابط و معیارهای آماری، احتمال اجرای بتن با مقاومت کم‌تر از نیاز طراحی به یک حد قابل پذیرش محدود گردد. برای نمونه در آیین‌نامه ACI 214R، بر اساس میزان اهمیت و حساسیت موقعیت هر بخش از سازه، درصد بتن اجرا شده با مقاومت کم‌تر از نیاز طراحی تعیین شده است. بر اساس این آیین‌نامه، به طور متوسط گستره نواحی با مقاومت کم‌تر از نیاز طراحی در یک بخش از سازه نباید از ۲۰ درصد تجاوز کند، برای مثال گستره نواحی با مقاومت برشی کم‌تر (نسبت به مقاومت برشی مد نظر در طراحی) در سطح یک درز اجرایی بتن‌ریزی نباید بیش‌تر از ۲۰ درصد کل سطح درز باشد (مبحث کنترل کیفی بتن غلتکی به تفصیل در فصل دوازدهم این راهنما ارائه شده است). از دیدگاه طراحی با توجه به پیش‌بینی تمهیدات طراحی مناسب برای سرمایش بتن تازه و نیز با توجه به فرضیات و مبانی طراحی، اجرای بتن با مقاومت فراتر از نیاز طراحی در سدهای بتنی وزنی متعارف

اغلب منجر به یک حاشیه اطمینان بیش‌تر شده و معمولا محدودیتی از این بعد در رویه‌های اجرایی لحاظ نمی‌گردد (هرچند هزینه سرمایش بتن با افزودن میزان سیمان افزایش می‌یابد).

در اعمال رویه فوق برای سدهای وزنی بتن غلتکی باید به این نکته توجه داشت که هر میزان افزایش مواد سیمانی برای تولید بتن با مقاومت بالاتر از نیاز طراحی برای پوشش نوسانات کیفی بتن در اجرا، می‌تواند منجر به افزایش بیش از حد مجاز کرنش‌ها و تنش‌های حرارتی شده و ریسک ترک‌خوردن بتن را افزایش دهد. علاوه بر این، با افزایش مقاومت و مواد سیمانی در بتن غلتکی، مدول تغییرشکل بتن افزایش و ظرفیت کرنش کششی بتن کاهش یافته و در مجموع رفتار بتن غلتکی شکننده‌تر خواهد شد. بنابراین افزایش مواد سیمانی و مقاومت بتن غلتکی، بر خلاف سدهای بتنی وزنی متعارف، همواره منجر به حاشیه اطمینان اضافی و «یک سد بهتر» نخواهد شد و ممکن است افزایش بیش از حد نیاز و کنترل نشده مقاومت بتن غلتکی منجر به «یک سد گران‌تر و ترک‌خورده» به‌جای «یک سد ارزان و بدون ترک» گردد. از طرفی در سدهای وزنی بتن غلتکی که نرخ تولید و اجرای بتن بالا می‌باشد، معمولا زمان کافی برای آزمایش مقاومت درازمدت نمونه‌های بتن و تحلیل آماری به موقع نتایج این آزمایش‌ها و نوسانات کیفی بتن اجرا شده وجود ندارد. بنابراین، علاوه بر آزمایش‌های متعارف نمونه‌های بتن در حین اجرا، برای بررسی نوسانات کیفی بتن در فرایند تولید و اجرای بتن غلتکی، کنترل و پایش نوسانات کیفی مخلوط بتن تازه بر اساس رویه‌های نوین تدوین شده توصیه می‌گردد (Schrader, 2007)[۱۸].

۵-۴-۵- ملاحظات طراحی و جانمایی سازه‌های جنبی

با توجه به زمان اجرای کوتاه‌تر سدهای وزنی بتن غلتکی، دوره بازگشت سیلاب طراحی و متناسبا ابعاد سیستم انحراف رودخانه را در این نوع سدها می‌توان کاهش داد. درصورتی که رودخانه از عرض کافی و بده نسبتا پایین در بعضی از فصول سال برخوردار باشد، می‌توان بخش پایینی بدنه سد اصلی را درفصل خشک اجرا نموده و از آن به‌عنوان فرازبند نیز استفاده نمود. در شرایطی که احتمال وقوع سیلاب‌های شدید و پیش‌بینی نشده بالا بوده و ریسک روگذری سیلاب از بدنه سد در حین اجرا قابل توجه باشد، می‌توان با اجرای تمهیدات مناسب روگذری جریان سیلاب را به بخش محدودی از بدنه سد هدایت کرد.

با توجه به بده رودخانه و ملاحظات طراحی و اجرایی، می‌توان یکی از گزینه‌های متداول تونل، کالورت، یا لوله‌های با قطر زیاد برای انحراف آب استفاده نمود. کالورت انحراف در محدوده گود پی باید بر روی توده سنگ سالم و عاری از مصالح سست طراحی و اجرا شود، زیرا پس از اتمام دوره اجرا، کالورت در محدوده بدنه سد با بتن پر شده و جزئی از بدنه سد می‌گردد. برای تسریع عملیات اجرایی، می‌توان از قطعات پیش‌ساخته برای اجرای کالورت استفاده نمود. در این حالت پیش‌بینی تمهیدات مناسب برای آب‌بندی درزهای بین قطعات پیش‌ساخته کالورت ضروری خواهد بود. ابعاد کالورت باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که دسترسی به داخل آن و پر کردن (پلاگ) آن با بتن، قبل از شروع آبگیری امکان‌پذیر باشد.

در برخی موارد، بخش پایینی بدنه سد در فصل خشک سریعا اجرا شده و انحراف آب از طریق یک مجرا یا تعدادی لوله با قطر نسبتا زیاد در بدنه سد صورت می‌پذیرد. این روش اگرچه موجب صرفه جویی اولیه در هزینه و زمان می‌شود، ولی باید ابزارها و تمهیدات لازم برای کنترل جریان آب در زمان پلاگ مجرا یا لوله‌ها، طراحی و پیش‌بینی گردد. در غیر این صورت، پلاگ مجرا یا لوله‌های انحراف و شروع آبگیری فقط در فصل خشک امکان‌پذیر خواهد بود. نکته مهم دیگر این‌که در شرایط استفاده از لوله برای انحراف آب، ریسک گرفتگی آن‌ها درصورتی‌که سیلاب همراه با رسوب و اجسام شناور باشد، به شدت افزایش می‌یابد.

در سدهای بزرگ، درصورتی که فرازبند نیز از نوع بتن غلتکی انتخاب شود، فرصت بررسی گزینه‌های مختلف اجرایی و بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن برای تیم مشاور و پیمانکار فراهم شده و با تجربه به‌دست آمده در فرازبند، سرعت و کیفیت اجرای بتن غلتکی بدنه سد اصلی بهبود می‌یابد.

امکان جانمایی سرریز و سایر مجاری هیدرولیکی در بدنه سد وزنی بتن غلتکی وجود داشته و این یکی از مزایای مهم سدهای بتن غلتکی در مقایسه با سدهای خاکی می‌باشد. با این حال، با توجه به روش اجرای بتن غلتکی، طراحی و جانمایی سازه های هیدرولیکی باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که کم‌ترین اخلال در فرایند اجرای بتن غلتکی ایجاد گردد. برای نمونه، گزینه سرریز تاج با عرض بیش‌تر و عمق کم‌تر نسبت به گزینه سرریز تاج با عرض کم‌تر و عمق بیش‌تر، به دلیل تلاقی با تعداد کم‌تر لایه‌های بتن غلتکی، ارجح می‌باشد. همچنین جانمایی مجاری هیدرولیکی در بخش‌های میانی بدنه سد، سبب قطع ارتباط و دسترسی فضاهای دو سمت این سازه‌ها شده و فرایند اجرا را با مشکل مواجه خواهد نمود. بر این اساس سعی می‌گردد آبگیرها و مجاری داخل بدنه سد از بخش‌های میانی به کناره‌های بدنه سد منتقل گردد. در شرایطی که امکان‌پذیر باشد، می‌توان با جانمایی آبگیرها و سازه‌های هیدرولیکی بر روی ترانشه‌ای که برای احداث این سازه‌ها در حفاری‌های پی سد پیش‌بینی می‌گردد، کلا عملیات اجرایی آن‌ها را از فرایند اجرای بتن غلتکی مستقل نمود.

۵-۵- طراحی جزییات سد

۵-۵-۱- کیفیت درزهای اجرایی و ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی

با توجه به روش اجرای بتن غلتکی، ایجاد تعداد قابل توجه درزهای اجرایی در سدهای وزنی بتن غلتکی اجتناب‌ناپذیر بوده و رفتار و عملکرد کلی بدنه سد تا حد زیادی متاثر از کیفیت عملکرد درزهای اجرایی بتن‌ریزی خواهد بود. از آنجا که هر درز اجرایی افقی در بدنه سد به‌عنوان یک نقطه ضعف احتمالی، هم از نظر مقاومت برشی و کششی و هم از بعد آب‌بندی بدنه سد، تلقی می‌گردد، کاهش هر چه بیش‌تر تعداد درزهای اجرایی (با افزایش ضخامت هر لایه بتن‌ریزی) یک راهکار و راه حل منطقی به‌نظر می‌رسد. با این حال باید توجه داشت که مقاومت برشی و کششی درز اجرایی بتن‌ریزی به شدت وابسته به میزان رشد یا پختگی (maturity) بتن زیرین در زمان اجرای لایه بعدی بتن غلتکی می‌باشد. به بیان دیگر کاهش فاصله زمانی بین دو لایه متوالی بتن، با افزایش نرخ بتن‌ریزی (و یا انتخاب ضخامت کم‌تر برای هر لایه بتن)،

می‌تواند در بهبود کیفیت درز اجرایی هم از نظر مقاومت و هم از نظر آب‌بندی و نفوذناپذیری، بسیار موثر بوده و نهایتا منجر به سرعت اجرای بیش‌تر و بدنه سد همگن‌تر و کم‌هزینه‌تر (علیرغم تعداد بیش‌تر درزهای اجرایی) گردد.

چسبندگی بین دو لایه متوالی بتن از طریق واکنش و چسبندگی شیمیایی بین دو لایه بتن و همچنین نفوذ سنگ‌دانه‌ها از لایه فوقانی به لایه بتن زیرین حاصل می‌گردد. در یک شرایط ایده‌آل، درصورتی‌که پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها (Segregation) در فرایند ریختن و پخش بتن رخ ندهد و واکنش شیمیایی و اختلاط کاملی بین دو لایه متوالی بتن (با اعمال انرژی ویبره مناسب) حاصل گردد، پارامترهای مقاومتی درز اجرایی بین لایه‌های متوالی بتن مشابه با توده بتن غلتکی بوده و بدنه سد به صورت یکپارچه و همگن عمل خواهد نمود. با ایجاد فاصله زمانی بین اجرای لایه‌های متوالی بتن غلتکی، پتانسیل نفوذ سنگ‌دانه‌های بتن لایه فوقانی در لایه بتن زیرین به سرعت کاهش یافته (و تقریبا از بین می‌رود) و عملا چسبندگی بین دو لایه بتن صرفا از طریق واکنش و چسبندگی شیمیایی تامین می‌گردد. با توجه به شرایط محیطی و فاصله زمانی بین لایه‌های متوالی بتن‌ریزی، عملا سه حالت زیر برای توصیف کیفیت چسبندگی سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی متصور می‌باشد:

- **درز اجرایی گرم یا تازه (Fresh or Hot Joint)**: این حالت درز متناظر با شرایط اجرای سریع و پیاپی لایه‌های متوالی بتن می‌باشد به‌گونه‌ای که در زمان اجرای لایه بعدی، بتن لایه زیرین هنوز روانی و کارایی (Workability) خود را از دست نداده است.
- **درز اجرایی سرد (Cold Joint)**: در این حالت میزان سختی بتن لایه زیرین به‌گونه‌ای است که به هیچ وجه امکان نفوذ سنگ‌دانه‌های بتن لایه فوقانی در بتن لایه زیرین وجود نداشته و پتانسیل چسبندگی شیمیایی بین دو لایه نیز به حداقل ممکن می‌رسد.
- **درز اجرایی بینابینی (Intermediate or Warm Joint)**: این حالت متناظر با شرایط بینابین درز اجرایی گرم و درز اجرایی سرد است.

به‌منظور ارزیابی و قضاوت کمّی در مورد میزان چسبندگی و واکنش شیمیایی بین دو لایه متوالی بتن با توجه به مدت فاصله زمانی بین اجرای دو لایه متوالی و دمای محیط، ضریبی با عنوان ضریب رشد (Maturity Factor) تعریف شده است (این ضریب حاصل‌ضرب فاصله زمانی بین اجرای دو لایه متوالی بتن بر حسب ساعت، و دمای محیط بر حسب درجه سانتی‌گراد، است). البته ضریب رشد یا پختگی بتن به نوبه خود متاثر از میزان آب مخلوط بتن، نوع مواد سیمانی، و استفاده یا عدم استفاده از مواد افزودنی دیرگیر می‌باشد و به همین دلیل یک اجماع و قاعده کلی پذیرفته شده برای قضاوت در مورد کیفیت چسبندگی سطح درز اجرایی بر اساس این ضریب وجود ندارد. با این حال بر اساس تجارب موجود، حدود ضریب رشد برای شرایط مختلف درز اجرایی و انواع مختلف بتن غلتکی را می‌توان مطابق جدول (۵-۲) در نظر گرفت [۱۳]. در این جدول نوع تمهیدات اجرایی مناسب برای دستیابی به یک شرایط چسبندگی مناسب در سطح درز نیز پیشنهاد شده است.

نکته قابل تامل و مهم دیگر که در جدول (۵-۲) مشاهده می‌گردد، افزایش قابل توجه و محسوس ضریب رشد متناظر با درز گرم با افزایش مواد سیمانی در بتن است، به این معنی که با افزایش مواد سیمانی در بتن غلتکی می‌توان در فاصله زمانی بیش‌تری لایه بعدی بتن را، بدون نیاز به تمهید اضافی در سطح درز، اجرا نمود.

نرخ تولید بتن غلتکی، حجم هر لایه بتن، و نوع ماشین‌آلات و امکانات اجرایی پیمانکار نیز می‌تواند تاثیر تعیین‌کننده‌ای در ضخامت بهینه و مناسب لایه‌های بتن‌ریزی بدنه سد داشته باشد. در صورت استفاده از ماشین‌آلات و غلتک‌های ویبره سنگین، می‌توان چند لایه متوالی بتن غلتکی را سریعا ریخته و آن‌ها را یکجا ویبره نمود (تکنیک اجرایی مورد استفاده در سدهای RCD در ژاپن). نسبت نرخ تولید بتن غلتکی در مقایسه با سطح مقطع درز اجرایی بتن‌ریزی (حجم هر لایه بتن) نیز با توجه به متغیر بودن سطح مقطع افقی بدنه سد در ترازهای مختلف، متغیر بوده و این موضوع در نحوه اجرا و انتخاب ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی باید مورد توجه قرار گیرد. به‌عنوان نمونه برای حفظ فاصله زمانی مناسب بین لایه‌های متوالی بتن، می‌توان بتن‌ریزی بدنه سد در سطح یک درز اجرایی را متناسب با نرخ تولید بتن، در چند مرحله انجام داده و یا ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی را در ارتفاع سد متغیر در نظر گرفت.

جدول ۵-۲- حدود ضریب رشد و تمهیدات پیشنهادی برای شرایط مختلف درزهای اجرایی در انواع سدهای وزنی بتن غلتکی [۱۳]

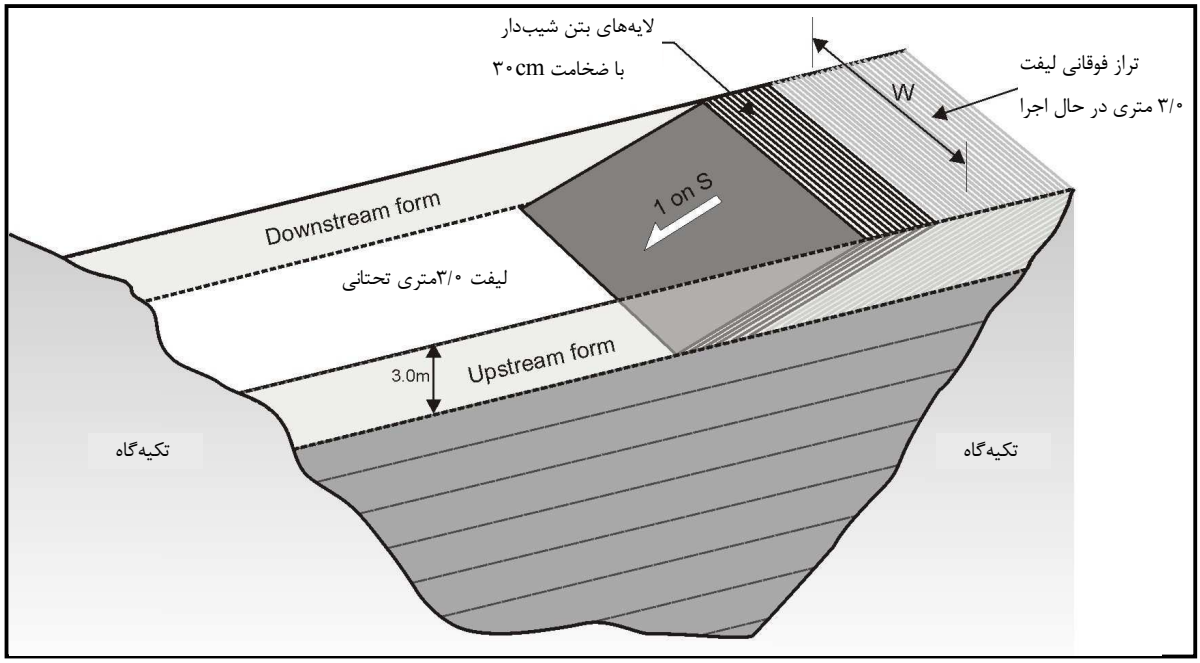
نوع سد	پارامتر	درز گرم Hot or Fresh Joint	درز بینابینی Intermediate Joint	درز سرد Cold Joint
سد با مواد سیمانی کم	ضریب رشد (Maturity Factor)	< 100 °C.hr	100-250 °C.hr	> 250 °C.hr
	تمهیدات لازم	تمیزکاری سطح درز با مکش هوا	تمیزکاری سطح درز با مکش هوا	تمیزکاری سطح درز با آب کم‌فشار
	ملات بستر	----	در محدوده بالادست	در کل سطح درز
سد غلتکی کوبیده (RCD)	ضریب رشد (Maturity Factor)	----	----	تمام درزها درز سرد فرض می‌شوند
	تمهیدات لازم	----	----	تمیزکاری سطح درز با جت آب
	ملات بستر	----	----	در کل سطح درز
سد با مواد سیمانی متوسط	ضریب رشد (Maturity Factor)	< 200 °C.hr	200-500 °C.hr	> 500 °C.hr
	تمهیدات لازم	تمیزکاری سطح درز با مکش هوا	تمیزکاری سطح درز با آب کم‌فشار	تمیزکاری سطح درز با جت آب
	ملات بستر	----	در محدوده بالادست	در کل سطح درز
سد با مواد سیمانی زیاد	ضریب رشد (Maturity Factor)	< 300 °C.hr	300-800 °C.hr	> 800 °C.hr
	تمهیدات لازم	تمیزکاری سطح درز با مکش هوا	تمیزکاری سطح درز با آب کم‌فشار	تمیزکاری سطح درز با جت آب
	ملات بستر	----	----	در محدوده بالادست یا کل سطح درز

دامنه تغییرات ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی در سدهای وزنی بتن غلتکی اجرا شده (با احتساب سدهای RCD) بین ۲۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر، و در بیش از ۵۰ درصد موارد ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی ۳۰ سانتی‌متر بوده است. بر این اساس، در زمان طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی، ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی معمولا برابر ۳۰ سانتی‌متر انتخاب می‌گردد [۱۳، ۱۹، ۲۴، ۲۵]. با این حال، علیرغم این‌که موضوع انتخاب ضخامت مناسب لایه‌های بتن‌ریزی در فرایند طراحی سدهای بتن غلتکی غالبا امری ساده تلقی می‌گردد، ولی انتخاب منطقی ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی و روش اجرای مناسب با در نظر گرفتن ملاحظات فوق می‌تواند تاثیر تعیین‌کننده‌ای در سرعت و هزینه اجرا و همچنین رفتار و عملکرد مناسب و مطلوب بدنه سد داشته باشد.

از جمله روش‌های ابداعی برای افزایش سرعت اجرا و کاهش تعداد درزهای اجرایی سرد در بدنه سد، روش اجرای لایه شیب‌دار (Sloped Layer Method - SLM) است که برای اولین بار در ساخت نیمه فوقانی سد Jiangya در کشور چین در اواخر سال ۱۹۹۷ به‌کار رفته و در نتیجه آن نرخ بتن‌ریزی بدنه سد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در این روش با افزایش ارتفاع قالب های بالادست و پایین‌دست به ۳/۰ متر، بتن غلتکی در لایه‌های شیب‌دار با ضخامت ۰/۳۰ متر (در شرایط درز اجرایی گرم) اجرا شده و این روند در امتداد محور سد، از یک تکیه‌گاه تا تکیه‌گاه دیگر، بدون نیاز به قالب های عرضی ادامه می‌یابد (شکل ۵-۴). با این تکنیک، فواصل درزهای اجرایی بتن‌ریزی سرد به ۳/۰ متر افزایش یافته و در نتیجه تعداد آن‌ها به نحو قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با توجه به مزایای قابل توجه این روش، که در ذیل به آن‌ها اشاره شده است، این تکنیک اجرایی با موفقیت در سدهای متعدد دیگر در چین و بقیه کشورها به‌کار گرفته شده است [۲۶]:

- کاهش حدودا ۹۰ درصدی درزهای اجرایی سرد افقی،
- کاهش و یکسان بودن سطح بتن غلتکی تازه در معرض شرایط محیطی (بارندگی، یخ‌زدگی، و ...) و متناسبا کاهش و یکسان بودن میزان نیاز به تمهیدات حفاظتی در فرایند اجرا
- کاهش قابل توجه زمان بستن و برداشتن قالب‌ها (حذف این فعالیت از مسیر بحرانی عملیات اجرایی سد)
- نیاز به تجهیز کارگاه کوچک‌تر و بتن‌ریزی پیوسته با نرخ تولید کم‌تر بتن غلتکی، بدون ایجاد درز سرد
- افزایش نرخ اجرای بتن غلتکی به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد
- محدود کردن روگذری سیلاب به بخش کوچکی از عرض سد با ایجاد یک کانال در حین اجرای بتن غلتکی و کاهش قابل توجه خسارت‌ها و عملیات جبرانی ناشی از احتمال روگذری سیلاب



شکل ۵-۴- روش لایه شیب‌دار در سدهای بتن غلتکی (Sloped Layer Method - SLM) [۲۶]

۵-۵-۲- درزهای انقباضی قائم

موقعیت و فواصل درزهای انقباضی با توجه به نوع بتن غلتکی مورد استفاده در بدنه سد، موقعیت سازه‌های جنبی، و الزامات کنترل تنش‌های حرارتی تعیین می‌گردد. با توجه به مشخصات رفتاری و ظرفیت کرنش کششی بتن و نتایج تحلیل‌های حرارتی فواصل درزهای انقباضی بدنه سد باید به نحوی تعیین گردند که انقباض تجمعی ناشی از جمع‌شدگی بتن سبب افزایش بیش از حد مجاز تنش‌ها و کرنش‌های کششی و نهایتا ایجاد ترک در بدنه سد نگردد. جزییات روش‌های مختلف تحلیل حرارتی بتن در فصل هشتم این راهنما ارائه شده است. به طور کلی با کاهش مواد سیمانی بتن، از یک سو پتانسیل ایجاد حرارت در بتن کاهش یافته و از سوی دیگر ظرفیت کرنش کششی بتن افزایش و مدول الاستیسیته آن کاهش می‌یابد. بر این اساس با کاهش مواد سیمانی در بتن، فواصل درزهای انقباضی در بدنه سد را معمولا می‌توان افزایش داد. موقعیت و ابعاد سازه‌های جنبی نظیر خروجی‌ها و مجاری آب‌بر داخل بدنه و سرریزهای روی بدنه سد نیز باید در طراحی و جانمایی درزهای انقباضی قائم مورد توجه قرار گیرند.

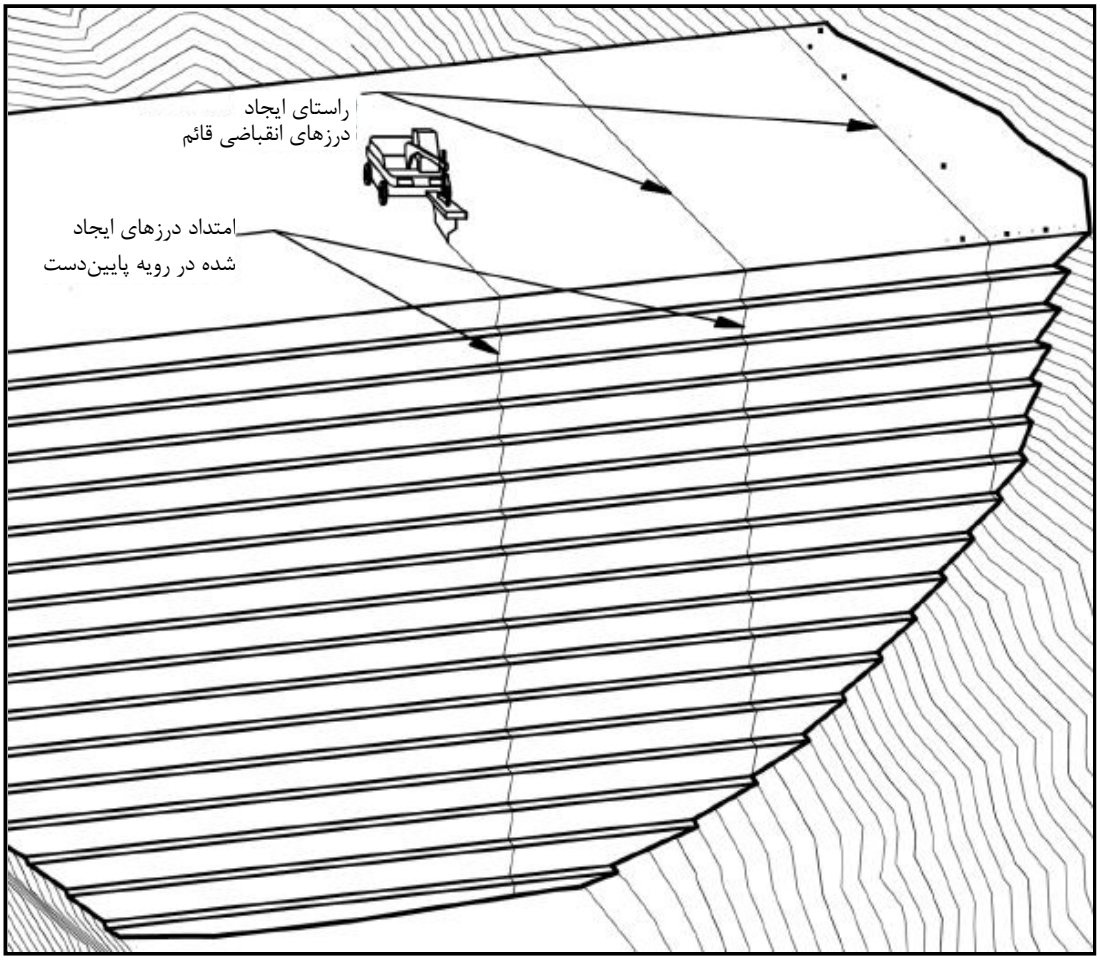
عرض بلوک‌های سد (فاصله بین درزهای قائم) از حداقل محافظه‌کارانه ۱۵ متر در سدهای کوبیده غلتکی (RCD) تا بیش از ۱۰۰ متر در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم اجرا گردیده‌اند. در برخی موارد مانند سد بتن غلتکی Guadalemar در کشور اسپانیا با طول تاج حدود ۴۰۰ متر، بدنه سد بدون درز اتقباضی قائم اجرا شده است [۲۴]. در شرایط متعارف، بر اساس تجربیات موجود با توجه به میزان مواد سیمانی بتن، فواصل حدود ۲۰ تا ۶۰ متر برای درزهای انقباضی بدنه سد انتخاب مناسبی خواهد بود. در طراحی درزهای انقباضی، باید سعی گردد فواصل درزها در طول بدنه سد تقریبا مساوی و یکنواخت باشند.

درزهای انقباضی باید به نحوی اجرا شوند که هیچ‌گونه چسبندگی بین بلوک‌های مجاور ایجاد نگردد و فولادگذاری سازه‌های جنبی نباید در محل یک درز انقباضی امتداد داشته باشند. محل تقاطع درزهای انقباضی با سطوح بالادست و پایین‌دست سد باید به نحو مناسبی پردازش و اجرا گردد تا سطح ظاهری درز مناسب بوده و خردشدگی لبه‌های درز به حداقل برسد. برای جلوگیری از نشت آب از درزهای انقباضی، نوارهای آب‌بند در فاصله حدود ۳۰ سانتی‌متر از لبه بالادست درز نصب می‌شوند. در محدوده سرریز تاج، نوارهای آب‌بند در مجاورت رویه پایین‌دست نیز نصب می‌شوند. نوع، عرض و تعداد نوارهای آب‌بند به تراز آب مخزن و نوع و نحوه بتن‌ریزی در محدوده بالادست سد بستگی دارد. البته برای افزایش بازدهی آب‌بندی در درزهای انقباضی، دقت در نحوه نصب نوارهای آب‌بند اهمیت بالاتری نسبت به جنس نوار آب‌بند دارد. برای حفظ موقعیت و جلوگیری از جابه‌جایی نوار آب‌بند، در نظر گرفتن تمهیدات مناسب در فرایند بتن‌ریزی و ویبره بتن در اطراف نوار آب‌بند از اهمیت زیادی برخوردار است. برای جمع‌آوری نشت‌های احتمالی، بلافاصله در پایین‌دست نوار آب‌بند، یک سیستم زهکش نظیر لوله‌های زهکش مشبک تعبیه شده و آب‌های نشتی را به گالری‌ها هدایت می‌نماید.

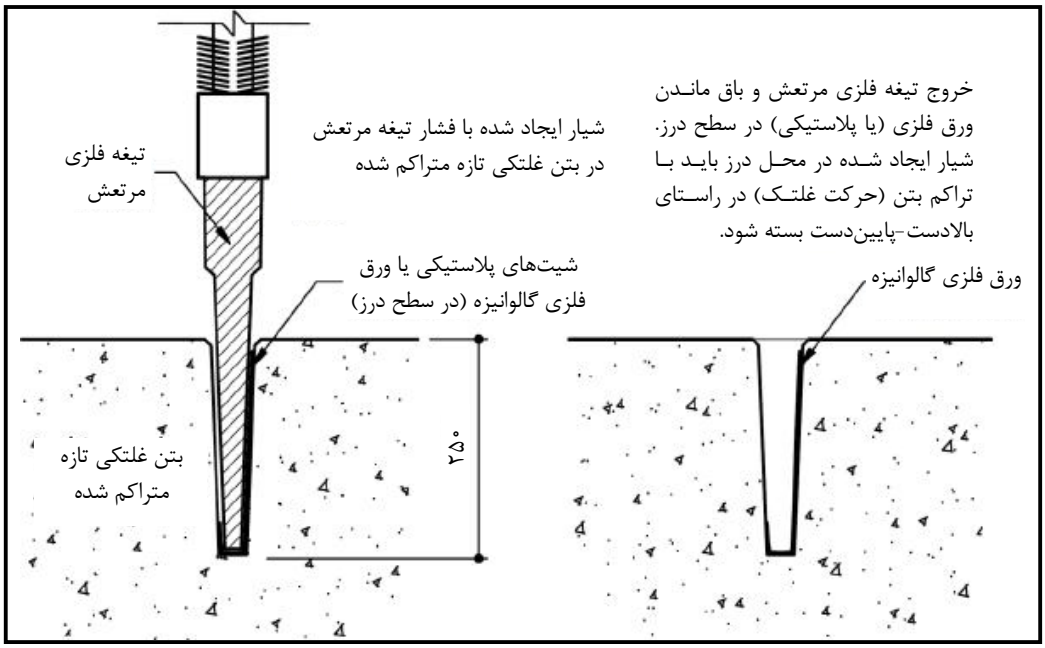
روش ایجاد درزهای انقباضی باید به‌گونه‌ای باشد که منجر به کم‌ترین اخلال و تاخیر در فرایند بتن‌ریزی بدنه سد گردد. سه روش برای اجرای درزهای انقباضی در سدهای بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفته است که در متداول‌ترین

آن‌ها پس از پخش و کوبیدن هر لایه بتن غلتکی، به کمک دستگاه نصاب لرزه‌ای (Crack Inducer)، ورق‌های فلزی گالوانیزه در محل درزها قرار داده می‌شوند. ضخامت این ورق ها حدود ۲ میلی‌متر بوده و نصب آن ها با این روش تاخیری در عملیات اجرای لایه بعدی بتن غلتکی ایجاد نمی‌کند.

در روش دوم در محل درزها از قالب استفاده می‌گردد، این روش تداخل زیادی با فرایند اجرای بتن‌ریزی بدنه سد داشته و در حال حاضر کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش سوم، پس از پخش بتن غلتکی در هر لایه، شیت‌های پلاستیکی با کمک ورق های فلزی در محل درزهای انقباضی نصب شده و ورق های فلزی پس از متراکم کردن بتن، خارج می‌گردند. در برخی پروژه‌ها این فرایند پس از متراکم کردن بتن غلتکی در هر لایه مورد استفاده قرار گرفته و در این حالت، ورق‌های فلزی بلافاصله پس از استقرار شیت‌های پلاستیکی در محل درز انقباضی از بتن خارج می‌گردند. در شکل‌های (۵-۵) و (۵-۶) جزییات شماتیک روش اجرای درزهای انقباضی قائم به کمک دستگاه نصاب لرزه‌ای (Crack Inducer) نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- شمای کلی فرایند ایجاد درزهای انقباضی قائم در سدهای وزنی بتن غلتکی [۱۸]



شکل ۵-۶- جزییات روش اجرای درزهای انقباضی قائم در سدهای وزنی بتن غلتکی [۱۸]

۵-۵-۳- گالری‌ها و شافت‌های داخل بدنه سد

به طور کلی طراحی گالری در بدنه سد و در توده سنگ پی به منظور برآورده شدن عملکردهای زیر صورت می‌پذیرد:

- تامین دسترسی‌های لازم به سازه‌های جنبی داخل بدنه سد
- تامین فضاهای لازم برای نصب و قرائت ابزاردقیق در بدنه سد و توده سنگ پی
- جمع‌آوری نشت آب‌ها در بدنه سد و تخلیه آن
- انجام تمام یا بخشی از تزریق‌های تحکیمی و آب‌بندی توده سنگ پی
- فراهم شدن امکان بازرسی‌های آتی از بدنه سد، و فراهم شدن امکان انجام عملیات بهسازی در موارد لزوم

در شرایط متعارف برای سهولت انجام تزریق‌های تحکیمی و آب‌بندی پی و نیز زهکشی و جمع‌آوری نشتاب‌ها در گالری‌های افقی بدنه سد و پی، طراحی و تعبیه یک گالری پیرامونی تقریبا در امتداد موازی سطح پی، بسیار مفید خواهد بود. با توجه به روش و زمان‌بندی اجرا در سدهای بتنی وزنی متعارف، در صورت وجود یک برنامه‌ریزی منطقی، عملیات اجرایی مربوط به گالری‌های بدنه سد معمولا یک فعالیت بحرانی و تعیین کننده در فرایند اجرای بدنه سد نبوده و موجب اختلال قابل توجه در عملیات بتن‌ریزی بدنه سد نیز نمی‌گردد.

در سدهای وزنی بتن غلتکی شرایط متفاوت می‌باشد چرا که با توجه به روش اجرای بتن غلتکی، وجود گالری سبب محدود شدن و یا قطع دسترسی ماشین‌آلات اجرایی بتن‌ریزی در مقطع بدنه سد شده و تاثیر کاملا محسوسی بر سرعت، کیفیت و برنامه زمان‌بندی اجرایی بدنه سد خواهد داشت. بر اساس تجربیات موجود، در شرایطی که فضای اجرای لایه بتن غلتکی بزرگ و وسیع باشد (نظیر ترازهای تحتانی سدهای بلند)، وجود گالری سبب کاهش حداقل ۱۵ درصدی نرخ بتن‌ریزی شده و در شرایطی که فضای اجرای بتن غلتکی نسبتا کوچک باشد، وجود گالری

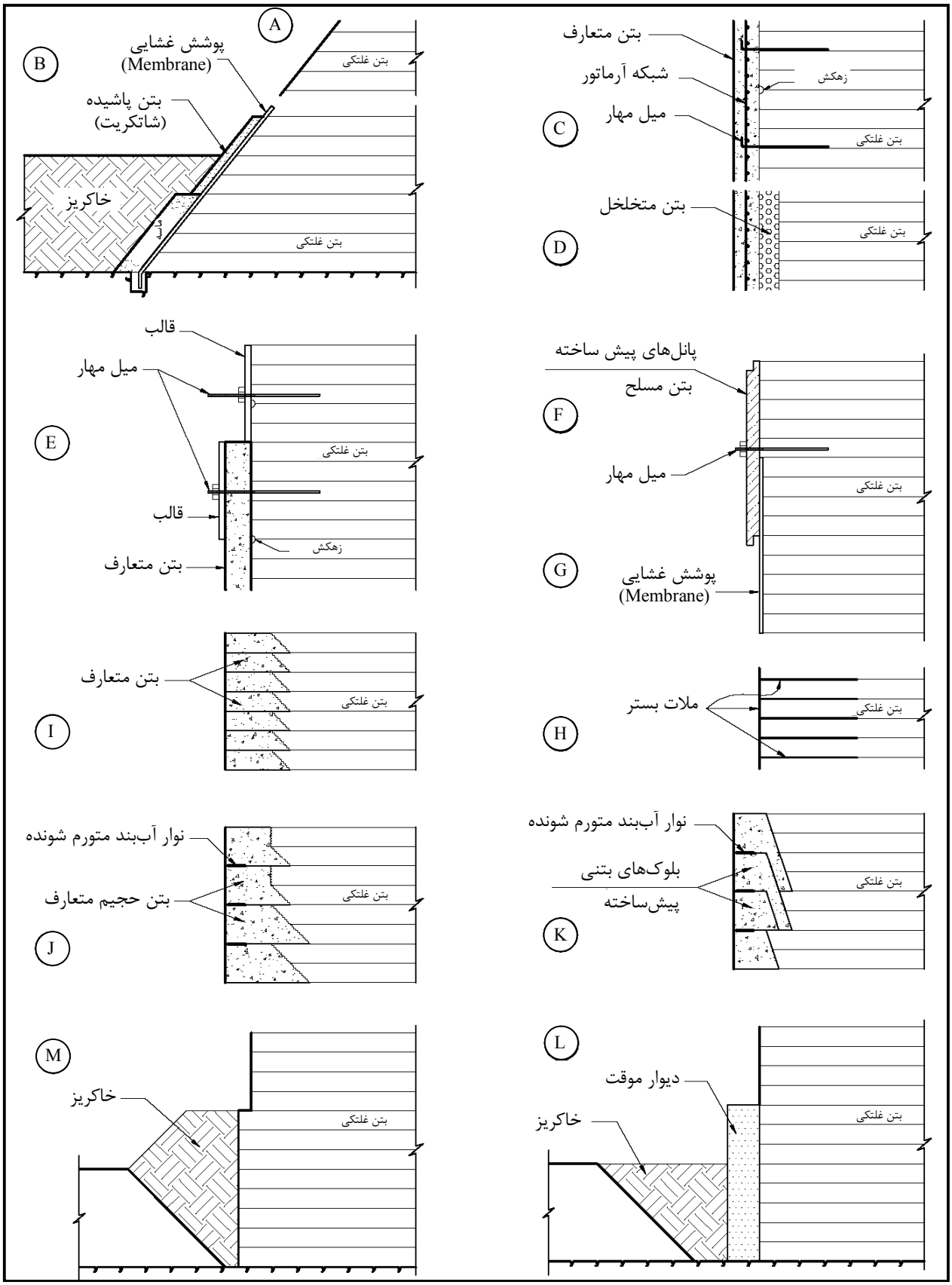
می‌تواند سرعت عملیات بتن‌ریزی را تا ۵۰٪ و یا بیش‌تر کاهش داده و تاثیر نامطلوبی بر کیفیت بتن غلتکی نیز داشته باشد. بنابراین، به طور کلی در طراحی سدهای بتن غلتکی تعداد گالری‌های بدنه سد به حداقل ممکن و ضروری کاهش یافته و جانمایی گالری‌ها با توجه به ملاحظات و نیازهای حین اجرا صورت می‌پذیرد [۱۸]. برای این منظور می‌توان تا حد ممکن فعالیت‌های اجرایی مرتبط با گالری‌ها را با روش‌های مناسب دیگری جایگزین گردد. به‌عنوان مثال برای تزریق پی می توان از سکوی بتنی که در بالادست سد پیش‌بینی می‌گردد استفاده نموده و یا قبل از اجرای بتن، تزریق پی را اجرا نمود.

با توجه به شرایط فوق، عملا طراحی گالری در سدهای وزنی بتن غلتکی کوتاه منطقی و متداول نبوده و نحوه طراحی گالری‌ها در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند نیز با توجه به ملاحظات اجرایی بتن غلتکی، متفاوت با سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشد. بر اساس تجربیات سدهای بتن غلتکی اجرا شده، مبانی و ملاحظات مهم در طراحی گالری‌های بدنه سد که تا حد ممکن باید رعایت شوند، به شرح زیر می‌باشند:

- حذف گالری در سدهای کوتاه (با ارتفاع کم‌تر از حدود ۳۰ متر)
- پرهیز از طراحی گالری‌های طویل و تامین دسترسی‌های لازم از پایین‌دست سد به‌جای گالری‌های پیرامونی (یا شفت‌ها)
- استفاده از پانل‌های پیش‌ساخته برای گالری‌ها و شفت‌ها در مواردی که سرعت بتن‌ریزی مهم و تعیین‌کننده باشد
- حذف گالری پیرامونی و جایگزینی آن با چند شافت قائم؛ البته در مواردی که ضرورت تزریق آب‌بندی (اولیه یا تکمیلی) پی سد در زمان اجرا یا بهره‌برداری از طریق گالری‌ها مطرح باشد، اجرای گالری پیرامونی بدنه سد ضروری خواهد بود.
- فواصل قائم گالری‌های بدنه سد تابع اهداف و عملکردهای مورد انتظار از گالری‌ها، موقعیت سازه‌های جنبی (نظیر اتاق شیرآلات خروجی‌ها)، موقعیت مناسب برای نصب ابزاردقیق و ... می‌باشد. درصورتی‌که اجرا و حفاری گمانه‌های زهکش در بدنه سد از داخل گالری‌های بدنه سد مد نظر باشد، با توجه به دقت معمول روش‌های حفاری گمانه، فاصله قائم گالری‌های بدنه سد باید به حدود ۳۰ تا ۳۵ متر محدود گردد [۱۸].

۵-۵-۴- گزینه‌های طراحی رویه بالادست بدنه سد

رویه بالادست سدهای وزنی بتن غلتکی غالبا به صورت قائم و یا با شیب تند بوده و آب‌بند بودن آن یکی از مهم‌ترین الزامات و نیازهای طراحی است که در نحوه طراحی و اجرای رویه بالادست بسیار تاثیرگذار می‌باشد. علاوه بر این، الزامات مربوط به زیبایی نمای رویه بالادست، نیازهای سازه‌ای (با توجه به این‌که معمولا تمرکز تنش‌ها در مجاورت رویه‌های سد رخ می‌دهد)، و نهایتا الزامات سهولت و سرعت اجرا نیز باید در طراحی رویه بالادست مد نظر قرار گیرند. گزینه‌های مختلف طراحی رویه بالادست سد با توجه به هندسه بدنه سد و میزان و کیفیت عملکرد مورد نظر به طور شماتیک در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. شرح این گزینه‌ها که با حروف لاتین A تا M مشخص شده‌اند در ادامه مطلب ارائه می‌گردد. اکثر این گزینه‌ها برای سایر رویه‌های قائم سد نیز قابل اعمال می‌باشند [۱۸].



شکل ۵-۷- گزینه‌های طراحی رویه بالادست در سدهای بتن غلتکی [۱۸]

در سدهای کوتاه و یا در موارد خاص در سدهای با ارتفاع متوسط و بلند، که رویه بالادست سد شیب‌دار می‌باشد، سطح رویه بالادست را درصورتی‌که زیبایی نمای ظاهری بتن چندان مهم نباشد می‌توان به صورت بدون قالب و خود ایستا اجرا کرد (شکل ۵-۷، گزینه A). در این شرایط تراکم مطلوب بتن در مجاورت رویه شیب‌دار امکان‌پذیر نبوده و رویه بالادست سد (به خصوص در محل درزهای اجرایی بتن‌ریزی) آب‌بند نخواهد بود. بنابراین نشت آب از درزهای اجرایی بتن‌ریزی را باید با اعمال تمهیدات مناسب به یک حد قابل پذیرش، که با توجه به مبانی طراحی و اهداف پروژه تعیین می‌گردد، کاهش داد. درصورتی که نشت محدود آب از درزهای اجرایی قابل پذیرش بوده و منافاتی با عملکرد مورد نظر از بدنه سد نداشته باشد، می‌توان با استفاده از ملات بستر در سطوح درز و یا کاربرد بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد در مجاورت رویه بالادست، میزان نشت آب را کنترل نمود. در شرایطی که آب‌بندی ایده‌آل رویه بالادست مد نظر باشد، می‌توان سطح رویه شیب‌دار بالادست سد را با یک پوشش ژئوممبرین (Geomembrane) پوشاند (شکل (۵-۷)، گزینه B). برای محافظت و جلوگیری از جابه جایی این پوشش، در ترازهای پایین می‌توان از یک لایه محافظ سنگریزه‌ای، و در ترازهای بالاتر از شبکه توری فلزی استفاده نمود [۱۸]. گزینه دیگر طراحی که بر مبنای ایده طراحی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی می‌باشد، استفاده از دال پوششی (یا دیوار) بتن مسلح معمولی بر روی بتن غلتکی در رویه بالادست سد است (شکل ۵-۷، گزینه C). اگر دال پوششی (یا دیوار) بتن مسلح در رویه بالادست به میزان کافی ضخیم در نظر گرفته شود، می‌توان آن را قبل از اجرای بتن غلتکی و با استفاده از قالب‌های لغزان یا قالب‌های خزنده اجرا نمود. در این شرایط دیوار بتن مسلح اجرا شده به‌عنوان قالب بتن غلتکی در بالادست عمل نموده و اجرای بتن غلتکی به‌صورت پیوسته و مداوم امکان‌پذیر می‌گردد. علاوه بر این، پوشش بتنی رویه بالادست به‌عنوان یک عایق حرارتی بتن غلتکی نیز عمل نموده و مانع از اعمال شوک‌های حرارتی به بتن غلتکی می‌گردد.

از نظر ظاهری، استفاده از پوشش بتن مسلح در رویه بالادست سد در صورت طراحی و اجرای مناسب و دقیق، یک نمای بسیار مطلوب و زیبا را به‌دست می‌دهد. همچنین در صورت طراحی شبکه آرماتورهای دو طرفه در پوشش بتن مسلح رویه بالادست، ترک‌خوردگی محتمل ناشی از اثرات حرارتی و جمع‌شدگی بتن در این پوشش به‌صورت شبکه ترک‌های با فاصله کم و عرض محدود شکل می‌گیرد. درصورتی‌که حداکثر عرض ترک‌های حرارتی به حدود ۰/۱۵ میلی‌متر محدود گردد، فرایند بسته شدن ذاتی و کلسیته شدن این ترک ها تحت اثر جریان آب، حتی در شرایط فشار هیدرولیکی بالا، سریعا سبب مسدود شدن آن‌ها خواهد شد و بر این اساس، ترک‌های پوشش بتن مسلح رویه بالادست را عملا می‌توان نفوذناپذیر در نظر گرفت.

با توجه به شرایط فوق، در صورت استفاده از پوشش بتن مسلح در رویه بالادست، و تعبیه نوار آب‌بند مناسب در درزهای اجرایی افقی و قائم این پوشش بتنی، رویه بالادست سد تا حد قابل توجهی نفوذناپذیر خواهد بود. با این حال، طراحی و اجرای یک شبکه زهکشی در حد فاصل پوشش بتن مسلح و بتن غلتکی سبب اطمینان بیش‌تر از عدم نفوذ آب به بتن غلتکی بدنه سد می‌گردد. یک گزینه طراحی ایده‌آل برای سیستم زهکشی، اجرای یک لایه بتن متخلخل در

حدفاصل پوشش بتن مسلح و بتن غلتکی بدنه سد می‌باشد (شکل ۵-۷، گزینه D). علاوه بر زهکشی، لایه بتن متخلخل فوق هم در کاهش و کنترل تبادل حراتی بتن غلتکی با محیط موثر می‌باشد و هم موجب حذف اثرات نامطلوب ناشی از جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی احتمالی (یا درزهای اجرایی) موجود در پوشش بتن مسلح بر بتن غلتکی بدنه سد می‌گردد. برای تحقق آب‌بندی مناسب توسط پوشش بتن مسلح رویه بالادست، مرزهای کف و جناحین این پوشش باید با تمهیدات مناسبی نظیر یک دال بتنی پاشنه (Plinth) یا یک المان آب‌بند رابط (نفوذی) به پی و تکیه‌گاه‌ها متصل گردد. همچنین با توجه به نحوه طراحی و اجرای پوشش بتنی، برای تامین اتصال مناسب آن به بدنه سد، پیش‌بینی و طراحی یک شبکه انکراژ ضروری است. بار طراحی تعیین‌کننده برای این شبکه انکراژ، شتاب زلزله افقی وارد به بخش‌های مختلف رویه بالادست سد می‌باشد. شبکه انکراژ نگهدارنده پوشش بتنی بالادست بهتر است هم‌زمان با اجرای بتن غلتکی بدنه سد جای‌گذاری و اجرا گردد، ولی با توجه به تداخل این کار با فرایند اجرای بتن غلتکی، می‌توان این شبکه انکراژ را پس از بتن‌ریزی بدنه سد با حفاری تعداد مناسبی گمانه جای‌گذاری نموده و سپس گمانه‌ها را تزریق نمود [۱۸].

علیرغم مزایای قابل توجه گزینه پوشش بتن مسلح برای رویه بالادست از دیدگاه طراحی و عملکرد مناسب، به دلیل مشکلات و حساسیت‌های مربوط به روش اجرای آن، این گزینه به ندرت در سدهای وزنی بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸].

گزینه دیگر طراحی و اجرای رویه بالادست، استفاده از روش متداول قالب‌بندی مشابه با سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشد. در این روش سیستم انکراژ نگهدارنده قالب‌ها باید به نحو مناسب در بتن غلتکی بدنه سد جای‌گذاری و مهار شده و با توجه به ارتفاع معمول قالب‌ها، با هر بار نصب قالب می‌توان چند لایه بتن غلتکی را اجرا نمود. با توجه به محدودیت‌های طراحی و باربری سیستم متعارف قالب‌بندی، برای پخش و تراکم بتن غلتکی در مجاورت قالب باید از ماشین‌آلات سبک و یا ابزارهای دستی استفاده گردد. با توجه به این شرایط و با در نظر گرفتن ویژگی‌های بتن غلتکی، در نظر گرفتن تمهیدات طراحی و اجرایی مناسب برای ایجاد تراکم کافی بتن در محدوده مجاور قالب و دستیابی به یک نمای ظاهری مناسب در رویه بالادست سد، الزامی می‌باشد. یکی از راهکارهای متداول برای این منظور، اجرای یک لایه بتن متعارف در مجاورت قالب رویه بالادست است. از دیدگاه طراحی، اجرای یک لایه بتن متعارف با ضخامت نسبتا کم (حدود ۳۰ سانتی‌متر) در مجاورت قالب رویه بالادست سد، هم از بعد محافظت بتن غلتکی بدنه سد در برابر شرایط محیطی و هم از بعد ایجاد شرایط مطلوب برای سطح ظاهری رویه بالادست کفایت می‌کند. با اجرای این لایه بتن متعارف، آب‌بندی رویه بالادست سد نیز تا حد مطلوبی حاصل می‌گردد. روش پیشنهادی برای اجرای درجای بتن متعارف با ضخامت کم در شکل (۵-۷) (گزینه E) ارائه شده است. در این روش، پس از اجرای لایه‌های بتن غلتکی به نحوی که امکان نصب و مهار قالب فوقانی فراهم گردد، قالب زیرین در امتداد میل‌مهارهای نگهدارنده خود به سمت بالادست انتقال داده شده و سپس در فضای بین قالب و بتن غلتکی، در شرایطی که هنوز بتن غلتکی کاملا سخت نشده است، بتن‌ریزی متعارف صورت می‌پذیرد. در این حالت، چسبندگی مناسب بین بتن متعارف و بتن غلتکی ایجاد شده و میل‌مهارهای قالب، اتصال مکانیکی لایه بتن متعارف و بتن غلتکی را تامین خواهند نمود. تجربه نشان داده است که در

صورت اجرای مناسب و کنترل شده این فرایند، فشار وارد بر قالب سبب کشیدگی میل‌مهارها شده و این پیش‌کشیدگی پس از گیرش بتن و برداشتن قالب، سبب اتصال و پیش‌فشرده شدن لایه بتن متعارف به بتن غلتکی خواهد شد. روش مناسب دیگر برای اجرای لایه بتن متعارف در رویه بالادست، نصب پانل‌های پیش‌ساخته بتنی پس از برداشتن قالب‌ها می‌باشد (شکل ۵-۷، گزینه F). برای اتصال پانل‌های بتنی پیش‌ساخته به بدنه سد یک شبکه میل‌مهارهای محدود (در حد $\phi 28@2.5\times 2.5m$) کفایت می‌نماید. این روش از نظر اقتصادی کاملا توجیه‌پذیر بوده و یک نمای ظاهری بسیار زیبا و عاری از ترک برای رویه بالادست سد به‌دست می‌دهد. مهم‌ترین ضعف این روش، آب‌بند نبودن درزهای بین پانل‌های بتنی پیش‌ساخته است. راهکار مناسب برای تامین آب‌بندی رویه بالادست، نصب یک پوشش انعطاف‌پذیر PVC (با ضخامت حدود ۲ میلی‌متر) بین بتن غلتکی و پانل‌های بتنی پیش‌ساخته می‌باشد (شکل ۵-۷، گزینه G). تسطیح و پرداخت محدود رویه بتن غلتکی برای اتصال بهتر و یکنواخت پوشش PVC به آن توصیه شده است. طراحی و پیش‌بینی یک شبکه زهکش در پشت پوشش PVC برای جمع‌آوری نشتاب‌های احتمالی و کاهش هر چه بیش‌تر فشار برکنش در سطوح درزهای اجرایی بتن‌ریزی موثر خواهد بود. بررسی نتایج روش استفاده از پانل‌های پیش‌ساخته به همراه پوشش PVC در رویه بالادست مبین عملکرد مناسب و رضایت‌بخش آن تحت اثر فشار آب تا ۱۸۰ متر، بوده است [۱۸].

راهکار دیگر برای تحقق تراکم کافی بتن در مجاورت قالب و دستیابی به یک نمای ظاهری و آب‌بندی مناسب در رویه بالادست، اجرای بتن متعارف در مجاورت قالب هم‌زمان با اجرای بتن غلتکی در هر لایه بتن‌ریزی است. در این شرایط با توجه به استفاده از روش‌های معمول پخش و تراکم بتن، و نیز با توجه به فضای لازم برای نصب نوار آب‌بند در درزهای انقباضی، ضخامت لایه بتن متعارف باید حداقل حدود ۱/۰ متر در نظر گرفته شود. در مقابل، در صورت ایجاد چسبندگی لازم بین بتن متعارف و بتن غلتکی، در این روش نیازی به استفاده از شبکه انکراژ برای مهار و اتصال لایه بتن متعارف به بتن غلتکی نمی‌باشد. برای این منظور، به طور معمول پس از ریختن بتن متعارف در مجاورت قالب و قبل از متراکم نمودن آن، بتن غلتکی نیز ریخته می‌شود تا در فرایند تراکم بتن غلتکی، چسبندگی و اختلاط مناسب بین بتن متعارف و بتن غلتکی ایجاد گردد. در این روش، طرح اختلاط بتن متعارف باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که بتن دارای اسلامپ پایین بوده و پخش و تراکم بتن غلتکی در زمانی صورت پذیرد که بتن متعارف اسلامپ خود را از دست داده ولی گیرش اولیه آن کامل نشده باشد. در این شرایط، هم انسجام بتن متعارف حفظ می‌شود و هم اختلاط و چسبندگی مناسب بین بتن متعارف و بتن غلتکی ایجاد می‌گردد (شکل ۵-۷، گزینه I). درصورتی‌که در ابتدا بتن غلتکی اجرا شود و سپس بتن متعارف اجرا گردد، اگرچه شرایط ظاهری بتن در سطح لایه مناسب به‌نظر می‌رسد ولی چسبندگی (فیزیکی و شیمیایی) مناسب و لازم در سطح تماس بتن غلتکی و بتن متعارف، به خصوص در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، ایجاد نخواهد شد. بنابراین در این حالت استفاده از شبکه انکراژ برای تامین اتصال مکانیکی بین لایه بتن متعارف و بتن غلتکی ضروری خواهد بود (شکل ۵-۸، گزینه D). نکته مهم دیگر در این روش این است که با توجه به ضخامت قابل توجه بتن متعارف، فواصل درزهای انقباضی بدنه سد باید بر اساس الزامات کنترل ترک در بتن متعارف تعیین گردد. در شرایط اجرایی عادی و در صورت استفاده از یک طرح اختلاط مناسب، برای اطمینان از دستیابی به یک

رویه عاری از ترک، فواصل درزهای انقباضی در بتن متعارف باید در حدود ۷/۵ متر در نظر گرفته شود. در صورت استفاده از مواد افزودنی و تمهیدات اجرایی مناسب و با کنترل ریسک ترک‌خوردگی بتن بر مبنای نتایج تحلیل‌های حرارتی، می‌توان فواصل درزهای انقباضی در بتن متعارف را افزایش داد. با توجه به این شرایط، برای پرهیز از افزایش تعداد درزهای انقباضی در کل بدنه سد، معمولا با افزایش موضعی تعداد درزهای انقباضی در بتن متعارف، ترک‌های حرارتی در لایه بتن متعارف کنترل می‌گردد، در این شرایط باید به این نکته توجه داشت که با سرمایش بتن در طی زمان، به خصوص در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد که دارای ظرفیت کرنش کششی کم‌تری هستند، ریسک ایجاد و گسترش ترک در بتن غلتکی در امتداد درز انقباضی موضعی لایه بتن متعارف وجود خواهد داشت. این وضعیت می‌تواند در آب‌بندی و عملکرد مناسب بتن غلتکی بدنه سد تاثیر نامطلوب داشته باشد. بنابراین در صورت استفاده از این تکنیک، باید با انجام تحلیل‌های لازم و نیز اعمال تمهیدات اجرایی مناسب، ریسک ایجاد و گسترش ترک در بتن غلتکی کنترل گردد. در برخی پروژه‌ها به‌منظور کاهش تعداد درزهای اجرایی بتن‌ریزی در تماس با آب مخزن، لایه بتن متعارف بالادست با تمهیدات اجرایی لازم با ارتفاع دوبرابر لایه‌های بتن غلتکی اجرا شده است (شکل ۵-۷، گزینه J). همچنین در برخی موارد برای بهبود شرایط آب‌بندی درزهای اجرایی لایه بتن متعارف، در سطح درزهای اجرایی از نوارهای آب‌بند منبسط شونده استفاده شده است [۱۸].

بر اساس تجارب سال‌های اخیر، می‌توان با در نظر گرفتن تمهیداتی بتن غلتکی را بلافاصله در مجاورت قالب اجرا نمود. این روش از نظر سرعت و سهولت اجرایی، با توجه به حذف عملیات اجرایی مربوط به لایه بتن متعارف، بسیار مطلوب می‌باشد. در صورت استفاده از این روش، قالب‌ها باید برای بارهای اجرایی ناشی از ریختن و به خصوص تراکم بتن غلتکی طراحی و کنترل شوند. برای دستیابی به یک سطح ظاهری مناسب در رویه بالادست، می‌توان از یک لایه نازک ملات در مجاورت قالب، هم‌زمان با اجرای بتن غلتکی، استفاده نمود. این تکنیک در صورت اجرای مناسب، نتیجه بسیار خوبی به‌دست داده و سطح ظاهری رویه بالادست کاملا مشابه با سدهای بتنی وزنی متعارف می‌گردد. با این حال، از آنجا که این روش نیاز به طرح اختلاط، دقت و امکانات اجرایی ویژه دارد، اجرای مناسب و موفق آن به‌سادگی میسر نمی‌گردد. در روش دیگر، پس از ریختن و پخش بتن غلتکی، یک لایه دوغاب رقیق (Fluid Grout)، با یا بدون مواد افزودنی هوازا، بر روی بتن غلتکی در محدوده تقریبا ۰.۵ متری مجاور قالب اضافه می‌گردد. سپس سعی می‌گردد با استفاده از ابزارهای مناسب این دوغاب در بتن غلتکی نفوذ کرده و به طور یکنواخت با آن مخلوط گردد به‌گونه‌ای که در نهایت یک مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد و با روانی بالا در مجاورت قالب به‌دست آید. در این شرایط، نمای ظاهری رویه بالادست شبیه سدهای بتنی وزنی متعارف بوده و آب‌بندی بدنه سد نیز تا حد مناسبی ایجاد می‌گردد. با توجه به فرایند مورد استفاده در این روش، به بتن غلتکی مجاور قالب، بتن غلتکی غنی شده با دوغاب (Grout-Enriched RCC or GERCC) اطلاق می‌گردد.

با توجه به این‌که در فرایند ویبره یا متراکم کردن بتن غلتکی، دوغاب به طور طبیعی تمایل به بالا آمدن داشته و در سطح بتن قرار می‌گیرد، در روش مشابه دیگری، برای غنی‌سازی بتن غلتکی، به‌جای این‌که دوغاب در سطح بتن غلتکی

تازه پخش گردد، ابتدا دوغاب ریخته شده و سپس بتن غلتکی ریخته و متراکم می‌گردد. در این روش نیز عملیات ویبره و تراکم بتن غلتکی (در محدوده حدودا ۰.۵ متری مجاور قالب) تا زمانی ادامه می‌یابد که دوغاب کاملا با بتن مخلوط شده و در سطح بتن غلتکی اثر دوغاب ظاهر گردد. بتن غلتکی غنی شده با دوغاب با این روش، (Grout-Enriched Vibrated RCC or GEVR) نامیده می‌شود [۱۸].

با استفاده از ملات بستر در سطح درزهای اجرایی بتن‌ریزی، خصوصا در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و یا در مواردی که وقفه بین اجرای لایه‌های بتن‌ریزی ایجاد می‌گردد، می‌توان آب‌بندی درز اجرایی را تامین نمود (شکل ۵-۵، گزینه H). اگر ملات بستر به‌صورت کاملا یکنواخت در پهنایی معادل ۸ درصد هد هیدرواستاتیک در محدوده بالادست همه درزهای اجرایی پخش شده و در فرایند اجرای بتن غلتکی دقت و مراقبت لازم صورت پذیرد، بدنه سد کاملا آب‌بند خواهد شد. با این حال، حتی در شرایط اجرایی خوب و کنترل شده، اجرای ملات بستر با کیفیت فوق می‌تواند تا ۹۵ درصد در کاهش نشت آب به داخل بدنه سد موثر باشد [۱۸].

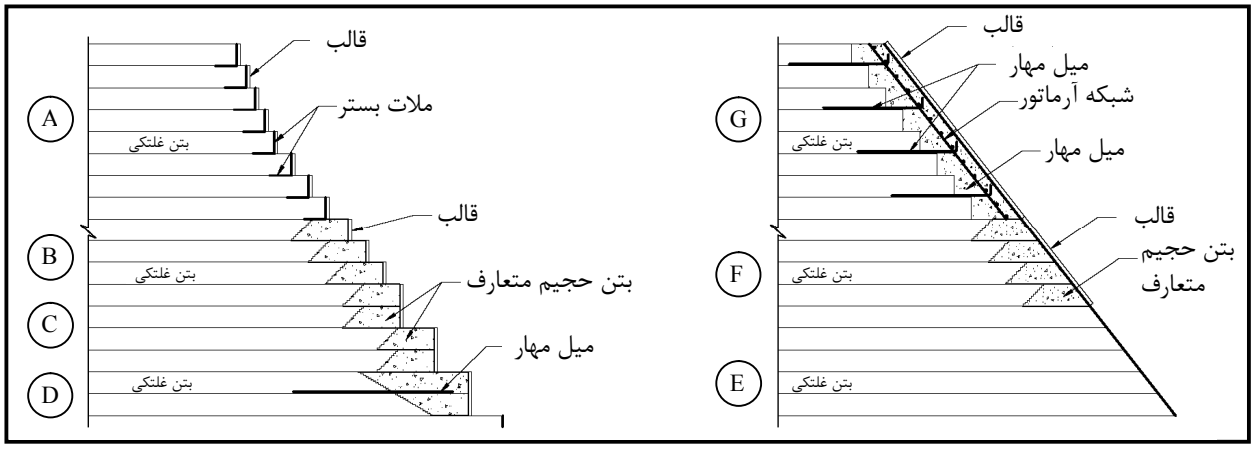
یکی از گزینه‌های طراحی رویه بالادست در سدهای وزنی بتن غلتکی، استفاده از بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی در رویه بالادست سد می‌باشد (شکل ۵-۷، گزینه K). معمولا بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی باید به گونه‌ای طراحی شوند که در زمان اجرا در یکدیگر قفل شده و با توجه به وزن و نحوه استقرار خود، پایدار باشند و نیازی به استفاده از شبکه انکراژ برای نگهداری و مهار آن‌ها وجود نداشته باشد. به همین دلیل وزن بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی نسبتا زیاد بوده و با توجه به محدودیت‌های حمل و نصب آن‌ها، سطح هر یک از بلوک‌ها در رویه بالادست به طور معمول از حدود ۱/۰ متر مربع تجاوز نمی‌کند. با توجه به این شرایط، یکی از نقاط ضعف اصلی این روش، نیاز به نیروی کار زیاد و زمان‌بر بودن فرایند استقرار و نصب بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی می‌باشد. درزهای بین بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی آب‌بند نمی‌باشند و برای تامین آب‌بندی بدنه سد باید تمهیدات مناسب، مشابه با تمهیدات اشاره شده در سایر گزینه‌ها، پیش‌بینی و اعمال گردد. در این روش نیز مشابه با روش استفاده از پانل‌های پیش‌ساخته بتنی، در صورت اجرای دقیق و کنترل شده بلوک‌های بتنی، شرایط ظاهری نمای رویه بالادست زیبا و یکنواخت خواهد بود.

در سدهایی که در دره‌های پرشیب و باریک احداث می‌گردند (و یا حداقل بخش پایینی دره نسبتا باریک و با دیواره‌های پرشیب می‌باشد) احداث یک دیوار در مرز بالادست سد در ترازهای تحتانی راهکار مناسبی برای تسریع عملیات اجرایی بدنه سد می‌باشد (شکل ۵-۷، گزینه L). این دیوار به منزله قالب برای رویه بالادست سد بوده و می‌توان بتن غلتکی را در مجاور آن اجرا نمود. از طرفی، با اجرای خاکریز در محدوده بالادست دیوار، فضای کارگاهی مناسبی برای فعالیت‌های اجرایی مختلف ایجاد می‌گردد. در برخی موارد به‌جای اجرای دیوار، صرفا خاکریزی فضای بالادست لایه به لایه هم‌زمان با پیشرفت عملیات بتن‌ریزی بدنه سد و متناسب با ارتفاع هر لایه بتن اجرا شده و از این خاکریز به‌عنوان قالب در رویه بالادست استفاده شده است (شکل ۵-۷، گزینه M). این فرایند را تا جایی که اجرای پایدار خاکریز رویه بالادست امکان‌پذیر باشد، می‌توان ادامه داد. این روش بسیار اقتصادی و سریع است ولی برای حفظ کیفیت بتن غلتکی مجاور خاکریز، تمهیدات اجرایی لازم باید در نظر گرفته شود [۱۸].

۵-۵-۵- گزینه‌های طراحی رویه پایین‌دست بدنه سد

رویه پایین‌دست سدهای وزنی بتن غلتکی عموما شیب‌دار بوده و شکل ظاهری مناسب و اقتصادی رویه پایین‌دست یکی از مهم‌ترین الزاماتی است که باید در نحوه طراحی و اجرای آن مد نظر قرار گیرد. گزینه‌های مختلف طراحی رویه پایین‌دست سد به طور شماتیک در شکل (۵-۸) ارائه شده است. شرح این گزینه‌ها که با حروف لاتین A تا G مشخص شده‌اند در ادامه مطلب ارائه می‌گردد. اکثر این گزینه‌ها برای سایر رویه‌های شیب‌دار سد نیز قابل اعمال می‌باشند [۱۸].

متداول‌ترین گزینه اجرای رویه پایین‌دست، که از نظر اقتصادی و اجرایی نیز بهینه و سریع می‌باشد، قالب‌بندی و اجرای پله‌ای رویه پایین‌دست است (شکل ۵-۸، گزینه A). به طور معمول ارتفاع قالب‌ها حداقل حدود ۱ تا ۳ برابر ارتفاع هر لایه بتن‌ریزی بوده و مهار قالب‌ها به بتن غلتکی سخت شده با استفاده از روش‌های ساده و متعارف انجام می‌پذیرد. شیب‌های مختلف و یا متغیر رویه پایین‌دست سد را می‌توان صرفا با تغییر عرض پله‌ها (و حفظ ارتفاع آن‌ها) پیاده‌سازی و اجرا نمود. درصورتی‌که نمای ظاهری مشابه با سدهای بتنی وزنی متعارف در رویه پایین‌دست مد نظر باشد، می‌توان در مجاورت قالب یک لایه بتن حجیم متعارف اجرا نمود (شکل ۵-۸، گزینه B). در این روش اجرای پله‌های با ارتفاع بیش‌تر (و یا متغیر)، در شرایطی که اجرای آن برای مثال بر اساس الزامات طراحی سرریز ضروری باشد، به‌سادگی با تنظیم یا تغییر ارتفاع قالب امکان‌پذیر خواهد بود (شکل ۵-۸، گزینه‌های C و D).



شکل ۵-۸- گزینه‌های طراحی رویه پایین‌دست در سدهای بتن غلتکی [۱۸]

در صورت اجرای پیوسته و مداوم بتن، نیازی به استفاده از آرماتور در رویه پایین‌دست نخواهد بود. با این حال توجه به این نکته ضروری است که، به خصوص در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، بتن حجیم متعارف مجاور قالب باید قبل از بتن غلتکی اجرا گردد (شکل ۵-۸، گزینه‌های B و C). طرح اختلاط حجیم متعارف مجاور قالب باید به‌گونه‌ای باشد که اسلامپ بتن پایین بوده و پخش و تراکم بتن غلتکی در زمانی صورت پذیرد که بتن متعارف اسلامپ خود را از دست داده ولی گیرش اولیه آن کامل نشده باشد. درصورتی‌که در ابتدا بتن غلتکی اجرا شود و سپس بتن متعارف اجرا گردد، اگرچه شرایط ظاهری بتن در سطح لایه مناسب به‌نظر می‌رسد ولی چسبندگی (فیزیکی و شیمیایی) مناسب و لازم در سطح تماس بتن غلتکی و بتن متعارف، به خصوص در سدهای وزنی بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، ایجاد

نخواهد شد. بنابراین در این حالت استفاده از شبکه انکراژ برای تامین اتصال مکانیکی بین لایه بتن متعارف و بتن غلتکی ضروری خواهد بود (شکل ۵-۸، گزینه D). مشابه با رویه بالادست، در رویه پایین‌دست سد نیز به‌جای اجرای لایه بتن متعارف در مجاورت قالب، می‌توان بتن غلتکی غنی شده با دوغاب (GERCC or GEVR) اجرا نمود [۱۸].

برای اجرای سطوح شیب‌دار در رویه پایین‌دست، و یا رویه سرریز، می‌توان بسته به شرایط یکی از گزینه‌های زیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

- اجرای رویه شیب‌دار بدون قالب، در این حالت پس از تراکم بتن غلتکی، رویه پایین‌دست سد صرفا با ابزارهای ساده تسطیح و تحکیم می‌گردد (شکل ۵-۸، گزینه E)
- قالب‌بندی و اجرای یک لایه بتن متعارف، یا بتن غلتکی غنی شده با دوغاب، با ضخامت حداقل ۰.۵ متر بدون آرماتورگذاری و بدون شبکه انکراژ (شکل ۵-۸، گزینه F)
- اجرای بتن غلتکی به‌صورت پله‌ای با قالب، پرداخت و زدودن مواد سیمانی و سنگ‌دانه‌های سست سطح رویه پایین‌دست با جت آب (Chipping) یا روش‌های مناسب دیگر، و سپس اجرای یک رویه بتن مسلح با شبکه آرماتور دو سویه و یک شبکه انکراژ برای مهار لایه بتن مسلح رویه (شکل ۵-۸، گزینه G). این گزینه غالبا برای اجرای رویه شیب‌دار سرریزها در پایین‌دست مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جزییات و ملاحظات مربوط به این گزینه‌ها مشابه با موارد ارائه شده برای گزینه‌های نظیر طراحی در رویه بالادست سد می‌باشد.

فصل ۶

معیارهای ایمنی و پذیرش

۶-۱- کلیات

در فرایند محوریابی و طراحی هندسی بدنه سد، با اتکا به تجربه طراح و نیز شناخت حاصل از ساختار زمین‌شناسی و شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه مورد نظر، انتخاب محور و طرح هندسی بدنه سد با توجه به مبانی و ملاحظات طراحی و اجرایی به نحوی باید صورت پذیرد که رفتار کلی بدنه سد و پی مطلوب بوده و مناسب‌ترین شرایط برای بدنه سد از دیدگاه‌های فنی، اجرایی، و اقتصادی فراهم گردد. پس از این مرحله به منظور ارزیابی کمّی ایمنی و پایداری بدنه سد و توده سنگ پی در برابر شرایط محیطی مختلف در طول دوره بهره‌برداری و نیز بهینه‌سازی اقتصادی پروژه، انجام تحلیل‌های پایداری تکیه‌گاه، تحلیل‌های حرارتی (حین ساخت)، و تحلیل‌های تنش بدنه سد و پی ضروری خواهد بود. بر این اساس، در وهله نخست باید کیفیت و ماهیت بارهای وارد بر بدنه سد و پی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مختلف تعیین گردد. تعیین برخی بارهای وارد بر بدنه سد، نظیر بار وزن و فشار هیدرواستاتیک، نسبتا ساده بوده ولی در برخی موارد برای تخمین میزان و ماهیت بارهای وارد بر بدنه سد، نظیر بارهای حرارتی و بار دینامیکی زلزله، انجام مطالعات مستقل و ویژه لازم است. علاوه بر این در محاسبه و تعیین بارها (به خصوص بارهای حرارتی)، علاوه بر پارامترها و شرایط محیطی، اثرات ناشی از روش و مراحل اجرای بدنه سد نیز باید مد نظر قرار گیرد. با توجه به این‌که پرداختن به این مباحث خارج از موضوع این راهنما می‌باشد، در ادامه مطلب فرض بر این است که میزان و ماهیت بارهای مختلف وارد بر بدنه سد و توده سنگ پی در زمان اجرا و در شرایط مختلف بهره‌برداری مشخص می‌باشند.

به طور معمول در تحلیل پایداری و تحلیل تنش، بارهای وارد بر سازه سد بر اساس شرایط مختلف محیطی و اثرات ناشی از وضعیت‌های مختلف عملکرد سازه، به سه رده ترکیب بارهای عادی (Usual)، ترکیب بارهای غیرعادی (Unusual)، و ترکیب بارهای فوق‌العاده (Extreme)، تفکیک می‌گردند. در هر رده، با توجه به نوع رفتار متفاوت بدنه سد و پی در برابر بارهای بسیار کوتاه مدت و لرزه‌ای، ترکیب بارهای محتمل به دو دسته ترکیب بارهای استاتیکی و ترکیب بارهای دینامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. معیارهای ایمنی و پذیرش (Acceptance Criteria) نیز متناسب با میزان اهمیت سازه بر همین اساس قابل دسته‌بندی بوده و در هر مورد با توجه به سطح ایمنی و عملکرد قابل پذیرش برای بدنه سد، این معیارها تبیین می‌گردند. علاوه بر دسته‌بندی فوق، ترکیب بارها و معیارهای پذیرش جداگانه‌ای برای مطالعات ارزیابی ایمنی سدهای موجود نیز تعریف می‌شوند که البته پرداختن به این مبحث نیز جزء موضوعات این راهنما نمی‌باشد.

مبانی رده‌بندی ترکیب بارهای وارد بر بدنه سد، و معیارهای ایمنی و پذیرش برای هر یک از رده‌های مذکور را به طور کلی می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ترکیب بارهای عادی بیانگر حالتی از بارهای وارده و عملکرد سازه می‌باشند که به طور معمول مورد انتظار بوده و در طول دوره بهره‌برداری اقتصادی (عمر مفید) تعریف شده برای پروژه به دفعات رخ خواهند داد. بنابراین سازه سد و توده سنگ پی تحت اثر این ترکیب بارها باید با حاشیه اطمینان لازم و کافی، رفتار کاملا ایمن و پایدار داشته باشند.

- ترکیب بارهای غیرعادی مبین حالتی از عملکرد سازه و یا بارهای ناشی از شرایط محیطی هستند که متفاوت با حالت بهره‌برداری عادی بوده و رخداد آن‌ها در طول دوره بهره‌برداری (عمر مفید) تعریف شده برای پروژه، هر چند با احتمال وقوع کم‌تر، ولی قطعی است. با توجه به حتمی بودن وقوع این دسته از ترکیب بارها، سازه سد و توده سنگ پی باید مقاومت کافی در برابر آن‌ها داشته و تحمل آن‌ها بدون ایراد خسارت به بدنه سد و پی و یا اخلال در عملکرد و بهره‌برداری عادی از پروژه، امکان‌پذیر باشد.
- ترکیب بارهای فوق‌العاده معرف یک سری حالات بارگذاری حدی می‌باشند که در بدترین شرایط محیطی ممکن، و یا در بدترین حالت عملکرد سازه، امکان وقوع آن‌ها وجود خواهد داشت. بر اساس این تعریف، ممکن است در واقعیت، حداقل در طول دوره بهره‌برداری اقتصادی (عمر مفید) پروژه، این دسته از ترکیب بارها رخ ندهند ولی با توجه به اهمیت و میزان ریسک ناشی از خرابی یا انهدام سازه، بدنه سد و توده سنگ پی باید در برابر این گروه از ترکیب بارها ایستایی خود را، هر چند با پذیرش ایراد خسارات جزئی در سازه، حفظ نمایند.

با توجه به معیارهای فوق، عملا فرایند طراحی بدنه سد کاملا متاثر و مرتبط با مطالعات تحلیلی، شامل تحلیل‌های حرارتی حین ساخت، تحلیل‌های پایداری و تحلیل‌های تنش بدنه سد، ملاحظات مربوط به فلسفه و روش اجرا، و همچنین میزان اهمیت و ریسک ناشی از خرابی یا انهدام سازه می‌باشد. برای تحقق معیارهای ایمنی و پذیرش و نیز کنترل عدم قطعیت‌های ناشی از مقاومت و رفتار مصالح، شرایط بارگذاری، و عدم دقت و تقریبهای روش تحلیل، به طور معمول برای هر رده ترکیب‌های بارگذاری یک ضریب اطمینان خاص، به معنی نسبت ظرفیت باربری سازه به میزان تلاش‌های متناظر وارد بر آن، تعریف می‌گردد. در هر ترکیب بارگذاری، میزان تلاش‌های وارد بر هر یک از اجزا یا مقاطع سازه بر مبنای نتایج تحلیل (تحلیل حرارتی، تحلیل تنش، و یا تحلیل پایداری) تعیین خواهد شد.

در ادامه مطالب این بخش، ترکیب‌های بارگذاری و ضرایب اطمینان متناظر با آن‌ها برای تحلیل‌های پایداری بدنه سد و پی، تحلیل‌های حرارتی، و همچنین تحلیل‌های تنش بدنه سد به طور مجزا بیان می‌گردد. از آنجا که معیارهای ایمنی و پذیرش به فرضیات پایه و دقت روش تحلیل نیز وابسته می‌باشد، در موارد لزوم به توضیحات مرتبط در خصوص روش تحلیل در بخش‌های ذیربط ارجاع داده شده است.

۶-۲- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های پایداری بدنه سد و پی

هدف از کنترل پایداری، تضمین ایستایی و ایمنی کلی بدنه سد و پی در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌باشد به نحوی که تامین اهداف طراحی و احداث سد میسر گردد. بر این اساس در تحلیل‌های پایداری، تعادل بدنه سد در راستای افقی (لغزش)، تعادل بدنه سد در راستای قائم (شناوری)، و تعادل بدنه سد در مقابل دوران (واژگونی) محاسبه و ارزیابی می‌گردد. کنترل لغزش باید در امتداد درزهای اجرایی بتن‌ریزی در داخل بدنه سد، در امتداد سطح تماس بدنه سد و پی، و نیز در امتداد ناپیوستگی‌های توده سنگ (در داخل پی) بررسی و ارزیابی گردد. علاوه بر این موارد، برای اطمینان از

باربری و پایداری پی، ظرفیت باربری پی با توجه به ساختار و مکانیزم‌های کلی ناپایداری توده سنگ تعیین شده و حداکثر تنش‌های وارد بر پی به آن محدود می‌گردد.

برای بررسی و کنترل پایداری سدهای وزنی بتن غلتکی، به طور معمول از روش «تحلیل تعادل حدی» استفاده می‌شود. در این روش، کل نیروهای پایدارساز که امکان بسیج آن وجود دارد (صرف نظر از تغییر مکان لازم برای آن) محاسبه شده و نسبت این نیروی پایدارساز به نیروهای ناپایدارکننده محاسبه می‌گردد. این نسبت اصطلاحا «ضریب اطمینان» نامیده می‌شود و بنابراین تعریف از بعد تئوریک، ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۱/۰ به معنی پایداری و ایستایی بدنه سد خواهد بود. با این وجود به منظور تامین حاشیه ایمنی مناسب و پوشش دادن خطاها و عدم قطعیت های ناشی از ناهمگنی توده سنگ پی، کاستی‌ها و نقایص اجرایی بتن بدنه سد، و نیز خطاها و عدم قطعیت های ناشی از پیش‌بینی احتمالاتی بارهای وارد بر بدنه سد و تقریب‌های روش‌های تحلیلی مورد استفاده، متناسب با سطح بارگذاری و شرایط محیطی، «ضرایب اطمینان حداقل مجاز» برای مکانیزم‌های مختلف ناپایداری تعریف می‌شوند.

با توجه به مبانی فوق، مراحل کنترل و ارزیابی پایداری بدنه سد و پی به شرح زیر می‌باشند:

الف- تعریف و تعیین هر یک از بارهای وارد بر بدنه سد و پی

ب- بررسی شرایط بهره‌برداری مختلف و تعیین ترکیب بارهای متناسب با آن شرایط

ج- تدوین روش تحلیل

د- تعیین ضرایب اطمینان حداقل مجاز برای مکانیزم‌های مختلف ناپایداری

از بین مراحل فوق، موارد «الف» و «ج» در بخش هفتم این راهنما به تفصیل ارائه شده‌اند و موارد «ب» و «د» که مرتبط با معیارهای ایمنی و پذیرش می‌باشند، در این فصل ارائه می‌گردند.

۶-۲-۱- ترکیب‌های بارگذاری برای تحلیل پایداری

متناسب با ماهیت و احتمال وقوع شرایط مختلف در طول عمر مفید سد، ترکیب‌های بارگذاری قابل تعریف برای یک سد به طور معمول به سه گروه «ترکیب‌های بارگذاری عادی»، «ترکیب‌های بارگذاری غیرعادی» و «ترکیب‌های بارگذاری فوق‌العاده» تقسیم می‌گردد. این گروه‌ها (یا حالت‌های) بارگذاری مبین شرایط بهره‌برداری زیر می‌باشند:

- حالت بارگذاری عادی: این حالت بارگذاری در برگیرنده کلیه بارهای اولیه‌ای است که سد همیشه با آن‌ها مواجه بوده و قاعدتا در طول عمر سد به دفعات به وقوع می‌پیوندند.
- حالت بارگذاری غیرعادی: این حالت بارگذاری در برگیرنده بارهایی است که سد به طور مداوم با آن‌ها مواجه نمی‌باشد. شرایط بارگذاری «دوره ساخت» و نیز بارهایی که به ندرت رخ می‌دهند (نظیر سیلاب‌ها و زلزله‌های کوچک و متوسط) در همین گروه قرار می‌گیرند.

- حالت بارگذاری فوق‌العاده: این حالت بارگذاری دربرگیرنده بارهایی است که احتمال رویداد آن‌ها بسیار کم است و جز در شرایط خاص احتمال وقوع آن‌ها وجود ندارد. رویدادهایی که بسیار تصادفی و نادر هستند، نظیر سیلاب‌های بسیار بزرگ و زلزله‌های شدید از جمله بارهای فوق‌العاده می‌باشند.

بر اساس تعاریف و دسته‌بندی‌های فوق، احتمال وقوع شرایط محیطی و حالت‌های بارگذاری متناسب با آن‌ها در جدول (۶-۱) ارائه شده است. ترکیب‌های بارگذاری متناظر با هریک از حالت‌های بارگذاری نیز در جدول (۶-۲) ارائه شده‌اند. درصورتی‌که منحنی تداوم مخزن (منحنی تغییرات تراز مخزن با درصد احتمال وقوع) قابل پیش‌بینی باشد، در ترکیب بارهای غیرعادی و فوق‌العاده دینامیکی (ترکیب بارهای ۵ و ۶) تراز مخزن را می‌توان متناظر با احتمال وقوع بار زلزله مورد نظر انتخاب نمود. در غیر این‌صورت، تراز نرمال مخزن در این ترکیب‌های بارگذاری باید در نظر گرفته شوند.

جدول ۶-۱- احتمال وقوع شرایط محیطی و حالت‌های بارگذاری متناسب با آن‌ها برای تحلیل‌های پایداری [۲۷]

حالت بارگذاری	احتمال وقوع سالیانه (p)	دوره بازگشت (t_r)
عادی	بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۱	کم‌تر یا مساوی ۱۰ سال
غیرعادی	بین ۰/۱ و ۰/۰۰۳۳	بین ۱۰ و ۳۰۰ سال
فوق‌العاده	کم‌تر از ۰/۰۰۳۳	بیش از ۳۰۰ سال

جدول ۶-۲- حالت‌های مختلف بارگذاری برای تحلیل‌های پایداری [۲۷]

شماره بارگذاری	حالت بارگذاری	شرح	وزن سد	فشار آب (مخزن)	فشار پایاب	فشار رسوب	فشار برکنش	زلزله
۱	غیرعادی	شرایط دوره ساخت	✓	---	---	---	---	---
۲	عادی	شرایط بهره‌برداری عادی	✓	تراز نرمال	✓	✓	✓	---
۳	غیرعادی	شرایط وقوع سیل پایه طراحی	✓	سیل پایه طراحی	✓	✓	✓	---
۴	فوق‌العاده	شرایط وقوع زلزله حداکثر محتمل در دوره ساخت	✓	---	---	---	---	زلزله پایه دوره بهره‌برداری (OBE)
۵	غیرعادی	شرایط وقوع زلزله‌های متوسط در دوره بهره‌برداری	✓	تراز متناظر با زمان وقوع	✓	✓	✓	زلزله پایه دوره بهره‌برداری (OBE)
۶	فوق‌العاده	شرایط وقوع زلزله شدید در دوره بهره‌برداری	✓	تراز متناظر با زمان وقوع	✓	✓	✓	زلزله حداکثر محتمل (MCE)
۷	فوق‌العاده	شرایط وقوع سیل حداکثر طراحی[۱]	✓	سیل حداکثر طراحی	✓	✓	✓	---

۱- سیل پایه طراحی و سیل حداکثر طراحی بایستی بر مبنای ضوابط انتخاب سیلاب طراحی سدهای بزرگ ایران (۳۷۸- الف) تعیین گردند.

۶-۲-۲- معیارهای پذیرش (ضرایب اطمینان) برای پایداری

در مراجع و استانداردهای معتبر جدید، سعی شده است با هدف بهینه شدن طراحی‌ها و در عین حال تضمین حاشیه اطمینان لازم، معیارهای پذیرش متناسب با اهمیت هدف و عملکرد سازه، ریسک خطر ناشی از انهدام یا گسیختگی سازه، و نیز سطح دقت داده‌های پایه ساختگاه و مصالح، تعریف گردند.

از بعد میزان اهمیت خطر ناشی از ایراد خسارت یا انهدام، سازه ها به طور معمول به دو گروه «سازه های بحرانی» و «سازه‌های معمولی» تقسیم می‌شوند. سازه‌هایی که انهدام یا گسیختگی آن‌ها به طور مستقیم یا غیر مستقیم خطر جدی برای زندگی افراد ایجاد می‌نماید، جزء گروه سازه های بحرانی رده‌بندی می‌شوند. بر اساس تعریف فوق، با توجه به اهمیت سدها و ریسک خطرات ناشی از انهدام و گسیختگی آن ها، سدها عموما در رده «سازه های بحرانی» قرار می‌گیرند. البته در موارد خاص، که سد با اهداف کوتاه مدت (و با ارتفاع و حجم مخزن کم) احداث شده و انهدام یا گسیختگی سد نیز ریسک خطر و خسارت محدودی ایجاد نماید (نظیر سدهای باطله)، می‌توان سد را در رده «سازه‌های معمولی» در نظر گرفت.

داده‌های ژئوتکنیکی پی، و پارامترهای مقاومتی بتن بدنه سد (جسم بتن و سطوح واریز بتن) برای انجام تحلیل‌های پایداری مورد نیاز می‌باشند. داده‌های ژئوتکنیکی پی شامل ساختار و موقعیت سطوح ضعیف و ناپیوستگی‌های توده سنگ، پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها و توده سنگ، میزان نفوذپذیری و نحوه بسیج فشار برکنش در توده سنگ و سطوح ضعیف پی می‌باشد. میزان شناخت و دقت برآورد این داده‌ها، وابسته به سطح مطالعات اکتشافی و آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام یافته و نیز سطح طراحی و مشخص بودن ملاحظات و تمهیدات اجرایی است. از این بعد، سه سطح زیر برای دقت داده‌های پایه مورد نیاز برای تحلیل‌های پایداری تعریف می‌گردد:

الف-داده‌های پایه با سطح دقت خوب: دستیابی به این سطح از دقت برای داده‌های پایه مستلزم در اختیار بودن سطح مناسب و کافی اطلاعات از توده سنگ پی، بتن بدنه سد (مصالح سازه)، و نیز نحوه و میزان ایجاد فشار برکنش در توده سنگ پی می‌باشد. با این سطح دقت داده‌های پایه باید موارد زیر برآورده گردد:

- عملکرد مناسب و ایمن سد در تمام مراحل ساخت و بهره‌برداری تحت اثر بارهای تجربه شده قابل اثبات باشد (در سدهای موجود).
- امکان برآورد منطقی و نسبتا دقیق مقاومت پی سد با اطمینان بالا وجود داشته باشد.
- بارگذاری حاکم و بحرانی وارد بر سد با سطح اطمینان بالا قابل تعیین باشد.
- میزان و توزیع فشار برکنش در شرایط مختلف بهره‌برداری قابل اندازه‌گیری و یا برآورد با دقت مناسب باشد.

با توجه به الزامات فوق، بدیهی است این سطح از دقت و اطمینان از داده‌های پایه در سدهای در دست مطالعه به ندرت محقق می‌گردد. در مطالعات ارزیابی پایداری و ایمنی سدهای موجود، با توجه به وجود سوابق اجرا و رکوردهای موجود از پایش عملکرد بدنه سد و پی، دستیابی به این سطح از دقت در داده‌های پایه مورد نیاز برای تحلیل‌های پایداری، امکان‌پذیرتر خواهد بود.

ب- **داده‌های پایه با سطح دقت معمولی:** در این سطح از دقت برای داده‌های پایه، الزامات ذیل باید تامین گردد:

- مطالعات اکتشافی و آزمایشگاهی کافی برای اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی توده سنگ پی انجام گردد.
- با توجه به نتایج مطالعات و آزمایش‌های انجام یافته، برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ پی با سطح اعتماد و اطمینان مناسب امکان‌پذیر باشد.
- سناریوهای ناپایداری و بارگذاری‌های حاکم با سطح اطمینان بالایی تعیین گردد.

ج- **داده‌های پایه با سطح دقت محدود:** این سطح از دقت داده‌های پایه معمولا در مطالعات مراحل اولیه مطالعات کاربرد داشته و در مطالعات تفصیلی طراحی سدها و مطالعات ارزیابی پایداری سدهای موجود، به خصوص برای سازه‌ها و سدهای بحرانی، اتکا به داده‌های پایه با این سطح از دقت، قابل پذیرش نمی‌باشد. در داده‌های پایه با سطح دقت محدود:

- پارامترهای مقاومتی توده سنگ پی و مصالح بدنه سد بر اساس عملیات اکتشافی محدود و ناکافی برآورد می‌گردد.
- به دلیل عدم وجود اطلاعات هیدرولوژی و هیدرولیکی کافی، برآورد بارهای وارد بر بدنه سد در ترکیب‌بارهای مختلف، به‌صورت تقریبی برآورد می‌گردد.

در ادامه مطلب، معیارهای پذیدش برای مکانیزم‌های ناپایداری مختلف، با توجه به رده اهمیت سازه و سطح دقت داده‌های پایه ارائه می‌گردد.

الف- حداقل ضرایب اطمینان مجاز در برابر لغزش

بر این اساس، حداقل ضرایب اطمینان لازم در برابر لغزش برای سدهای وزنی بتن غلتکی مطابق با سطح دقت داده‌های پایه برای حالت‌های مختلف بارگذاری در جدول (۶-۳) ارائه شده است [۲۷]. همان‌گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌گردد، با افزایش سطح دقت داده‌های پایه و متناسبا کاهش بخشی از عدم قطعیت ها، ضرایب اطمینان حداقل مجاز کاهش یافته‌اند.

شایان ذکر این که در شرایطی که شتاب‌های زلزله ساختگاه به‌صورت تقریبی و بدون مطالعات کامل برآورد شده باشد، ضرایب اطمینان حداقل مجاز متناظر با بارگذاری‌های دینامیکی غیرعادی و فوق‌العاده در سازه های بحرانی (ردیف دوم جدول ۶-۳) باید برابر ۱/۷ و ۱/۳ در نظر گرفته شوند.

جدول ۶-۳- حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز در مقابل لغزش در سازه‌های بحرانی و معمولی [۲۷]

سطح دقت داده‌های پایه	سازه‌های بحرانی			سازه‌های معمولی		
	عادی	غیرعادی	فوق‌العاده	عادی	غیرعادی	فوق‌العاده
خوب	۱/۷	۱/۳	۱/۱	۱/۴	۱/۲	۱/۱
معمولی	۲/۰	۱/۵	۱/۱	۱/۵	۱/۳	۱/۱
محدود	---	---	---	۳/۰	۲/۶	۲/۲

ب- حداقل ضرایب اطمینان مجاز در برابر شناوری

حداقل ضرایب اطمینان لازم در برابر شناوری برای سدهای وزنی بتن غلتکی برای حالت‌های مختلف بارگذاری در جدول (۶-۴) ارائه شده است [۲۷].

با توجه به عدم وابستگی تحلیل پایداری در برابر شناوری به داده‌های پایه ویژه ساختگاه، در این حالت ضرایب اطمینان وابسته به سطح دقت داده‌های پایه نمی‌باشند.

جدول ۶-۴- حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز در مقابل شناوری برای انواع سازه‌ها [۲۷]

سطح دقت داده‌های پایه	عادی	غیرعادی	فوق‌العاده
تمام سطوح	۱/۳	۱/۲	۱/۱

ج- معیار پذیرش در برابر واژگونی

معیار پذیرش برای پایداری در برابر واژگونی بر اساس موقعیت برآیند نیروها در صفحه‌ای که مستعد شکست است، تعریف می‌گردد. این معیار که برای انواع سازه‌ها و سطوح دقت مختلف داده‌های پایه در جدول (۶-۵) ارائه شده است، به طور غیرمستقیم طول قابل پذیرش جدایش در صفحه مستعد شکست را نیز بیان می‌دارد.

جدول ۶-۵- معیار پذیرش برای محل اثر برآیند نیروها در صفحه مستعد شکست (کنترل پایداری در برابر واژگونی) [۲۷]

سطح دقت داده‌های پایه	محل اثر برایند نیروها در سطح شکست		
	عادی	غیرعادی	فوق‌العاده
تمام سطوح	در $\frac{۱}{۳}$ میانی	در $\frac{۱}{۲}$ میانی	در داخل سطح

بر اساس این جدول، در شرایط بهره‌برداری عادی، محل اثر برایند نیروها باید در $\frac{۱}{۳}$ میانی صفحه مستعد شکست قرار گیرد؛ در این حالت کل سطح تماس در امتداد صفحه مستعد شکست در فشار باقی می‌ماند. تحت اثر بارگذاری غیرعادی، موقعیت محل اثر برایند نیروها به $\frac{۱}{۲}$ میانی صفحه مستعد شکست محدود شده است. بر این اساس، جدایش در سطح شکست حداکثر در ۲۵٪ طول این صفحه مجاز خواهد بود. در شرایط بارگذاری فوق‌العاده نیز صرفا ایستایی سازه مد نظر بوده و محدودیتی برای طول جدایش در صفحه شکست مطرح نمی‌باشد. البته با توجه به این‌که با کاهش سطح اتکای سازه، تنش وارد بر پی به طور مضاعف افزایش می‌یابد، کنترل ظرفیت باربری پی به‌عنوان یک عامل محدود کننده طول جدایش در سطح شکست خواهد بود.

در شرایط وقوع جدایش در سطح شکست، فشار برکنش در این محدوده تقریبا معادل فشار هیدرواستاتیک متناظر مخزن بوده و در محدوده وقوع جدایش، چسبندگی سطح شکست نیز از بین خواهد رفت. بنابراین، وقوع جدایش در سطح شکست سبب کاهش حاشیه اطمینان سازه در برابر لغزش شده و این موضوع در فرایند کنترل پایداری سازه در برابر لغزش باید در نظر گرفته شود.

ج- معیار پذیرش برای ظرفیت باربری پی

ظرفیت باربری مجاز پی که توسط کارشناسان ژئوتکنیک برآورد می‌گردد مبنای ارزیابی کفایت طراحی از این بعد می‌باشد. در واقع ظرفیت باربری مجاز برابر حداکثر تنشی است که پی با اعمال ضرایب اطمینان مقتضی می‌تواند در محدوده جابه‌جایی‌های مجاز و بدون آسیب دیدن (یا گسیختگی) تحمل نماید. ظرفیت باربری مجاز تابع عوامل متعددی از جمله تراکم‌پذیری نسبی مصالح پی، شرایط بارگذاری، هندسه سطح تماس سازه و ... می‌باشد. در شرایط بهره‌برداری و بارگذاری عادی، حداکثر تنش وارد بر پی به ظرفیت باربری مجاز محدود می‌گردد. تحت اثر بارگذاری غیرعادی، حداکثر تنش فشاری وارد بر پی تا ۱۵٪ بیش از ظرفیت باربری؛ و در شرایط بارگذاری فوق‌العاده، حداکثر تنش فشاری وارد بر پی تا ۵۰٪ بیش از ظرفیت باربری مجاز خواهد بود [۲۷].

۶-۳- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های حرارتی بدنه سد

تنش‌های حرارتی در سدهای بتنی (بتن حجیم) در اثر فرایند انتقال و تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف برای آزادسازی حرارت ناشی از واکنش هیدراتاسیون سیمان در بتن، ایجاد می‌شوند. حرارت ناشی از واکنش سیمان در سنین اولیه، زمانی که بتن هنوز حالت خمیری داشته و به‌تدریج سختی خود را به‌دست می‌آورد، در جسم بتن ایجاد می‌گردد. این حرارت اضافی، منجر به افزایش دما و انبساط بتن در سنین اولیه و در نتیجه ایجاد تنش‌های فشاری در بتن می‌گردد (میزان این تنش فشاری با توجه به سختی کم بتن در این زمان نسبتا کوچک می‌باشد).

پس از تحقق بخش عمده واکنش هیدراتاسیون و افزایش دمای جسم بتن در اثر تولید حرارت اضافی، یک گرادیان حرارتی بین جسم بتن و محیط اطراف ایجاد شده و نتیجتا تبادل حرارتی بتن با محیط برای آزادسازی حرارت اضافی و دستیابی به یک تعادل حرارتی بین جسم بتن و محیط اطراف آن آغاز می‌گردد. در این دوره، به دلیل روند ناهمسان و غیریکنواخت کاهش دمای اضافی در جسم بتن، سخت شدن نسبی بتن، و گیرداری‌های ایجاد شده در مرزهای اتکایی بتن، تنش‌های کششی غیریکنواختی در بخش‌های مختلف بتن ایجاد می‌گردد که می‌توانند منجر به وقوع ترک در بتن گردند.

مکانیزم‌های ایجاد ترک در فرایند سرد شدن (انقباض) بتن را به دو دسته می‌توان تقسیم نمود: مکانیزم ایجاد ترک در سطوح (رویه‌های) بتن، و مکانیزم ایجاد ترک در حجم بتن (ترک‌های حجمی). در فرایند سرد شدن بتن، به دلیل تبادل حرارتی سریع رویه‌های بتن با محیط اطراف، دمای بتن مجاور رویه‌ها بسرعت کاهش یافته و بتن در این نواحی تمایل به انقباض دارد در حالی که بخش داخلی بتن هنوز گرم و منبسط یافته می‌باشد. در این شرایط، یک شبکه ترک‌های کششی متعامد با راستاهای عمود بر رویه بتن در محدوده بتن خنک شده سطحی رخ می‌دهند. این مکانیزم، اصطلاحا گیرداری داخلی بتن (Internal Restraint) نامیده می‌شود و ترک‌های ناشی از آن، ترک‌های حرارتی سطحی نامیده می‌شوند. عمق نفوذ ترک‌های حرارتی سطحی در جسم بتن، با توجه به کاهش شتاب تبادل

حرارتی بتن با فاصله گرفتن از سطوح رویه، نسبتا محدود می‌باشد. مکانیزم ایجاد ترک‌های حرارتی سطحی در اثر تبادل حرارتی سریع بتن مجاور رویه‌ها (مکانیزم گیرداری داخلی بتن) به‌صورت شماتیک در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.

با آزاد شدن تدریجی حرارت اضافی و کاهش دمای بتن، جسم بتن به طور کلی تمایل به کاهش حجم و انقباض می‌یابد. در این فرایند، به دلیل گیرداری بتن در مرزهای اتکایی آن، امکان جمع‌شدن بتن (و لغزش در سطح اتکای بتن) کاملا محدود بوده و این شرایط منجر به ایجاد و توسعه تنش‌های کششی حرارتی در بتن مجاور سطوح اتکایی و نیز در بخش‌های مرکزی بتن می‌گردد. با افزایش این تنش‌های کششی، ترک‌های حرارتی در مجاورت سطوح اتکایی بتن ایجاد شده و با توجه به توزیع تنش‌های کششی، این ترک‌ها دارای گستردگی و عمق نفوذ نسبتا زیاد در جسم بتن می‌باشند.

با توجه به گستردگی و عمیق بودن این نوع ترک‌ها، به آن‌ها ترک‌های حرارتی حجمی اطلاق شده و مکانیزم ایجاد آن‌ها با عنوان مکانیزم گیرداری خارجی (External Restraint) نامیده می‌شود. مکانیزم ایجاد ترک‌های حرارتی حجمی در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری و مقاومت در برابر حرکت (انقباض) بتن در مجاور سطوح اتکایی (مکانیزم گیرداری خارجی) به‌صورت شماتیک در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.

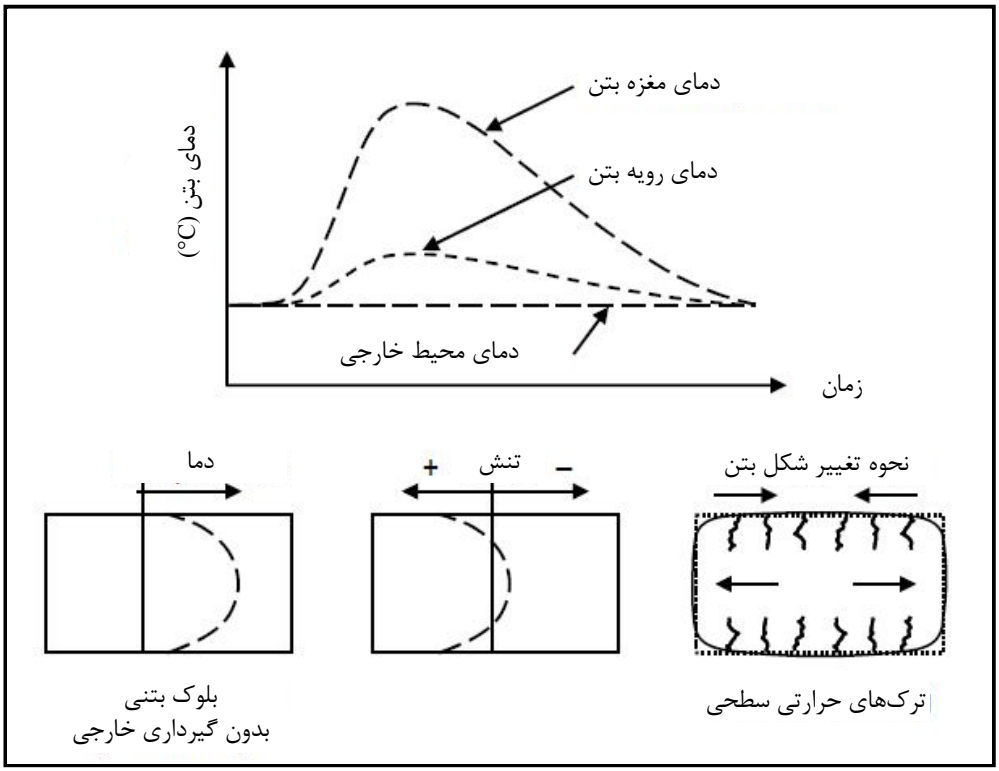
از آنجا که در سدهای بتنی حفظ یکپارچگی بتن یک معیار اساسی و تعیین‌کننده برای تامین عملکرد مناسب سازه‌ای و دوام بدنه سد می‌باشد، کنترل تنش‌های کششی حرارتی و جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی در دوره ساخت به طور ویژه در طراحی مد نظر می‌باشد. برای این منظور در سدهای بتنی (وزنی و قوسی) متعارف، علاوه بر کنترل تبادل حرارتی سریع در سطوح بتن، با استفاده از تمهیدات پیش‌سرمایش سنگ‌دانه‌ها و آب بتن (Pre-Cooling)، و سیستم پس‌سرمایش بتن (Post-Cooling)، افزایش دمای بتن تازه حتی‌الامکان کنترل شده و حرارت ناشی از هیدراتاسیون نیز به طور یکنواخت در حجم بتن در سنین اولیه آزاد گردد.

با توجه به کاهش میزان سیمان در سدهای بتن غلتکی، میزان حرارت‌زایی در بتن در اثر واکنش هیدراتاسیون کاهش یافته و پتانسیل ایجاد ترک‌های حرارتی کاهش می‌یابد، ولی از سوی دیگر با توجه به حذف سیستم پس‌سرمایش، ریسک وقوع ترک‌های حرارتی در بتن افزایش خواهد یافت. همچنین سرعت اجرا (کاهش فاصله زمانی بین لیفتهای متوالی)، تمهیدات حین اجرا، نوع سنگ‌دانه‌های مورد استفاده، و ... از عوامل تاثیرگذار بر فرایند تولید حرارت و تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف می‌باشند. بر این اساس کنترل ترک‌های حرارتی در سدهای بتن غلتکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌گردد.

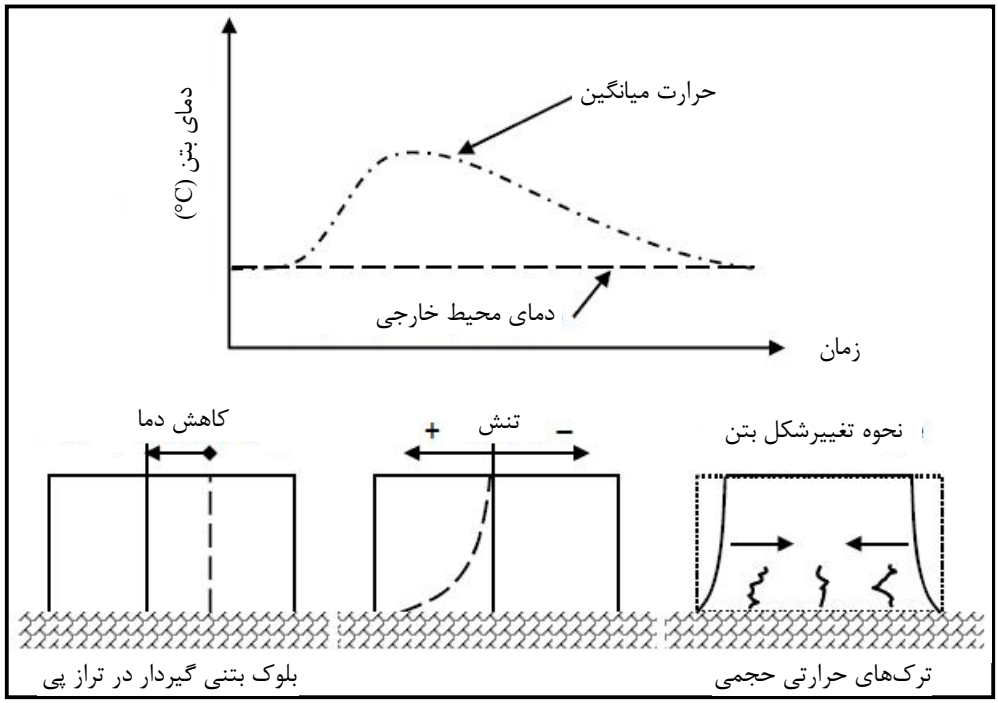
تحلیل‌های حرارتی در دوره ساخت عموما بر مبنای تحلیل و محاسبه کرنش کششی ایجاد شده در اثر تغییرات دمای بتن در سنین اولیه انجام پذیرفته و معیار پذیرش نتایج تحلیل‌های حرارتی، مقایسه کرنش کششی ایجاد شده در بتن با ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی می‌باشد (جزییات روش‌های تحلیل‌های حرارتی در فصل هشتم ارائه شده است).

با توجه به طیف گسترده عوامل تاثیرگذار بر ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی (که در فصل ۴ این راهنما به آن‌ها اشاره شده است) و نیز با توجه به اهمیت تعیین کننده این پارامتر در تحلیل‌های حرارتی، در مرحله طراحی تفصیلی

پروژه‌ها، انجام آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین ظرفیت کرنش کششی تحت اثر بارگذاری‌های سریع و تدریجی برای پروژه مورد نظر با لحاظ کردن همه مبانی و ملاحظات طراحی و اجرایی اکیدا توصیه می‌گردد.



شکل ۶-۱- مکانیزم ترک‌خوردگی سطحی بتن در اثر تبادل حرارتی سریع بتن رویه با محیط اطراف (مکانیزم گیرداری داخلی)



شکل ۶-۲- مکانیزم ترک‌خوردگی حجمی بتن در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری بتن در مجاور سطوح اتکایی (مکانیزم گیرداری خارجی)

در مراحل اولیه مطالعات که نتایج آزمایش خاص پروژه مورد نظر وجود نداشته باشد، بسته به شرایط، ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی تحت بارگذاری تدریجی را بر مبنای مقادیر توصیه شده در مراجع معتبر می‌توان در حدود ۹۰ تا ۱۵۰ میکروکرنش ($1\times10^{-6}\,mm/mm$) در نظر گرفت [۱۶].

بر اساس نتایج تحلیل‌های حرارتی، درصورتی‌که کرنش کششی ایجاد شده در بتن از ظرفیت کرنش کششی بتن فراتر رود، تعبیه درز یا درزهای انقباضی افقی در مقطع مورد نظر ضرورت یافته و فرض می‌گردد بخشی از کرنش‌های کششی حرارتی با بازشدگی در درزهای انقباضی مستهلک می‌گردد. نکته کلیدی در طراحی و جانمایی درزهای انقباضی، فرض میزان بازشدگی این درزها می‌باشد که وابسته به عوامل متعددی از جمله میزان سختی و مقاومت بتن غلتکی، سختی پی، تمهیدات اجرایی در سطوح درز و ... دارد.

ارزیابی و تحلیل همه عوامل موثر در این خصوص و دستیابی به یک تخمین کمّی منطقی برای بازشدگی درزهای انقباضی به سادگی میسر نبوده و علاوه بر این با توجه به ماهیت اثرات حرارتی، میزان بازشدگی همه درزهای انقباضی در یک سد یکسان نخواهد بود. در تحلیل‌های حرارتی، بر اساس توصیه‌های ACI، میزان بازشدگی محتمل در درزهای انقباضی در حدود ۲ تا ۵ میلی‌متر فرض شده و بر مبنای آن فواصل درزهای انقباضی محاسبه و طراحی می‌گردد.

صرف‌نظر از مطالعات تحلیلی متعارف فوق برای کنترل ترک‌های حرارتی بتن در دوره ساخت که مبتنی بر یک سری فرضیات ساده کننده می‌باشند، Hansen و Forbes نتایج مشاهده‌ها و بررسی‌های انجام یافته خود بر روی تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی را در قالب ۱۰ مشاهده غالب و نیز ۱۰ توصیه برتر ارائه نموده‌اند که با توجه به اهمیت و عمومیت این نتایج، مشاهده‌ها و توصیه‌های فوق در ادامه این بخش از راهنما ارائه شده است.

۶-۳-۱- مشاهدات و نتایج غالب در خصوص ترک‌های حرارتی

۱- اکثر ترک‌های حرارتی دارای امتداد قائم بوده و در کل مقطع بدنه سد (در راستای بالادست - پایین‌دست) گسترش می‌یابند. بازشدگی برخی از ترک‌های حرارتی به اندازه‌ای است که می‌توانند مجرای عبور و نشت آب نیز باشند. در سدهای وزنی بتن غلتکی، با توجه به رفتار غالب دو بعدی بدنه سد، وجود ترک‌های حرارتی قائم تهدیدی برای پایداری و ایستایی بدنه سد محسوب نمی‌شوند.

۲- ترک‌ها در سدهای وزنی بتن غلتکی به طور معمول صرفا بخاطر تنش‌های کششی ناشی از حرارت رخ نمی‌دهند. در اغلب موارد، عواملی نظیر حرکات پی ناشی از فشار آب، نشست‌های نامساوی ناشی از پی غیرسنگی یا ضعیف، و همچنین کرنش‌های ناشی از جمع‌شدگی بتن (در اثر از دست دادن آب)، نیز در ایجاد ترک در بدنه سد موثر و دخیل می‌باشند.

۳- همه ترک‌های حرارتی عرضی در یک زمان رخ نمی‌دهند، و بازشدگی همه ترک‌های حرارتی (یا درزهای انقباضی) نیز یکسان نمی‌باشد. در غالب روش‌های تحلیلی، بازشدگی همه ترک‌های حرارتی (یا درزهای انقباضی) یکسان فرض می‌گردند، در حالی که بر اساس مشاهدات انجام یافته، نسبت بازشدگی حداکثر به

بازشدگی حداقل ترک‌های حرارتی در یک مقطع به ۴ و بیش‌تر نیز می‌رسد. ترک‌های حرارتی که زودتر رخ می‌دهند، بازشدگی بیش‌تری نیز دارند.

۴- در غالب موارد، دلیل افزایش توسعه تنش‌های حرارتی در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده در تحلیل‌های حرارتی و وقوع ترک‌های حرارتی جدید، تاخیر در فرایند اجرا و در نتیجه اجرای بتن غلتکی در ماه‌های گرم سال و شرایط دمایی نامناسب محیطی بوده است.

۵- با افزایش ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی و ایجاد شرایطی که پتانسیل میزان بازشدگی درزهای انقباضی (یا ترک‌های حرارتی) افزایش یابد، از یک سو تعداد درزهای انقباضی لازم کاهش یافته و از نظر اجرایی شرایط مطلوب‌تری حاصل می‌گردد ولی از سوی دیگر ریسک جریان و نشت آب از طریق این درزهای انقباضی افزایش می‌یابد.

۶- ترک‌های حرارتی محتمل در بدنه سد معمولا در صفحات با سطح مقطع کاهش یافته و یا صفحات عبوری از نواحی تمرکز تنش، نظیر موارد زیر، رخ می‌دهند:

- در مقطع ادیت دسترسی به گالری بدنه سد
- در مقاطع عبوری از سرریز (لبه‌های انتهایی یا مقطع میانی سرریز)
- در مقاطع کناری سد که اثر گیرداری (خارجی) پی سد در مقایسه با ارتفاع و ضخامت مقطع سد افزایش می‌یابد.
- در مقاطع عبوری از بیرون‌زدگی‌های توده سنگ پی به داخل بدنه سد
- در مقاطع عبوری از مجاری آب داخل بدنه سد
- در مقاطع مجاور شکست محور سد

۷- ترمیم ترک‌های حرارتی با بازشدگی زیاد نسبتا پر هزینه می‌باشد، به خصوص در شرایطی که امکان تخلیه کامل مخزن برای انجام عملیات ترمیم میسر نگردد.

۸- مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین روش برای کاهش دمای ریختن بتن غلتکی، استفاده از آب سرد یا مقدار معینی یخ در آب اختلاط بتن می‌باشد. سایر تکنیک‌ها نظیر استفاده از نیتروژن مایع برای کاهش دمای بتن غلتکی نسبتا پر هزینه بوده و سرمایش مطلوبی در مقایسه با هزینه آن در بتن حاصل نمی‌گردد.

۹- ترک‌های حرارتی سطحی ناشی از گرادیان حرارتی سطحی در رویه بتن (در اثر سرمایش سریع سطح رویه آزاد بتن – اثر گیرداری داخلی) عمق نفوذ نسبتا کمی در بتن دارند. با این حال، در صورت ایجاد مکانیزم جدید ترک‌خوردگی در بتن (در اثر سایر عوامل)، پتانسیل گسترش ترک‌های حرارتی سطحی موجود بسیار محتمل‌تر از ایجاد یک ترک جدید می‌باشد.

۱۰-با انجام تحلیل‌های حرارتی پیشرفته و تفصیلی با لحاظ نمودن فرایند اجرای لایه به لایه بتن غلتکی، می‌توان روند توسعه و تغییرات دما را در نواحی مختلف بتن غلتکی به طور نسبتا دقیق پیش‌بینی نمود. با این حال، پیش‌بینی موقعیت ترک (یا ترک‌های) حرارتی بر اساس نتایج این تحلیل‌ها، از دقت و اعتبار کمی برخوردار می‌باشد.

۶-۳-۲- توصیه‌های مهم برای کنترل ترک‌های حرارتی

۱- برای کنترل مطلوب ترک‌های حرارتی در سدهای وزنی بتن غلتکی، استفاده از تمهیدات پیش‌سرمایش بتن و نیز تعبیه درزهای انقباضی عرضی ضروری می‌باشد. تولید مصالح سنگ‌دانه‌ای بتن در فصل زمستان، و محدود کردن زمان اجرای بتن غلتکی به ساعات خنک در شبانه‌روز (شب‌ها و ساعات آغازین و انتهایی روز) و نیز به فصول سرد سال، موثرترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های کنترل ترک‌های حرارتی می‌باشند. بدیهی است میزان اعمال این تمهیدات باید با توجه به چارچوب برنامه زمان‌بندی اجرایی پروژه تعیین گردد.

۲- در تعیین حداکثر دمای ریختن بتن غلتکی، باید به دمای متوسط سالیانه ساختگاه سد، نوع و اهمیت کاربری و اهداف سد، و نیز نرخ تغییر هزینه‌های سرمایش اضافی بتن توجه گردد.

۳- به‌منظور ایجاد انعطاف و سرعت بیش‌تر در عملیات اجرای بتن غلتکی، به‌جای تعیین یک دمای حداکثر برای ریختن بتن، می‌توان یک دمای حداکثر برای متوسط دمای ریختن بتن غلتکی در بازه ۱ یا ۳ روزه در نظر گرفت. بر این اساس، در زمان‌های کوتاهی در طول روز اجرای بتن غلتکی با دمایی فراتر از دمای متوسط حداکثر، مجاز خواهد بود. با این رویکرد، تهیه و برنامه‌ریزی بهینه امکانات و روش‌های پیش‌سرمایش، با لحاظ نمودن هزینه‌های اجرایی و بدون افزایش ریسک ترک‌خوردن بتن میسر می‌گردد.

۴- تمهیدات پیش‌سرمایش، به خصوص برای سرمایش مصالح سنگ‌دانه‌ای بتن، باید برای بدترین سناریوی شرایط دمایی و محیطی ساختگاه طراحی و پیش‌بینی گردد. در غیر این‌صورت، در شرایطی که نیاز به سرمایش اضافی به هر دلیل در فرایند اجرا ضرورت یابد، انجام این سرمایش اضافی از روش‌های مناسب و کم‌هزینه میسر نخواهد بود.

۵- درزهای انقباضی باید به نحوی اجرا شوند که به‌منزله صفحات ضعیف در بدنه سد عمل نمایند. این درزها باید مجهز به نوار آب‌بند و سیستم زهکشی باشند و روش نصب و اجرای این تمهیدات باید حتی‌الامکان ساده بوده و کم‌ترین تاثیر را بر روند اجرای بتن غلتکی داشته باشد. در فرایند نصب نوارهای آب‌بند در درزهای انقباضی توجه و دقت زیادی باید مبذول گردد چرا که موارد متعددی در انواع مختلف سدهای بتنی مشاهده شده است که نصب نامناسب نوار آب‌بند منجر به نشت متمرکز آب از محل درز شده و ترمیم آن‌ها مستلزم هزینه‌های قابل توجه بوده است.

۶- جانمایی درزهای انقباضی باید با توجه به نقاط ضعف و مستعد برای ترک‌خوردگی در بدنه سد (شامل موارد ذکر شده در مشاهده شماره ۶) انجام پذیرد و هیچ ضرورتی به جانمایی درزها در فواصل مساوی نمی‌باشد.

۷- در مواردی که از بتن متعارف در رویه‌های سد استفاده می‌شود، درزهای انقباضی باید در بتن متعارف رویه‌های بالادست و پایین‌دست نیز به‌منظور کنترل ترک‌های حرارتی سطحی، امتداد یابند.

۸- در صورت استفاده از بتن متعارف در رویه‌های سد، علاوه بر درزهای انقباضی بدنه سد، باید یک سری درزهای آب‌بند شده (با نوار آب‌بند یا تمهیدات دیگر) با فواصل حدود ۳/۵ تا ۵ متر (فواصل محتمل ترک‌های حرارتی سطحی) برای کنترل ترک‌های حرارتی و نشت آب از بتن متعارف رویه طراحی و اجرا گردند.

۹- تعبیه درزهای انقباضی به‌صورت موضعی در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست توصیه نمی‌شود. فلسفه این تکنیک مبتنی بر این ایده است که با ایجاد نقاط ضعف موضعی در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست، ترک حرارتی دقیقا در امتداد و موقعیت همین درز انقباضی موضعی رخ داده و موجب گسترش اتوماتیک و تکمیل درز انقباضی خواهد شد. مزیت این تکنیک، صرفه‌جویی اقتصادی آن می‌باشد. اما نتایج مشاهدات نشان داده است که ترک حرارتی که از لبه انتهایی درز در بالادست (یا پایین‌دست) شروع می‌شود الزاما به امتداد درز انقباضی در رویه مقابل منتهی نمی‌گردد (برای نمونه در سد Salto Caxias). این شرایط منجر به نشت کنترل نشده آب و تضعیف یکپارچگی بدنه سد می‌گردد. از سوی دیگر، تجربه نشان داده است برای تسریع عملیات اجرایی در موارد خاص می‌توان درزهای انقباضی را «یک لیفت در میان» اجرا نمود.

۱۰-در مقایسه با سیمان‌های قدیمی، سیمان‌های تولیدی جدید به دلیل ریزدانه‌تر بودن حرارت اولیه بیش‌تری تولید می‌کنند و از سوی دیگر به دلیل استفاده توام از سیمان و پوزولان (یا سیمان پوزولانی)، پیک حرارت‌زایی سیمان در بتن کاملا بعد از سن ۲۸ روز خواهد بود. با توجه به این شرایط استفاده از گراف‌های حرارت‌زایی آدیاباتیک سیمان‌های متعارف قدیمی، منجر به ایجاد خطا در نتایج تحلیل‌های حرارتی شده و توصیه نمی‌گردد.

۶-۴- معیارهای ایمنی و پذیرش نتایج تحلیل‌های تنش بدنه سد

بارهای وارد بر سدهای وزنی بتن غلتکی عموما مشابه با بارهای شناخته شده وارد بر سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشند با این تفاوت که اختلاف ویژگی‌های ماهوی بتن غلتکی با بتن معمولی در تعیین برخی از بارها، نظیر فشارهای برکنش و فشارهای منفذی (تراوش) در داخل حجم بتن، باید لحاظ گردد. بارهای وارد بر بدنه سد را به طور کلی می‌توان به بارهای استاتیکی و دینامیکی دسته‌بندی نمود که عمده این بارها شامل موارد زیر می‌گردد:

الف- بارهای استاتیکی

- بار مرده (وزن بتن بدنه سد)
- فشار خارجی آب (شامل فشار سراب، فشار پایاب، و وزن آب)
- فشار داخلی آب (فشار برکنش)
- فشار رسوب و فشار خاک
- فشار یخ (فقط در اقلیم‌های خیلی سرد)
- بارهای حرارتی
- بارهای ناشی از جریان (در مقاطع سرریز شونده)

ب- بارهای دینامیکی (در سطوح مختلف زلزله)

- نیروی اینرسی وارد بر جرم بدنه سد

- فشار هیدرودینامیک ناشی از مخزن و پایاب
- فشار دینامیکی خاکریزها و رسوبات انباشته شده در مجاورت بدنه سد

جزییات و ملاحظات مربوط به محاسبه و نحوه تعیین بارهای فوق و نیز جزییات فرایند تهیه مدل تحلیلی بدنه سد و توده سنگ پی و انجام تحلیل‌های تنش در فصل نهم این راهنما ارائه شده‌اند.

ترکیب بارهای وارد بر سازه با توجه به شرایط مختلف بهره‌برداری به‌گونه‌ای تعریف می‌گردند که در برگیرنده همه حالات بارگذاری محتمل بر سازه در دوره بهره‌برداری باشند. علاوه بر این درصد احتمال وقوع هر ترکیب‌بار نیز باید با مطالعه و بررسی‌های لازم تعیین گردد تا امکان دسته‌بندی بارگذاری‌ها از این بعد و استقرار معیارهای ایمنی و پذیرش بر مبنای آن فراهم گردد. با توجه به این مبانی، بر اساس توصیه‌های مراجع موجود، ترکیب بارهای استاتیکی و دینامیکی مطابق با جدول (۶-۶) تعیین شده و با توجه به پتانسیل وقوع شرایط محیطی مختلف، این ترکیب‌بارها در رده‌های عادی، غیرعادی، و فوق‌العاده، تقسیم‌بندی شده‌اند.

در ادامه مطالب این بخش، در ابتدا بر پایه سطح ایمنی مورد نظر، عملکرد مطلوب و قابل پذیرش بدنه سد در شرایط محیطی مختلف تشریح می‌گردد. سپس به ماهیت رفتار بتن بدنه سد در ارتباط با شاخص‌های تعریف شده در تعیین عملکرد مطلوب به طور مختصر اشاره شده و نهایتا ضوابط و معیارهای پذیرش و ایمنی به‌صورت قابل کاربرد در طراحی ارائه می‌گردد. با توجه به این که مکانیزم غالب خرابی و خسارت در سدهای بتن غلتکی، ترک‌خوردن بدنه سد (در جسم بتن و یا در محل درزهای اجرایی افقی) می‌باشد، سطح عملکرد قابل پذیرش در شرایط مختلف عمدتا بر پایه میزان و گسترش وقوع ترک در بتن بدنه سد تعریف می‌گردد.

جدول ۶-۶- ترکیب بارهای استاتیکی و دینامیکی برای تحلیل تنش بدنه سد [۱۹ و ۲۸]

ترکیب‌های بار			بار مرده	فشارهای خارجی آب			فشار برکنش[1]	فشار خاک و رسوب	بار زلزله	
				نرمال	حداقل	سیل حداکثر			OBE	MCE
استاتیکی	عادی	۱	×	×			×	×		
		۲	×		×		×	×		
	غیرعادی	۳	×							
	فوق‌العاده	۴	×			×	×	×		
		۵	×	×			×[2]	×		
دینامیکی	غیرعادی [3]	۶	×	×			×	×	×	
		۷	×		×		×	×	×	
	فوق‌العاده [3]	۸	×						×	
		۹	×	×			×	×		×
		۱۰	×		×		×	×		×

۱- فشار برکنش در سراب و پایاب معادل ترازهای آب متناظر می‌باشد. در تعیین توزیع فشار برکنش، وضعیت تنش در سطح تماس بدنه سد و پی در محدوده سراب باید لحاظ گردد.

۲- در ترکیب‌بار استاتیکی فوق‌العاده شماره ۵، فشار برکنش متناظر با انهدام و عدم کارکرد پرده‌های تزریق و زهکشی باید در نظر گرفته شود.

۳- درصورتی‌که اختلاف تراز نرمال و حداقل کم باشد از ترکیب‌بارهای شماره ۷ و ۱۰ می‌توان صرف‌نظر کرد.

۶-۴-۱- سطح عملکرد قابل پذیرش

سطح عملکرد قابل پذیرش در برابر شرایط محیطی مختلف در دوره بهره‌برداری به تفکیک شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به شرح زیر تعیین می‌گردد:

- **شرایط محیطی عادی (ترکیب‌بارهای استاتیکی عادی)**: در این شرایط بدنه سد باید عاری از هر گونه ترک و کاملا منسجم و یکپارچه باشد.
- **شرایط محیطی غیرعادی (ترکیب‌بارهای استاتیکی غیرعادی)**: در شرایط محیطی غیرعادی، قابلیت بهره‌برداری از سد باید بدون هیچ خللی حفظ شده و در بدترین حالت، بدنه سد صرفا تا آستانه شروع ریزترک‌ها در بتن تحت تنش قرار گیرد.
- **شرایط محیطی بحرانی (ترکیب‌بارهای استاتیکی فوق‌العاده)**: در شرایط محیطی بحرانی استاتیکی نیز باید قابلیت بهره‌برداری از سد حفظ شده و در این شرایط در بدترین حالت وقوع ریزترک‌ها در نواحی تمرکز تنش در بدنه سد مجاز می‌باشد.
- **شرایط دینامیکی غیرعادی (ترکیب‌بارهای دینامیکی غیرعادی)**: در این شرایط وقوع ریزترک‌ها در بدنه سد مجاز بوده و در عین حال سطح آسیب‌های وارد بر بدنه سد می‌بایست به‌نحوی محدود گردد که قابلیت بهره‌برداری بدنه سد با اخلال مواجه نگردد.
- **شرایط دینامیکی بحرانی (ترکیب‌بارهای دینامیکی فوق‌العاده)**: در شرایط وقوع زلزله حداکثر محتمل پایداری کلی بدنه سد باید حفظ شود به نحوی که تعمیر آسیب‌های وارد بر بدنه سد امکان‌پذیر بوده و همچنین آسیب‌های وارد بر تاسیسات و سازه‌های پایین‌دست سد در اثر رهاسازی آب مخزن محدود باشد. در این حالت، وقوع ترک و پتانسیل رفتار غیرخطی در بدنه سد مجاز می‌باشد به شرط این‌که در شرایط پس از وقوع زلزله امکان تخلیه کنترل شده آب مخزن تا حدی که برای عملیات ترمیم و بازسازی خسارات وارده لازم است، وجود داشته باشد.

۶-۴-۲- شاخص‌های رفتاری بتن غلتکی

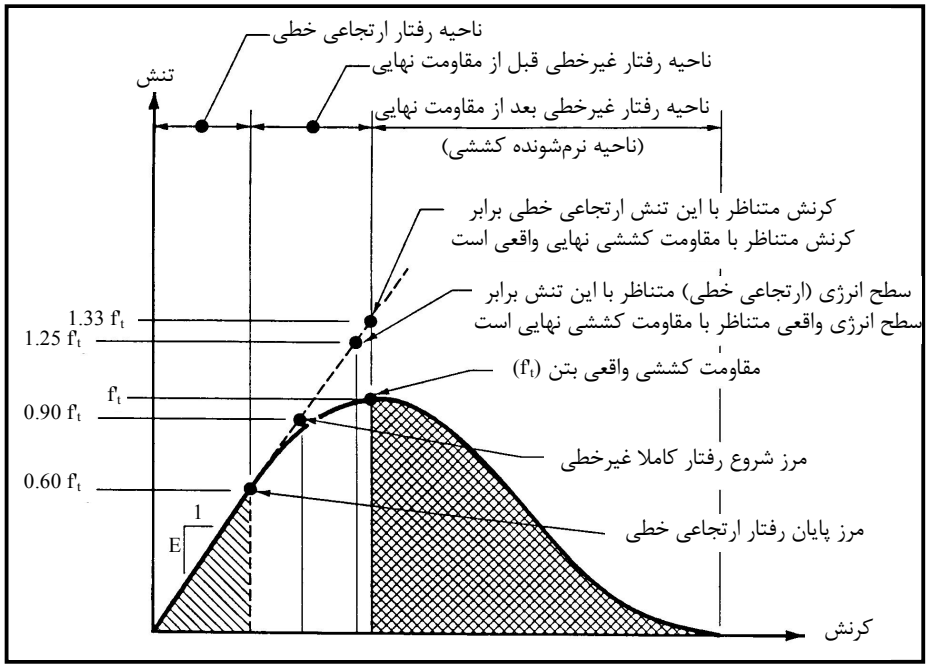
پارامترهای مقاومتی بتن غلتکی و درزهای اجرایی افقی بدنه سد به تفصیل در فصل ۴ این راهنما ارائه شده است. در اینجا صرفا به طور مختصر به شاخص‌های رفتاری مهم بتن از بعد معیارهای ایمنی و پذیرش اشاره می‌گردد. در تعیین معیارهای پذیرش بر اساس سطح عملکرد مطلوب تعریف شده، با توجه به ظرفیت تحمل کششی نسبتا کم‌تر بتن غلتکی، عموما مقاومت کششی بتن غلتکی بر اساس آزمایش کشش مستقیم (Direct Tensile Strength, f'_t) ملاک قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به این‌که در غالب موارد تحلیل‌های تنش بدنه سد با استفاده از روش تحلیل خطی ارتجاعی انجام می‌یابد، در بررسی رفتار بتن به پارامترهای مقاومتی متناظر با رفتار خطی بتن (با مدول الاستیسیته ثابت) نیز بررسی می‌گردد.

در شکل (۶-۳)، منحنی رفتاری واقعی بتن غلتکی در کشش و همچنین منحنی رفتار خطی بتن که در تحلیل‌های خطی در نظر گرفته می‌شود، ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، با فرض رفتار خطی برای بتن، در سطوح کرنشی که رفتار واقعی بتن به تدریج غیرخطی می‌شود، میزان تنش کششی محاسباتی در تحلیل‌های

خطی بیش‌تر از مقدار تنش کششی واقعی خواهد بود. بر همین اساس، در تحلیل‌های خطی می‌توان سطح تنش کششی مجاز را متناسب با سطح عملکرد مورد نظر، بیش‌تر از مقادیر مقاومت کششی واقعی بتن در نظر گرفت.

نقاط کلیدی در منحنی رفتاری بتن غلتکی در کشش از بعد پتانسیل رفتار غیرخطی، مطابق شکل (۶-۳)، به شرح زیر می‌باشند (مقاومت کششی واقعی بتن با f'_t و تنش کششی متناظر با حالات رفتاری مختلف بتن با f_t نمایش داده شده‌اند):

- نقطه $f_t = 0.6f'_t$: این سطح تنش متناظر با حد نهایی رفتار کاملا خطی و الاستیک بتن در کشش می‌باشد.
- نقطه $f_t = 0.9f'_t$: تا این سطح تنش، منحنی رفتار واقعی بتن اختلاف ناچیزی با منحنی رفتار خطی داشته و درصورتی‌که تنش‌های ایجاد شده در سازه در تحلیل‌های خطی کم‌تر از این مقدار باشند، می‌توان رفتار غالب سازه را خطی و الاستیک (و عاری از ترک) در نظر گرفت. این سطح تنش مرز وقوع ریزترک‌ها در بتن می‌باشد.
- نقطه $f_t = 1.25f'_t$: در این تنش، سطح زیر منحنی تنش-کرنش در منحنی رفتار خطی تقریبا مساوی با سطح زیر منحنی واقعی تنش-کرنش بتن تا تنش کششی حداکثر، می‌باشد. بر این اساس، انرژی جذب شده در این سطح تنش در تحلیل‌های خطی مساوی با مقدار واقعی انرژی قابل جذب توسط بتن تا مرز مقاومت کششی حداکثر واقعی بتن می‌باشد. این سطح تنش حد نهایی وقوع ریزترک‌ها در بتن بوده و متناظر با مرز شروع رفتار غیرخطی پیشرفته در بتن و فاصله گرفتن منحنی رفتار واقعی بتن با منحنی رفتاری خطی می‌باشد. این سطح تنش مرز شروع ترک‌های کوچک و محدود (قابل مشاهده) در بتن می‌باشد.
- نقطه $f_t = 1.33f'_t$: کرنش معادل با این سطح تنش مساوی کرنش متناظر مقاومت کششی واقعی بتن می‌باشد. این سطح تنش متناظر با حد نهایی وقوع ترک‌های کوچک و محدود در بتن و مرز شروع رفتار نرم‌شونده بتن در کشش و وقوع ترک‌های پیش‌رونده و گسترده در بتن بدنه سد می‌باشد.



شکل ۶-۳- منحنی رفتاری بتن غلتکی در کشش و میزان آسیب وارد بر بتن در سطوح کرنش مختلف [۲۹]

۶-۴-۳- ضوابط و معیارهای ایمنی

با توجه به این که تنش‌های بحرانی در سدهای وزنی عمدتا در رویه‌ها رخ می‌دهند و ماهیت غالب این تنش‌ها تک محوره هستند، در ارزیابی این تنش‌ها و تعیین ضوابط و معیارهای ایمنی نیازی به استفاده از پوش گسیختگی بتن در حالت تنش دو محوره نمی‌باشد. ضوابط و معیارهای ایمنی (در قالب ضرایب اطمینان) برای تنش‌های کششی حاصل از تحلیل‌های خطی و ارتجاعی با توجه به سطوح عملکرد قابل پذیرش در شرایط محیطی مختلف و همچنین شاخص‌های کلیدی رفتار بتن در کشش، در جدول (۶-۷) ارائه شده است [۲۹]. قابل ذکر این‌که در خصوص تنش‌های کششی شبه‌قائم، مقاومت کششی واقعی درزهای اجرایی افقی، و در خصوص تنش‌های کششی شبه‌افقی، مقاومت کششی واقعی جسم بتن غلتکی باید مبنای محاسبه تنش کششی مجاز قرار گیرد. همچنین در شرایط بارگذاری دینامیکی، با توجه به سرعت بارگذاری، مقاومت کششی واقعی دینامیکی بتن که ۱/۵ برابر مقاومت کششی واقعی استاتیکی بتن می‌باشد، ملاک می‌باشد $(f'_{td} = 1.5f'_t)$

جدول ۶-۷- معیارهای پذیرش برای تحلیل تنش بدنه سد (ضرایب اطمینان برای تنش‌های حاصل از تحلیل‌های خطی) [۲۹]

ترکیب‌بار	تنش‌های کششی مجاز			تنش‌های فشاری مجاز
	سدهای جدید در دست مطالعه و احداث		سدهای موجود	
	خطر لرزه‌خیزی کم و متوسط	خطر لرزه‌خیزی زیاد و بسیار زیاد		
عادی استاتیکی	$0.45f'_t$		$0.45f'_t$	$0.33f_c$
غیرعادی استاتیکی	$0.60f'_t$		$0.60f'_t$	$0.50f_c$
فوق‌العاده استاتیکی	$0.90f'_t$		$0.90f'_t$	$1.00f_c$
غیرعادی دینامیکی	$0.60f'_{td} = 0.90f'_t$	$0.90f'_{td} = 1.35f'_t$	$1.25f'_{td} = 1.875f'_t$	$0.65f_c$
فوق‌العاده دینامیکی	$1.33f'_{td} = 2.0f'_t$		$1.33f'_{td} = 2.0f'_t$	$1.30f_c$

در تعیین ضوابط و معیارهای پذیرش، مطابق عرف بین‌المللی، در شرایط وقوع زلزله OBE سطح ایمنی بالاتری برای سدهای جدید در دست مطالعه و احداث، و همچنین سدهایی که در نواحی با لرزه‌خیزی کم و متوسط (بر اساس ناحیه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران) واقع می‌شوند، در نظر گرفته شده است. در نواحی با خطر لرزه‌خیزی بالا و نیز در خصوص ارزیابی ایمنی سدهای موجود، بنابر ملاحظات اقتصادی و توجیه‌پذیری بهتر پروژه‌های سدسازی، حاشیه اطمینان نسبتا کم‌تری لحاظ شده است. تنش‌های فشاری مجاز بر اساس توصیه مراجع معتبر و روال عرف، با اعمال ضرایب اطمینان ۳، ۲ و ۱ برای ترکیب بارهای عادی، غیرعادی و فوق‌العاده تعیین می‌گردند (جدول ۶-۷). مقاومت فشاری دینامیکی بتن، با توجه به سرعت بارگذاری، ۱/۳ برابر مقاومت فشاری استاتیکی بتن در نظر گرفته می‌شود.

۶-۴-۴- ضوابط و معیارهای ایمنی طراحی سازه‌های وابسته به سد

جهت طراحی تجهیزات و المان‌های سازه‌ای خاص (سازه‌های ثانویه) که بر روی بدنه سد قرار دادند، پاسخ دینامیکی سد در موقعیت استقرار آن المان‌ها به عنوان ورودی طراحی لرزه‌ای سازه‌های ثانویه استفاده می‌شود. طیف‌های پاسخ این حرکت ورودی برای سازه‌های ثانویه طیف‌های پاسخ طبقه نامیده می‌شوند (Floor Response Spectra). معیارهای طراحی لرزه‌ای تجهیزات باید با طراحی لرزه‌ای سازه‌های اولیه متناسب باشد به‌گونه‌ای که دستیابی به معیارهای عملکرد

تعیین شده برای زلزله‌های با سطوح مختلف امکان‌پذیر باشد. بر این اساس، سازه‌های جانبی که بر ایمنی سد تاثیرگذار هستند باید با یک سطح ایمنی مشابه با بدنه سد در مقابل زلزله طراحی شوند. به منظور ساماندهی طراحی لرزه‌ای اجزای ثانویه طرح، با توجه به تجارب ملی و بین‌المللی موجود، رده‌های ایمنی مختلف زیر را می‌توان تعریف کرده و اجزای فوق را مطابق آن‌ها دسته‌بندی نمود:

- **رده ایمنی ۱** برای سازه‌های بحرانی و مرتبط با ایمنی بدنه سد نظیر دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی که باید بعد از زلزله MCE قابل بهره‌برداری باشند.
- **رده ایمنی ۲** برای سازه‌های مهم و مرتبط با عملکرد سد نظیر سرریزهای دریچه‌دار و آزاد و همچنین مجراهای آبیاری.
- **رده ایمنی ۳** برای سازه‌های کم‌اهمیت یا موقت.

در جدول (۶-۸) فهرست کلیه سازه‌های وابسته به سد به همراه رده ایمنی آن‌ها و سطوح زلزله مربوطه آورده شده است. ضرایب ایمنی (یا تنش‌های مجاز) متناظر با سطح زلزله طراحی (بارگذاری دینامیکی غیرعادی) و سطح زلزله کنترل طراحی (بارگذاری دینامیکی فوق‌العاده) متناظر با مقادیر معادل ذکر شده در جدول (۶-۷) خواهد بود [۱۳، ۱۹، ۲۹].

جدول ۶-۸- معیارهای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و اجزای وابسته به سد [۱۳، ۲۹]

سازه‌های وابسته به سد	اجزای سازه	رده ایمنی	سطح طراحی و کنترل لرزه‌ای				
			CE	OBE	DBE	MDE	MCE
تکیه‌گاه‌های سد	گوه‌های مستعد لغزش	۱		×			×
سرریز تاج سد	پایه‌های سرریز پل سرریز	۲		×		×	
خروج‌های تحتانی	دریچه‌ها و شیرهای اصلی	۱		×			×
	پایه‌های کناری سازه خروجی دریچه‌ها و استاپلاگ‌های اضطراری تجهیزات بهره‌برداری	۲		×		×	
تجهیزات الکتریکی و مکانیکی	اجزای اصلی تجهیزات	۲		×		×	
اجزای سیستم انحراف	سازه‌های ورودی و خروجی پوشش تونل شیب‌های حفاری در سنگ سازه‌های زیرزمینی فرازبند و نشیب‌بند دریچه راس و تجهیزات آن	۳	×		×		
	سازه پلاگ بتنی	۲		×		×	
راه‌های دسترسی	راه‌ها کالورت‌ها حفاری‌ها و خاکریزها پل‌ها سازه‌های زیرزمینی	۳	×		×		
شیروانی‌های حریم مخزن	شیروانی‌های بحرانی (شیروانی‌هایی که ایمنی بدنه سد را متاثر ساخته و یا شیروانی‌های حجیمی که موج قابل توجهی در دریاچه مخزن ایجاد می‌نمایند)	۲		×		×	
	شیروانی‌های غیربحرانی	۳	×		×		

فصل ۷

کنترل پایداری سدهای وزنی بتن غلتکی

۷-۱- کلیات

در این فصل از راهنما مبانی و فرایند محاسبه بارها و روش‌های تحلیل پایداری سدهای وزنی بتن غلتکی ارائه می‌شود. منظور از پایداری، پایداری عمومی سد، شامل پایداری در برابر لغزش، واژگونی، شناوری و تنش وارد بر توده سنگ پی سد می‌گردد. ترکیب‌های بارگذاری و معیارهای کنترل و پذیرش پایداری برای شرایط مختلف بهره‌برداری در فصل ششم این راهنما ارائه شده‌اند.

مبانی و فرایندهای تحلیل پایداری ارائه شده در این راهنما بر اساس فرضیات و مبانی روش‌های معادل استاتیکی بوده و برای سدهایی که بر روی توده سنگ یا خاک مقاوم قرار می‌گیرند، کاربرد دارد. در مواردی که به علت ضعف پی، استفاده از شمع ضرورت می‌یابد، باید از ضوابط و روش‌های کنترل پایداری متناسب با تمهیدات طراحی مذکور استفاده گردد (این راهنما در بر گیرنده ضوابط طراحی و تحلیل این دسته از تمهیدات پایدارسازی نمی‌باشد). پی سد بسته به نیاز و با توجه به ملاحظات فنی، اجرایی، و اقتصادی می‌تواند افقی و یا شیب‌دار طراحی گردد. مبانی و روش‌های ارائه شده برای کنترل پایداری در سطوح محتمل گسیختگی در محل تماس بدنه سد و پی و یا در توده سنگ پی (کمی پایین‌تر از سطح تماس سد و پی) و نیز در هر سطحی در داخل بدنه سد قابل استفاده می‌باشند.

از بین سناریوهای مختلف ناپایداری، کنترل پایداری در برابر لغزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بررسی و ارزیابی آن مستلزم تجربه کافی و همکاری کارشناسان ژئوتکنیک (و هیدرولیک) با کارشناسان سازه است. در برخی موارد با توجه به موقعیت استقرار بدنه سد، به دلیل ناهمگنی و یا وجود بزرگ‌درزه‌ها (یا سیستم‌های درزه) در توده سنگ، ایجاد مکانیزم‌های لغزشی بحرانی در داخل توده سنگ پی سد محتمل بوده و این موضوع باید به دقت توسط تیم طراحی و تحلیل پروژه بررسی گردد. همچنین پتانسیل فرسایش و یا تضعیف توده سنگ در اثر جریان نشت آب و یا ریزش جت آب سرریز (یا تخلیه‌کننده تحتانی) باید در مرحله طراحی جانمایی سد و در تعیین مکانیزم‌های لغزش محتمل و بحرانی در توده سنگ پی مد نظر قرار گیرد. بیش‌ترین عدم قطعیت‌ها در فرایند تحلیل پایداری در برابر لغزش مربوط به برآورد مقاومت برشی توده سنگ پی است، به خصوص در شرایطی که پی سد متشکل از سنگ‌های با مقاومت برشی متفاوت و یا در برگیرنده درزه‌های متعدد باشد. بنابراین، انتخاب و تخمین پارامترهای مقاومت برشی مناسب و معرف برای توده سنگ نیاز به تجربه و قضاوت کارشناسی خوب دارد [۲۷، ۲۸، ۳۰].

۷-۲- روش تحلیل تعادل حدی

۷-۲-۱- مدهای گسیختگی

با توجه به هدف از تحلیل پایداری (اطمینان از تعادل افقی، قائم و دورانی سازه)، مدهای گسیختگی زیر باید کنترل شوند:

- مد گسیختگی لغزشی: برای کنترل این مد گسیختگی، حداقل ضریب اطمینان لازم در مقابل لغزش در تمام سطوح محتمل لغزش محتمل باید وجود داشته باشد.

- مد گسیختگی ناشی از عدم کفایت باربری پی: برای کنترل این مد گسیختگی، مقادیر تنش وارد بر پی در همه حالات بارگذاری باید در محدوده مجاز واقع شود.
- مد گسیختگی واژگونی: برای کنترل مد گسیختگی واژگونی، محل اثر برایند نیروهای محرک در ترکیب بارهای مختلف باید در محدوده تعریف شده مجاز قرار گیرد. با این روش عملا میزان بازشدگی سطح تماس سازه و پی در شرایط مختلف بهره‌برداری به طور ضمنی کنترل می‌گردد.
- مد گسیختگی شناوری: برای کنترل مد گسیختگی شناوری، ضریب اطمینان لازم در مقابل شناوری متناسب با شرایط مختلف بارگذاری باید تامین گردد.

کنترل شستگی و خردشدگی سنگ پی یا شکستگی و گسیختگی (ترک‌خوردگی) بدنه سد باید به طور جداگانه بررسی و مطالعه گردد.

برای کنترل مدهای گسیختگی فوق، نوشتن روابط تعادل استاتیکی برای برآورد نیروها و فشارهای وارد بر سازه کفایت نمی‌نماید و حل معادلات تعادل نیازمند فرضیات اضافی است. «روش تحلیل تعادل حدی» یکی از روش‌های مرسوم حل معادلات تعادل می‌باشد. در این روش، برای اطمینان از عدم وقوع مد گسیختگی مورد نظر، مشخصات مقاومتی مصالح با اعمال یک ضریب کاهنده مناسب (یا ضریب اطمینان) تا اندازه‌ای کاهش می‌یابد که تعادل بین نیروهای وارده و مقاومت (کاهش یافته) مصالح حاصل گردد.

بر اساس مبانی فوق، باید توجه شود که این روش ماهیتا با روش تحلیل سازه‌ای که مبتنی بر تحلیل تنش ــ کرنش (تغییر شکل) می‌باشد، متفاوت است. در فرایند روش تحلیل تعادل حدی اصولا میزان تغییرشکل مورد توجه نبوده و تغییرشکل سازه تا آستانه گسیختگی مصالح و بسیج کل نیروهای مقاوم، امکان‌پذیر فرض می‌گردد. در این روش، کنترل تغییرمکان سازه به صورت غیر مستقیم و با در نظر گرفتن یک سری ضرایب اطمینان حداقل متناسب با ترکیب بارها و شرایط مختلف بهره‌برداری، انجام می‌پذیرد.

۷-۲-۲- مبانی تحلیل تعادل حدی

اولین گام در تحلیل پایداری، شناسایی و تعیین هندسه بخشی از سازه که مستعد ناپایداری لغزشی و یا ناپایداری متناسب با مد گسیختگی مورد نظر است، می‌باشد. برای این منظور، موقعیت و هندسه سطوح جداکننده بخش مستعد ناپایداری سازه که اصطلاحا سطوح مستعد گسیختگی یا سطوح گسیختگی نیز نامیده می‌شوند، باید تعیین گردد. سطوح گسیختگی می‌توانند ترکیبی از سطوح مستوی یا منحنی باشد، ولی به طور معمول و به منظور سادگی محاسبات، این سطوح به صورت مستوی در نظر گرفته می‌شوند.

تعیین سطوح مستعد گسیختگی یکی از مهم‌ترین مراحل تحلیل‌های پایداری بوده و مستلزم مشارکت کارشناسان باتجربه سازه و ژئوتکنیک است. در این خصوص، باید دقت نمود که اولا سطوح گسیختگی به نحوی انتخاب گردند که امکان وقوع مد ناپایداری مورد نظر در امتداد آن‌ها امکان‌پذیر باشد، و ثانیا بحرانی‌ترین سناریوهای مستعد ناپایداری با

توجه به مشخصات سازه و مشخصات مصالح عبوری از سطح گسیختگی (جسم بتن یا سنگ پی، سطوح واریز اجرایی بتن، سطح تماس سازه و پی، و ناپیوستگی‌های توده سنگ پی) را شامل گردد.

یکی از سطوحی که به طور معمول در تحلیل‌های پایداری مورد توجه بوده و در غالب موارد می‌تواند جزء یکی از سطوح بحرانی مستعد ناپایداری باشد، سطح تماس سازه و پی است، چرا که معمولا مشخصات مقاومتی (مقاومت برشی و مقاومت کششی) این سطح در مقایسه با سطوح لغزش عبوری از داخل بدنه سد کم‌تر بوده و مساحت (طول) آن نیز در مقایسه با مساحت سطوح لغزش عبوری از داخل توده سنگ پی کوچک تر است. شایان ذکر این که، با فرض عبور سطح گسیختگی از توده سنگ پی بلافصل سازه (بدنه سد)، پارامترهای مقاومتی سطح تماس سازه و پی در تحلیل‌های پایداری معادل پارامترهای سنگ پی در نظر گرفته می‌شود. به همین جهت، در برخی موارد برای بهبود شرایط پایداری، سطح تماس سازه و پی به صورت شیب‌دار (به سمت بالادست) طراحی می‌گردد.

در تحلیل پایداری در برابر واژگونی، به جای تعریف ضریب اطمینان، عملکرد مطلوب سازه با تعیین یک محدوده معین برای موقعیت قرارگیری محل اثر برآیند نیروها در سطح گسیختگی کنترل می‌گردد. در این رویکرد، با توجه به میزان پذیرش بازشدگی (گسیختگی کششی) در سطح گسیختگی تحت اثر شرایط مختلف بارگذاری، محدوده مجاز برای محل اثر نیروی برایند تعیین می‌گردد. شایان ذکر این‌که به طور معمول در تحلیل‌های پایداری، از مقاومت کششی سطوح گسیختگی بحرانی (نظیر سطح تماس بتن-سنگ، سطح واریز بتن، یا سطوح عبوری از توده سنگ پی) صرف‌نظر می‌گردد.

در شرایطی که بازشدگی در سطح گسیختگی ایجاد شود، توزیع فشار برکنش (به دلیل نفوذ آب به بخش باز شده سطح گسیختگی) کاملا تغییر خواهد نمود. بر این اساس، محاسبات پایداری باید با اصلاح فشار برکنش تا حصول یک شرایط سازگار در تحلیل تکرار گردد. همچنین باید توجه داشت که توزیع تنش در سطح گسیختگی نیز در اثر بازشدگی سطح گسیختگی تغییر نموده و بازتوزیع این تنش‌ها باید متناسب با میزان بازشدگی مجددا محاسبه گردد.

مد گسیختگی یا ناپایداری شناوری هنگامی روی می‌دهد که فشار خالص برکنش (فشار برکنش اعمالی بر کف سازه منهای وزن آب سربار) از وزن سازه و سایر نیروهای قائم ناشی از سربارها بیش‌تر شود. از آنجا که وقوع این مد ناپایداری وابسته به مشخصات مقاومتی بتن سازه و توده سنگ پی نیست، عدم قطعیت‌های محاسبات کنترل شناوری بسیار کم‌تر از سایر مدهای گسیختگی می‌باشد. به همین جهت، به طور معمول، ضرایب اطمینان کم‌تری برای کنترل مد ناپایداری شناوری در نظر گرفته می‌شود.

ظرفیت باربری پی بر مبنای روش‌های تحلیلی، روابط متعارف ظرفیت باربری، و آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی برآورد می‌گردد. ظرفیت باربری مجاز پی بنا به تعریف بیانگر حداکثر فشار قابل تحمل توده سنگ پی پس از اعمال ضریب اطمینان‌های لازم برای جلوگیری از گسیختگی (یا انهدام) پی و نیز محدود نمودن نشست پی (به نحوی که عملکرد سازه را مختل نکند) می‌باشد.

بر اساس رویکرد فوق، در تحلیل کفایت باربری پی، میزان نشست توده سنگ پی به طور مستقیم محاسبه و ارزیابی نمی‌گردد، و کنترل نشست با تعریف و اعمال ضرایب اطمینان مناسب بر ظرفیت باربری پی به طور ضمنی انجام می‌پذیرد. با توجه به این تعریف، تحت اثر بارگذاری‌های غیرعادی و فوق‌العاده ظرفیت باربری پی می‌تواند افزایش یابد.

در سدها (یا سازه هایی) که بر روی توده سنگ ناهمگن و یا با درزه‌داری زیاد قرار می‌گیرند، گسیختگی لغزشی ممکن است در اثر گسیختگی برشی در امتداد میان‌لایه‌های ضعیف سنگ و یا ناپیوستگی‌ها رخ دهد. در این موارد، علاوه بر ضرورت شناسایی و کنترل مکانیزم‌های ناپایداری در برابر لغزش در توده سنگ، میزان نشست توده سنگ تحت اثر تنش‌های وارد بر پی باید با انجام محاسبات دقیق‌تر ارزیابی و کنترل گردد.

۷-۳- تحلیل پایداری در برابر لغزش

۷-۳-۱- انتخاب پارامترهای مقاومت برشی طراحی

پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ پی را می‌توان با انجام آزمایش‌های برجا یا آزمایش‌های آزمایشگاهی برش مستقیم (و یا سایر آزمایش‌های مناسب) تعیین نمود. آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک و شرایط خاص آزمایشگاه انجام می‌شوند و طبیعتا به طور مستقیم قابل اعمال در طراحی و تحلیل‌های پایداری نمی‌باشند. مقاومت برشی سنگ بکر (نمونه سنگ سالم) و نیز توده سنگ متشکل از درزهای تمیز یا پر شده تابع متغیرهای زیادی از جمله فشار محصور کننده، تاریخچه بارگذاری و نرخ بارگذاری است. همچنین ابعاد نمونه‌ها، تعداد، راستا و ابعاد درزه‌ها می‌توانند تاثیر بسزائی بر نتایج آزمایش‌ها داشته باشند. بنابراین به منظور برآورد پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ (و ناپیوستگی‌های آن) بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، باید مطالعات ویژه‌ای با در نظر گرفتن ساختار توده سنگ و نوع و ماهیت آزمایش‌های انجام یافته، توسط کارشناسان ژئوتکنیک (یا مکانیک سنگ) صورت پذیرد. در برآورد این پارامترها شرایط واقعی تنش و وضعیت زهکشی توده سنگ نیز باید مد نظر قرار گیرد.

با توجه به نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام یافته، برآورد و انتخاب نهایی پارامترهای مقاومت برشی طراحی باید با مشارکت کارشناسان ژئوتکنیک و سازه انجام پذیرد. پارامترهای مقاومت برشی طراحی نباید بیش از حد محافظه‌کارانه انتخاب شوند چرا که این رویکرد ممکن است سبب غیراقتصادی و غیرمنطقی شدن طراحی گردد. البته در برخی موارد، ممکن است در نظر گرفتن یک برآورد محافظه‌کارانه تاثیر ناچیزی در طراحی داشته و نسبت به انجام آزمایش‌های پرهزینه اقتصادی‌تر باشد.

هنگام انتخاب پارامترهای مقاومت برشی طراحی، شکل منحنی تنش ـ کرنش باید مورد توجه قرار گیرد. اگر در منحنی تنش ـ کرنش، افت قابل توجهی در برش یا تنش انحرافی پس از عبور از مقدار تنش برشی حداکثر (Peak) مشاهده نگردد، مقاومت طرح را می‌توان همان تنش برشی حداکثر (Peak) در نظر گرفت. در شرایطی که پس از

عبور از تنش برشی حداکثر، افت مقاومت برشی قابل توجه باشد (یا به بیان دیگر مقاومت برشی پسماند به نحو محسوسی کم‌تر از مقاومت برشی حداکثر باشد)، در برآورد و انتخاب پارامترهای مقاومت برشی باید پتانسیل گسیختگی پیش‌رونده در سطح گسیختگی مورد توجه قرار گیرد. البته به این نکته نیز باید توجه داشت که به طور معمول به دلیل غیر یکنواختی توزیع تنش و ناهمسانی توده سنگ در امتداد سطح گسیختگی، امکان وقوع هم‌زمان جابه جایی (کرنش) متناظر با مقاومت برشی حداکثر (Peak) در تمام نواحی سطح گسیختگی مورد نظر وجود ندارد. به بیان دیگر در این شرایط، پارامترهای مقاومت برشی طراحی را می‌توان بین مقاومت برشی حداکثر (Peak) و مقاومت برشی پسماند (Residual) در نظر گرفت.

۷-۳-۲- روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای

روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای در واقع همان روش ساده و پرکاربرد تحلیل تعادل حدی برای کنترل لغزش است. در رده‌بندی و نام‌گذاری روش‌های تحلیل، هر بخش از توده لغزنده که معادلات تعادل به صورت مستقل برای آن نوشته می‌شود، اصطلاحا یک «گوه» نامیده می‌شود. بنابراین، در روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای، توده لغزنده صرفا شامل یک گوه می‌شود که در برگیرنده بدنه سد بوده و صفحه کف این گوه، همان فصل مشترک سازه (بدنه سد) و پی است. در این حالت، نیروی محرک ناشی از توده سنگ (یا خاک) در بالادست و نیروی مقاوم ناشی از توده سنگ (یا خاک) در پایین‌دست، با فرض این که این نیروها در پایداری بدنه سد کم‌اثر هستند، با استفاده روابط مربوط به فشار محرک و فشار مقاوم خاک به صورت تخمینی برآورد می‌گردند (شکل ۷-۱). بر این اساس، ضریب اطمینان در برابر لغزش (Sliding) از رابطه ۷-۱ قابل محاسبه خواهد بود:

$$FS_S = \frac{N.\tan\varphi + C.L}{T} \qquad (۷-۱)$$

در این رابطه:

N= برآیند نیروی نرمال موثر (شامل نیروی برکنش) بر سطح گسیختگی (فصل مشترک سازه و پی)،

φ = زاویه اصطکاک داخلی مصالح پی در مجاورت سطح گسیختگی،

C= چسبندگی مصالح پی در مجاورت سطح گسیختگی،

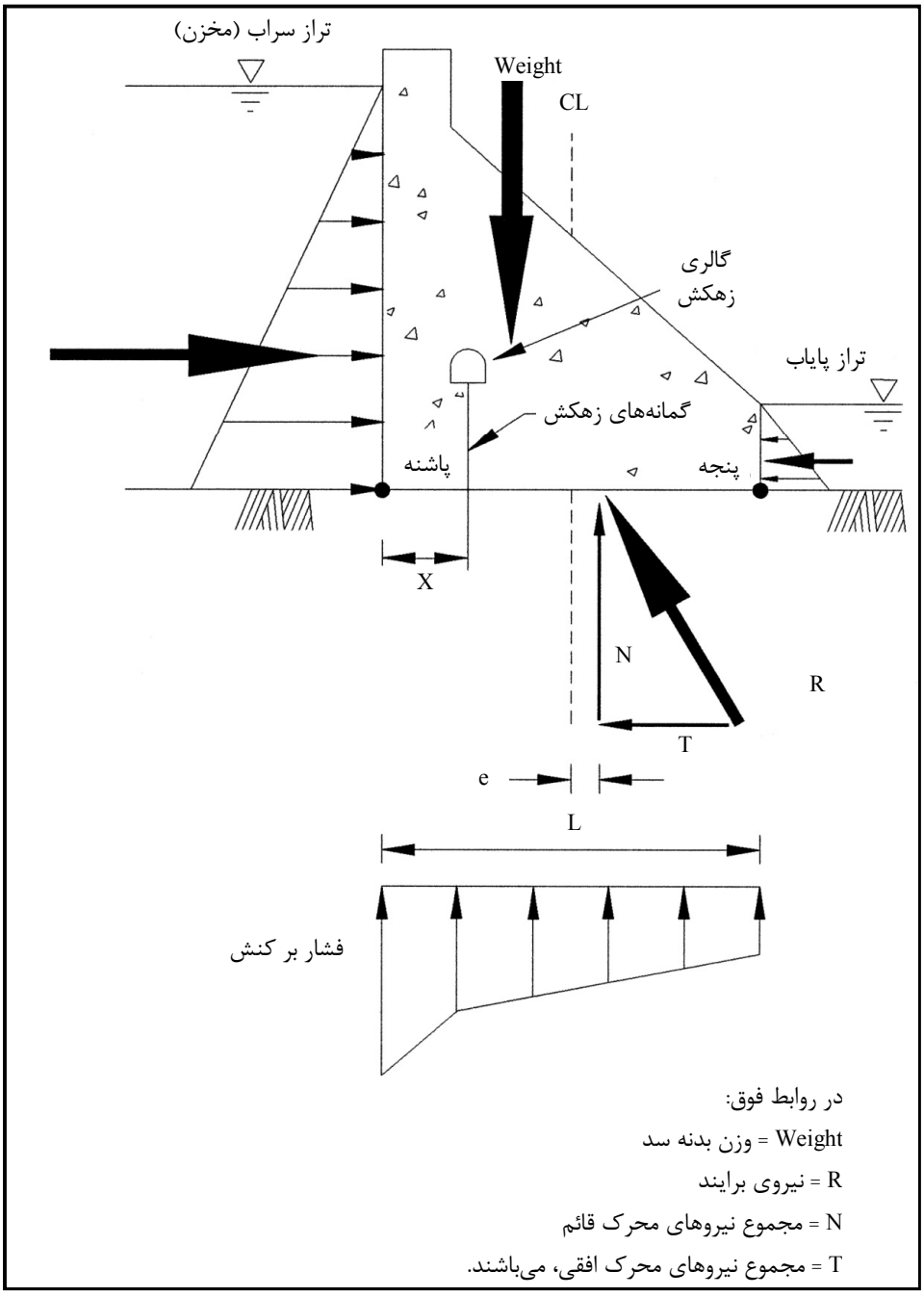
L = طول سطح تماس در سطح گسیختگی، و

T = نیروی برشی موثر در امتداد سطح گسیختگی، می‌باشند.

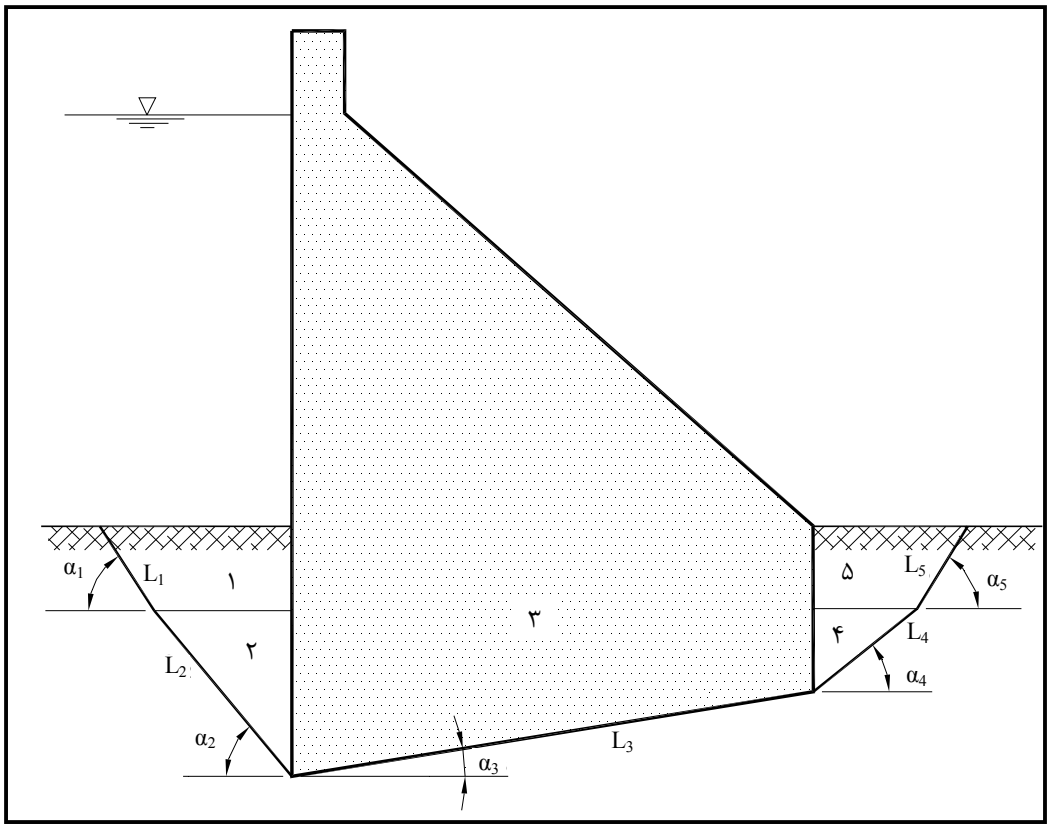
۷-۳-۳- روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای

در شرایطی که هندسه سطح تماس سازه (بدنه سد) و پی به صورت یک صفحه مستوی نبوده و یا با توجه به تاثیر نیروهای محرک و مقاوم ناشی از توده سنگ (خاک) در بالادست و پایین‌دست سازه، برآورد دقیق‌تر این نیروها مورد نظر باشد، استفاده از روش‌های تحلیلی جامع‌تر ضروری خواهد بود. در این شرایط، می‌توان از روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای،

که یک روش تحلیل تعادل حدی موثر و نسبتا ساده برای تحلیل و کنترل پتانسیل لغزش در امتداد مجموعه‌ای از ناپیوستگی‌ها و سطوح مستعد گسیختگی مختلف در پی می‌باشد، استفاده نمود. مکانیزم لغزشی قابل بررسی در این روش، به صورت شماتیک در شکل (۹-۲) نشان داده شده است. اگرچه در سدهای وزنی تحلیل مکانیزم‌های لغزش در غالب موارد به صورت دوبعدی انجام می‌پذیرد ولی کنترل مکانیزم‌های لغزشی سه‌بعدی نیز با روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای امکان‌پذیر است.



شکل ۷-۱- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر بدنه سد در روش تحلیل لغزش تک‌گوه‌ای [۲۷]



شکل ۷-۲- مکانیزم لغزشی قابل بررسی (شامل بدنه سد و گوه‌های بالادست و پایین‌دست) در روش تحلیل چند گوه‌ای [۲۷]

روش تحلیل لغزش چند گوه‌ای مبتنی بر اصول مدرن مهندسی سازه، ژئوتکنیک، زمین‌شناسی و مکانیک سنگ است که در آن با اعمال ضرایب اطمینان بر پارامترهای مقاومتی مصالح، تعادل لغزشی گوه‌ها تحت اثر تمامی بارهای وارد بر آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اصول، فرضیات و ساده‌سازی‌های این روش به شرح زیر می‌باشند:

- سطح گسیختگی می‌تواند ترکیبی از سطوح مستوی و منحنی باشد، با این حال برای سادگی محاسبات، به طور معمول تمام سطوح تشکیل دهنده سطح گسیختگی مستوی فرض می‌شوند. هر یک از این سطوح مستوی، در واقع صفحه کف یک گوه که پتانسیل لغزش در آن وجود دارد، می‌باشند (شکل ۷-۱). بدیهی است هندسه کلی سطح گسیختگی باید به نحوی انتخاب گردد که امکان ایجاد مکانیزم لغزش وجود داشته باشد.
- فرض بر این است که تاثیر لنگر ناشی از نیروها ناچیز بوده و از اثر آن صرف‌نظر می‌گردد.
- از اثر نیروی برشی بین دو گوه مجاور صرف‌نظر می‌شود.
- در صفحه کف هر گوه و در کل سطح گسیختگی، نسبت بین نیروی برشی و نیروی نرمال به صورت خطی و تابع رابطه مور ـ کولمب می‌باشد.
- مشابه با سایر روش‌های تحلیل تعادل حدی، کنترلی بر روی مقادیر جابه‌جایی گوه‌ها وجود نداشته و فرض بر این است که جابه‌جایی گوه‌ها نسبتا کوچک و به نحوی است که مکانیزم کلی لغزش (و عملکرد کلی سازه) را متاثر نمی‌سازد (در واقعیت، سختی نسبی متفاوت گوه‌های شکل گرفته در توده سنگ پی و

بدنه سد بر نتایج تحلیل پایداری تاثیرگذار بوده و در وضعیت‌های پیچیده استفاده از روش‌های تحلیلی دقیق‌تر برای بررسی و تامین سازگاری تغییرمکان‌ها و کرنش‌ها در یک سطح گسیختگی ممکن است ضرورت یابد).

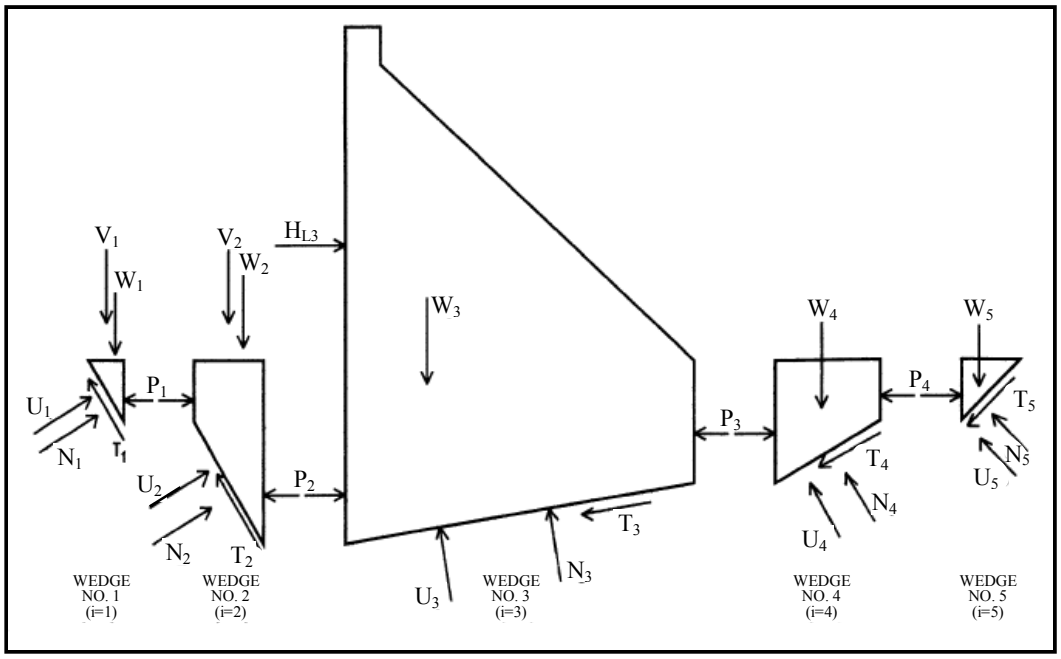
- در این روش، ضریب اطمینان کلی سطح گسیختگی با یک فرایند تکراری (مطابق مراحل گام به گام تحلیل) محاسبه می‌گردد. مراحل گام به گام تحلیل در روش تحلیل لغزشی چند گوه‌ای به شرح زیر است:

گام ۱- انتخاب و تعیین هندسه سطح گسیختگی با توجه به شیب، موقعیت و جهت لایه‌ها و ناپیوستگی‌های توده سنگ پی.

گام ۲- تقسیم کل سیستم لغزنده به تعداد مناسبی گوه، به نحوی که سطح کف هر گوه یک صفحه مستوی بوده و سطح تماس بین گوه‌ها یک صفحه قائم باشد. در این تقسیم‌بندی، هر جزء یکپارچه سازه (نظیر بدنه سد، حوضچه آرامش، و ...) باید در قالب یک گوه مجزا در نظر گرفته شود. بر این اساس، مرزهای بالادست و پایین‌دست گوه در بر گیرنده بدنه سد، صفحات قائم عبوری از پاشنه و پنجه سد خواهند بود.

گام ۳- گوه‌هایی که در بالادست سازه واقع شده و شیب صفحه کف آن‌ها به سمت پایین‌دست است (زاویه شیب منفی α)، اصطلاحا گوه‌های محرک (Driving Wedges)، و گوه‌هایی که در پایین‌دست سازه واقع شده و شیب صفحه کف آن‌ها به سمت بالادست است (زاویه شیب مثبت α)، اصطلاحا گوه‌های مقاوم (Resisting Wedges)، نامیده می‌شوند. برای شناسایی بحرانی‌ترین سناریوی لغزش، زاویه شیب گوه‌های محرک باید به نحوی انتخاب گردد که نیروی محرک (Driving Force) ناشی از آن‌ها بیشینه گردد. در مقابل، زاویه شیب گوه‌های مقاوم نیز باید به نحوی انتخاب گردد که نیروی مقاوم (Resisting Force) ناشی از آن‌ها کمینه گردد. در تعیین این سطوح گسیختگی، هندسه سیستم‌های درزه و سایر ناپیوستگی‌های توده سنگ باید در نظر گرفته شوند.

گام ۴- پس از تعیین هندسه سطح گسیختگی و تقسیم‌بندی کل توده لغزنده به تعداد مناسبی گوه، دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر هر گوه، شامل تمام نیروهای موثر بر گوه، ترسیم می‌گردد (نظیر شکل ۷-۳). با توجه به فرضیات پایه روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای، در ترسیم دیاگرام آزاد نیروها از اثر نیروی برشی در مرز دو گوه مجاور صرف نظر می‌شود. بر این اساس، نیروهای وارد بر هر گوه شامل نیروی وزن گوه (W_i)، نیروی ناشی از سربار وارد بر گوه شامل وزن آب (V_i)، نیروی فشار برکنش (U_i)، نیروهای عکس‌العمل قائم و مماس بر صفحه کف گوه (N_i & T_i)، و نیروهای افقی عمود بر فصل مشترک گوه با گوه‌های مجاور (P_{i-1} & P_i) می‌گردد.



شکل ۷-۳- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر هر گوه در روش تحلیل لغزش چندگوه‌ای [۲۷]

گام ۵- با توجه به دیاگرام آزاد نیروها، تعادل حدی برای هر گوه را به صورت رابطه ۷-۲ می‌توان نوشت. در این رابطه، علامت مثبت مربوط به نیروهای افقی به سمت پایین‌دست (سمت راست در شکل ۷-۳)، و نیروهای قائم به سمت بالا می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، حل مستقیم این رابطه به دلیل نامشخص بودن نیروهای افقی عمود بر فصل مشترک گوه با گوه‌های مجاور (P_{i-1} & P_i)، امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به رابطه تعادل حدی، برایند نیروهای افقی وارد بر سطوح فصل مشترک گوه ($P_{i-1} - P_i$) از رابطه ۷-۳ قابل محاسبه است.

$$FS_i = \frac{\left[(W_i + V_i)\cos\alpha_i - U_i + (H_{Li} - H_{Ri})\sin\alpha_i + (P_{i-1} - P_i)\sin\alpha_i\right]\tan\phi_i + c_i L_i}{(H_{Li} - H_{Ri})\cos\alpha_i - (W_i + V_i)\sin\alpha_i + (P_{i-1} - P_i)\cos\alpha_i} \qquad (۲\text{-}۷)$$

$$(P_{i-1} - P_i) = \frac{\left[(W_i+V_i)\cos\alpha_i - U_i + (H_{Li} - H_{Ri})\sin\alpha_i\right]\frac{\tan\phi_i}{FS_i} - (H_{Li} - H_{Ri})\cos\alpha_i + (W_i+V_i)\sin\alpha_i + \frac{c_i L_i}{FS_i}}{\cos\alpha_i - \frac{\tan\phi_i \sin\alpha_i}{FS_i}} \qquad (۳\text{-}۷)$$

گام ۶- با توجه به این‌که مجموعه گوه‌ها به‌عنوان یک مکانیزم لغزش واحد در نظر گرفته می‌شوند، ضرایب اطمینان همه گوه‌ها باید با هم برابر باشد، به بیان دیگر:

$$FS_1 = FS_2 = ...FS_{i-1} = FS_i = FS_{i+1} = ...FS_N$$

شرایط تعادل نهایی با ارضاء تعادل نیروهای افقی در مجموعه گوه‌ها، حاصل می‌گردد (رابطه ۷-۴). بدیهی است مقادیر P_0 و P_N برابر صفر می‌باشند.

$$\sum_{i=1}^{N}(P_{i-1} - P_i) = 0 \qquad (۴\text{-}۷)$$

با توجه به الزامات فوق، حل معادلات تعادل باید با روش سعی و خطا انجام پذیرد. برای این منظور، در ابتدا یک مقدار برای ضریب اطمینان فرض شده و مقادیر $(P_{i-1} - P_i)$ برای هر گوه محاسبه می‌گردد. درصورتی‌که مجموع $\sum(P_{i-1} - P_i)$ بزرگ‌تر از صفر باشد، ضریب اطمینان نهایی سیستم بزرگ‌تر از مقدار فرضی فوق و درصورتی‌که مجموع $\sum(P_{i-1} - P_i)$ کم‌تر از صفر باشد، ضریب اطمینان نهایی سیستم کم‌تر از مقدار فرضی خواهد بود. این روند تا ارضای رابطه ۷-۴ ادامه یافته و ضریب اطمینان سیستم به‌دست می‌آید.

۷-۴- تحلیل پایداری در برابر سایر مدهای گسیختگی

۷-۴-۱- تحلیل پایداری در برابر شناوری

ضریب اطمینان در برابر مد ناپایداری شناوری (Floatation) از رابطه ۷-۵ به‌دست می‌آید:

$$FS_f = \frac{W_S + W_C + S}{U - W_G} \qquad (۵-۷)$$

در این رابطه:

W_S = وزن سازه (بدنه سد) و تجهیزات جنبی ثابت آن،

W_C = وزن آب محصور درون سازه (شامل آب داخل مجاری آب، لوله‌ها و ...)،

S = سربار (دائمی) وارد بر سازه،

U = فشار برکنش در زیر سازه (بدنه سد)، و

W_G = وزن آب روی سازه (مقطع سرریز شونده بدنه سد، سرریز، و ...)، می‌باشند.

۷-۴-۲- تحلیل پایداری در برابر واژگونی

برخلاف مد ناپایداری لغزش، محاسبه ضریب اطمینان به صورت «نسبت لنگر پایدارساز به لنگر واژگونی»، تعبیر فیزیکی همسان و واحدی برای سازه‌های مختلف به‌دست نمی‌دهد. به بیان دیگر، به ازاء یک ضریب اطمینان مساوی، شرایط عملکرد و رفتار دو سازه با هندسه و ویژگی‌های محیطی مختلف ممکن است کاملا متفاوت باشد، به این معنی که یک سازه کماکان در بازه رفتار خطی باقی مانده و در سازه دیگر، علیرغم حفظ پایداری کلی، رفتار غیرخطی به شکل بازشدگی (یا ترک‌خوردگی) جزئی در سطح گسیختگی ایجاد شده باشد. به همین جهت، استانداردها و مراجع معتبر برای تضمین یک شرایط عملکرد همسان به ازاء شرایط مشابه بارگذاری در سازه های مختلف، به جای محاسبه ضریب اطمینان، میزان بازشدگی (یا ترک‌خوردگی) در سطح گسیختگی را محاسبه و مبنای کنترل پایداری در برابر واژگونی در نظر می‌گیرند. برای این منظور، به طور معمول محل اثر نیروی برایند در سطح گسیختگی، بر اساس روابط تعادل استاتیکی، محاسبه می‌شود. در حالتی که محل اثر نیروی برایند در هسته مرکزی ($\frac{۱}{۳}$ میانی) سطح گسیختگی مورد نظر

قرار گیرد، کل سطح گسیختگی در فشار خواهد بود. در بارگذاری‌های غیرعادی و بحرانی، با تشدید بارهای ناپایدارساز وارد بر سازه، محل اثر نیروهای برایند به خارج از هسته مرکزی سطح گسیختگی متمایل شده و ریسک بازشدگی (ترک‌خوردگی) محدود (یا گسترده) در سطح گسیختگی ایجاد خواهد شد (شکل ۷-۴). محدوده مجاز محل اثر نیروهای برایند در معیارهای پذیرش برای پایداری در برابر واژگونی تعیین می‌شود (به فصل ششم مراجعه گردد).

۷-۴-۳- کنترل کفایت باربری پی

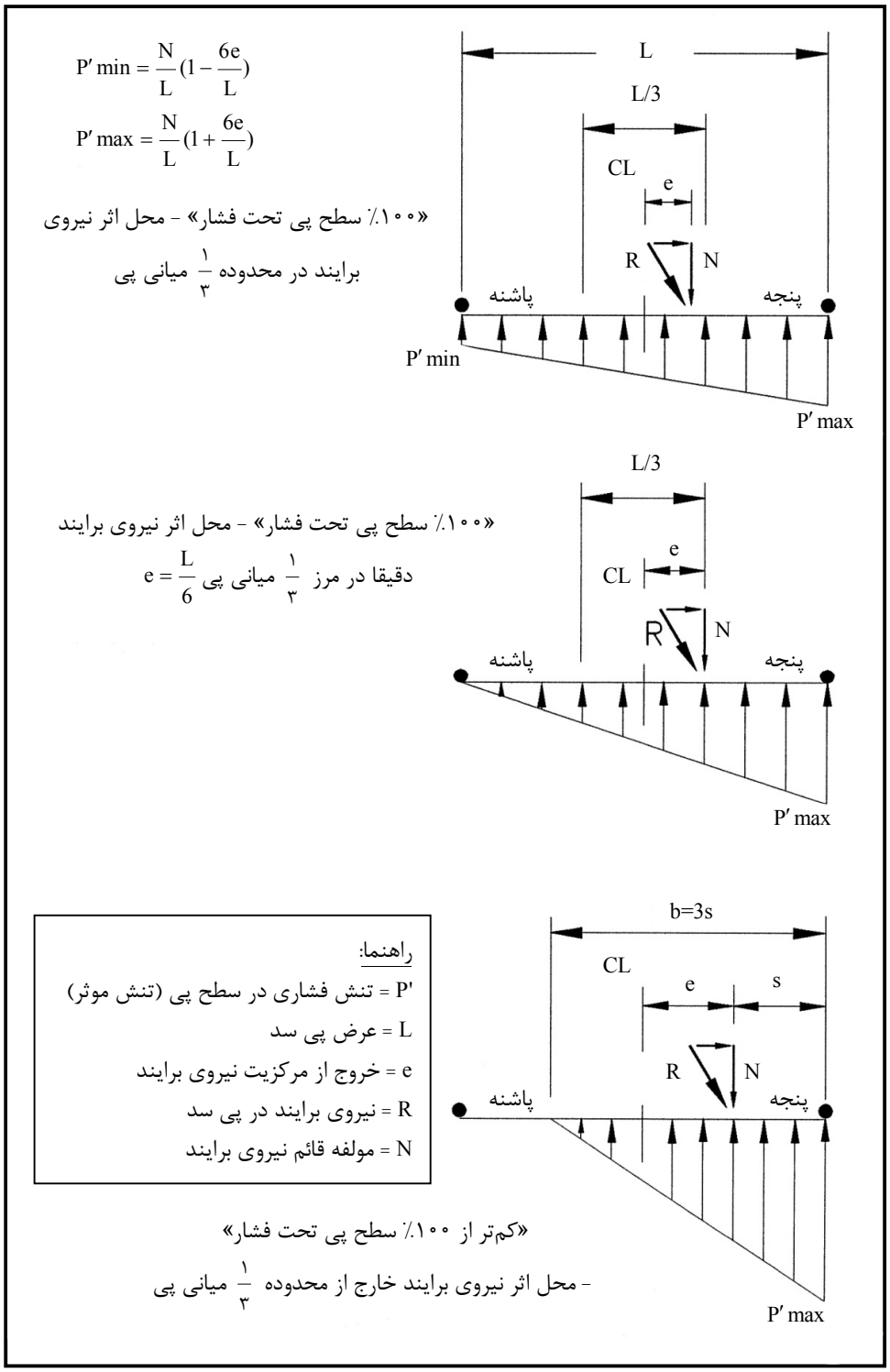
برای کنترل کفایت باربری پی، در ابتدا باید مقدار و توزیع تنش‌های وارد بر پی در شرایط بارگذاری مختلف محاسبه گردد. با توجه به معین بودن مکانیزم‌های مستعد ناپایداری از نظر استاتیکی، و با فرض صلب بودن نسبی سازه (بدنه سد)، محاسبه مقدار و توزیع تنش ها در سطح مستعد گسیختگی به سادگی میسر می‌باشد (شکل ۷-۴). در این خصوص باید توجه داشت که در محاسبات کنترل پایداری به طور معمول از مقاومت کششی محدود سطح گسیختگی صرف‌نظر می‌گردد. پس از محاسبه مقدار و توزیع تنش‌های وارد بر پی، با مقایسه این تنش‌ها با ظرفیت باربری مجاز پی، کفایت باربری پی ارزیابی و کنترل می‌گردد (به فصل ششم مراجعه شود).

۷-۵- ملاحظات مهم در محاسبه بارها در تحلیل‌های پایداری

۷-۵-۱- بارهای ناشی از مخزن سد

بارهای ناشی از مخزن، شامل فشار هیدرواستاتیک و فشار برکنش، از جمله مهم‌ترین و موثرترین بارهای ناپایدارساز وارد بر بدنه سد می‌باشند. بنابراین، در تعیین تراز مخزن (و تراز پایاب) متناظر با شرایط بارگذاری عادی، غیرعادی، و فوق‌العاده (به خصوص در ترکیب با بار زلزله) باید دقت کافی مبذول گردد. به طور معمول «تراز نرمال مخزن» به عنوان تراز مبنا برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک و فشار برکنش در ترکیب بارهای عادی، و نیز در ترکیب بارهای غیرعادی و فوق‌العاده دینامیکی، در نظر گرفته می‌شود.

در شرایطی که بارهای ناشی از مخزن سد در کنترل پایداری سد تعیین‌کننده و بحرانی باشند، می‌توان با توجه به نوع بهره‌برداری و نحوه عملکرد مخزن، تراز مبنا برای محاسبه بارهای فوق را تا حدی کاهش داد. برای این منظور، منحنی «تداوم مخزن» در دوره بهره‌برداری و نیز منحنی تراز آب مخزن به ازای سیل‌های با دوره بازگشت مختلف (با استفاده از منحنی تداوم مخزن) باید با دقت مناسب قابل تهیه و در دسترس باشد. تهیه این داده‌ها مستلزم وجود آمار اندازه‌گیری شده در دوره زمانی مناسب و برنامه‌ریزی و پیش‌بینی دقیق نحوه بهره‌برداری از سد می‌باشد. از نتایج پایش تراز مخزن در سدهای موجود نیز می‌توان برای این منظور استفاده نمود.

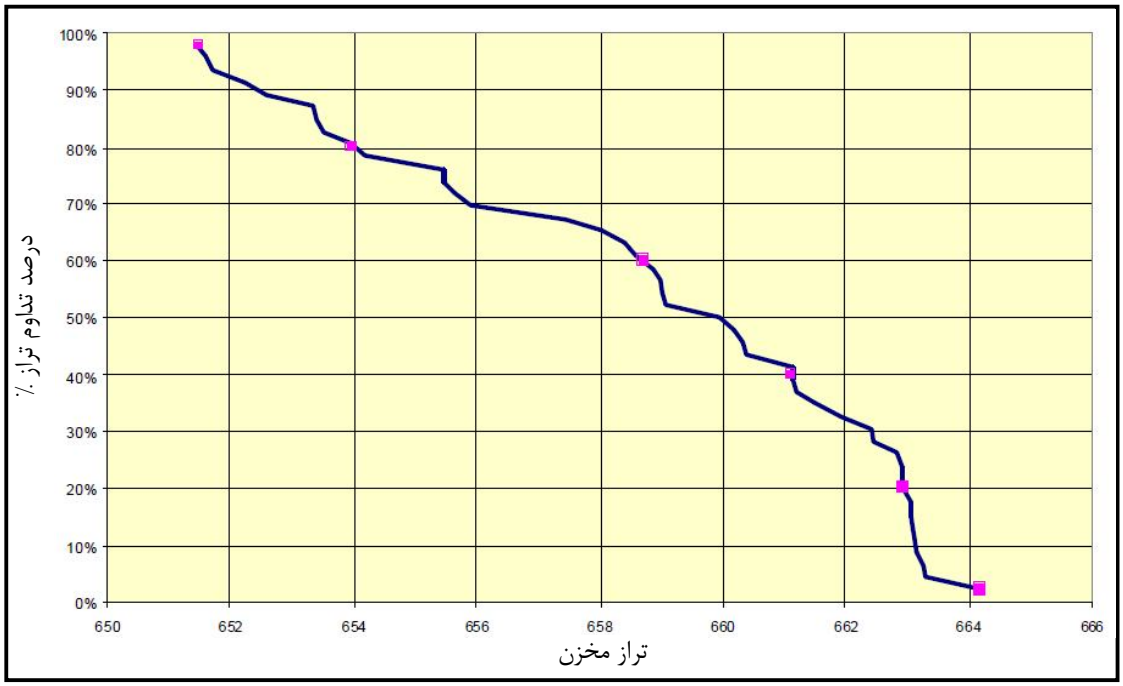


شکل ۷-۴- موقعیت نیروی برآیند و توزیع تنش در سطح گسیختگی در حالات مختلف بارگذاری [۲۷]

با در اختیار داشتن منحنی «تداوم مخزن» و منحنی تراز آب مخزن به ازای دوره‌های بازگشت مختلف، تراز مخزن متناظر با حالات مختلف بارگذاری را می‌توان با توجه به درصد احتمال وقوع تعریف شده برای آن‌ها (مطابق جدول ۶-۱)

در نظر گرفت. برای نمونه، تراز متناظر مخزن برای ترکیب بارهای عادی (تراز نرمال مخزن) را با توجه به درصد احتمال وقوع سالیانه ۱۰٪، می‌توان معادل تراز مخزن با دوره بازگشت ۱۰ سال در نظر گرفت.

در ترکیب بارهای غیرعادی و فوق‌العاده دینامیکی، به‌جای تراز نرمال (یا تراز عادی) مخزن، می‌توان ترازی را در نظر گرفت که با توجه به منحنی تداوم مخزن، در ۵۰٪ از اوقات سال تراز مخزن مساوی یا بیش‌تر از آن است. یک نمونه از برآورد تراز با احتمال تداوم ۵۰٪ در سال در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.



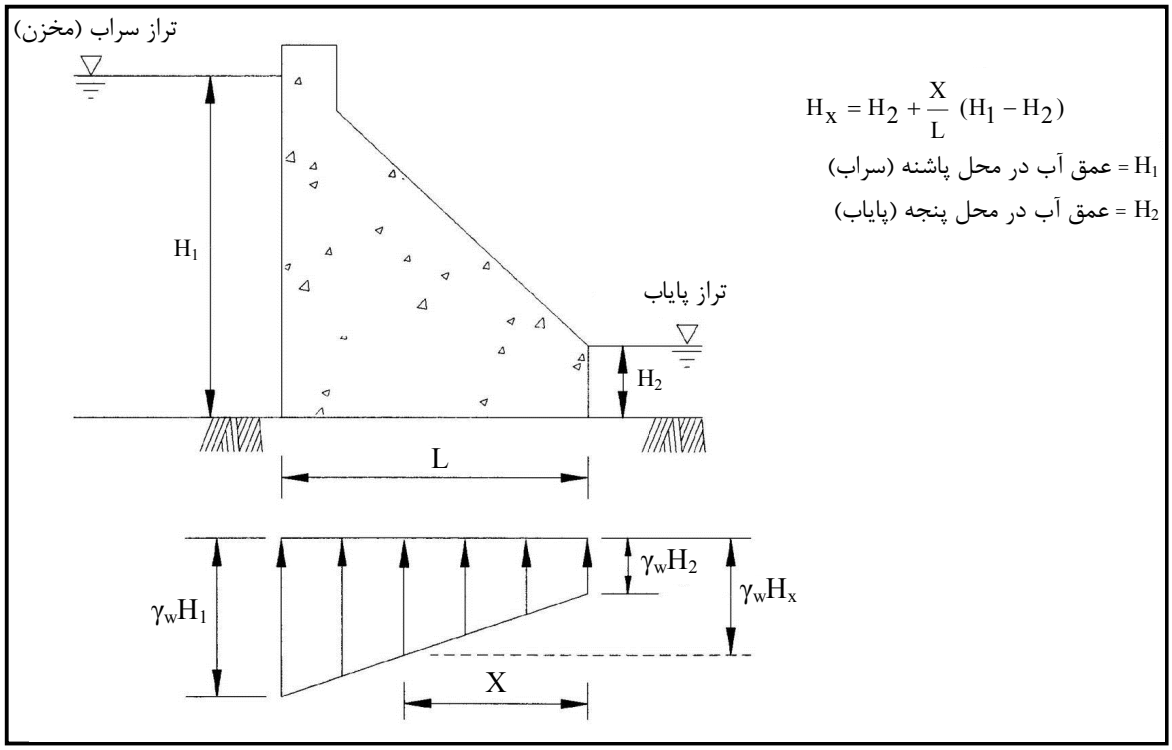
شکل ۷-۵- نمونه منحنی تداوم مخزن (بر اساس منحنی فوق، در ۵۰٪ اوقات سال تراز مخزن بالاتر از تراز ۶۶۰ می‌باشد)

۷-۵-۲- فشار برکنش

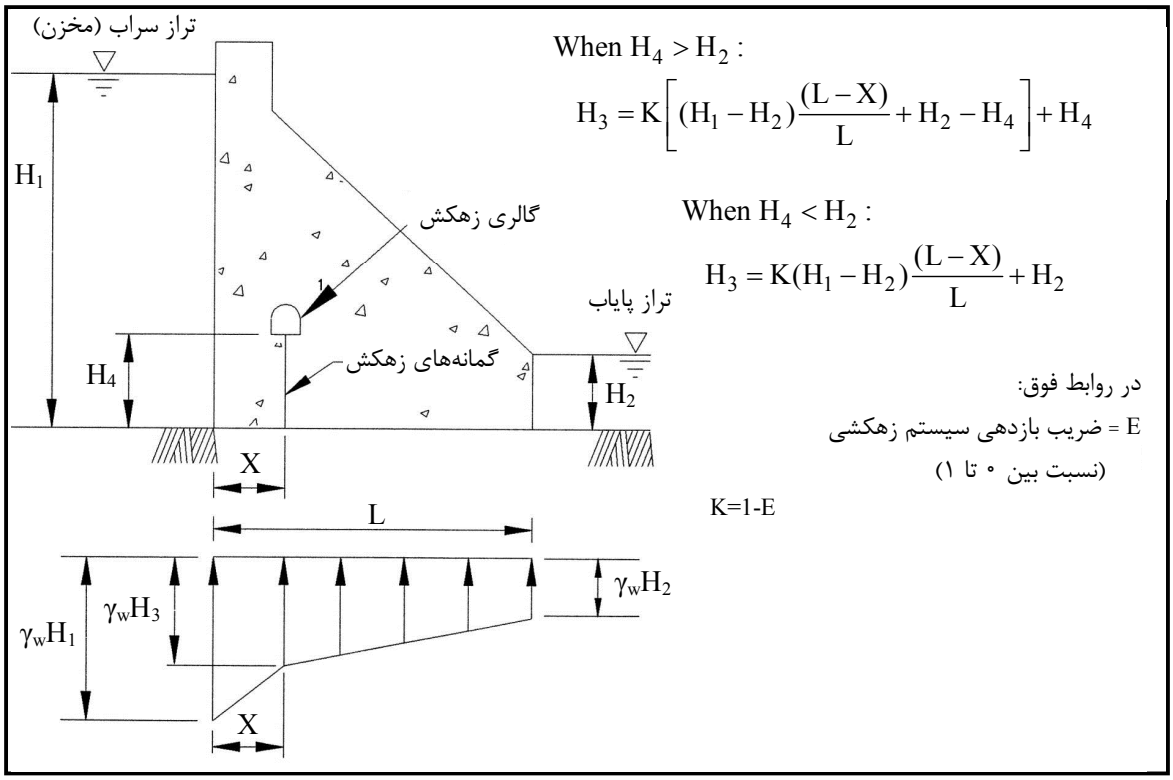
در شرایطی که هیچ تمهید خاصی برای کنترل و کاهش فشار برکنش پیش‌بینی و طراحی نگردد، با فرض نفوذپذیری تقریبا یکنواخت توده سنگ، توزیع فشار برکنش در سطح تماس بدنه سد و پی به صورت خطی بوده و مقادیر آن در بالادست و پایین‌دست به ترتیب برابر فشار هیدرواستاتیک در سراب و پایاب سد است (شکل ۷-۶).

کنترل و کاهش فشار برکنش با تمهیداتی نظیر پرده تزریق و یا یک سیستم زهکش تاثیر قابل توجهی در بهبود وضعیت پایداری سازه (بدنه سد) در برابر مدهای گسیختگی لغزش، واژگونی، و شناوری دارد. به طور معمول بر اساس توصیه‌های نسبتا محافظه‌کارانه استانداردهای موجود، میزان فشار برکنش در سطح تماس بدنه سد و پی در محل پرده تزریق و پرده زهکش حدود «$\frac{۲}{۳}$ اختلاف فشار آب در محل پرده تزریق و فشار پایاب» کاهش می‌یابد. در شکل (۷-۷) روابط محاسباتی و توزیع شماتیک فشار برکنش در صورت استفاده از پرده زهکش (و پرده تزریق) متناسب با درصد بازدهی (Efficiency) این سیستم ارائه شده است. شایان ذکر این‌که فرض معمول کاهش گرادیان فشار برکنش به $\frac{۱}{۳}$

مقدار اولیه متناظر با ضریب بازدهی ۶۷٪ است. تخمین دقیق‌تر توزیع فشار برکنش را با انجام تحلیل نشت در توده سنگ پی سد (با اعمال نفوذپذیری توده سنگ پی، پرده آب‌بند و سیستم زهکش) می‌توان برآورد نمود.



شکل ۷-۶- توزیع فشار برکنش در شرایط عدم وجود پرده تزریق و سیستم زهکش

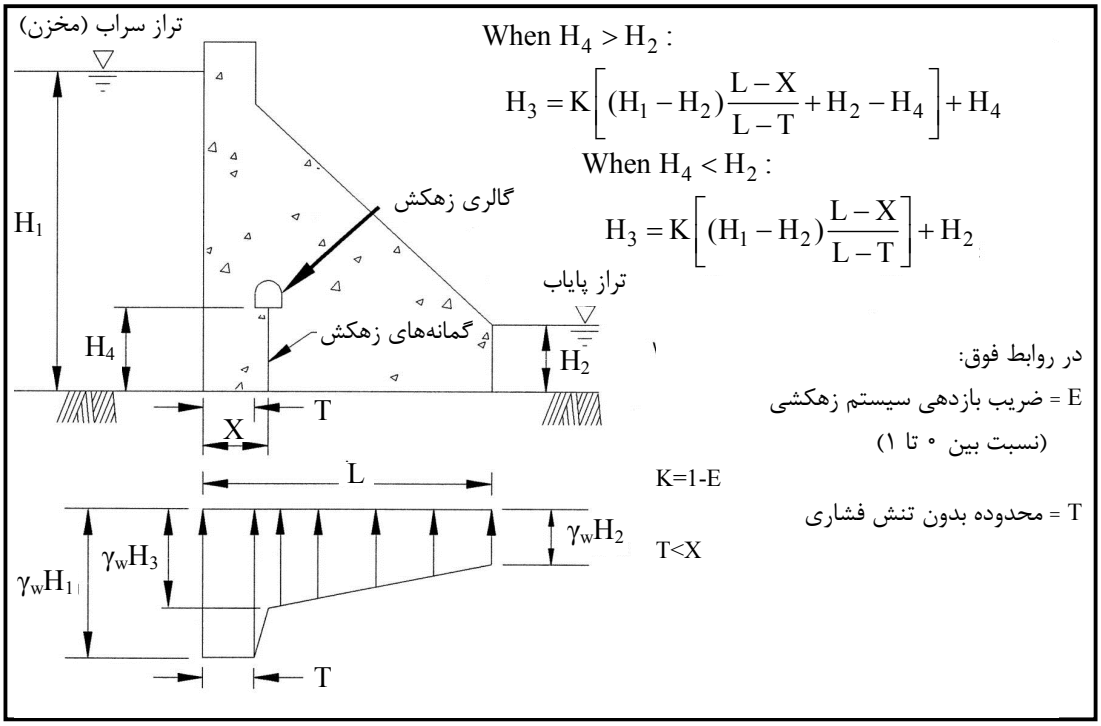


شکل ۷-۷- توزیع فشار برکنش در شرایط استفاده از پرده تزریق و سیستم زهکش

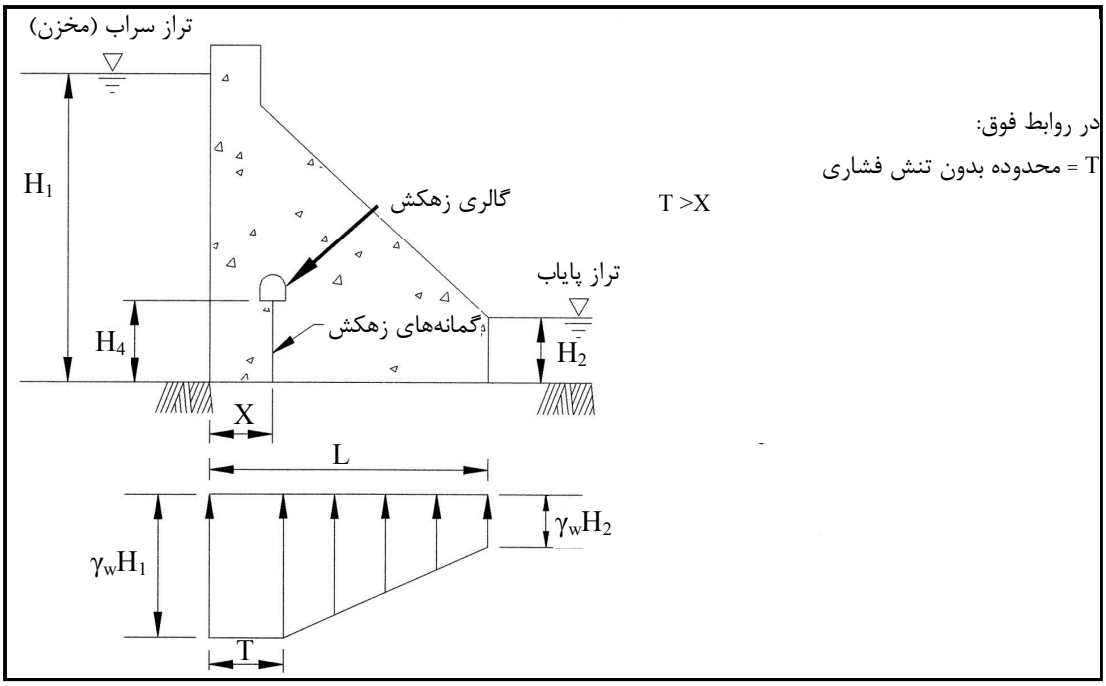
در شرایطی که بر اساس معادلات تعادل نیروها، محل اثر نیروی برایند خارج از هسته مرکزی سطح گسیختگی واقع گردد، بازشدگی در بخشی از سطح گسیختگی در مجاورت رویه بالادست رخ می‌دهد. بنابراین، با توجه به نفوذ آب به بخش بازشده سطح گسیختگی، فشار برکنش در این ناحیه معادل فشار سراب خواهد بود. در این شرایط، اگر محدوده گسترش بازشدگی سطح گسیختگی به موقعیت پرده زهکش (و پرده تزریق) نرسد، توزیع فشار برکنش در باقی‌مانده سطح گسیختگی مطابق شکل (۷-۸) خواهد بود. با افزایش عمق گسترش بازشدگی در سطح گسیختگی و قرار گرفتن پرده زهکش (و پرده تزریق) در این محدوده، عملکرد این سیستم به طور کامل از بین رفته و توزیع فشار برکنش به طور ناگهانی مطابق شکل (۷-۹) افزایش خواهد یافت.

بنا بر روند و نحوه تغییرات فشار برکنش، توجه به موارد ذیل در خصوص تعیین فشار برکنش و رویکرد طراحی سیستم تزریق و زهکش ضروری است:

- با توجه به تاثیر وقوع بازشدگی در سطح گسیختگی بر توزیع فشار و میزان نیروی برکنش، در صورت وقوع این شرایط حل معادلات تعادل باید با اصلاح فشار برکنش تکرار شده و تا حصول شرایط سازگار، روند تکرار محاسبات ادامه یابد.
- با نزدیک‌تر کردن موقعیت پرده زهکش (و پرده تزریق) به رویه بالادست، میزان نیروی برکنش در شرایط عدم وجود پتانسیل بازشدگی در سطح گسیختگی، کاهش می‌یابد. در مقابل، در این شرایط در صورت وقوع بازشدگی حتی محدود در سطح گسیختگی، ریسک ایجاد شکاف و ناکارآمدی پرده تزریق و سیستم زهکش بسیار بیش‌تر بوده و در این حالت، فشار برکنش به نحو قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بنابراین، در طراحی موقعیت پرده تزریق و پرده زهکش در سدها، اعمال یک قاعده کلی و یکسان برای همه موارد منطقی نبوده و طراحی باید متناسب با شرایط هر پروژه انجام پذیرد.

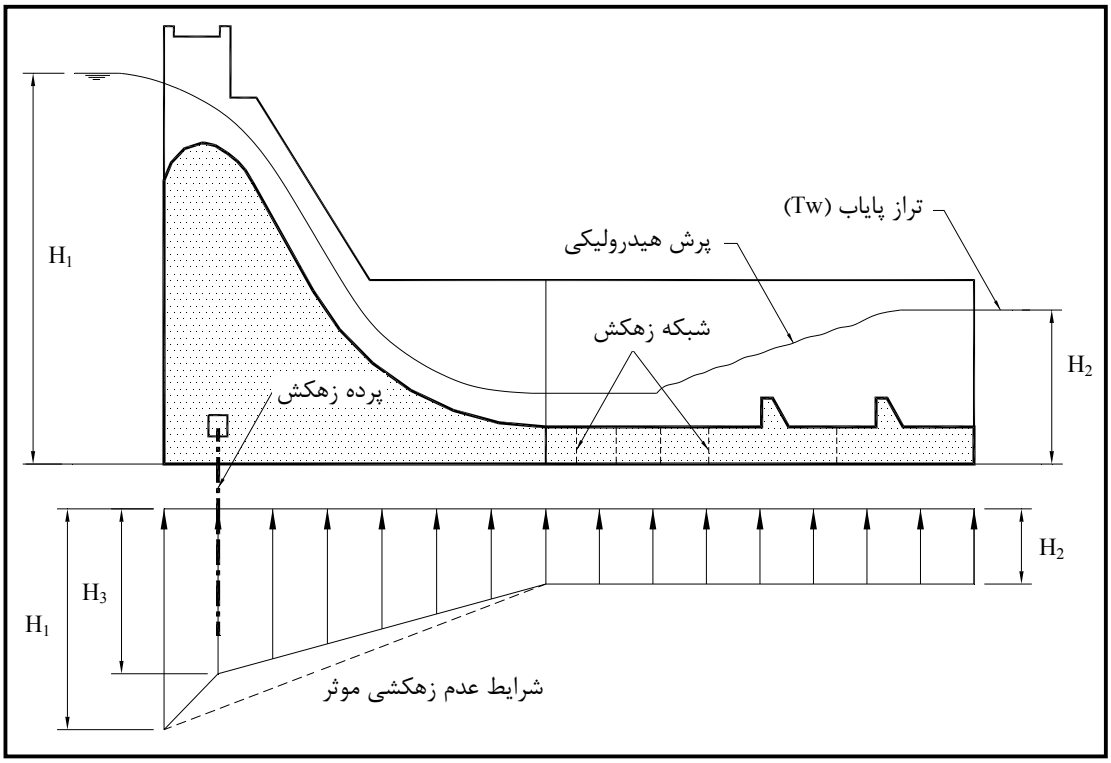


شکل ۷-۸- توزیع فشار برکنش در شرایط وقوع بازشدگی محدود در سطح گسیختگی (عدم تلاقی ناحیه باز شده با پرده زهکش)



شکل ۷-۹- توزیع فشار برکنش در شرایط وقوع بازشدگی گسترده در سطح گسیختگی (تلاقی ناحیه باز شده با پرده زهکش)

در شرایط خاص، نظیر مقاطع سرریز با حوضچه آرامش و یا در سدهای انحرافی، توزیع فشار برکنش با توجه به تمهیدات کاهش و کنترل زیرفشار تعیین می‌گردد (شکل ۷-۱۰).



شکل ۷-۱۰- توزیع فشار برکنش در مقاطع سرریز شونده با حوضچه آرامش

از بعد فشار برکنش (یا فشار منفذی)، ویژگی شاخص سدهای وزنی بتن غلتکی در مقایسه با سدهای بتنی وزنی متعارف، نفوذپذیری بیش‌تر جسم سد، به خصوص در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و متوسط، می‌باشد. بنابراین، پتانسیل بسیج فشار برکنش در سطوح واریز بتن غلتکی، که در تحلیل‌های پایداری به عنوان یکی از گزینه‌های سطوح مستعد گسیختگی مطرح می‌باشند، وجود خواهد داشت. در این شرایط، تامین الزامات پایداری ممکن است به طراحی یک شکل هندسی حجیم‌تر برای مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی (در مقایسه با سدهای بتنی وزنی متعارف) منجر گردد.

در صورت استفاده از لایه بتن متعارف (یا هر نوع المان آب‌بند دیگر) در رویه بالادست سد و حذف یا کاهش قابل توجه پتانسیل نفوذ آب به جسم بدنه سد، فشار آب منفذی محدود ایجاد شده در سطوح واریز بتن قابل صرف‌نظر خواهد بود. در این حالت یکپارچگی و انسجام المان آب‌بند رویه بالادست سد در شرایط بهره‌برداری و محیطی مختلف، به خصوص تحت اثر بار زلزله، باید به دقت بررسی و کنترل گردد.

استفاده از یک سیستم زهکش (شبکه گمانه‌ها و گالری زهکش) در داخل بدنه سدهای وزنی بتن غلتکی نیز تمهید مناسب و موثری برای کاهش فشار برکنش در جسم بدنه سد است.

در خصوص طراحی و پیش‌بینی هر یک از تمهیدات فوق‌الذکر، باید به این نکته توجه داشت که اجرای این تمهیدات منجر به اخلال و کاهش بیش از حد در سرعت و سهولت عملیات اجرایی بتن غلتکی نگردد. بنابراین انتخاب و اجرای تمهیدات کاهش فشار برکنش در جسم بدنه سد (در مقابل افزایش حجم بتن غلتکی به دلیل پذیرش فشار برکنش در داخل جسم سد) باید به دقت از ابعاد فنی، اجرایی و اقتصادی، و همچنین از بعد الزامات و ملاحظات مربوط به دوام بتن و زیبایی ظاهری رویه پایین‌دست سد بررسی شده و شرایط بهینه و منطقی طراحی با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و ملاحظات خاص مربوط به هر پروژه، در نظر گرفته شود. انتخاب و طراحی پرده تزریق و سیستم زهکش در توده سنگ پی سدهای وزنی بتن غلتکی نیز، با رویکرد و نگرش مشابهی باید بررسی و ارزیابی گردد.

۷-۵-۳- بارهای ناشی از زلزله

نیروهای ناشی از شتاب زلزله بر روی سدها را به طور کلی می‌توان به دو گروه نیروهای اینرسی وارد بر جرم بدنه سد، و نیروهای هیدرودینامیک ناشی از ارتعاش آب مخزن دسته‌بندی نمود. به طور معمول در تحلیل‌های پایداری مبتنی بر روش تعادل حدی با توجه به رفتار تقریبا صلب سدهای بتنی وزنی، برای برآورد نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله از روش‌های ساده شده شبه‌استاتیکی استفاده می‌گردد. برای این منظور، شتاب شبه‌استاتیکی معادل شتاب‌های دینامیکی زلزله، با اعمال یک ضریب کاهنده معادل $\frac{۲}{۳}$ به شتاب بیشینه زمین یا PGA (در سطح زلزله مورد نظر) تعیین می‌گردد. شتاب افقی زلزله را می‌توان در راستاهای بالادست یا پایین‌دست، و شتاب قائم زلزله را می‌توان در راستاهای بالا و پایین اعمال نمود. بر اساس تجارب و توصیه‌های موجود در سدهای بتنی وزنی، اعمال نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله در

راستای پایین‌دست و بالا شرایط بحرانی‌تری به‌دست خواهد داد (صرفا در شرایط مخزن خالی، اعمال نیروی دینامیکی ناشی از زلزله در راستای بالادست منجر به نتایج بحرانی‌تری می‌گردد).

نکته مهم دیگر که در برآورد نیروهای ناشی از زلزله باید مد نظر قرار گیرد این است که بیشینه شتاب قائم زلزله در غالب موارد از بیشینه شتاب افقی زلزله کوچک تر بوده و این مقادیر بیشینه شتاب‌های افقی و قائم به طور هم‌زمان و هماهنگ رخ نمی‌دهند. بر این اساس در تحلیل‌های پایداری به روش تعادل حدی، معمولا از اثر توام شتاب‌های افقی و قائم زلزله صرف نظر شده و فقط اثر شتاب افقی زلزله در محاسبه نیروهای ناشی از زلزله مد نظر قرار می‌گیرد. با این حال در موارد خاصی که مقادیر و نسبت شتاب‌های افقی و قائم زلزله قابل تامل بوده و این احتمال وجود دارد که اعمال هم‌زمان ترکیبی از شتاب‌های افقی و قائم زلزله منجر به شرایط بحرانی‌تری از بعد پایداری گردد، می‌توان ترکیب‌های هم‌زمان زیر را در محاسبه بارهای دینامیکی ناشی از زلزله در نظر گرفت:

- کل شتاب شبه‌استاتیکی افقی (معادل $\frac{۲}{۳}$ بیشینه شتاب افقی)
- $\frac{۲}{۳}$ شتاب شبه‌استاتیکی افقی (معادل $\frac{۴}{۹}$ بیشینه شتاب افقی) و $\frac{۱}{۳}$ شتاب شبه‌استاتیکی قائم ($\frac{۲}{۹}$بیشینه شتاب قائم)
- $\frac{۱}{۳}$ شتاب شبه‌استاتیکی افقی (معادل $\frac{۲}{۹}$ بیشینه شتاب افقی) و $\frac{۲}{۳}$ شتاب شبه‌استاتیکی قائم ($\frac{۴}{۹}$ بیشینه شتاب قائم)
- کل شتاب شبه‌استاتیکی قائم (معادل $\frac{۲}{۳}$ بیشینه شتاب قائم)

بر اساس رویکرد فوق، نیروی اینرسی بدنه سد را می‌توان از ضرب مقدار شتاب شبه‌استاتیکی (افقی یا قائم) زلزله مورد نظر در جرم بدنه سد محاسبه نمود. محل اثر این نیرو(ها) در مرکز جرم بدنه سد می‌باشد.

در تحلیل‌های پایداری، نیروی هیدرودینامیک مخزن در اثر شتاب‌های زلزله را نیز می‌توان از روش‌های تقریبی مناسب، به شرح زیر، برآورد نمود:

- نیروی هیدرودینامیک مخزن در اثر شتاب قائم زلزله: توزیع فشار هیدرودینامیک مخزن بر رویه بالادست سد در اثر شتاب قائم زلزله، به صورت خطی، دقیقا مشابه با الگوی توزیع فشار هیدرواستاتیک، و متناسب با مقدار شتاب قائم شبه‌استاتیکی می‌باشد. با توجه به جهت شتاب قائم، نیروی هیدرودینامیک مخزن ممکن است هم‌جهت و یا در خلاف جهت فشار هیدرواستاتیک مخزن باشد (در حالتی که شتاب زلزله به سمت بالا باشد، فشار هیدرودینامیک آب با فشارهیدرواستاتیک هم‌جهت، و در حالتی که شتاب زلزله به سمت پایین باشد، فشار هیدرودینامیک آب در خلاف جهت فشارهیدرواستاتیک خواهد بود). در صورتی‌که ارتفاع آب در پایاب قابل توجه باشد، با روند مشابهی نیروی هیدرودینامیک ناشی از اثر زلزله در پایاب نیز باید محاسبه و این نیرو بر رویه پایین‌دست سد اعمال گردد.

- نیروی هیدرودینامیک مخزن در اثر شتاب افقی زلزله: وسترگارد در سال ۱۹۳۳ رابطه تقریبی محاسبه فشار هیدرودینامیک مخزن در اثر شتاب افقی زلزله را با فرض رفتار تقریبا صلب و رویه قائم بدنه سدهای بتنی وزنی، و همچنین رفتار تراکم‌ناپذیر آب و محیط نیمه بی‌نهایت مخزن، ارائه نموده است. با توجه به سادگی و دقت قابل قبول این رابطه برای برآورد نیروی هیدرودینامیک، کاربرد آن در تحلیل‌های مبتنی بر روش شبه‌استاتیکی، از جمله تحلیل‌های پایداری تعادل حدی، بسیار مرسوم می‌باشد. در رابطه ۷-۶، فرمول اصلاح شده وسترگارد برای محاسبه نیروی هیدرودینامیک در سطوح شیب‌دار رویه سد ارائه شده است (قابل ذکر این که نیروی هیدرودینامیک عمود بر رویه شیب‌دار سد می‌باشد):

$$P_{EH} = \frac{7}{12}.\frac{90-\varphi}{90}.\gamma_w K_H.\frac{\alpha_H}{g}.h^2 \qquad (۶-۷)$$
$$P_{EV} = P_{EH}.\tan\varphi$$

در این رابطه:

P_{EH} = مولفه افقی نیروی هیدرودینامیک،

P_{EV} = مولفه قائم نیروی هیدرودینامیک،

φ = زاویه رویه بالادست سد با امتداد قائم،

γ_w = وزن مخصوص آب،

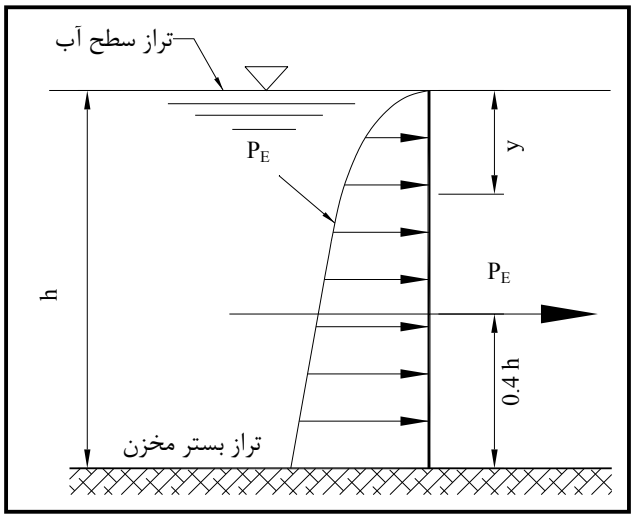
K_H = ضریب (کاهش شتاب) زلزله،

α_H = بیشینه شتاب افقی زمین در سطح زلزله مورد نظر،

g = شتاب ثقل، و

h = ارتفاع آب، می‌باشند.

توزیع فشار هیدرودینامیک مخزن در رابطه پیشنهادی وسترگارد به صورت سهمی بوده و محل اثر نیروی هیدرودینامیک در ارتفاع می‌باشد (شکل ۷-۱۱).



شکل ۷-۱۱- توزیع فشار هیدرودینامیک در اثر شتاب افقی زلزله بر اساس رابطه وسترگارد

در شرایطی که شتاب زلزله به سمت بالادست باشد، نیروی هیدرودینامیک در رویه بالادست بـه صـورت فشـاری و در رویه پایین‌دست (ناشی از پایاب) به صورت مکش؛ و در شرایطی که شـتاب زلزلـه بـه سـمت پـایین‌دسـت باشـد، نیـروی هیدرودینامیک در رویه بالادست به صورت مکش و در رویه پایین‌دست (ناشی از پایاب) به صورت فشاری خواهد بود.

فصل ۸

تحلیل حرارت بدنه سد

۸-۱- کلیات

تنش‌های حرارتی در سدهای بتنی (بتن حجیم) در اثر فرایند انتقال و تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف برای آزادسازی حرارت ناشی از واکنش هیدراتاسیون سیمان در بتن، ایجاد می‌شوند. حرارت ناشی از واکنش سیمان در سنین اولیه، زمانی که بتن هنوز حالت خمیری داشته و به‌تدریج سختی خود را به‌دست می‌آورد، در جسم بتن ایجاد می‌گردد. این حرارت اضافی، منجر به افزایش دما و انبساط بتن در سنین اولیه و در نتیجه ایجاد تنش‌های فشاری در بتن می‌گردد. با افزایش دمای جسم بتن در اثر تولید حرارت اضافی، گرادیان حرارتی بین جسم بتن و محیط اطراف ایجاد شده و فرایند تبادل حرارتی بتن با محیط برای آزادسازی حرارت اضافی و دستیابی به یک تعادل حرارتی آغاز می‌گردد. در این فرایند، به‌دلیل روند ناهمسان و غیریکنواخت کاهش دما، سخت شدن نسبی بتن، و گیرداری‌های ایجاد شده در مرزهای اتکایی و در درون جسم بتن، تنش‌های کششی غیریکنواختی در بخش‌های مختلف بتن ایجاد می‌گردد که می‌توانند منجر به وقوع ترک در بتن گردند.

در سدهای بتنی وزنی متعارف، برای کنترل فرایند سرمایش بتن حجیم، از سیستم پس سرمایش بتن استفاده می‌گردد. طراحی سیستم پس سرمایش بتن مستلزم اجرای یک شبکه لوله در حجم بتن، تامین آب خنک برای تزریق در این شبکه لوله‌ها، و پیش‌بینی سیستم تغذیه و تخلیه شبکه لوله‌های پس‌سرمایش در نواحی مختلف بتن (که معمولا از طریق شبکه گالری‌های داخل بدنه سد انجام می‌گردد) می‌باشد. از آنجا که اجرای سیستم پس سرمایش و انجام این عملیات نسبتا زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، استفاده از این سیستم در سدهای وزنی بتن غلتکی موجب ایجاد اخلال جدی در فرایند اجرای بتن شده و مغایر با فلسفه و مبانی این سدها خواهد بود. به همین جهت رویکرد کنترل فرایند سرمایش بتن حجیم در سدهای وزنی بتن غلتکی مبتنی بر کاهش میزان سیمان تا حد ممکن، جایگزینی سیمان با پوزولان، کاهش ارتفاع لیفت‌های بتن‌ریزی و تنظیم سرعت عملیات اجرایی لیفت‌های متوالی بتن برای کنترل گرادیان حرارتی می‌باشد. بدیهی است در این شرایط، اهمیت و حساسیت تحلیل‌های حرارتی بسیار بیش‌تر بوده و این تحلیل‌ها کاملا متاثر از طرح اختلاط، فرایند تولید، روش، و سرعت اجرای بتن غلتکی خواهد بود.

تحلیل‌های حرارتی در دوره ساخت بر مبنای تحلیل و محاسبه کرنش کششی ناشی از تغییرات دمای بتن در سنین اولیه انجام پذیرفته و معیار پذیرش نتایج تحلیل‌های حرارتی، مقایسه کرنش کششی ایجاد شده در بتن با ظرفیت کرنش کششی بتن غلتکی می‌باشد. مبانی و جزییات روش‌های ساده و تفصیلی تحلیل‌های حرارتی در این فصل ارائه می‌گردد.

۸-۲- مکانیزم ترک‌های حرارتی

مکانیزم‌های ایجاد ترک در فرایند تبادل حرارتی بتن با محیط و سرد شدن بتن را به دو دسته می‌توان تقسیم نمود: مکانیزم ایجاد ترک در سطوح یا رویه‌های بتن (ترک‌های سطحی)، و مکانیزم ایجاد ترک در حجم بتن (ترک‌های حجمی).

الف- مکانیزم گیرداری داخلی (ترک‌های سطحی)

در فرایند سرد شدن بتن، به‌دلیل تبادل حرارتی سریع رویه‌های بتن با محیط اطراف، دمای بتن مجاور رویه‌ها بسرعت کاهش یافته و بتن در این نواحی تمایل به انقباض دارد در حالی که بخش داخلی بتن هنوز گرم و منبسط یافته می‌باشد. در این شرایط، یک شبکه ترک‌های کششی متعامد با راستاهای عمود بر رویه بتن در محدوده بتن خنک شده سطحی رخ می‌دهند. این مکانیزم، اصطلاحا گیرداری داخلی بتن (Internal Restraint) نامیده می‌شود و ترک‌های ناشی از آن، ترک های حرارتی سطحی نامیده می‌شوند. عمق نفوذ ترک‌های حرارتی سطحی در جسم بتن، با توجه به کاهش شتاب تبادل حرارتی بتن با فاصله گرفتن از سطوح رویه، نسبتا محدود می‌باشد. مکانیزم ایجاد ترک‌های حرارتی سطحی در اثر تبادل حرارتی سریع بتن مجاور رویه‌ها (مکانیزم گیرداری داخلی بتن) به صورت شماتیک در شکل (۸-۱) نشان داده شده است.

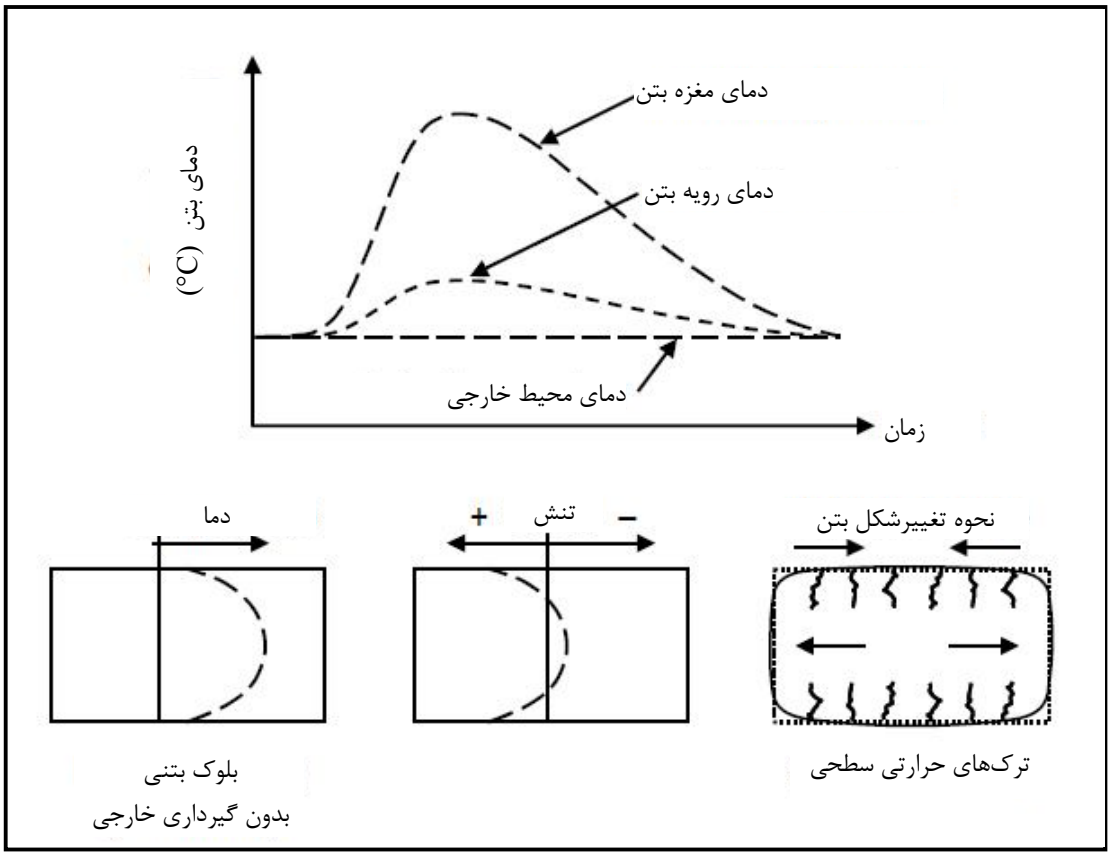
ب- مکانیزم گیرداری خارجی (ترک‌های حجمی)

با آزاد شدن تدریجی حرارت اضافی و کاهش دمای بتن، جسم بتن به طور کلی تمایل به کاهش حجم و انقباض می‌یابد. در این فرایند، به دلیل گیرداری بتن در مرزهای اتکایی آن، امکان جمع‌شدن بتن (و لغزش در سطح اتکای بتن) کاملا محدود بوده و این شرایط منجر به ایجاد تنش‌های کششی حرارتی در مجاورت سطوح اتکایی بتن و توسعه این تنش‌ها تا بخش‌های مرکزی بتن می‌گردد. با افزایش این تنش‌های کششی، ترک‌های حرارتی در مجاورت سطوح اتکایی بتن ایجاد شده و با توجه به مکانیزم و توزیع تنش‌های کششی، پتانسیل گسترش و نفوذ این ترک‌ها تا عمق نسبتا زیاد در بخش‌های مرکزی بتن وجود خواهد داشت. با توجه به گستردگی و عمیق بودن این نوع ترک‌ها، به آن‌ها ترک‌های حرارتی حجمی اطلاق شده و مکانیزم ایجاد آن‌ها با عنوان مکانیزم گیرداری خارجی (External Restraint) نامیده می‌شود. مکانیزم ایجاد ترک‌های حرارتی حجمی در بتن در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری و مقاومت در برابر انقباض بتن در مجاور سطوح اتکایی به صورت شماتیک در شکل (۸-۲) نشان داده شده است (مکانیزم گیرداری خارجی).

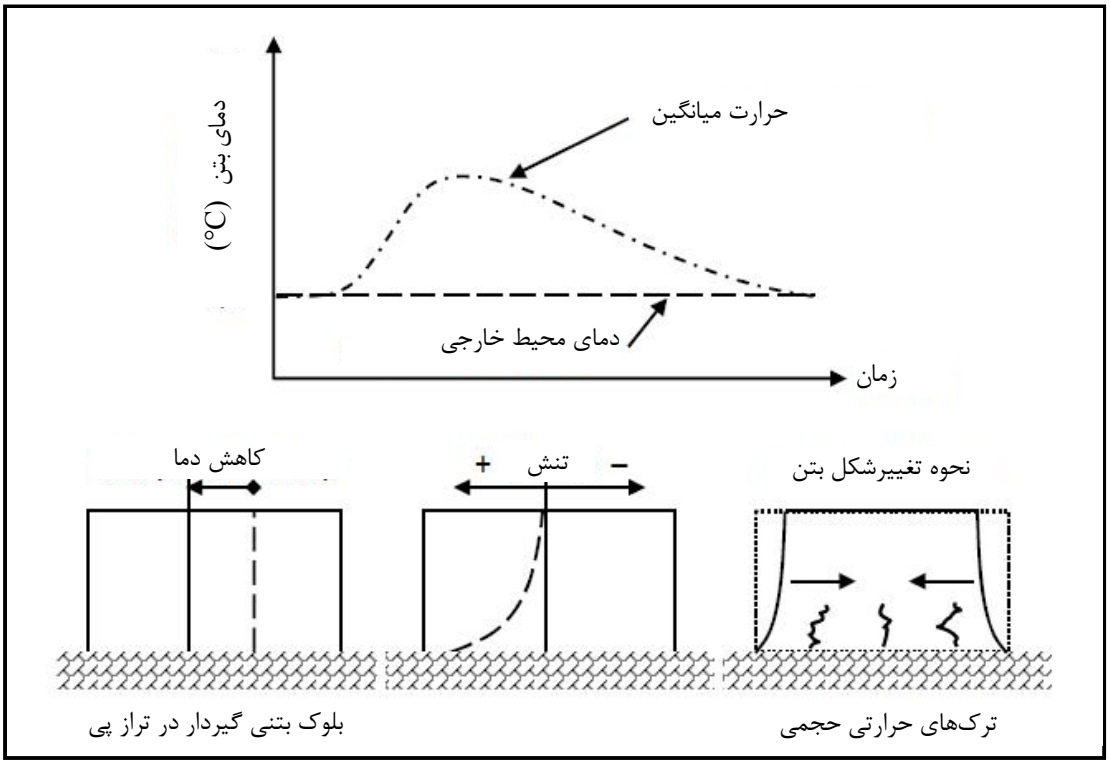
۸-۳- داده‌های پایه مورد نیاز

الف- دمای هوا

میزان و دامنه نوسانات دمای هوای ساختگاه سد یکی از اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز جهت انجام مطالعات حرارتی می‌باشد. دمای هوای ساختگاه در واقع شاخص تعیین دمای پایدار بلند مدت جسم بتن بوده و کنترل کننده کیفیت فرایند تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف (هم در سنین اولیه بتن و هم در دوره بهره‌برداری) خواهد بود. بنابراین، برای کاهش و کنترل ترک‌های حرارتی، میزان پیش‌سرمایش بتن و دمای پخش بتن تازه بر مبنای دامنه نوسانات دمای هوای محیط باید تعیین و انتخاب گردد.



شکل ۸-۱- مکانیزم ترک‌خوردگی سطحی بتن در اثر تبادل حرارتی سریع بتن رویه با محیط اطراف (مکانیزم گیرداری داخلی)



شکل ۸-۲- مکانیزم ترک‌خوردگی حجمی بتن در اثر کاهش دمای کلی و گیرداری بتن در مجاور سطوح اتکایی (مکانیزم گیرداری خارجی)

با توجه به نرخ نفوذ بسیار کم حرارت محیطی به جسم بتن، دامنه نوسانات روزانه دمای محیط (هوا) منجر به یک سری ترک‌های ریز مویی در سطح بتن (با عمق نفوذ بسیار کم) می‌گردد. این ترک‌های ریز مویی تاثیر محسوسی بر یکپارچگی بتن نداشته و به طور معمول در تحلیل‌های حرارتی بتن حجیم، از گرادیان‌های حرارتی گذرای ناشی از تغییرات روزانه دمای محیط صرف نظر می‌گردد. بنابراین، بازه زمانی تحلیل‌های حرارتی «حداقل یک سال»، و گام زمانی تغییرات دمایی محیط، «یک ماه» در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، تغییرات میانگین ماهانه دمای محیط (هوا) در طی سال - که باید بر اساس متوسط مقادیر دمای میانگین ماهانه در یک دوره حداقل ۱۰ ساله محاسبه شده باشند – در تحلیل‌های حرارتی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت نوسانی تغییرات دمای میانگین ماهانه محیط، به طور معمول می‌توان یک منحنی سینوسی به تغییرات دمای میانگین ماهانه در طی یک سال برازش داد.

ب- سرعت باد

در فرایند تبادل حرارتی جسم بتن با محیط اطراف (هوا)، دمای هوا افزایش یافته و گرادیان حرارتی موثر بین بتن و محیط، و متناسبا نرخ تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف آن، کاهش می‌یابد. بنابراین سرعت تبادل حرارتی و کاهش دما در محیط، می‌تواند تاثیر محسوسی بر نرخ تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف خود داشته باشد. یکی از عوامل موثر در سرعت تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف، سرعت باد در محل اجرای بتن حجیم است؛ هر چه سرعت باد بیش‌تر باشد، سرعت انتقال حرارت در محیط اطراف افزایش می‌یابد. سرعت تبادل حرارتی و کاهش دما در محیط اطراف بتن، با ضریبی به نام ضریب فیلم (Film Coefficient) در تحلیل‌های حرارتی وارد می‌گردد.

بر اساس مکانیزم فوق، و با توجه به مقیاس زمانی تحلیل‌های حرارتی، مقادیر میانگین ماهانه سرعت باد در ساختگاه (مستقل از جهت آن) برای محاسبه ضریب فیلم در تحلیل‌های حرارتی مورد نیاز است [۳۱].

ج- ویژگی‌های بتن

از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین داده‌های مورد نیاز در تحلیل‌های حرارتی، ویژگی‌های حرارتی بتن غلتکی شامل نرخ و میزان تولید حرارت در فرایند هیدراتاسیون، ظرفیت حرارتی ویژه، نرخ تبادل حرارتی، و ...، می‌باشد که خود تابع نوع مواد سیمانی، نوع سنگ‌دانه‌ها، و طرح اختلاط بتن است. علاوه بر این، برای محاسبه کرنش‌ها و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در بتن، خواص مکانیکی بتن غلتکی نیز جهت انجام تحلیل‌های حرارتی مورد نیاز است. ویژگی‌ها و خواص حرارتی و مکانیکی بتن و اجزای تشکیل دهنده آن در فصل‌های دوم و چهارم این راهنما به تفصیل ارائه شده است.

به این نکته باید توجه داشت که با توجه به تغییرات ماهیتی بتن در فرایند واکنش هیدراتاسیون، برخی ویژگی‌های بتن تابع میزان و نرخ پیشرفت فرایند هیدراتاسیون (به بیان دیگر تابع زمان و دما) می‌باشند. در مراحل اولیه مطالعات و در شرایطی که تعیین ویژگی‌های مخلوط بتن غلتکی بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی مقدور نباشد، می‌توان از مراجع معتبر و نتایج پروژه‌های مشابه برای تخمین ویژگی‌های بتن استفاده نمود.

۸-۴- تحلیل‌های حرارتی بتن غلتکی

با توجه به اهداف مطالعات و میزان دقت مورد نظر، به طور معمول تحلیل‌های حرارتی سازه‌های حجیم بتنی در سه سطح مختلف انجام می‌پذیرد. در «سطح ۱» که ساده‌ترین سطح تحلیل‌های حرارتی می‌باشد، تحلیل حرارتی جسم بتن بر پایه فرضیات ساده کننده متعدد و به صورت تقریبی انجام می‌یابد. با توجه به ماهیت تقریبی این سطح از تحلیل‌های حرارتی، نیازی به انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص حرارتی و مکانیکی بتن نبوده و داده‌های مورد نیاز بر پایه نتایج پروژه‌های مشابه و یا توصیه‌ها و پیشنهادهای مراجع معتبر تعیین می‌گردند. این سطح از تحلیل‌های حرارتی برای مراحل اولیه مطالعات سدهای وزنی بتن غلتکی، و یا در مورد پروژه‌هایی که ریسک وقوع و اهمیت ترک های حرارتی بالا نباشد (نظیر فرازبندهای بتن غلتکی)، مناسب و قابل توصیه است. در برخی موارد با انجام تحلیل‌های حرارتی ساده شده سطح ۱، میزان ضرورت و حساسیت انجام مطالعات و تحلیل‌های حرارتی دقیق‌تر مشخص می‌گردد.

در «سطح ۲» تحلیل‌های حرارتی، ریسک وقوع و برآورد میزان گسترش ترک های حرارتی با استفاده از مدل‌ها و روش‌های تحلیلی دقیق‌تر (مانند روش اجزای محدود) ارزیابی می‌گردد. این سطح از تحلیل‌های حرارتی نیاز مند به داده‌های پایه نسبتا دقیق از شرایط محیطی و خواص حرارتی و مکانیکی بتن غلتکی بوده و برای مطالعات تفصیلی طیف گسترده‌ای از سدهای وزنی بتن غلتکی معمول کاربرد دارد.

در «سطح ۳» تحلیل‌های حرارتی که دقیق‌ترین و کامل‌ترین سطح انجام تحلیل‌های حرارتی می‌باشد، تحلیل حرارتی و تحلیل کرنش (و تنش) بتن غلتکی به طور توام و مرتبط (Coupled) انجام می‌پذیرد. علاوه بر این، در این تحلیل‌ها جزییات و برنامه زمانی عملیات اجرای لیفت‌های متوالی (و یا مجاور) بتن غلتکی نیز لحاظ می‌گردد. با توجه به سطح دقت تحلیل‌های حرارتی سطح ۳، انجام این تحلیل‌ها نیازمند داده‌های پایه تفصیلی و متنوع در خصوص شرایط محیطی، خواص حرارتی و مکانیکی بتن غلتکی، و فرایند و نحوه اجرای بتن غلتکی می‌باشد. در این روش، خواص حرارتی و مکانیکی بتن غلتکی غالبا باید با انجام آزمایش‌های خاص برای پروژه مورد نظر تعیین گردند.

با توجه به ماهیت تحلیل‌های سطح ۳، انجام تحلیل‌های تکرار شونده، که در برخی موارد باید بر پایه مدل‌های رفتاری غیرخطی استوار باشند، ضروری می‌گردد. کاربرد تحلیل‌های حرارتی سطح ۳، صرفا در مواردی که ارزیابی دقیقی از ریسک وقوع ترک‌های حرارتی در نواحی بحرانی سدهای وزنی بتن غلتکی مد نظر باشد، توجیه‌پذیر و منطقی خواهد بود. با توجه به این شرایط، عملا تمرکز و کیفیت تحلیل‌های حرارتی سطح ۳ در موارد مختلف تابع شرایط پروژه مورد نظر بوده و متفاوت خواهد بود. بر این اساس، اگرچه اصول و فرایند تحلیل‌های حرارتی سطح ۳ کاملا مشابه با تحلیل‌های حرارتی سطح ۲ می‌باشد، ولی تدوین و ارائه یک جزییات و کیفیت همسان برای مراحل و گام‌های تحلیل‌های حرارتی سطح ۳ میسر و منطقی نمی‌باشد.

در ادامه، جزییات و فرایند تحلیل‌های حرارتی ساده شده سطح ۱، و تحلیل‌های حرارتی نسبتا دقیق سطح ۲، که طیف وسیعی از نیازها و اهداف تحلیل‌های حرارتی را در پروژه‌های مختلف پوشش می‌دهند، ارائه می‌گردد.

۸-۴-۱- تحلیل‌های حرارتی سطح ۱

در این سطح از تحلیل‌های حرارتی، در اولین گام، حداکثر دمای بتن به صورت محافظه‌کارانه با برهم‌نهی دمای پخش بتن و افزایش دمای آدیاباتیک ناشی از حرارت هیدراتاسیون در مخلوط بتن، محاسبه می‌شود. در این گام، از تلفات حرارتی بتن در سنین اولیه، تا مرحله تحقق دمای حداکثر در بتن تازه، صرف‌نظر می‌گردد. در مرحله بعد، فرض می‌گردد بتن در یک مدت زمان کافی بعد از تحقق دمای حداکثر، با محیط اطراف تبادل حرارتی داشته و به دمای پایدار خود، که معمولا معادل متوسط سالیانه دمای هوا در نظر گرفته می‌شود، می‌رسد. البته باید توجه داشت که به خصوص برای بتن‌های غلتکی با ضخامت کم، نوسانات دمای محیط در طی سال (که به منزله دمای پایدار نهایی در نظر گرفته می‌شود) می‌تواند در کرنش‌ها و تنش‌های حرارتی، و در نتیجه در ریسک وقوع ترک‌های حرارتی تاثیرگذار باشد. مراحل تحلیل حرارتی سطح ۱ در روابط (۸-۱) تا (۸-۳) ارائه شده است؛ در رابطه (۸-۱) دمای حداکثر بتن، در رابطه (۸-۲) دمای پایدار یا دمای حداقل بتن، و در رابطه (۸-۳) گرادیان حرارتی وارد بر بتن محاسبه شده‌اند:

$$T_{max} = T_P + \Delta T_{adiabatic} \qquad (۱-۸)$$

$$T_{min} = T_{Avg} - T_{Amp}\exp(-z\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\gamma}}) \qquad (۲-۸)$$

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \qquad (۳-۸)$$

در این روابط، T_p، T_{Avg}، T_{Amp} و $\Delta T_{adiabatic}$ به ترتیب معرف دمای پخش بتن (Placing Temperature)، متوسط سالیانه دمای هوا، دامنه تغییرات دمای هوا، و افزایش دمای آدیاباتیک مخلوط بتن غلتکی می‌باشند. همچنین مقادیر α، γ و z به ترتیب ضریب پرانش حرارتی بتن (Thermal Diffusivity)، پریود تغییرات دمای هوا (معادل ۳۶۵ روز) و فاصله مغز بتن تا سطح بتن هستند [۳۱].

۸-۴-۲- تحلیل‌های حرارتی سطح ۲

در تحلیل‌های حرارتی سطح ۲، فرایند تبادل حرارتی بتن با استفاده از یک مدل اجزای محدود و بر پایه معادلات اساسی انتقال حرارت، با اعمال شرایط مرزی مناسب، تحلیل می‌گردد.

الف- معادلات اساسی انتقال حرارت

در حالت کلی انتقال حرارت با سه طریق هدایت (Conduction)، همرفت یا جابه‌جایی (Convection)، و تشعشع (Radiation) امکان‌پذیر است.

با توجه به تعریف، انتقال حرارت از طریق هدایت به صورت انتقال انرژی ارتعاشی ذرات جسم به ذرات مجاور با دمای پایین‌تر، بدون حرکت واسطه انتقال حرارت (ماده جسم)، می‌باشد. بنابراین، شدت انتقال حرارت (مقدار گرمای منتقل شده در واحد زمان) از طریق هدایت متناسب با گرادیان دما در جسم و اندازه سطح عبوری گرما می‌باشد.

انتقال حرارت از طریق همرفت یا جابه‌جایی فرآیندی است که از طریق آن انرژی حرارتی بین یک جسم جامد و سیال اطراف آن، از یکی از دو روش انتقال انرژی توسط حرکت تصادفی مولکولی و یا حرکت ماکروسکوپی سیال، مبادله می‌گردد.

انتقال حرارت تشعشعی زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند جسم که از سطح خود انرژی منتشر می‌کنند، در معرض دید یکدیگر قرار گیرند. در این حالت انرژی تابش شده هر سطح به سطح دیگر برخورد نموده و تبادل حرارت صورت می‌گیرد. در این روش تبادل حرارت به صورت امواج الکترومغناطیس می‌باشد.

در غالب موارد در طبیعت، انتقال حرارت به صورت ترکیبی از دو یا سه طریق فوق انجام می‌پذیرد.

معادله حاکم بر انتقال حرارت از طریق هدایت در مختصات کارتزین برای یک جسم همسانگرد با ضریب هدایت حرارتی مستقل از دما، بر طبق اصل پایستگی انرژی و با استفاده از قانون فوریه در رابطه (۸-۴) ارائه شده است:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{Q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۸-۴)$$

در این رابطه x، y و z معرف محورهای سیستم مختصات کارتزین و t معرف زمان می‌باشند. همچنین $T(x,y,z,t)$ معرف دما، $\dot{Q}$ معرف نرخ تولید حرارت داخلی (ناشی از هیدراتاسیون) برای واحد حجم ماده، k ضریب هدایت حرارتی، و α ضریب پرانش حرارتی می‌باشند. ضریب پرانش حرارتی با توجه به معادله (۸-۵) زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha=\frac{k}{\rho c} \qquad (۸-۵)$$

که در آن ρ جرم واحد حجم ماده و c ظرفیت گرمایی ویژه ماده است.

برای محاسبه نرخ تولید حرارت داخلی ناشی از واکنش هیدراتاسیون در مخلوط بتن ($\dot{Q}$) می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\dot{Q}=\rho c\Delta\dot{T} \qquad (۸-۶)$$

که در آن ΔT افزایش دمای آدیاباتیک مخلوط و $\Delta\dot{T}=d(\Delta T)/dt$ نرخ افزایش دمای آدیاباتیک مخلوط خواهد بود.

با حل کردن معادله انتقال حرارت (۸-۴) به همراه شرایط مرزی مناسب (اعم از همرفت و تشعشع و ....) و شرایط اولیه توزیع دما در جسم، فرایند توزیع حرارت و تغییرات دما در داخل جسم در زمان‌های مختلف به‌دست می‌آید. در تحلیل حرارتی سدهای وزنی بتن غلتکی معمولا از اثر انتقال حرارت تشعشعی، با توجه به تاثیر ناچیز آن، چشم‌پوشی می‌شود. شرایط مرزی محتمل برای معادله انتقال حرارت (۸-۴) به شرح زیر می‌باشند:

- شرایط مرزی دمای مشخص

در این حالت، دمای سطح یک مرز، می‌تواند ثابت و یا تابعی از مکان مرز و یا زمان باشد:

$$T=\overline{T}(x,y,z,t) \qquad (۸-۷)$$

- شرط مرزی جریان گرمایی مشخص

در این شرایط، نرخ جریان گرمایی در امتداد یک مرز، به صورت ثابت و یا تابعی از مختصات مرز و یا زمان در نظر گرفته می‌شود. برای یک ماده همسانگرد مطابق با قانون فوریه جریان گرمایی سطح را می‌توان با استفاده از معادله زیر بیان نمود:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = q_s \qquad (۸-۸)$$

در رابطه (۸-۸)، n معرف جهت عمود بر مرز و q_s نرخ جریان گرمایی گذرنده از واحد سطح مرز می‌باشد. اگر در رابطه (۸-۸) نرخ جریان صفر باشد آنگاه شرط مرزی عایق را خواهیم داشت.

- شرط مرزی تبادل حرارتی از طریق همرفت

در شرایط مرزی تبادل حرارتی از طریق همرفت، نرخ جریان حرارت در امتداد عمود بر مرز متناسب با اختلاف دمای سطح (T_s) و دمای سیال مجاور سطح (T_e) بوده و با توجه به رابطه (۸-۸) این شرط مرزی به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T_s - T_e) \qquad (۹-۸)$$

ضریب تناسب (β) در رابطه (۸-۹) ضریب انتقال حرارت سطحی یا ضریب فیلم نامیده می‌شود و در تمام سطوح بتن که در تماس با آب یا هوا هستند، باید لحاظ گردد. ضریب فیلم ممکن است تابعی از دمای سیال، و دمای سیال اطراف ممکن است تابعی از مختصات مرز و یا زمان باشد. برای محاسبه مقدار ضریب فیلم برای سطوح بدون قالب در مرز تماس با هوا می‌توان از روابط زیر استفاده نمود [۳۱]:

$$\beta = \begin{cases} 2.6362V^{0.8} & \text{if } V > 17.5 \text{ km/h} \\ 5.622 + 1.086V & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۱۰-۸)$$

که در آن V سرعت باد بر حسب کیلومتر بر ساعت و β ضریب فیلم بر حسب $W/m^2\,^\circ C$ می‌باشد. برای سطوح قالب‌بندی شده مقدار محاسبه شده از رابطه (۸-۱۰) باید توسط رابطه (۸-۱۱) اصلاح گردد:

$$\beta' = \frac{1}{\left(\frac{b}{k}\right)_{formwork} + \left(\frac{b}{k}\right)_{insulation} + \left(\frac{1}{\beta}\right)} \qquad (۱۱-۸)$$

که در آن b و k به ترتیب ضخامت و ضریب انتقال حرارت قالب و یا عایق مورد استفاده در سطح بتن می‌باشند. لازم به ذکر است که سرعت باد در رابطه (۸-۱۰) باید معادل متوسط سرعت باد ماهانه در ساختگاه سد لحاظ گردد. از آنجا که خنک شدن یک سد بتن غلتکی در بازه زمانی طولانی انجام می‌شود و قالب روی سطوح به صورت موقتی می‌باشد، می‌توان در تحلیل‌های حرارتی از اثر قالب‌ها صرف‌نظر کرد.

ب- روند مدل سازی اجزای محدود

مدل اجزای محدود سدهای وزنی بتن غلتکی برای تحلیل‌های حرارتی را می‌توان با استفاده از المان‌های یک بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی، تهیه نمود. ماهیت غالب تغییرات درجه حرارت در سدهای وزنی بتن غلتکی دو بعدی می‌باشد، با این وجود، با توجه به ابعاد سدهای وزنی بتن غلتکی به طور معمول اکثر شارش گرمایی در راستای ضخامت لیفت (جهت قائم)، که در مقایسه با سایر ابعاد بتن به‌مراتب کوچک تر است، اتفاق می‌افتد. بر این اساس، برای تعیین دمای نقاط میانی بدنه سد که به اندازه کافی از رویه‌های بدنه سد فاصله دارند مدل‌های یک بعدی از دقت مناسب و کافی برخوردار هستند.

برای تحلیل و ارزیابی دقیق‌تر تغییرات دما در بدنه سد و نیز بررسی میزان گرادیان سطحی دما در مجاورت رویه‌های سد، استفاده از مدل تحلیلی دو بعدی (مقطع عرضی بدنه سد) ضروری می‌باشد. با توجه به شرایط مرزی و ماهیت تبادل حرارتی در سدهای وزنی بتن غلتکی، به ندرت نیاز به مدل اجزای محدود سه بعدی برای تحلیل حرارتی بدنه سد خواهد بود.

- مدل تحلیلی بدنه سد

در مدل‌سازی بدنه سدهای بتن غلتکی، توالی و فاصله زمانی بتن‌ریزی لایه‌های بتن غلتکی، با توجه به برنامه زمان‌بندی عملیات اجرایی، باید لحاظ گردد. در برخی موارد، با توجه به نتایج تحلیل‌های حرارتی و الزامات کنترل کرنش‌ها و تنش‌های حرارتی، بازنگری و اصلاح برنامه زمان‌بندی عملیات اجرایی ضروری می‌گردد. با توجه به ضرورت در نظر گرفتن هر لایه بتن غلتکی در مدل تحلیلی و نظر به این‌که به طور معمول در لایه‌های ۳۰ سانتی‌متری اجرا می‌گردد، تعداد المان‌های مورد نیاز جهت مدل‌سازی بدنه سد بتن غلتکی (در مدل‌سازی دو بعدی) همواره قابل توجه بوده و فرایند انجام تحلیل‌های حرارتی معمولا زمان‌بر می‌باشد. برای ارزیابی مناسب‌تر تغییرات دما در ارتفاع، استفاده از دو ردیف المان (خطی) در ضخامت هر لایه از بتن غلتکی توصیه می‌گردد، در نتیجه تعداد المان‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی بدنه سد در مدل‌سازی یک بعدی دو برابر تعداد لایه‌های بتن خواهد بود. نکته قابل ذکر دیگر این که هر یک از لایه‌های بتن‌ریزی در فرایند تحلیل متناسب با برنامه زمان‌بندی اجرای سد باید در مدل تحلیلی فعال گردند، بنابراین، تحلیل حرارتی بدنه سد (مستقل از این‌که بدنه سد به صورت یک بعدی یا دو بعدی مدل‌سازی گردد) باید به صورت غیرخطی انجام پذیرد.

- مدل تحلیلی پی

در فرایند تبادل حرارتی، بدنه سد با توده سنگ پی از طریق «انتقال حرارت هدایتی» تبادل حرارتی داشته و این فرایند تأثیر قابل توجهی در تسریع روند کاهش دمای بتن مجاور پی خواهد داشت. علاوه بر این، با توجه به میزان گیرداری (سختی) توده سنگ پی، عملکرد ناشی از مکانیزم گیرداری خارجی پی اثر تعیین کننده‌ای در تشدید تنش های کششی

حرارتی داشته و ریسک وقوع ترک‌های حرارتی حجمی در لایه بتن مجاور پی را افزایش می‌دهد. بنابراین، به طور معمول در روند اجرای عملیات بتن‌ریزی، ارتفاع اولین لایه بتن بر روی سنگ پی (و یا ارتفاع اولین لایه بتن که بر روی بتن کاملا سخت شده قرار می‌گیرد) بسته به ضرورت کم‌تر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرایط فوق، لحاظ نمودن توده سنگ پی در مدل تحلیلی حرارت به شکل منطقی و صحیح ضروری می‌باشد. برای تخمین دمای توده سنگ، می‌توان دمای مرزهای دور سنگ در مدل تحلیلی را معادل دمای متوسط سالانه دمای محیط، و شرایط مرزی دمای سطح پی را معادل دمای هوا در نظر گرفته و تحلیل حرارتی توده سنگ پی را تا رسیدن به تعادل حرارتی انجام داد. در تحلیل‌های ساده‌تر، دمای اولیه توده سنگ پی (در تمام نواحی شامل سطح، مرزهای دور، و نواحی داخلی مدل توده سنگ) را در زمان شروع تحلیل حرارتی می‌توان معادل متوسط دمای سالانه محیط در نظر گرفت. عمق و گسترش توده سنگ در مدل تحلیلی باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که گرادیان حرارتی در مرزهای مدل پی تقریبا نزدیک به صفر باشد.

۸-۵- ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های حرارتی

تحلیل‌های حرارتی تا پایدار شدن نوسانات حرارتی در نقاط مختلف بدنه سد (متناسب با نوسانات حرارتی محیط) باید ادامه یابند. برای این منظور، بسته به ابعاد بدنه سد و شرایط محیطی ساختگاه سد، معمولا انجام تحلیل‌های حرارتی در یک دوره چند ساله ضروری گردد. پس از انجام تحلیل‌های حرارتی، به منظور برآورد و ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های حرارتی، با استخراج و ترسیم پوش دماهای حداکثر و همچنین پوش دماهای حداقل در نقاط مختلف سد، می‌توان پوش گرادیان حرارتی در نواحی مختلف بدنه سد را محاسبه و ترسیم نمود. برای سهولت محاسبات، می‌توان پوش گرادیان حرارتی را صرفا در یک سری نقاط شاخص در نواحی مختلف بدنه سد، که بر مبنای قضاوت کارشناسی و ماهیت تغییرات دما در بدنه سد در محدوده‌های بحرانی و مستعد شروع ترک‌خوردگی انتخاب می‌گردند، محاسبه و تعیین نمود. باید توجه داشت که اگر کاهش حجم بتن در شرایط آزاد و بدون گیرداری رخ دهد، هیچ کرنش (یا تنش) کششی در بتن ایجاد نشده و در نتیجه پتانسیل ترک حرارتی در آن وجود نخواهد داشت. در واقعیت، مکانیزم‌های گیرداری‌های داخلی و خارجی، که در بخش ۸-۲ نحوه عملکرد آن‌ها به طور شماتیک و مفهومی تشریح گردید، مانع از تحقق بخشی از کاهش حجم بتن شده و تمایل بتن به کاهش حجم تبدیل به کرنش کششی و نهایتا ترک‌خوردن بتن می‌گردد. با اعمال ضرایب گیرداری داخلی و خارجی بر پوش گرادیان حرارتی به‌دست آمده از نتایج تحلیل‌های حرارتی می‌توان پوش کرنش حرارتی ایجاد شده در نقاط شاخص (و یا همه نقاط گرهی) در مدل تحلیلی بدنه سد را به‌دست آورد.

الف- محاسبه کرنش‌های کششی حجمی در اثر گیرداری خارجی

با استفاده از روابط پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه ACI 207.2R برای محاسبه اثر گیرداری خارجی می‌توان میزان کرنش حرارتی ناشی از گرادیان حرارتی حجمی را از رابطه زیر به‌دست آورد [۳۲]

$$\varepsilon = (C_{th})(\Delta T)(K_R)(K_F) \qquad (۱۲-۸)$$

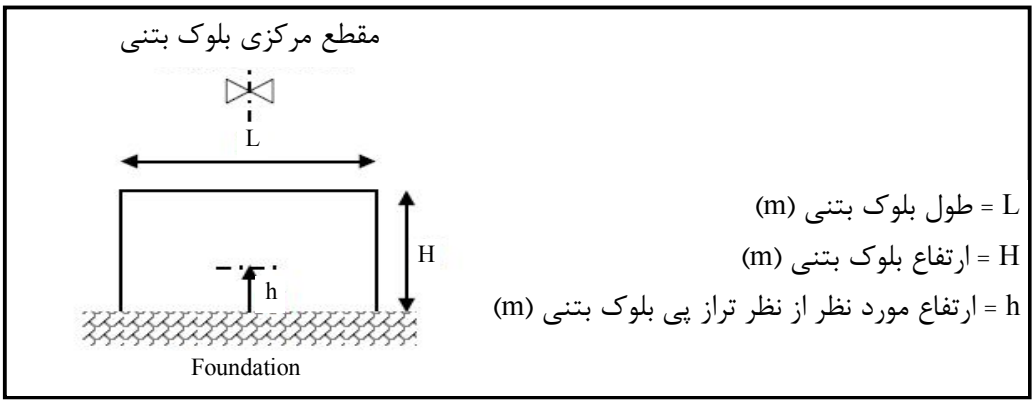
که در آن ε کرنش حرارتی، C_{th} ضریب انبساط حرارتی، $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ اختلاف دمای موثر، K_R ضریب گیرداری سازه‌ای (Structural Restraint Factor) و K_f ضریب گیرداری پی (Foundation Restraint Factor) می‌باشند. مدل شماتیک مورد استفاده در ACI برای گیرداری خارجی در شکل (۸-۳) نشان داده شده است [۳۲]. در شرایطی که پی بلوک بتنی مورد نظر کاملا گیردار و صلب باشد ($E_c/E_r = 0$)، ضریب گیرداری پی برابر ۱.۰ بوده و اثر گیرداری خارجی با ضریب گیرداری سازه‌ای بیان می‌گردد. ضریب گیرداری سازه‌ای تابع نسبت بزرگ‌ترین بعد (طول) بلوک بتنی به ارتفاع آن است و مقدار این ضریب با دور شدن از سطح پی کاهش می‌یابد. در واقعیت، با توجه به محدود بودن سختی پی، اثر گیرداری خارجی تعدیل می‌گردد و در رابطه پیشنهادی ACI، این تعدیل با توجه به نسبت سختی بتن به سختی بلوک بتنی، با محاسبه و اعمال ضریب گیرداری پی در محاسبات لحاظ می‌گردد. بر اساس ACI 207.2R، ضریب گیرداری سازه‌ای از روابط (۸-۱۳) و (۸-۱۴)، و ضریب گیرداری پی از رابطه (۸-۱۵) محاسبه می‌گردد. در این رابطه، A_g سطح کل مقطع بتن در تماس با پی، A_f سطح پی یا زون گیردار با بتن (مقدار حداکثر آن $2.5A_g$ پیشنهاد شده است)، E_f مدول تغییر شکل پذیری پی و E_c مدول الاستیسیته بتن می‌باشند.

$$\text{if } \frac{L}{H} \geq 2.5 \ , \ K_R = \left(\frac{\frac{L}{H} - 2}{\frac{L}{H} + 1} \right)^{h/H} \qquad (۱۳-۸)$$

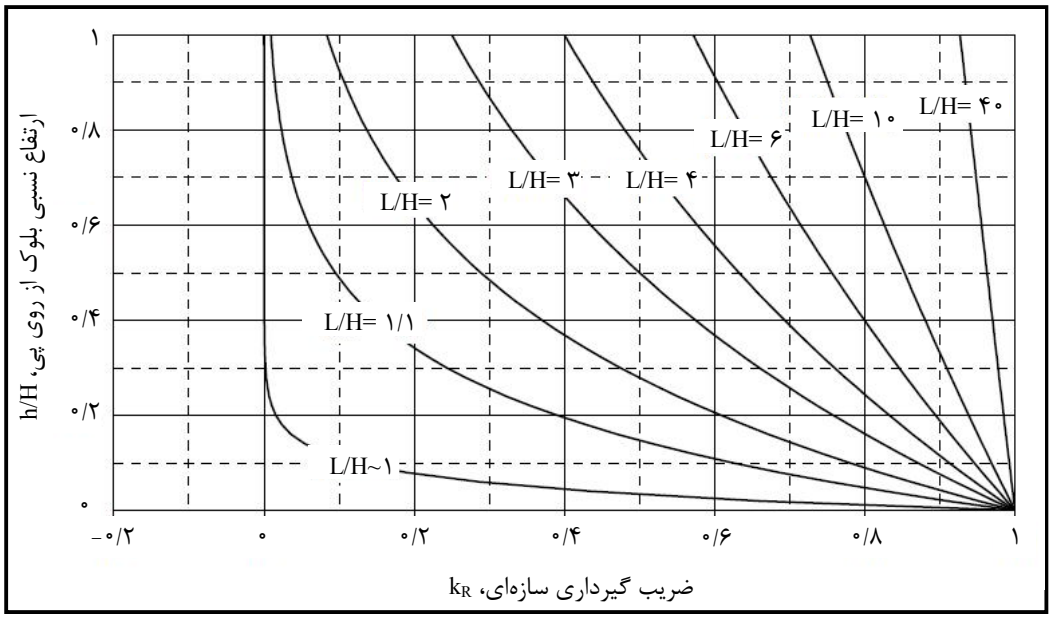
$$\text{if } \frac{L}{H} < 2.5 \ , \ K_R = \left(\frac{\frac{L}{H} - 1}{\frac{L}{H} + 10} \right)^{h/H} \qquad (۱-۸)$$

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_f E_f}} \qquad (۱۵-۸)$$

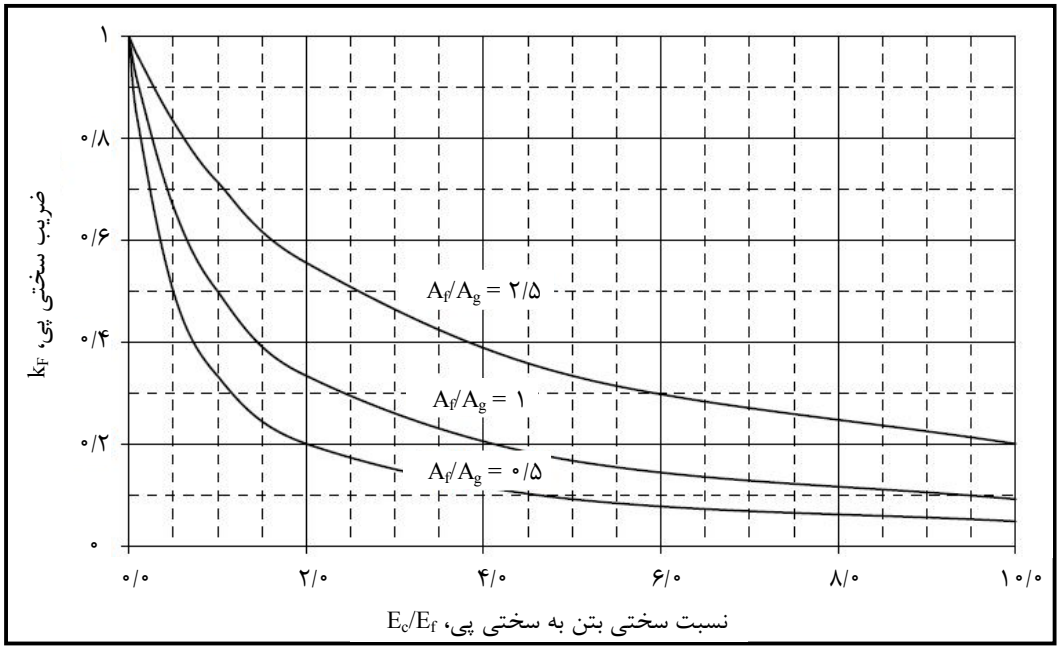
بر اساس روابط فوق، تغییرات مقادیر ضریب گیرداری سازه‌ای در شکل (۸-۴) و تغییرات مقادیر ضریب گیرداری پی در شکل (۸-۵) نشان داده شده است.



شکل ۸-۳- مدل شماتیک محاسبه اثر گیرداری خارجی



شکل ۸-۴- تغییرات ضریب گیرداری سازه‌ای بر اساس روابط پیشنهادی ACI– روابط ۸-۱۳ و ۸-۱۴



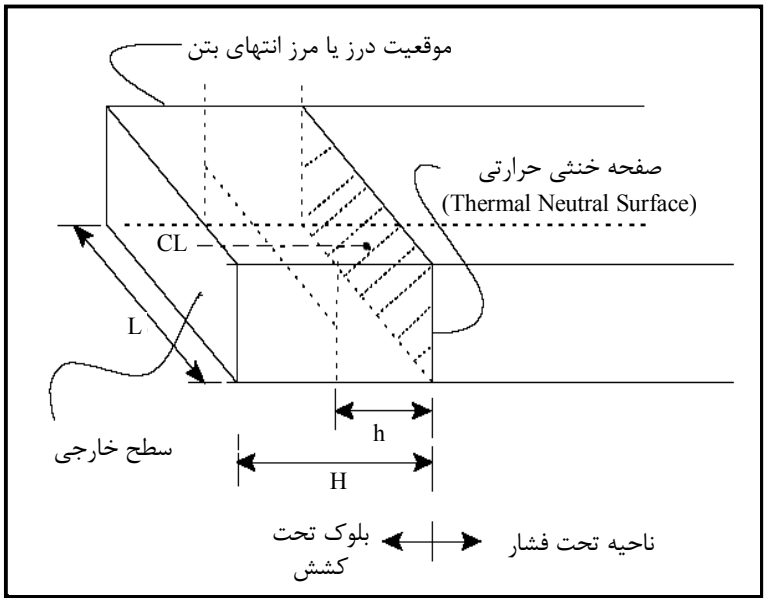
شکل ۸-۵- تغییرات ضریب گیرداری سازه‌ای بر اساس روابط پیشنهادی ACI – رابطه ۸-۱۵

ب- محاسبه کرنش‌های کششی سطحی در اثر گیرداری داخلی

همان‌گونه که در بخش ۸-۲ (و شکل ۸-۱) تشریح شده است، علت به‌وجود آمدن ترک‌های حرارتی سطحی، گیرداری داخلی ناشی از تفاوت گرادیان حرارتی سطح و مرکز بتن (نسبت به محیط اطراف) می‌باشد. برای محاسبه کرنش ناشی از گیرداری داخلی و ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های سطحی ناشی از آن، آیین‌نامه ACI 207.2R رابطه (۸-۱۶) را پیشنهاد می‌دهد:

$$\varepsilon = (C_{th})(dT)(K'_R) \qquad (۱۶-۸)$$

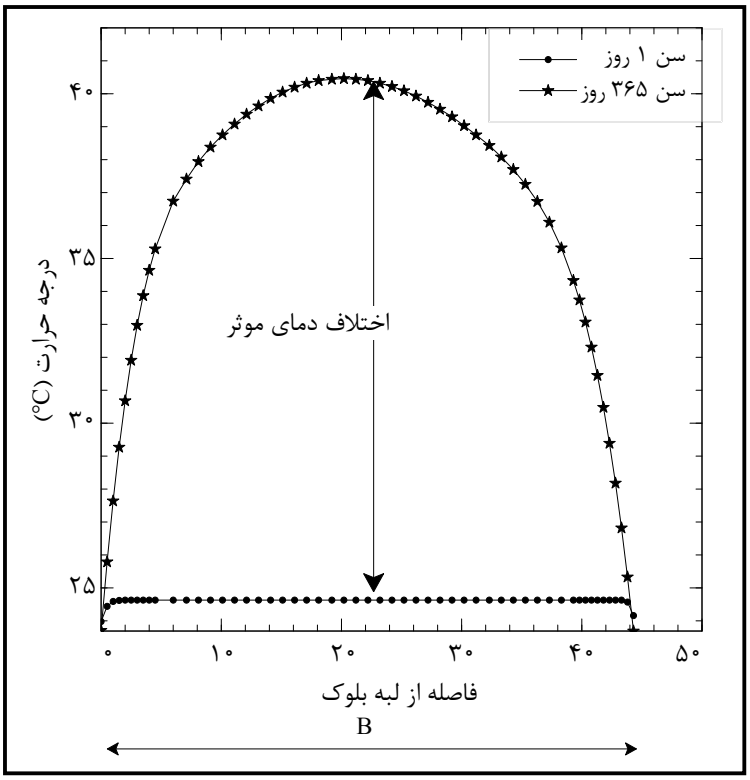
که در آن dT اختلاف دمای موثر سطح نسبت به اختلاف دمای داخل و K'_R ضریب گیرداری داخلی است. ضریب گیرداری داخلی (K'_R) دارای مکانیزمی مشابه با ضریب گیرداری سازه‌ای است. برای محاسبه ضریب گیرداری داخلی، مطابق مدل ارائه شده در شکل (۸-۶)، می‌توان در روابط (۸-۱۳) و (۸-۱۴)، L را معادل عرض بلوک و H را معادل فاصله سطح خنثی حرارتی (سطح داخلی بدون تنش یا کرنش) تا سطح آزاد در نظر گرفت [۳۱].



شکل ۸-۶- شبیه‌سازی مکانیزم ضریب گیرداری داخلی با ضریب گیرداری سازه‌ای

محاسبات کرنش سطحی با استفاده از اختلاف دمایی که در واقع تفاضل تغییرات دما در نقطه مورد نظر با تغییرات دما در محدوده داخلی بتن است انجام می‌شود. این اختلاف دما نشان دهنده گرادیان حرارتی سطح بتن نسبت به نقاط داخلی آن می‌باشد. اگر سطح بتن و نقاط داخلی بتن تحت یک شرایط یکسان تغییرات دما باشند، آنگاه کرنش سطحی و متناسبا تنش (کششی) سطحی ایجاد نخواهد شد. بدیهی است زمان مبنا برای محاسبات گرادیان حرارتی بین سطح و نواحی داخلی بتن، زمانی است که بتن قوام اولیه خود را به‌دست آورده و شروع به سخت شدن می‌کند (سن گیرش اولیه بتن). بنابراین، در زمان مبنا، دمای نواحی مختلف بتن متغیر بوده و تابع نرخ حرارت زایی و تبادل حرارتی بتن با محیط اطراف خود در سنین اولیه می‌باشد. سن گیرش اولیه بتن تابعی از مشخصات مخلوط بتن تازه بوده و در حالت کلی این سن از ۶ ساعت تا یک روز متغیر می‌باشد. به عنوان یک تخمین اولیه، زمان مبنا برای محاسبات گرادیان حرارتی بین سطح و نواحلی داخلی بتن را در مخلوط‌های کم سیمان می‌توان معادل یک روز، و در مخلوط‌های با سیمان زیاد ۶ ساعت در نظر گرفت. در هر مقطع زمانی، باید دمای هر نقطه از بتن را از دمای آن نقطه در زمان مبنا (زمان گیرش اولیه) کم نموده و سپس اختلاف دمای موثر بین نواحی سطحی و مرکز بتن را محاسبه نمود.

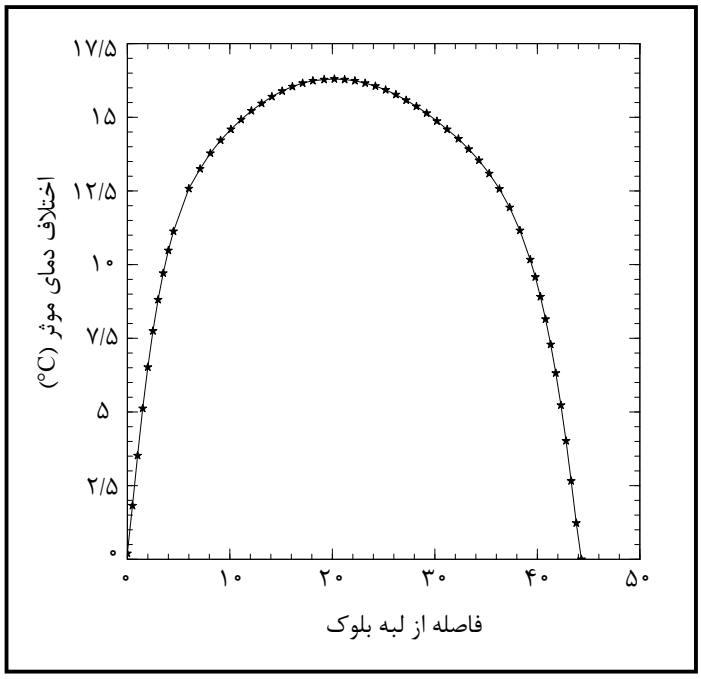
پس از محاسبه اختلاف دمای موثر بین نواحی سطحی و مرکز بتن، می‌توان محل مقطع با کرنش صفر را در عمق بتن، که عمق مبنا برای محاسبه dT می‌باشد، تعیین نمود. شکل (۸-۷) گراف توزیع دما در ضخامت بدنه سد در یک تراز مشخص (B) را در زمان مبنا (سن یک روز) و در زمان مورد نظر (سن ۳۶۵ روز) نشان می‌دهد.



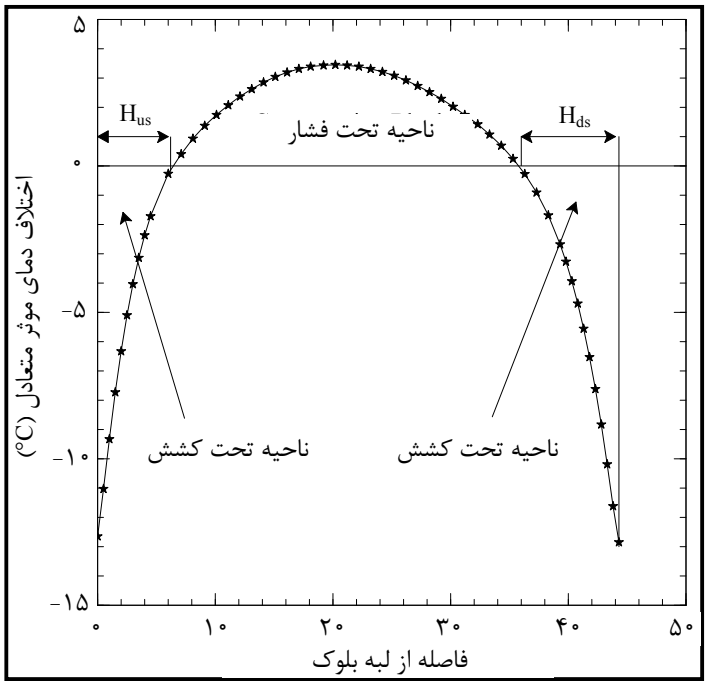
شکل ۸-۷- توزیع دما در ضخامت بدنه سد در زمان مبنا (سن یک روز) و در زمان مورد نظر (برای مثال در سن ۳۶۵ روز)

در اولین گام، دمای موثر مربوط به زمان مورد نظر (۳۶۵ روز) با کسر دمای مربوط به زمان مبنا (سن یک روز) محاسبه می‌شود. نتیجه این محاسبه در شکل (۸-۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است نقاط سطحی دمای موثر کم‌تری نسبت به نقاط میانی دارند و این توزیع دمای موثر باعث ایجاد کشش در سطح بتن و فشار در نقاط میانی می‌گردد. با توجه به اصل تعادل نیروهای داخلی (یا پایداری مقطع)، مطابق ACI 207.2R با شرط این‌که مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی در کل مقطع یکسان فرض شوند، مجموع نیروهای (تنش‌های) کششی در مقطع باید با مجموع نیروهای (تنش‌های) فشاری ایجاد شده برابر باشند [۳۲].

بر اساس اصل پایداری مقطع و با توجه به تناسب خطی مقادیر تنش با گرادیان حرارتی، می‌توان توازن مقادیر نسبی حرارت در مقطع را به جای توازن مقادیر تنش محاسبه نمود. برای این منظور با تقسیم سطح زیر نمودار در شکل (۸-۸) بر ضخامت سد، مقدار متوسط دمای موثر در مقطع به‌دست می‌آید. با کسر مقادیر دمای موثر از این مقدار متوسط، مقادیر اختلاف دمای موثر در مقطع محاسبه می‌گردد (شکل ۸-۹).



شکل ۸-۸- دمای موثر مقطع در زمان مورد نظر (سن ۳۶۵ روز)



شکل ۸-۹- اختلاف دمای موثر (dT) در مقطع در زمان مورد نظر (۳۶۵ روز)

نقطه با اختلاف دمای موثر صفر ($dT = 0$) در شکل (۸-۹) محل تغییر ماهیت تنش از کشش به فشار خواهد بود. بنابراین، مقدار H در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست مشخص شده و بخش‌های سطحی مقطع (در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست) که دارای اختلاف دمای موثر منفی و تحت کشش هستند متناظر با بلوک کششی نشان داده شده در شکل (۸-۶) تعیین می‌گردند.

ج- ارزیابی ریسک وقوع ترک در بدنه سد

برای ارزیابی ریسک وقوع ترک های حجمی یا سطحی در بتن، کرنش کششی محاسبه شده در هر حالت باید با ظرفیت کرنش کششی بتن مقایسه گردد. با توجه به ماهیت و زمان وقوع ترک های سطحی و حجمی، برای ارزیابی ریسک وقوع ترک‌های سطحی از ظرفیت کرنش کششی تحت اثر بارگذاری سریع، و برای ارزیابی ریسک وقوع ترک های حجمی از ظرفیت کرنش کششی بتن تحت اثر بارگذاری آهسته باید استفاده نمود.

اگر کرنش کششی از ظرفیت کرنش کششی بتن کم‌تر باشد، هیچ ترکی در بتن به‌وجود نخواهد آمد ولی اگر کرنش کششی از ظرفیت کرنش کششی بتن بیش‌تر باشد، بتن ترک خورده و عرض (یا بازشدگی) ترک یا ترک ها معادل کاهش طول ناشی از کرنش کششی اضافی در بتن خواهد بود. بنابراین، تعداد و فواصل ترک‌ها متناسب با شرایط سازه برای تحمل حداکثر بازشدگی در هر ترک خواهد بود. این موضوع نیز به نوبه خود بسیار پیچیده بوده و تابع عوامل متعددی است که در فصل ششم این راهنما به تفصیل به آن‌ها اشاره شده است.

د- طراحی فواصل درزهای انقباضی

یکی از راه‌های کنترل ترک‌های حرارتی حجمی در سازه‌های بتنی حجیم، پیش‌بینی و ایجاد ترک‌های کنترل شده در سازه (درزهای انقباضی) می‌باشد. بهتر است درزهای انقباضی در محل‌هایی که مستعد تمرکز تنش‌های کششی و شروع ترک‌خوردگی می‌باشند، جانمایی شوند. همان‌گونه که ذکر شد تعداد و عرض ترک های حرارتی ایجاد شده در یک سازه بتنی حجیم تابع عوامل متعددی از جمله میزان سختی پی می‌باشند. می‌توان گفت که در شرایط یکسان گرادیان حرارتی، تعداد ترک های ایجاد شده در سازه قرار گرفته بر روی پی نرم کم‌تر از تعداد ترک های سازه واقع بر پی سخت بوده و متقابلا میزان بازشدگی ترک‌ها در سازه قرار گرفته بر روی پی نرم بزرگ‌تر خواهد بود. معمولا میزان بازشدگی ترک‌های حجمی در سازه‌های بتنی از ۲ تا ۵ میلیمتر متغیر می‌باشد. با تخمین میزان بازشدگی محتمل ترک ها بر پایه شواهد و معیارهای ارائه شده در فصل ۶ این راهنما، δ_{crack}، برای طراحی فواصل درزهای انقباضی از روش زیر می‌توان استفاده نمود:

۱- با توجه به شرایط گیرداری سد، از رابطه (۸-۱۲) کرنش حرارتی ایجاد شده در بتن بدنه سد محاسبه می‌گردد. در این مرحله می‌توان به صورت محافظه‌کارانه ضریب گیرداری سازه‌ای را برابر یک در نظر گرفت.

۲- میزان تجمعی بازشدگی درزهای انقباضی را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$\Delta = (\varepsilon_{induced} - \varepsilon_c)L \qquad (۸-۱۷)$$

که در آن $\varepsilon_{induced}$ کرنش حجمی محاسبه شده از رابطه (۸-۱۲)، ε_c ظرفیت کرنش کششی بتن و L طول سد می‌باشد.

۳- تعداد درزهای انقباضی مورد نیاز را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$n = \frac{\Delta}{\delta_{crack}} \qquad (۸-۱۸)$$

۴- در نهایت فواصل درزهای انقباضی با تقسیم کردن طول سد به تعداد آن به دست خواهد آمد.

فصل ۹

تحلیل تنش بدنه سد، پی و مخزن

۹-۱- کلیات

با انتخاب محور و طراحی اولیه سد، کفایت محور منتخب و طرح کلی سدهای وزنی بتن غلتکی بر مبنای تحلیل‌های پایداری بدنه سد (و تکیه‌گاه‌ها) کنترل و ارزیابی می‌گردد. پس از این مرحله، کنترل و بهینه‌سازی طرح هندسی بدنه سد مستلزم انجام تحلیل‌های تنش برای شرایط بارگذاری محتمل استاتیکی و دینامیکی در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. فرایند تحلیل تنش و بهینه‌سازی طرح هندسی بدنه سد شامل مراحل زیر می‌گردد:

الف- تعیین و رده‌بندی بارهای وارد بر بدنه سد

ب- تعیین معیارهای ایمنی و پذیرش (تنش‌های مجاز، سطح خسارات قابل پذیرش، و ...)

ج- تعیین مشخصات رفتاری بدنه سد، توده سنگ پی، و آب

د- مدل‌سازی بدنه سد، پی و مخزن

هـ- تحلیل تنش و محاسبه تنش‌ها، تغییرمکان‌ها، و خسارات محتمل در بدنه سد

و- مقایسه نتایج تحلیل با معیارهای پذیرش و ارزیابی طرح هندسی بدنه سد

ز- اعمال اصلاحات لازم در طرح هندسی بدنه سد و تکرار تحلیل تنش تا دستیابی به نتیجه مطلوب

مراحل الف و ب در فصل ششم این راهنما ارائه شده‌اند. مشخصات رفتاری و خواص مکانیکی بتن غلتکی در فصل چهارم به تفصیل بررسی و ارائه شده‌اند. مشخصات رفتاری توده سنگ پی باید با انجام مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی لازم و کافی شامل اکتشافات صحرایی و آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی مشخص گردند. در تحلیل‌های دینامیکی پیشرفته، که تهیه مدل تحلیلی تراکم‌پذیر مخزن مد نظر قرار می‌گیرد، مشخصات رفتاری آب شامل سرعت موج در آب مورد نیاز می‌باشد (سرعت موج در آب معمولا حدود ۱۴۴۰ متر برثانیه در نظر گرفته می‌شود).

اصول و مبانی روش‌های ساده و پیشرفته تحلیل، ملاحظات و فرضیات پایه مدل‌سازی بدنه سد، توده سنگ پی، و مخزن، و محدوده اعتبار و کاربرد هر یک از این روش‌ها جهت برآورد تنش های ایجاد شده در بدنه و کنترل و ارزیابی پایداری و ایمنی سد در این فصل ارائه می‌گردد.

روش‌های تحلیل سدهای وزنی بتن غلتکی را می‌توان به دو دسته روش‌های تحلیلی ساده و روش‌های تحلیلی عددی اجزای محدود تقسیم نمود. روش‌های تحلیلی ساده مبتنی بر تحلیل تعادل حدی مقطع سد و روابط ساده مقاومت مصالح و عموما با فرض رفتار صلب برای بدنه سد هستند. در روش‌های تحلیلی عددی اجزای محدود نیز در غالب قریب به اتفاق موارد مقطع دوبعدی سد به همراه محدوده مناسبی از توده سنگ پی و مخزن سد، با فرض رفتار انعطاف‌پذیر خطی و یا غیرخطی برای بتن بدنه سد مدل‌سازی و تحلیل می‌گردد.

اتخاذ روش تحلیلی مناسب تابع اهداف و نوع کاربری سد، شرایط ساختگاه و سطح داده‌ها و اکتشافات ژئوتکنیکی، و نیز دقت مورد نظر در مطالعات می‌باشد. بدیهی است انتخاب و استفاده از روش تحلیلی مناسب تاثیر تعیین‌کننده‌ای در حصول اهداف مطالعات و دستیابی به طرح هندسی بهینه متناسب برای بدنه سد خواهد داشت. به طور معمول در مراحل

اولیه مطالعات از روش‌های تحلیلی ساده، و در مراحل پایانی مطالعات (طراحی تفصیلی و مطالعات حین اجرا) بسته به میزان اهمیت سد و شرایط ساختگاه از روش‌های دقیق‌تر تحلیل عددی اجزای محدود برای محاسبه و کنترل تنش های ایجاد شده در بدنه سد و ارزیابی و بهینه‌سازی طرح هندسی آن استفاده می‌گردد. بدیهی است برای سدهای با اهمیت کم و یا کاربری موقت نظیر فرازبندها، استفاده از روش‌های تحلیلی اجزای محدود چندان ضرورت نخواهد داشت.

از آنجا که مبانی طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی به طور کلی بر اساس رفتار خطی بدنه سد تحت اثر بارهای عادی و غیرعادی استوار است، تدوین و تبیین دقیق روش‌های تحلیل مبتنی بر فرض رفتار خطی بتن غلتکی پایه و اساس کنترل طراحی مقطع سد بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، بر اساس نتایج تحلیل‌های خطی، می‌توان پتانسیل و میزان توسعه رفتار غیرخطی در بدنه سد در شرایط بارگذاری فوق‌العاده را شناسایی نموده و با پیش‌بینی تمهیدات لازم میزان خسارات وارد بر بدنه سد را در این شرایط به حداقل ممکن تقلیل داد.

اصولا رفتار غیرخطی در سدهای بتنی وزنی بتن غلتکی در وهله اول به دلیل بازشدگی درزهای افقی و در وهله بعد به دلیل از ترک‌خوردن جسم بتن غلتکی در اثر تنش های کششی ایجاد شده در بدنه سد، ایجاد می‌گردند. بنابراین رفتار غیرخطی بدنه سد در تحلیل‌های تنش باید متناسب با ماهیت رفتار بتن غلتکی بدنه سد، ویژگی‌های ژئوتکنیکی و تکتونیکی ساختگاه، و همچنین هدف از مطالعه و تحلیل در نظر گرفته شود. در پاره‌ای موارد استفاده از روش‌های ساده شده و تقریبی برای ارزیابی پتانسیل رفتار غیرخطی (بازشدگی درزهای افقی و ترک‌خوردگی بتن) در بدنه سد و یا پایداری کلی مقطع ترک‌خورده احتمالی بسیار مفید و موثر بوده و می‌تواند معیار مناسبی برای قضاوت به‌دست بدهد.

۹-۲- روش تحلیلی ساده

روش تحلیلی ساده همان‌گونه که ذکر شد بر فرض رفتار صلب بدنه سد و روابط تحلیل تعادل حدی و روابط حاکم بر تیر طره‌ای قائم بر اساس تئوری اولر- برنولی، استوار می‌باشد. فرض دیگر این روش، رفتار مجزای بلوک‌های بدنه سد از یکدیگر است که لازمه آن وجود درزهای قائم تزریق نشده و بدون کلید برشی بین بلوک‌های بدنه سد می‌باشد. با توجه به این‌که در سدهای وزنی بتن غلتکی غالبا شرایط فوق وجود داشته و بلوک‌های بدنه سد به صورت مجزا از هم عمل می‌کنند، استفاده از این روش جهت برآورد تنش‌ها و همچنین محاسبه (تخمین) طول مقطع ترک‌نخورده در داخل بدنه سد (به خصوص در ترازهای قطع بتن‌ریزی) و در مرز تماس بدنه سد و پی امکان‌پذیر می‌باشد. با توجه به فرضیات فوق، فرایند و مبانی روش تحلیلی ساده سدهای وزنی کاملا مشابه با روش تحلیل تعادل حدی متداول برای تحلیل پایداری این نوع سدها می‌باشد.

علیرغم مبانی ساده و فرضیات ساده‌کننده روش تحلیلی ساده، نتایج حاصل از این روش از دقت مطلوبی برخوردار بوده و می‌تواند مبنای مطالعات طراحی و بهینه‌یابی طرح هندسی بدنه سد در مراحل اولیه مطالعات و حتی در طراحی تفصیلی باشد. به همین جهت، مطالعات و تحقیقات نسبتا جامعی برای توسعه و بهبود سطح دقت و نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی ساده سدهای وزنی انجام یافته است. بدیهی است استفاده از روش‌های تحلیل‌های دقیق‌تر در مطالعات مرحله تفصیلی، برای اعمال دقیق‌تر بارهای استاتیکی و دینامیکی و شناخت بهتر توزیع تنش در بدنه سد اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

۹-۲-۱- روش تحلیلی ساده برای بارهای استاتیکی

مود شکست و پتانسیل رفتار غیرخطی غالب در سدهای وزنی بتن غلتکی، در اثر شکست کششی (بازشدگی) درزهای قطع بتن‌ریزی و یا شکست کششی جسم بتن غلتکی رخ می‌دهد. تنش‌های اصلی کششی در بدنه سدهای وزنی غالبا در مجاورت رویه بالادست سد رخ داده و با توجه به هندسه متداول مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی، جهت تنش‌های اصلی کششی عموما نزدیک به قائم می‌باشد. از سوی دیگر، با توجه به هندسه افقی صفحات نسبتا ضعیف‌تر قطع بتن‌ریزی در بدنه سد، محاسبه تنش‌های کششی قائم در ارزیابی کفایت و بهینه‌سازی طرح هندسی سدهای وزنی بتن غلتکی کاملا ضروری و اساسی می‌باشد. بنابراین در روش تحلیلی ساده سدهای وزنی بتن غلتکی، به طور معمول محاسبات توزیع تنش در امتداد صفحات افقی در داخل بدنه سد انجام می‌پذیرد.

اولین گام در محاسبه توزیع تنش‌های قائم در امتداد صفحات افقی در بدنه سد، بررسی پتانسیل ترک‌خوردگی و محاسبه طول ترک احتمالی در بدنه سد در امتداد صفحه افقی مورد نظر می‌باشد. این موضوع تابع وجود یا عدم وجود فشار برکنش در داخل بدنه سد (در محدوده مورد نظر)، و مقاومت کششی درز قطع بتن‌ریزی در بدنه سد می‌باشد. با افزایش مقاومت کششی درزهای قطع بتن‌ریزی، ریسک وقوع و میزان پیشرفت ترک در بدنه سد متناسبا کاهش می‌یابد. همچنین در صورتی بدنه سد به صورت آب‌بند طراحی گردد، ریسک وقوع ترک در بدنه سد به دلیل حذف فشار برکنش به شدت کاهش یافته و مقادیر تنش های کششی (و فشاری) در بدنه سد تقلیل می‌یابند. در این شرایط می‌توان طرح هندسی بدنه را تا حد قابل توجهی بهینه نموده و متناسبا احجام سد را کاهش داد.

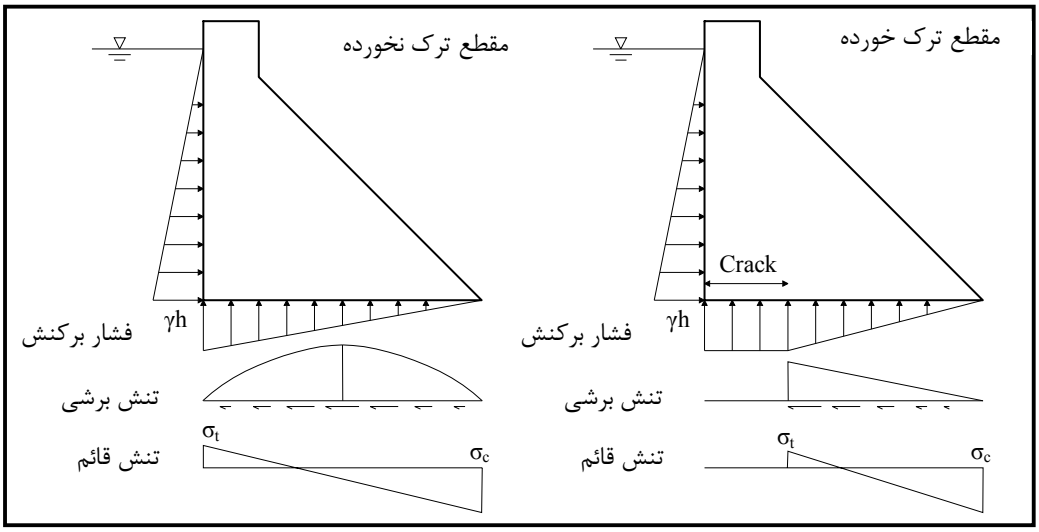
در شرایطی که آب‌بندی بدنه سد با پیش‌بینی و اجرای المان آب‌بند در رویه بالادست تامین شده باشد، باید هندسه بدنه سد به‌گونه‌ای طراحی (و بهینه) گردد که پتانسیل وقوع تنش های کششی به حداقل ممکن رسیده و امکان ترک‌خوردن رویه آب‌بند بالادست سد وجود نداشته باشد. زیرا در صورت وقوع ترک و شکست رویه آب‌بند بالادست، با بسیج فشار برکنش در داخل بدنه سد، ترک به سرعت گسترش یافته و ایمنی و ایستایی بدنه سد، به خصوص برای شرایط بارگذاری بحرانی، تهدید می‌گردد.

در گام بعد، بر اساس تئوری حاکم بر تیرها (تئوری اولر- برنولی) می‌توان تنش‌های نرمال و برشی را در امتداد صفحه مورد بررسی محاسبه نمود. با توجه به تئوری تیرها، تغییرات تنش های نرمال (تنش عمود بر صفحه مورد نظر) به صورت خطی بوده و مقادیر این تنش‌ها را می‌توان بر اساس روابط تعادل نیروهای داخلی مقطع به‌دست آورد.

در شرایطی که صفحه مورد بررسی ترک نخورده باشد، توزیع تنش های برشی در امتداد صفحه مورد بررسی سهمی شکل بوده و بیش‌ترین مقدار برش در میانه مقطع رخ خواهد داد (شکل ۹-۱). در شرایط وقوع ترک، توزیع تنش برشی در قسمت ترک‌نخورده مقطع تحت تاثیر تمرکز تنش قائم در نوک ترک تغییر نموده و تقریبا به صورت خطی در می‌آید. در این حالت، بیش‌ترین مقدار تنش برشی تقریبا در نوک ترک رخ خواهد داد (شکل ۹-۱).

با این فرض که بر اساس تحلیل‌های پایداری، پایداری لغزشی بدنه سد (با فرض یک مقدار متوسط یکنواخت برای تنش برشی) در امتداد صفحات مختلف در داخل بدنه و یا در سطح تماس بدنه سد و پی بررسی شده و بدنه سد با

حاشیه اطمینان مناسب معیارهای پایداری را ارضاء نموده است، محاسبه مقادیر و نحوه توزیع تنش های برشی در روش‌های تحلیلی ساده چندان ضرورت نیافته و به طور معمول مد نظر قرار نمی‌گیرد.



شکل ۹-۱- توزیع تنش‌های نرمال و برشی در امتداد مقطع سد بر مبنای تئوری تیرها (تئوری اولر- برنولی) در شرایط وقوع یا عدم وقوع ترک

الف- محاسبه طول ترک

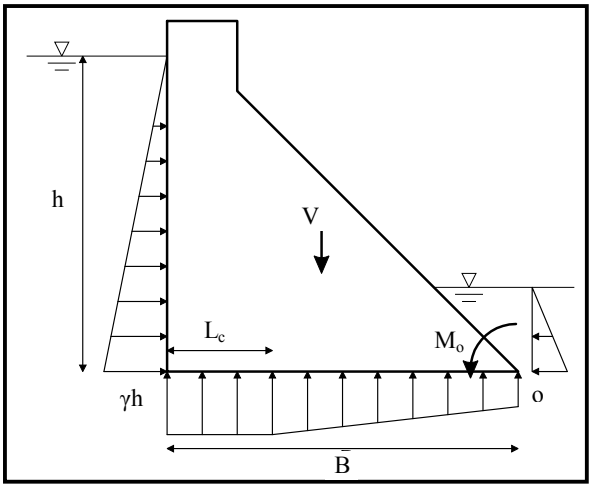
در اغلب مواقع وقوع ترک در درزهای افقی قطع بتن‌ریزی که در تماس با مخزن می‌باشند، رخ می‌دهد. پس از وقوع ترک، با نفوذ آب تحت فشار و ایجاد فشار برکنش کامل بر روی سطوح ترک، فرایند رشد و گسترش ترک با توجه به مقاومت کششی بدنه در امتداد وقوع ترک (مقاومت کششی بتن غلتکی یا درز قطع بتن‌ریزی) آغاز می‌گردد. بنابراین محاسبه طول ترک کاملا مرتبط با فشار آب مخزن در محل وقوع ترک، میزان بسیج فشار برکنش در بخش ترک‌نخورده مقطع، و مقاومت کششی بدنه سد در امتداد وقوع ترک بوده و با توجه به ماهیت پیچیده و غیرخطی این فرایند، تحلیل دقیق آن مستلزم انجام یک سری محاسبات تکراری است تا جایی که همگرایی لازم در تحلیل‌ها و محاسبات تامین گردد.

در یک رویکرد محافظه‌کارانه، با فرض این‌که مقاومت کششی مقطع ترک‌خورده ناچیز و قابل صرف‌نظر بوده و به دلیل عدم وجود سیستم زهکشی در داخل بدنه و نفوذپذیر بودن درزهای بتن‌ریزی، فشار برکنش نیز در داخل بدنه سد در محدوده وقوع ترک به طور کامل بسیج می‌گردد (شکل ۹-۲)، طول ترک در امتداد یک صفحه افقی در بدنه سد را می‌توان مستقیما با استفاده از رابطه (۹-۱) محاسبه نمود (از اثر فشار پایاب در رابطه زیر صرف‌نظر شده است) [۳۰]:

$$L_c = B - \frac{3\left(\frac{M_o}{\gamma h} - \frac{B^2}{2}\right)}{\frac{V}{\gamma h} - B} \qquad (۹-۱)$$

در این رابطه B عرض کل صفحه مورد بررسی، L_c طول ترک، M_o مجموع لنگر نیروهای خارجی حول لبه پایین‌دست بدون در نظر گرفتن فشار برکنش (و فشار پایاب)، V مجموع نیروهای قائم به غیر از فشار برکنش، h هد آب

مخزن در محل وقوع ترک، و γ وزن مخصوص آب می‌باشند (شکل ۹-۲). درصورتی که L_c مقداری بزرگ‌تر از B داشته باشد، بخشی از بدنه سد که بالاتر از صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد، ناپایدار بوده و به سمت پایین‌دست واژگون خواهد شد. علیرغم فرضیات ساده‌کننده و محافظه‌کارانه فوق، این روش برای ارزیابی اولیه و مقدماتی پتانسیل وقوع و رشد ترک بسیار مفید بوده و قضاوت مناسبی از وضعیت ایستایی و ایمنی بدنه سد به‌دست می‌دهد. شایان ذکر این که در تحلیل‌های پایداری نیز برای محاسبه طول ترک در امتداد سطح تماس بدنه سد و پی (که مقاومت کششی ناچیزی داشته و فشار برکنش نیز به طور کامل وجود دارد) می‌توان از رابطه (۹-۱) استفاده نمود.



شکل ۹-۲- پارامترهای در نظر گرفته شده برای محاسبه طول ترک در بدنه سد در امتداد صفحه افقی بدون مقاومت کششی

استفاده از این روش در سدهای وزنی بتن غلتکی که تمهیدات خاصی برای آب‌بندی مطلوب بدنه سد پیش‌بینی نشده و در فرایند اجرای بدنه سد نیز حساسیت مناسبی برای آماده‌سازی و کاهش نفوذپذیری درزهای قطع بتن‌ریزی (و خود جسم بتن غلتکی) اعمال نمی‌گردد، قابل توصیه می‌باشد. در این موارد، یکی از راه‌کارهای محدود نمودن ریسک گسترش ترک، پیش‌بینی و اجرای یک سیستم زهکشی موثر در بدنه سد با هدف کاهش فشار برکنش در جسم سد است.

در شرایطی که مقاومت کششی بدنه سد در راستای عمود بر صفحه مورد نظر نسبتا قابل توجه بوده و فشار برکنش در بخش ترک‌نخورده مقطع سد به دلیل وجود سیستم زهکشی و یا نفوذپذیری کم بدنه سد به شکل محدودتری بسیج گردد، برای محاسبه دقیق طول ترک باید در ابتدا یک مقدار اولیه برای طول ترک (طول ترک صفر) در نظر گرفته شده و متناسب با آن، میزان و توزیع فشار برکنش در بخش ترک‌نخورده مقطع سد مشخص گردد (توزیع فشار برکنش در امتداد ترک ثابت و مقدار آن همواره مساوی با هد مخزن در محل وقوع ترک در نظر گرفته می‌شود). با برقراری تعادل نیروها، توزیع تنش نرمال موثر در بخش ترک‌نخورده مقطع سد در امتداد صفحه مورد نظر قابل محاسبه خواهد بود. درصورتی‌که تنش کششی موثر در لبه بالادست (یا در نوک ترک) معیار ایجاد (یا معیار گسترش) ترک را ارضاء نماید، طول فرض شده برای ترک باید افزایش یافته و محاسبات تکرار گردد. این فرایند تکرار تا حصول شرایط مرزی برای معیار گسترش ترک در نوک ترک باید ادامه یابد. لازم به ذکر این‌که معمولا انرژی مورد نیاز برای ایجاد ترک از انرژی مورد نیاز برای گسترش ترک بیش‌تر می‌باشد، در نتیجه در حالت کلی معیار گسترش

ترک می‌تواند با معیار ایجاد ترک متفاوت باشد. با این حال، می‌توان معیار ساده مقایسه تنش کششی موثر با مقاومت کششی بدنه سد در امتداد صفحه مورد نظر را به عنوان معیار ایجاد و گسترش ترک در نظر گرفت.

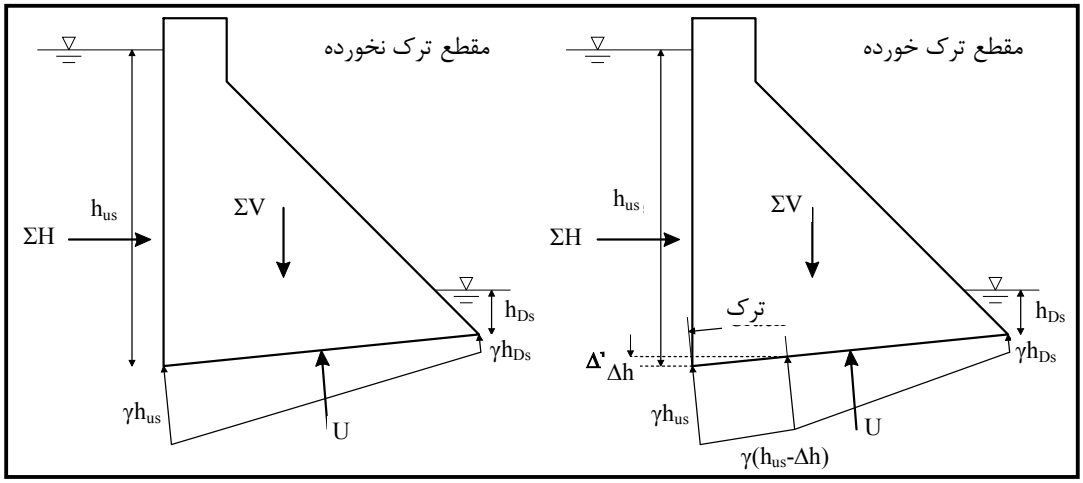
ب- محاسبه توزیع تنش

اگر فشار برکنش به عنوان نیروی خارجی در محاسبات لحاظ گردد، توزیع «تنش موثر» در ناحیه ترک نخورده را می‌توان بر اساس لنگر و نیروی برآیند که شامل فشار برکنش است، از رابطه ۹-۲ محاسبه کرد. در این رابطه، توزیع تنش نرمال موثر خطی فرض شده است ولی توزیع فشار برکنش با توجه به شرایط زهکش می‌تواند غیرخطی باشد.

$$\sigma_n = \frac{\sum V}{A} \pm \frac{(\sum M)c}{I} \qquad (۹-۲)$$

در این رابطه، σ_n تنش نرمال موثر، $\sum V$ برآیند نیروهای قائم با در نظرگرفتن فشار برکنش، A مساحت ناحیه ترک نخورده، $\sum M$ برآیند لنگر خمشی حول مرکز سطح قسمت ترک نخورده شامل لنگر فشار برکنش، I ممان اینرسی ناحیه ترک نخورده، و c فاصله مرکز سطح ناحیه ترک نخورده تا نقطه مورد نظر می‌باشند. اگر صفحه مورد نظر شیب‌دار در نظر گرفته شود (شکل ۹-۳)، فشار برکنش عمود بر صفحه وارد می‌شود و برای محاسبه توزیع تنش از رابطه (۹ -۲)، مشخصات هندسی (مساحت و ممان اینرسی) در مختصات محلی صفحه شیب‌دار باید محاسبه و در نظر گرفته شود.

با در نظر گرفتن فشار برکنش به عنوان یکی از بارهای خارجی وارد بر مقطع سد، تنش محاسبه شده از رابطه (۹-۲) متناظر با مفهوم تنش موثر خواهد بود و این تنش را می‌توان با مقاومت کششی بدنه سد (درز قطع بتن‌ریزی) مقایسه نمود. در این ارتباط باید به این نکته توجه داشت که پتانسیل بسیج و ایجاد فشار برکنش در نواحی مختلف بدنه سد ممکن است همسان نباشد. برای مثال، اگر بتن غلتکی با مواد سیمانی متوسط یا زیاد و با کیفیت مطلوب اجرار گردد، جسم بتن را می‌توان تقریبا نفوذناپذیر تلقی نمود. در این حالت فشار برکنش در صفحات عبوری از جسم بتن غلتکی بدنه سد عملا فشار برکنش صفر بوده و تنش موثر با تنش کل برابر می‌گردد. در درزهای قطع بتن‌ریزی در بدنه سد نیز بسته به کیفیت و تمهیدات اجرایی در نظر گرفته شده، پتانسیل نفوذ آب و بسیج فشار برکنش باید متناسبا بررسی شده و توزیع فشار برکنش مناسب برای سطح درزهای قطع بتن‌ریزی محاسبه و تعیین گردد.



شکل ۹-۳- محاسبات توزیع تنش در امتداد صفحه شیب‌دار در داخل بدنه سد (یا مرز بدنه سد و پی)

با توجه به این‌که امتداد تنش‌های اصلی در مجاورت رویه‌های سد موازی سطوح رویه‌های بالادست و پایین‌دست می‌باشند، برای محاسبه مقادیر حدی تنش‌های اصلی در رویه‌های پایین‌دست و بالادست (در شرایطی که رویه بالادست قائم نباشد)، با توجه به روابط دایره مور می‌توان از رابطه (۹-۳) استفاده نمود [۳۰].

$$\sigma_p = \sigma_n \sec^2\theta + p\tan^2\theta \qquad (۹-۳)$$

در این رابطه، σ_p تنش اصلی، σ_n تنش قائم، θ زاویه راستای رویه نسبت به قائم، و p فشار روی سطح رویه می‌باشند. بر این اساس، σ_p متناظر با مقدار تنش اصلی موثر در بتن غلتکی مجاور رویه‌های سد بوده و قابل مقایسه با مقاومت کششی (یا فشاری) بتن غلتکی خواهد بود (با توجه به مایل بودن تنش اصلی σ_p، این تنش نباید با مقاومت درزهای قطع بتن‌ریزی مقایسه گردد).

۹-۲-۲- روش تحلیلی ساده برای بارهای دینامیکی

مهم‌ترین و تنها بار دینامیکی موثر وارد بر بدنه سد در دوره اجرا و بهره‌برداری، بار زلزله است که هم به صورت نیروی اینرسی بر مرکز جرم بدنه سد، و هم به صورت فشار هیدرودینامیک اضافی آب مخزن بر رویه بالادست سد نیرو وارد می‌کند. با توجه به این‌که اعمال بار دینامیکی و متغیر با زمان در روش‌های تحلیلی ساده امکان‌پذیر نمی‌باشد، بارهای دینامیکی وارد بر بدنه سد (شامل نیروی اینرسی وارد بر جرم بدنه و فشار هیدرودینامیکی ناشی از مخزن) باید به صورت یک بار «استاتیکی معادل» محاسبه و در نظر گرفته شوند. با فرض رفتار صلب بدنه سد، عملا شتاب وارد بر بخش‌های مختلف بدنه سد یکسان و معادل شتاب زمین خواهد بود. این فرض، با توجه به این‌که بخش ابتدایی (محدوده فرکانس‌های بالا) طیف پاسخ زلزله معمولا صعودی است، به خصوص در مورد سدهای وزنی بتن غلتکی (که نسبتا انعطاف‌پذیرتر از سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشند) می‌تواند منجر به تخمین دست‌پایین شتاب زلزله وارد بر بدنه سد گردد. بنابراین، اعمال اثر انعطاف‌پذیری بدنه سد برای محاسبه و تخمین دقیق‌تر بار «استاتیکی معادل» زلزله در سدهای وزنی بتن غلتکی مهم و قابل توصیه می‌باشد.

با توجه به شرایط فوق، روش‌های محاسبه بار استاتیکی معادل زلزله را می‌توان به دو روش «شبه استاتیکی» مبتنی بر رفتار صلب بدنه سد، و روش «شبه دینامیکی» مبتنی بر رفتار انعطاف‌پذیر بدنه سد، تقسیم نمود. مبانی و جزییات هر یک از دو روش فوق در ادامه ارائه می‌گردد.

الف- روش شبه استاتیکی

در این روش، بر اساس فرض رفتار صلب بدنه سد، شتاب وارد بر بدنه سد (و مخزن) در زمان وقوع زلزله در هر لحظه یکسان و معادل شتاب سطح زمین خواهد بود. بنابراین، بالاترین شتاب وارد بر بدنه سد و مخزن معادل بیشینه شتاب زمین در زمان وقوع زلزله (Peak Ground Acceleration - PGA) خواهد بود. با توجه به ماهیت دینامیکی بار زلزله، در نظر گرفتن کل مقدار شتاب بیشینه زمین برای محاسبه نیروی استاتیکی معادل زلزله غیرمنطقی و بسیار محافظه‌کارانه خواهد

بود. در این خصوص با توجه به ماهیت دینامیکی و تغییرات بسیار سریع جهت شتاب زلزله، بر اساس مطالعات و توصیه‌های اکثر مراجع معتبر، در روش‌های تحلیلی شبه استاتیکی، $\frac{۲}{۳}$ بیشینه شتاب زمین ($\frac{۲}{۳}$ PGA) مبنای محاسبه نیروی استاتیکی معادل زلزله قرار می‌گیرد.

شایان ذکر این‌که که به دلیل عدم وقوع هم‌زمان بیشینه شتاب‌های افقی و قائم زمین در زمان وقوع زلزله، درصورتی‌که اعمال هم‌زمان شتاب‌های شبه استاتیکی در راستاهای افقی و قائم مد نظر باشد، مقادیر این شتاب‌ها باید با اعمال ضرایب کاهنده مناسب اصلاح گردند. بر این اساس، برای محاسبه نیروی استاتیکی معادل زلزله در روش شبه استاتیکی، می‌توان یکی از ترکیب‌های ارائه شده در جدول (۹-۱) را در نظر گرفت ولی به طور معمول جهت بحرانی برای اعمال نیروی استاتیکی معادل زلزله، جهت افقی در راستای بالادست - پایین‌دست می‌باشد.

جدول ۹-۱- ترکیب‌های مختلف شتاب‌های افقی و قائم زلزله مبنای محاسبه نیروی استاتیکی معادل در روش شبه‌استاتیکی

ترکیب زلزله‌های افقی و قائم	شتاب بیشینه افقی زمین (PGA_H)	شتاب بیشینه قائم زمین (PGA_V)
حالت اول	$\frac{۲}{۳}$	۰/۰
حالت دوم	$\frac{۲}{۹}$	$\frac{۲}{۹}$
حالت سوم	$\frac{۲}{۹}$	$\frac{۲}{۹}$
حالت چهارم	۰/۰	$\frac{۲}{۳}$

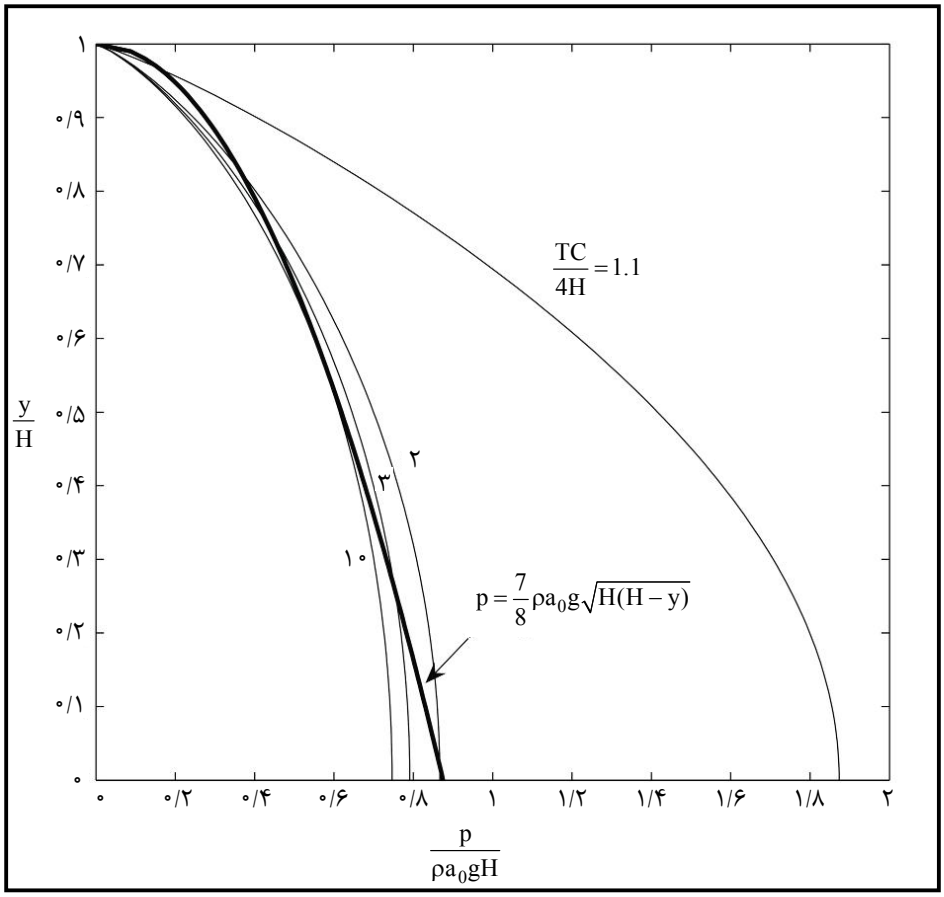
توزیع فشار هیدرودینامیک مخزن تحت اثر شتاب قائم زلزله دقیقا مشابه با توزیع فشار هیدرواستاتیک خطی بوده و روند تغییرات و مقدار آن متناسب با میزان شتاب شبه استاتیکی قائم می‌باشد.

برای برآورد فشار هیدرودینامیک مخزن در اثر شتاب افقی زلزله در راستای بالادست – پایین‌دست بر مبنای رفتار صلب بدنه سد، می‌توان از رابطه متداول پیشنهاد شده توسط وسترگارد استفاده نمود (رابطه ۹-۴). در رابطه وسترگارد، علاوه بر فرض صلب بودن بدنه سد، سیال (آب مخزن) تراکم‌ناپذیر، کف مخزن افقی و صلب، و شتاب دینامیکی زلزله به صورت هارمونیک و با پریودی بزرگ‌تر از دو برابر پریود طبیعی پایه مخزن در نظر گرفته شده است.

$$p = \frac{7}{8}\frac{90-\theta}{90}\rho a_0 g\sqrt{H(H-y)} \qquad (۹-۴)$$

در این رابطه، p فشار هیدرودینامیک، θ زاویه رویه بالادست سد نسبت به امتداد قائم برحسب درجه، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب ثقل، a_0 ضریب زلزله شبه استاتیکی ($\frac{۲}{۳}$ PGA)، H ارتفاع مخزن، و y فاصله قائم از کف مخزن می‌باشند. میزان اعتبار توزیع فشار هیدرودینامیک به دست آمده از روش وسترگارد وابسته به نسبت پریود تحریک (T) به پریود پایه مخزن ($\frac{4H}{C}$) می‌باشد. در شکل (۹-۴) توزیع فشار هیدرودینامیک به دست آمده از روش وسترگارد به صورت بدون بعد در مقایسه با توزیع فشار هیدرودینامیک متناظر با نسبت‌های مختلف پریود تحریک به پریود پایه مخزن رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، درصورتی‌که نسبت پریود تحریک به پریود پایه مخزن

($\frac{TC}{4H}$) بزرگ‌تر از ۲ باشد، توزیع فشار هیدرودینامیک تقریبا مستقل از نسبت پریود تحریک به پریود پایه مخـزن بـوده و توزیع فشار محاسبه شده از رابطه وسترگارد تخمین مناسبی از توزیع فشار هیدرودینامیک به‌دست می‌دهد [۳۰].



شکل ۹-۴- توزیع فشار هیدرودینامیک وسترگارد در مقایسه با توزیع فشار متناظر با نسبت‌های مختلف پریود تحریک به پریود پایه مخزن

در مورد سدهای وزنی بتن غلتکی، پریود غالب تحریک را می‌توان پریود طبیعی اصلی بدنه سد (بـه تنهـایی) در نظـر گرفت. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، برای سنجش اعتبار رابطه وسترگارد (رابطه ۹-۴) می‌توان از روابط تقریبی زیـر استفاده نمود:

$$T_s^1 = 0.38\frac{H_s}{\sqrt{E_s}} \qquad (۵-۹)$$

$$T_r^1 = \frac{4H}{C} \qquad (۶-۹)$$

$$\Omega = \frac{T_s^1}{T_r^1} \quad , \quad \text{if } \Omega \geq 2 \Rightarrow \text{Westergaard equation } (9-4) \text{ is accurate} \qquad (۷-۹)$$

در روابط فوق، T_s^1 پریود طبیعی اصلی سد، E_s مدول الاستیسیته دینامیکی بتن غلتکی (MPa)، H_s ارتفـاع سـد بـر حسب متر، T_r^1 فرکانس طبیعی اصلی مخزن، H ارتفاع مخزن برحسب متر، و C سـرعت انتشـار امـواج صـوت در داخـل مخزن (1440m/s) می‌باشند.

در شرایطی که $\Omega\rangle 2.0$ باشد، اثر تراکم‌پذیری آب در پاسخ سدهای وزنی به تحریک تناوبی (Harmonic) زمین ناچیز و قابل صرف‌نظر بوده و رابطه تقریبی وسترگارد (رابطه ۹-۴) تخمین مناسبی از توزیع فشار هیدرودینامیک به‌دست می‌دهد. در شرایطی که $\Omega\langle 2.0$ باشد، اثرات تراکم‌پذیری آب بر پاسخ دینامیکی مخزن قابل توجه بوده و نتایج رابطه تقریبی وسترگارد دقیق نخواهد بود.

ب- روش شبه‌دینامیکی

معروف‌ترین و معتبرترین روش شبه دینامیکی برای محاسبه بار استاتیکی معادل زلزله بر روی بدنه سد و مخزن، روش ارائه شده توسط چاپرا می‌باشد که جزییات آن در این بخش تشریح می‌گردد [۳۳]. در روش شبه‌دینامیکی چاپرا، علاوه بر لحاظ نمودن اثر انعطاف‌پذیری بدنه سد، اثر تراکم‌پذیری آب مخزن، و همچنین اثر جذب موج در کف مخزن در محاسبات در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، برآورد نیروی جانبی زلزله بر اساس شکل ارتعاشی مود اول سدهای بتنی وزنی که مود اصلی ارتعاشی نیز می‌باشد، انجام می‌گیرد. مراحل گام به گام روش چاپرا، که حتی‌المقدور با فرضیات محافظه‌کارانه ساده‌تر شده‌اند، به شرح زیر است [۳۳]:

۱- محاسبه پریود اصلی (T_s^1) بدنه سد با فرض پی صلب و مخزن خالی با استفاده از رابطه (۹-۵)

۲- تصحیح پریود اصلی سد با در نظر گرفتن اثر مخزن با استفاده از رابطه (۹-۸):

$$T_r = R_r T_s^1 \qquad (۹-۸)$$

مقدار R_r وابسته به مقادیر E_s و ضریب انعکاس موج از کف مخزن (ضریب α) می‌باشد که از گراف ارائه شده در شکل (۹-۵) قابل استخراج است. درصورتی‌که نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سازه ($\frac{H}{H_s}$) کم‌تر از ۰/۵ باشد ضریب تصحیح پریود R_r برابر ۱/۰ در نظر گرفته می‌شود.

۳- محاسبه نسبت پریود $R_w = \frac{T_r^1}{T_r}$ که در آن T_r^1 با استفاده از رابطه (۹-۶) تعیین می‌گردد

۴- محاسبه پریود اصلی سد ($\tilde{T}^1$) با در نظر گرفتن تاثیر پی و مخزن با استفاده از رابطه (۹-۹):

$$\tilde{T}^1 = R_r R_f T_s^1 \qquad (۹-۹)$$

که در آن نسبت پریود (R_f) بر مبنای نسبت مدول تغییرشکل پی به مدول الاستیسیته بتن ($\frac{E_f}{E_s}$) از گراف ارائه شده در شکل (۹-۶) استخراج می‌گردد. برای مقادیر $\frac{E_f}{E_s} > 4.0$ (پی‌های خیلی سخت) می‌توان مقدار R_f را برابر ۱/۰ در نظر گرفت.

۵- محاسبه نیروی گسترده جانبی زلزله $f(y)$ با استفاده از روابط ۹-۱۰ و ۹-۱۱ برای دو حالت مخزن خالی و مخزن پر:

$$f(y) = 3.0\frac{S_a(\tilde{T}^1,\xi)}{g}[w_s(y)\varphi(y)] \quad (۹-۱۰)$$

$$f(y) = 4.0\frac{S_a(\tilde{T}^1,\xi)}{g}[w_s(y)\varphi(y) + (\frac{H}{H_s})^2 gp(y)] \quad (۹-۱۱)$$

در روابط فوق:

$S_a(\tilde{T}^1,\xi)$ = مقدار شبه‌شتاب به دست آمده از طیف طرح ساختگاه برای پریود اصلی $\tilde{T}^1$ و نسبت میرایی ξ،

$w_s(y)$ = مقدار وزن واحد ارتفاع سازه (حاصل‌ضرب وزن مخصوص بتن در عرض مقطع) در ارتفاع مورد نظر،

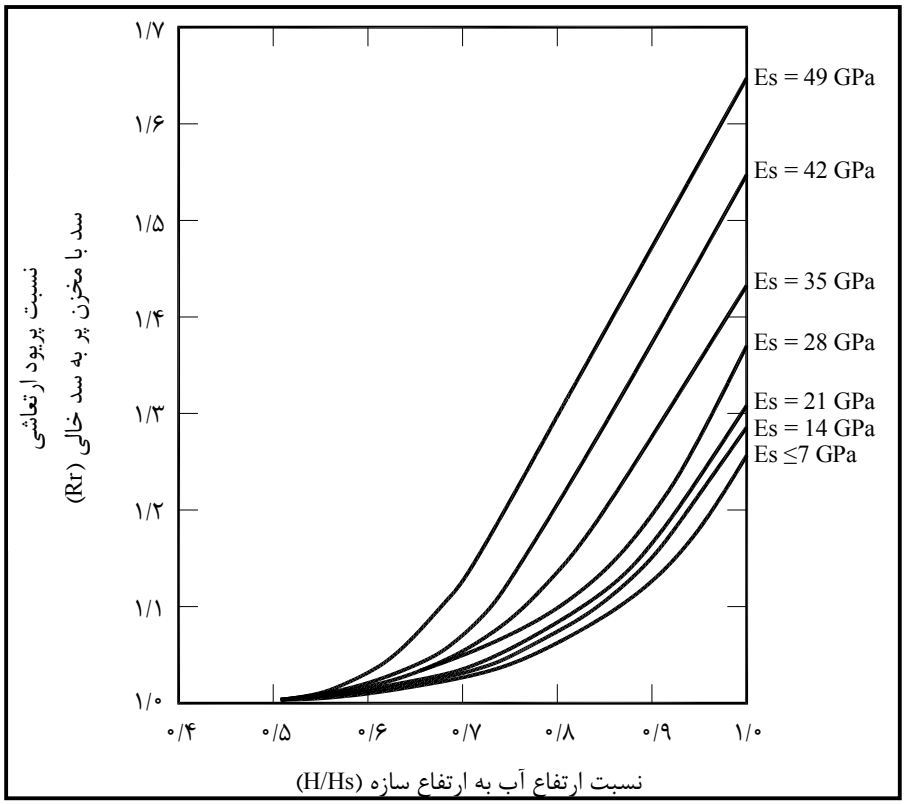
$\varphi(y)$ = شکل ارتعاشی مود اصلی (بر اساس شکل ۹-۷)، و

$p(y)$ = مقدار فشار هیدرودینامیک پایه از شکل ۹-۸ با توجه به مقدار R_w، α و $w = 9810\ N/m^3$، می‌باشند.

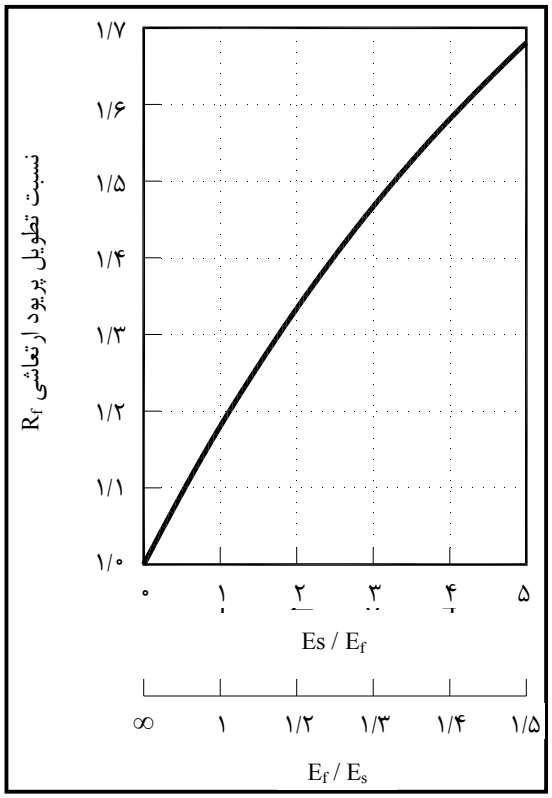
پس از محاسبه مقدار $f(y)$ در گام ۵، این نیروی جانبی زلزله باید به رویه بالادست بدنه سد اعمال شده و بدنه سد به همراه سایر نیروهای استاتیکی وارد بر آن مورد تحلیل قرار گیرد. نیروی $f(y)$ با توجه به جهت زلزله می‌تواند به سمت پایین‌دست و یا بالادست اعمال گردد (معمولا جهت پایین‌دست بحرانی‌تر خواهد بود).

۹-۳- روش‌های تحلیل عددی

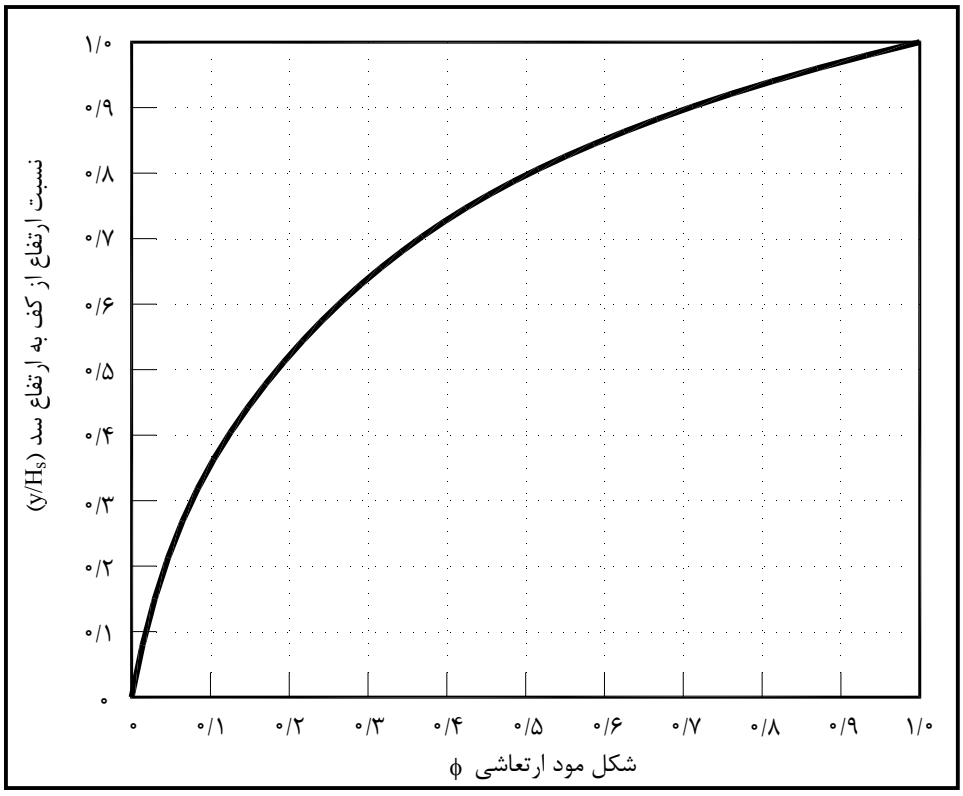
روش‌های تحلیل عددی به طور کلی از دقت بالاتری نسبت به روش تحلیلی ساده برخوردار بوده و مستلزم صرف وقت و هزینه بیش‌تری می‌باشند. به همین دلیل استفاده از این روش‌ها در مراحل نهایی مطالعات تفصیلی (مرحله دوم) و مطالعات ارزیابی ایمنی و پایداری سدهای موجود توصیه می‌گردد. با توجه به ماهیت رفتار سدهای وزنی بتن غلتکی، استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی مبتنی بر روش اجزای محدود برای تحلیل این نوع سدها رایج می‌باشد.



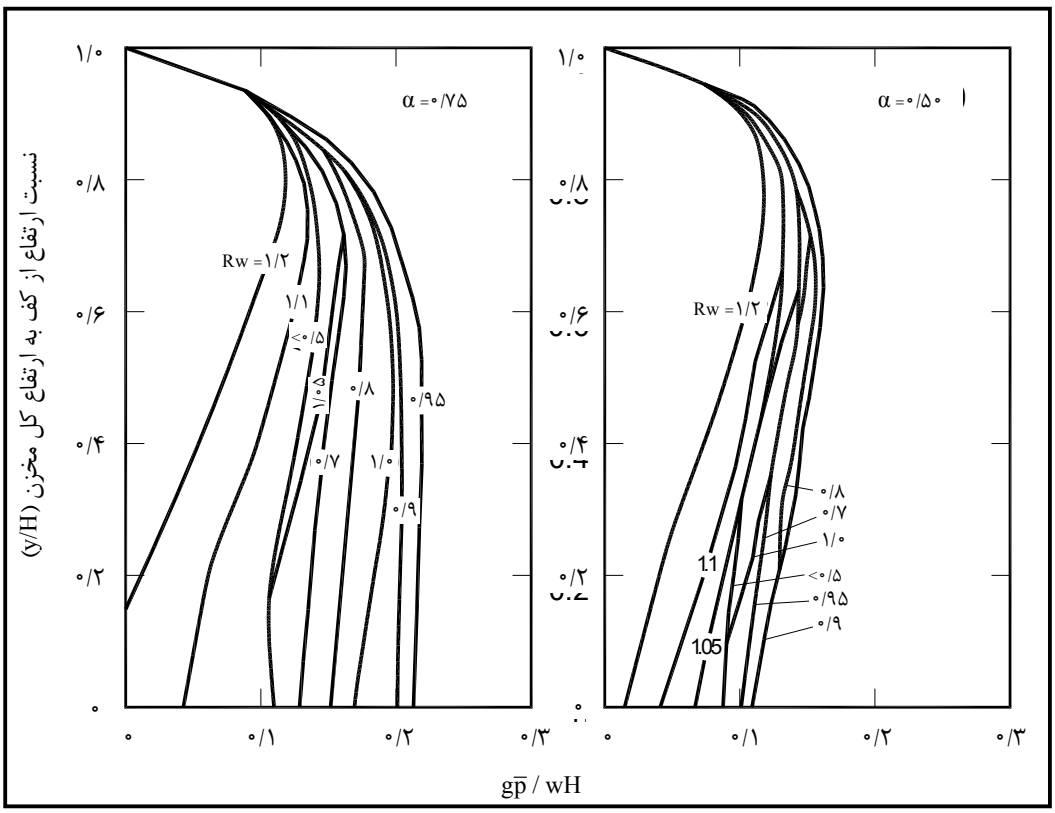
شکل ۹-۵- محاسبه نسبت پریود R_r در گام دوم روش شبه دینامیکی چاپرا [۳۴]



شکل ۹-۶- محاسبه نسبت پریود R_f در گام چهارم روش شبه دینامیکی چاپرا [۳۳]



شکل ۹-۷- شکل مود اول ($\varphi(y)$) در گام پنجم روش شبه دینامیکی چاپرا [۳۴]



شکل ۹-۸- توزیع فشار هیدرودینامیک ($p(y)$) در گام پنجم روش شبه دینامیکی چاپرا [۳۴]

امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی در شاخه‌های مختلف، نرم‌افزارهـای تحلیلـی جـامع متنـوع و بسـیار کـارایی نظیـر ANSYS و ABAQUS، بر مبنای روش اجزای محدود توسعه یافته‌اند که از قابلیت‌های لازم بـرای مـدل‌سـازی و تحلیـل سدهای وزنی بتن غلتکی برخوردار می‌باشند. البته نرم‌افزارهای ویژه‌ای نیز، شبیه EAGD، برای تحلیـل عـددی سـدهای وزنی بتن غلتکی با در نظر گرفتن برخی رفتارهای خاص مانند اثرات اندرکنش بدنه سد – پـی و مخـزن تهیـه و تنظـیم شده‌اند که استفاده از آن‌ها به منظور ارزیابی رفتار و ایمنی سد در موارد خاص مفید خواهد بـود. در ایـن فصـل، اصـول و مبانی مدل‌سازی و تحلیل عددی سدهای وزنی به طور کلی (و مستقل از نرم‌افـزار تحلیلـی مـورد اسـتفاده) ارائـه شـده و ملاحظات مهمی که در این فرایند باید مد نظر قرار گیرند، تشریح می‌گردد.

۹-۳-۱- مدل تحلیلی اجزای محدود بدنه سد، پی، و مخزن

با توجه به این‌که رفتار غالب سدهای وزنی بتن غلتکی به صورت دو بعدی (بلوک‌های مستقل از یکدیگر) می‌باشـد، در روش‌های تحلیل عددی نیز مشابه با روش تحلیلی ساده، تحلیل تنش سیستم بدنه سد، پـی، و مخـزن بـر پایـه مـدل دو بعدی مقطع سد انجام می‌پذیرد. برای این منظور، به طـور معمـول مـدل‌سـازی و تحلیـل بلنـدترین مقطـع سـد کفایـت می‌نماید ولی در مواردی که به دلیل تغییر در هندسه بدنه سد و یا تغییر شـرایط ژئـوتکنیکی تـوده سـنگ پـی، شـرایط رفتاری نواحی کم ارتفاع‌تر سد متفاوت باشد، مدل‌سازی و تحلیل تنش سایر مقاطع شاخص بدنه سد نیز ضرورت می‌یابد. در برخی موارد، به منظور افزایش یکپارچگی و ایمنی بدنه سد، پلان سدهای وزنی بتن غلتکی بـه صـورت یـک قـوس بـا انحنای کم (بدون تزریق درزهای انقباضی) طراحی می‌گردد. در این شرایط نیـز، پتانسـیل رفتـار سـه بعـدی سـد را کـه محدود به شرایط بارگذاری بحرانی (نظیر زلزله) می‌گردد، می‌توان بـه عنـوان حاشـیه اطمینـان اضـافی در نظـر گرفتـه و تحلیل تنش بدنه سد را به صورت دو بعدی انجام داد.

در مورد سدهای وزنی بتن غلتکی که در دره‌های با دیواره‌های پرشیب و تنگ (با نسبت طول تاج به ارتفاع سد کم‌تـر از ۳) احداث می‌گردند، و یا در سدهای وزنی بتن غلتکی که در پلان دارای انحنای قابـل توجـه هسـتند (اعـم از ایـن‌کـه تزریق درز صورت بگیرد یا نگیرد)، فرض رفتار دو بعدی صادق نبوده و مدل‌سازی و تحلیل ایـن گـروه از سـدها بایـد بـه صورت سه بعدی انجام گیرد. ملاحظات و جزییات مدل‌سازی و تحلیل این گروه از سدها مشابه با فرایند تحلیـل سـدهای بتنی قوسی (یا قوسی – وزنی) بوده و در این راهنما به آن‌ها پرداخته نمی‌شود.

با توجه به وجود درزهای انقباضی تزریق نشده در سدهای وزنی بتن غلتکی، رفتار مقطع بدنه سـد تقریبـا نزدیـک بـه شرایط «تنش مسطح»، و با در نظر گرفتن یکپارچگی نسبی توده سنگ پی، رفتار غالب پی نزدیـک بـه شـرایط «کـرنش مسطح» می‌باشد. بر این اساس، برای مدل‌سازی دو بعدی رفتار سدهای وزنی بتن غلتکی از المان‌های تنش مسطح بـرای مدل‌سازی بدنه سد و از المان‌های کرنش مسطح برای مدل‌سازی توده سنگ پی استفاده می‌گردد. مـدل اجـزای محـدود بدنه سد و پی را می‌توان با استفاده از المان‌های با توابع شکلی خطی و یا مرتبه دوم تهیه نمود. تعداد و آرایـش المـان‌هـا در نواحی مختلف بدنه سد و پی تابع هندسه سد، نواحی مستعد تمرکز تنش در بدنه سد، و موقعیت سازه‌هـای جنبـی در

بدنه سد دارد. بدیهی است در صورت استفاده از المان‌های با توابع شکلی مرتبه دوم، می‌توان چگالی و تعداد المان‌ها را در مدل تحلیلی کاهش داد.

ابعاد توده سنگ پی در مقایسه با ابعاد بدنه سد به منزله یک محیط نیمه بی‌نهایت است که البته میزان تاثیرپذیری آن از بارهای ناشی از بدنه سد و مخزن با فاصله گرفتن از بدنه سد به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین، برای شبیه‌سازی پی می‌توان بخش محدودی از توده سنگ را به نحوی که عمده تغییرشکل‌ها و اثرات ناشی از بارهای وارد بر پی در آن مستهلک گردد، مدل‌سازی نمود. به بیان دیگر محدوده گسترش پی در مدل تحلیلی باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که شرایط مرزی اعمال شده به مرزهای پی تاثیر محسوسی بر رفتار بدنه سد نداشته باشد. بر اساس تجارب و توصیه‌های مراجع معتبر نظیر ICOLD، اگر گسترش توده سنگ پی (نسبت به مرزهای بدنه سد) در حدود دو برابر ارتفاع سد در راستاهای افقی و قائم در نظر گرفته شود، اثر شرایط مرزی مدل تحلیلی پی تاثیر محسوسی بر رفتار بدنه سد نخواهد داشت. بر این اساس، همان‌گونه که در شکل (۹-۹) نشان داده شده است، معمولا توده سنگ پی به صورت یک مستطیل مدل‌سازی می‌شود که بعد افقی آن (در راستای بالادست- پایین‌دست) حدود ۵ برابر عرض کف سد و بعد قائم آن ۲ برابر ارتفاع سد می‌باشد. در این حالت، می‌توان درجات آزادی تغییرمکان گره‌های واقع در کف و مرزهای جانبی پی را بست (تکیه‌گاه‌های مفصلی - شکل ۹-۹). شایان ذکر این‌که این نحوه مدل‌سازی پی متناظر با شرایطی است که از اثر انتشار امواج در توده سنگ پی در محاسبات اندرکنش دینامیکی بدنه سد و پی صرف‌نظر شده و پی به صورت بدون جرم در مدل تحلیلی لحاظ می‌گردد. فرض پی بدون جرم یک فرض محافظه‌کارانه بوده و منجر به افزایش محدود سطح تنش‌های بدنه سد خواهد شد. در حالتی که در شبیه‌سازی اندرکنش دینامیکی بدنه سد و پی در نظر گرفتن اثر انتشار امواج در توده سنگ پی مد نظر باشد، جرم توده سنگ پی باید در مدل تحلیلی لحاظ شده و ابعاد و شرایط مرزی مدل تحلیلی پی متناسبا تغییر نماید. از آنجا که در نظر گرفتن جرم پی و اثر انتشار امواج در آن پیچیدگی‌ها و متغیرهای زیادی را در فرایند تحلیل وارد می‌نماید، در غالب موارد پذیرش تقریب ناشی از مدل‌سازی پی بدون جرم یک رویکرد مناسب و منطقی خواهد بود. با این حال، لحاظ نمودن اثر جرم پی معمولا در بررسی پایداری سدهای ساخته شده می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری گردد و در این موارد می‌توان با رعایت نکات لازم، اثر انتشار موج در توده سنگ پی را در مدل تحلیلی در نظر گرفت.

اثر نیروهای استاتیکی مخزن روی بدنه سد را در مدل اجزاء محدود به سادگی می‌توان با اعمال فشار هیدرواستاتیک آب روی رویه بالادست بدنه سد در نظر گرفت. بنابراین در تحلیل‌های استاتیکی نیازی به مدل‌سازی عددی مخزن نمی‌باشد. برای مدل‌سازی اثر دینامیکی مخزن بر بدنه سد در تحلیل‌های عددی نیز می‌توان از روش وسترگارد استفاده نمود. در این روش سیال مخزن تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود و بر این اساس اثر دینامیکی مخزن به صورت توده‌ای از آب مخزن که در هنگام ارتعاش با بدنه سد حرکت می‌کند، شبیه‌سازی می‌گردد. در مدل تحلیلی، جرم این توده آب را می‌توان به عنوان یک جرم افزوده به رویه بالادست بدنه سد اضافه نمود. مقدار جرم افزوده در واحد ارتفاع در رویه بالادست سد را بر اساس روش

وسترگارد می‌توان از رابطه $\frac{p}{a_0 g}=\frac{7}{8}\rho\sqrt{H(H-y)}$ محاسبه نمود. روش جرم افزوده وسترگارد، ساده‌ترین روش شبیه‌سازی اثر دینامیکی مخزن می‌باشد و همان‌گونه در تشریح روش تحلیلی ساده ذکر گردید، نتایج آن در شرایطی اعتبار دارد که نسبت فرکانس ارتعاشی اصلی بدنه سد به فرکانس ارتعاشی اصلی مخزن بزرگ‌تر از ۲/۰ باشد ($\Omega \geq 2$). در مواردی که نسبت فرکانس ارتعاشی اصلی بدنه سد به فرکانس ارتعاشی اصلی مخزن کم‌تر از ۲/۰ باشد ($\Omega < 2$)، اثر تراکم‌پذیری آب قابل توجه بوده و منجر به افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر بدنه سد خواهد شد.

برای لحاظ نمودن اثر اندرکنش دینامیکی مخزن و بدنه سد به طور معمول از روابط انتشار موج فشاری در سیال آکوستیک تراکم‌پذیر استفاده می‌گردد. در این روش، سیال تراکم‌پذیر و غیرچسبنده فرض شده و متغیر اصلی مقدار فشار هیدرودینامیک وارد بر رویه بالادست می‌باشد. بنابراین با توجه به این‌که متغیر اصلی در بدنه سد تغییرمکان است، جهت فعال‌سازی اندرکنش سیال با سازه، بر روی رویه پایین‌دست مدل تحلیلی مخزن (که مجاور رویه بالادست سد قرار می‌گیرد) با توجه به معادله اویلر باید شرط مرزی زیر باید اعمال گردد:

$$\frac{\partial p}{\partial n}=-\rho a_n \qquad (۹-۱۲)$$

که در آن p فشار هیدرودینامیک، n راستای عمود بر سطح رویه بالادست سد، a_n مولفه شتاب مطلق بدنه سد در جهت عمود بر سطح، و ρ جرم مخصوص آب می‌باشند. در شرایطی که پی بدون جرم مدل گردد، نیازی به اتصال مدل مخزن به سطح پی نمی‌باشد و اثر انتشار امواج یک بعدی در مرز مخزن و پی را با اعمال شرط مرزی زیر (در مرزهای کف و جانبی مخزن) می‌توان در نظر گرفت:

$$\frac{\partial p}{\partial n}=-\rho \ddot{X}_n^g-\frac{q}{C}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad (۹-۱۳)$$

در رابطه فوق، $\ddot{X}_n^g$ شتاب زمین در راستای عمود بر کف مخزن، C سرعت صوت در آب، و $q=\frac{\rho C}{\rho_r C_r}$ می‌باشند. ρ_r و C_r به ترتیب جرم مخصوص و سرعت صوت در مصالح موجود در کف بستر مخزن می‌باشند. با استفاده از تئوری انتشار امواج یک بعدی می‌توان نشان داد که بین مقدار q و مقدار α (نسبت دامنه موج بازگشتی از کف مخزن به دامنه موج برخوردکننده به آن) رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$q=\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \qquad (۹-۱۴)$$

$\alpha=1$ معرف مرز صلب (بازتاب کامل موج از کف مخزن) و $\alpha=0$ معرف مرز کاملا نرم و جاذب موج (به صورت ۱۰۰٪) می‌باشد. درصورتی‌که تخمینی از میزان بازتاب موج از کف و جداره‌های مخزن در دست نباشد، می‌توان مقدار α را برای سدهای در دست مطالعه معادل ۰/۹۰ و برای سدهای ساخته شده (با توجه به انباشت رسوب در مخزن) معادل ۰/۷۵ در نظر گرفت.

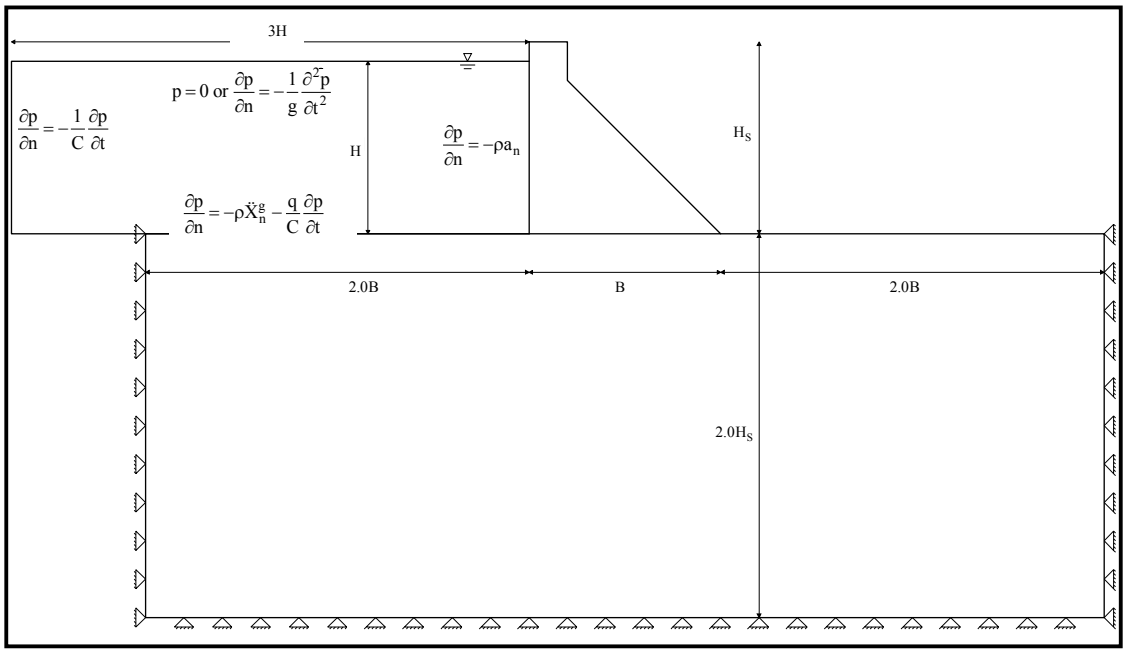
ابعاد مخزن نیز در مقایسه با ابعاد بدنه سد به‌منزله یک محیط نیمه بی‌نهایت بوده و امواج ارسالی به سمت بالادست

عملا بازتابی نخواهند داشت. در فرایند مدل‌سازی بخش محدودی از طول مخزن مدل شده و با اعمال شرط مرزی جاذب انرژی در رویه بالادست مخزن، اثر طول بی‌نهایت آن شبیه‌سازی می‌گردد. شرایط مرزی جاذب انرژی در رویه بالادست مخزن (مرز سامرفلد) به طور معمول بر اساس رابطه (۹-۱۵) در مدل تحلیلی لحاظ می‌گردد:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{C}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad (۱۵-۹)$$

بر اساس توصیه‌های موجود، طول مخزن در مدل تحلیلی حداقل باید سه برابر ارتفاع آن باشد تا شرط مرزی فوق‌الذکر از دقت مناسب برخوردار باشد (شکل ۹-۹). برای در نظر گرفتن سطح آزاد مخزن می‌توان از اثر موج‌های سطحی صرف‌نظر کرد و فشار هیدرودینامیک را برابر صفر در نظر گرفت. در موارد خاص، در صورت لزوم می‌توان اثر امواج سطحی مخزن را با فرض موج سطحی خطی با استفاده از شرط مرزی زیر روی سطح مخزن اعمال نمود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{g}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad (۱۶-۹)$$



شکل ۹-۹- مدل هندسی سد وزنی به همراه شرایط مرزی مورد نیاز

برای مدل‌سازی مخزن می‌توان از المان‌های آکوستیک با توابع شکلی خطی و یا مرتبه دوم استفاده نمود، در این خصوص توجه به این نکته ضروری است که توابع شکلی المان‌های بدنه سد و المان‌های سیال باید همسان و مشابه باشند). به منظور حصول دقت مطلوب مدل‌سازی انتشار امواج در مخزن، طول مشخصه المان‌های خطی (در راستای بالادست - پایین‌دست) نباید از مقدار $\frac{\lambda}{10}$، که در آن λ کم‌ترین طول موج غالب در مخزن است، بیش‌تر باشد. مقدار λ را می‌توان از تقسیم سرعت موج در آب بر بیش‌ترین فرکانس تاثیرگذار در رفتار دینامیکی سیستم سد – پی - مخزن (رابطه ۹-۱۷) محاسبه نمود.

$$\lambda = \frac{C}{f_{max}} \qquad (۱۷-۹)$$

۹-۳-۲- تحلیل استاتیکی

مهم‌ترین بارهای استاتیکی وارد بر بدنه سد شامل بار وزن و فشار هیدرواستاتیک مخزن می‌باشند. با توجه به روش اجرای سدهای بتن غلتکی، بار وزن بدنه سد به طور تدریجی اعمال می‌گردد ولی با توجه به رفتار خودایستای مقطع سدهای وزنی بتن غلتکی، می‌توان بار وزن سازه را به صورت یکباره در مدل تحلیلی اعمال نمود. با توجه به رفتار معین سدهای وزنی، اثر تغییرات حرارت در دوره بهره‌برداری بر تنش‌های بدنه سد ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشد.

از آنجا که در طبیعت توده سنگ تحت اثر بار وزن خود (و سایر نیروهای طبیعی) در حال تعادل بوده و پایدار می‌باشد، به طور معمول بار وزن توده سنگ در تحلیل‌های استاتیکی خطی اعمال نمی‌گردد.

بر اساس اصول و مبانی طراحی، عملکرد بدنه سد به خصوص تحت اثر بارهای استاتیکی می‌بایست در محدوده رفتار خطی مصالح بوده و هیچ پتانسیل بازشدگی درز یا ترک‌خوردگی در بدنه سد وجود نداشته باشد. بنابراین به طور معمول تحلیل‌های استاتیکی سدهای وزنی بتن غلتکی به صورت خطی انجام می‌شود. در شرایط بارگذاری فوق‌العاده استاتیکی (نظیر شرایط وقوع سیلاب حداکثر محتمل) و یا در مواردی که به دلیل کیفیت پایین اجرا، ریسک بازشدگی درزهای اجرایی بتن‌ریزی به دلیل مقاومت کششی کم و توسعه فشار برکنش در سطح این درزها وجود خواهد داشت. در این شرایط، در هنگام باز شدن درز، توزیع فشار برکنش متناسب با طول بازشدگی تغییر می‌کند و از طرف دیگر تغییر فشار برکنش باعث ازدیاد طول ترک (یا بازشدگی درز) خواهد شد. برای مدل‌سازی و تحلیل عددی این پدیده نیاز به انجام تحلیل‌های غیرخطی خواهد بود. شایان ذکر این‌که در مواردی که انجام تحلیل غیرخطی برای ارزیابی ایمنی و پایداری بدنه سد در برابر بارهای دینامیکی مد نظر باشد، انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز که پیش‌نیاز تحلیل دینامیکی است، ضرورت می‌یابد.

۹-۳-۳- تحلیل دینامیکی

ملاحظات و مبانی تهیه مدل تحلیل‌های دینامیکی در بخش ۹-۲-۱ به تفصیل ارائه شده است. مدل اجزای محدود بدنه سد و پی در تحلیل دینامیکی مشابه با مدل اجزای محدود استاتیکی است با این تفاوت که تحت اثر بارهای دینامیکی مدول الاستیسیته دینامیکی بتن غلتکی و توده سنگ باید در مدل اعمال شده و پارامترهای مقاومتی دینامیکی بتن غلتکی در ارزیابی نتایج در نظر گرفته شود.

تکنیک‌های تحلیل دینامیکی سدها را در حالت کلی می‌توان به دو دسته تحلیل طیفی (تحلیل در حوزه فرکانس) و تحلیل تاریخچه زمانی (تحلیل در حوزه فرکانس) تقسیم‌بندی کرد. در تحلیل طیفی بر مبنای محتوای فرکانسی مودهای ارتعاشی سیستم و با استفاده از طیف پاسخ طراحی ویژه ساختگاه سد، پوش تنش‌های حداکثر در بدنه سد محاسبه می‌گردد. اگرچه استفاده از روش تحلیل طیفی نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی از هزینه محاسباتی کم‌تری برخوردار است ولی مهم‌ترین عیب آن، بی‌علامت بودن مقادیر تنش به‌دست آمده از این روش می‌باشد (عدم تفکیک تنش های فشاری و کششی). بنابراین، با توجه به این که رفتار بتن در کشش و فشار کاملا متفاوت می‌باشد، ارزیابی درستی از

ایمنی بدنه سد بر اساس نتایج روش تحلیل طیفی امکان‌پذیر نبوده و کاربرد این روش برای تحلیل دینامیکی سدهای بتنی مرسوم نمی‌باشد. در روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، تحلیل تنش در هرگام زمانی بر مبنای شرایط (سرعت و شتاب) اولیه و شتاب زلزله در آن گام به صورت مجزا انجام یافته و تاریخچه تنش‌های ایجاد شده در نقاط مختلف بدنه سد محاسبه و ثبت می‌گردد. بر این اساس، نتایج روش تاریخچه زمانی بسیار تفصیلی و کامل بوده و غالب مراجع معتبر بین‌المللی بر استفاده از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای تحلیل دینامیکی سدها تاکید دارند. برای این منظور تاریخچه زمانی شتاب (شتاب‌نگاشت) زمین باید بر اساس مطالعات لرزه‌خیزی ساختگاه سد و بر اساس طیف طرح ساختگاه برای سطوح مختلف زلزله باید تحلیل و تعیین گردد. به طور معمول، برای ارزیابی و کنترل اثر زلزله‌های محتمل در ساختگاه، برای هر سطح زلزله سه شتاب‌نگاشت مختلف تهیه و در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ می‌گردد.

در مرحله طراحی، تحلیل‌های دینامیکی معمولا به صورت خطی انجام می‌پذیرد و نتایج به‌دست آمده با معیارهای پذیرش متناظر با تحلیل‌های خطی ارزیابی می‌شوند. اگر نتایج تحلیل‌های خطی نشان دهنده پتانسیل رفتار غیرخطی در بدنه سد باشد، در وهله نخست بایستی با اصلاح طرح هندسی بدنه سد رفتار و عملکرد دینامیکی سد بهبود یابد تا جایی که پتانسیل رفتار غیرخطی به حداقل ممکن (و در چارچوب معیارهای پذیرش تعریف شده) تقلیل یابد. در ارزیابی پایداری و ایمنی سدهای موجود، با توجه به این‌که اصلاح یا ترمیم بدنه سد بسیار پرهزینه و یا حتی غیرممکن می‌باشد، در صورت نامطلوب بودن نتایج تحلیل‌های دینامیکی خطی، انجام تحلیل‌های غیرخطی به منظور شناخت و ارزیابی دقیق‌تر نوع و محدوده رفتار غیرخطی محتمل در بدنه سد، اجتناب ناپذیر خواهد بود.

در مرحله طراحی، در ساختگاه‌های با شدت لرزه‌خیزی زیاد، حذف کامل پتانسیل رفتار غیرخطی در بدنه سد به خصوص در سدهای با ارتفاع متوسط و زیاد (علیرغم اعمال همه تمهیدات و اصلاحات متعارف در طراحی) میسر نمی‌گردد. در این موارد، با توجه به شناخته شده بودن مکانیزم‌های ناپایداری در سدهای وزنی بتن غلتکی، روش‌ها و تکنیک‌های تحلیلی ساده و موثری برای تعیین میزان توسعه رفتار غیرخطی در بدنه سد و متناسبا ارزیابی پایداری و ایستایی بدنه سد در مقابل زلزله‌های شدید تدوین شده‌اند. بنابراین قبل از انجام تحلیل‌های غیرخطی پیشرفته، استفاده از تکنیک‌های تحلیلی ساده مذکور برای ارزیابی ایمنی بدنه سد کاملا متداول بوده و در صورت حصول نتیجه مطلوب، انجام تحلیل‌های غیرخطی ضرورت نخواهد یافت. در ادامه مطالب این بخش، مبانی روش تحلیل دینامیکی خطی (تاریخچه زمانی) و تکنیک‌های تحلیلی ساده موجود برای ارزیابی میزان توسعه رفتار غیرخطی در بدنه سد تحت اثر بارهای دینامیکی ارائه می‌گردد.

الف- مبانی روش تحلیل دینامیکی خطی

یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل در تحلیل‌های دینامیکی خطی، نحوه تعریف و شبیه‌سازی مکانیزم‌های میرایی و استهلاک انرژی موجود در سیستم می‌باشد. به طورکلی در سدهای بتنی دو مکانیزم میرایی شامل میرایی داخلی (هیسترتیک) و میرایی خارجی (تشعشعی) پی وجود دارند. از آنجا که امکان مدل‌سازی میرایی داخلی

(هیسترتیک) در آنالیزهای تاریخچه زمانی در محدوده زمان وجود ندارد، این نوع میرایی معمولا به صورت میرایی ویسکوز (متناسب با سرعت) معادل‌سازی می‌شود. میرایی ویسکوز وابسته به فرکانس است و درصورتی‌که ماتریس میرایی ویسکوز با استفاده از روش رایلی، به صورت یک ترکیب خطی از ماتریس جرم و ماتریس سختی، در نظر گرفته شود، می‌توان برای فرکانس‌های غالب کل سیستم نسبت میرایی را تقریبا یکنواخت به دست آورد. در روش رایلی ماتریس میرایی C برحسب ماتریس جرم M و ماتریس سختی K به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$C = \gamma M + \beta K \qquad (۱۸-۹)$$

که در آن γ و β به ترتیب ضرایب جرم و سختی نامیده می‌شوند. برای تعیین این ضرایب نیز می‌توان کم‌ترین و بیش‌ترین فرکانس ارتعاشی غالب سیستم را با استفاده از یک تحلیل مقادیر ویژه به‌دست آورد و مطابق رابطه زیر آن‌ها را محاسبه نمود:

$$\begin{pmatrix}\gamma\\ \beta\end{pmatrix} = \frac{2\xi}{2\pi(f_{min}+f_{max})}\begin{pmatrix}4\pi^2 f_{min} f_{max}\\ 1\end{pmatrix} \qquad (۱۹-۹)$$

در این رابطه، f فرکانس ارتعاشی سیستم، و ξ نسبت میرایی ویسکوز معادل میرایی هیسترتیک می‌باشد. به طور معمول نسبت میرایی ویسکوز (ξ) برای سدهای وزنی بتن غلتکی در سطح زلزله مبنای بهره‌برداری (OBE) حدود ۵٪، و در سطح زلزله حداکثر محتمل در ساختگاه (MCE) حدود ۷٪ در نظر گرفته می‌شود.

انجام تحلیل‌های مقادیر ویژه و محاسبه شکل مودهای ارتعاشی و محدوده فرکانسی موثر سیستم، از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت می‌باشد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تعیین ضرایب میرایی رایلی بر مبنای مقادیر حداقل و حداکثر فرکانس‌های ارتعاشی غالب سیستم سد، پی و مخزن است. از دیگر موارد کاربرد نتایج تحلیل مقادیر ویژه، تسهیل فرایند تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از اصل جمع آثار مودهای مهم می‌باشد. همچنین از شکل‌های مودی به‌دست آمده در تعیین جرم افزوده با استفاده از روش ساده شده چاپرا می‌توان استفاده نمود.

معمولا در تعیین رفتار دینامیکی سدها مودهای ارتعاشی غالب بین مودهای ۱ تا ۱۰ قرار دارند و یکی از روش‌های مناسب برای تعیین این مودهای ارتعاشی، استفاده از مفهوم جرم موثر مودی است. در تحلیل‌های دینامیکی، در صورتی که مجموع جرم موثر مودی در نظر گرفته شده بیش‌تر از ۹۰٪ جرم کل سیستم باشد، پاسخ تحلیل از دقت کافی برخوردار خواهد بود. بنابراین برای تعیین فرکانس‌های ارتعاشی غالب سیستم، می‌توان مودهایی را در نظر گرفت که مجموع جرم موثر مودی آن‌ها از ۹۰٪ بیش‌تر باشد.

در فرایند تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، روش‌های حل عددی معادله حرکت سازه‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش انتگرال‌گیری مستقیم و روش جمع آثار مودها. در روش انتگرال‌گیری مستقیم معادله حرکت سازه توسط روش‌های عددی گام به گام به طور مستقیم انتگرال‌گیری می‌شوند، اما در روش جمع آثار مودها با استفاده از فرض رفتار خطی سازه، ابتدا معادله حرکت سازه در مختصات مودی نوشته می‌شود و سپس با استفاده از یک روش انتگرال‌گیری گام به گام در محدوده زمان و یا با روش‌های محدوده فرکانس، پاسخ سیستم تحلیل می‌شود. لازم به ذکر

است که روش دوم فقط مختص سازه‌های با رفتار خطی است و برای حل معادله حرکت سازه‌های با رفتار غیرخطی الزاما باید از روش انتگرال‌گیری مستقیم استفاده نمود.

روش‌های عددی گام به گام انتگرال‌گیری در محدوده زمان را می‌توان به دو دسته روش‌های صریح و ضمنی تفسیم‌بندی نمود. روش‌های انتگرال‌گیری صریح معمولا در تحلیل دینامیکی مسایلی که در مدت زمان کوتاهی اتفاق می‌افتند استفاده می‌شوند، چرا که روش‌های صریح انتگرال‌گیری به صورت مشروط پایدار هستند و گام انتگرال‌گیری باید بسیار کوتاه انتخاب شود. در روش‌های ضمنی معادله حرکت در انتهای گام زمانی نوشته می‌شود و برای به‌دست آوردن تغییرمکان و سرعت انتهای گام زمانی، از تغییرات فرض شده برای شتاب در خلال گام زمانی انتگرال‌گیری می‌شود. از جمله معروف‌ترین روش‌های ضمنی می‌توان به روش‌های انتگرال‌گیری گام به گام بتای نیومارک و تتای ویلسون اشاره نمود. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در روش‌های انتگرال‌گیری، پایداری عددی آن‌ها می‌باشد. در محاسبات روش‌های ضمنی، نیاز به معکوس کردن ماتریس سختی می‌باشد که این امر منجر به بالا رفتن هزینه محاسبات می‌شود ولی از آنجا که این روش‌ها معمولا پایدار هستند می‌توان گام زمانی انتگرال‌گیری را بزرگ‌تر در نظر گرفته و هزینه محاسبات را تا حد ممکن کاهش داد. لازم به ذکر این‌که در روش‌های ضمنی نباید گام زمانی انتگرال‌گیری از گام زمانی بارگذاری بیش‌تر در نظر گرفته شود.

نتایج به‌دست آمده از یک تحلیل تاریخچه زمانی شامل تاریخچه زمانی تغییرمکان، سرعت، شتاب و مولفه‌های مختلف تنش می‌باشند. با تجمیع تانسور تنش‌های دینامیکی در هر لحظه با تانسور تنش‌های استاتیکی، تاریخچه زمانی تانسور تنش کل را به دست آورد. با رسم پوش مولفه‌های مختلف تنش در مقطع سد، می‌توان با توجه به خواص مکانیک و معیارهای پذیرش متناظر، پتانسیل ایجاد رفتار غیرخطی در بدنه سد را تحت اثر زلزله مورد نظر تعیین و ارزیابی نمود.

برای نمونه، با ترسیم پوش تنش‌های کششی قائم کل (که عمود بر سطوح درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی هستند) و مقایسه آن‌ها با مقادیر مجاز تنش کششی درز، می‌توان پتانسیل بازشدگی درزهای اجرایی بتن‌ریزی را بررسی و تعیین نمود. همچنین، بر اساس پوش تنش‌های کششی اصلی کل و مقایسه آن با مقاومت کششی مجاز جسم بتن غلتکی، ریسک وقوع ترک (و جهت ترک) در توده بتن غلتکی قابل شناسایی خواهد بود.

ب- ارزیابی ایمنی بدنه سد بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی خطی

بر اساس معیارهای پذیرش ارائه شده برای نتایج تحلیل‌های دینامیکی (جدول ۶-۷)، مقدار مجاز تنش کششی در بارگذاری‌های غیرعادی دینامیکی $0.9f_t'$ برای مناطق با خطر لرزه‌خیزی کم و متوسط، و $1.35f_t'$ برای مناطق با خطر لرزه‌خیزی زیاد و بسیار زیاد می‌باشد (f_t' = مقاومت کششی مستقیم درز یا بتن). درصورتی‌که حداکثر مقادیر پوش تنش‌های کششی از این مقادیر تجاوز نماید، طرح هندسی بدنه سد مناسب نبوده و نیاز به تغییراتی در طراحی می‌باشد. در بارگذاری دینامیکی فوق‌العاده مقدار تنش کششی مجاز دینامیکی برابر $2f_t'$ است که نتایج پوش تنش تحلیل‌های دینامیکی خطی از این مقدار نباید تجاوز کند. از آنجا که مطابق نمودار تنش-کرنش دینامیکی بتن، رفتار بتن در

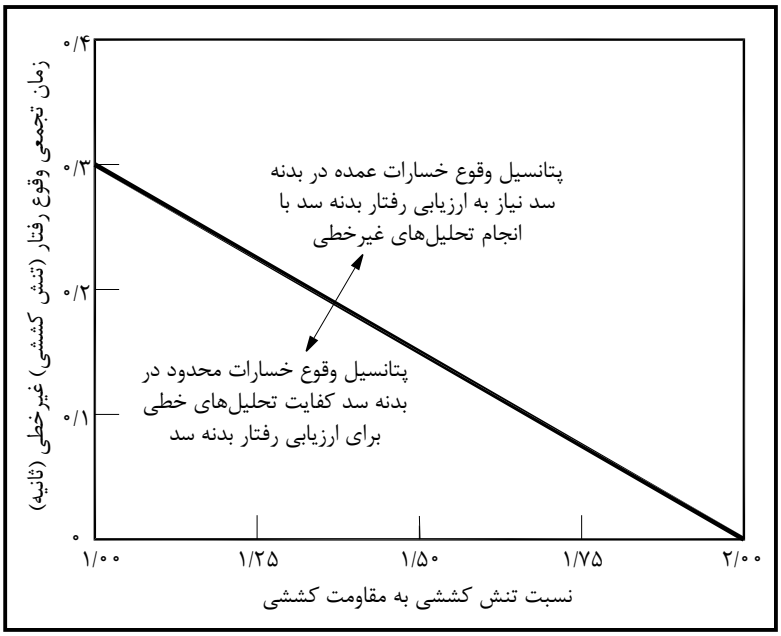
حدفاصل تنش کششی دینامیکی f'_t تا $2f'_t$ در ناحیه غیرخطی قرار خواهد داشت (شکل ۶-۳)، برآورد میزان توسعه و گسترش رفتار غیرخطی بدنه سد در بارگذاری دینامیکی فوق‌العاده بر اساس نتایج تحلیل‌های خطی به طور دقیق امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای این منظور و نیز برای قضاوت در خصوص کفایت نتایج تحلیل‌های دینامیکی خطی در برآورد و ارزیابی رفتار غیرخطی بدنه سد، از روش پیشنهادی توسط قناعت (Ghanaat) می‌توان استفاده نمود [۳۵]. بر اساس این روش، درصورتی‌که شرایط زیر برقرار باشد، بدنه سد از ایمنی لازم در برابر بارهای دینامیکی برخوردار بوده و نیازی به انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نخواهد بود:

۱- تنش کششی در تمامی نقاط بدنه کم‌تر از $2f'_t$ باشد.

۲- درصد سطح مناطقی که میزان تنش کششی بیش‌تر از f'_t است (محدوده گسترش رفتار غیرخطی) نسبت به کل سطح مقطع عرضی سد کم‌تر از ۱۵٪ باشد.

۳- در محدوده گسترش رفتار غیرخطی، وضعیت تداوم تنش‌های کششی بیش‌تر از f'_t در نقاط مختلف باید پایین‌تر از نمودار کارایی نشان داده شده در شکل (۹-۱۰) باشند.

در نمودار ارائه شده در شکل (۹-۱۰)، محور قائم مدت زمان تجمعی وقوع تنش کششی در ناحیه رفتار غیرخطی (Cumulative Inelastic Duration)، و محور افقی نسبت تنش کششی به وقوع پیوسته به ظرفیت کششی در محدوده رفتار خطی، σ_t / f'_t، (Demand-Capacity Ratio) می‌باشد. این پارامترها را برای مقادیر مختلف تنش‌های کششی بزرگ‌تر از f'_t براحتی می‌توان از تاریخچه تغییرات مولفه تنش مورد نظر استخراج نمود. با توجه به شکل غالب منحنی تنش – کرنش بتن غلتکی (شکل ۶-۳)، نسبت تنش کششی به وقوع پیوسته به ظرفیت کششی در محدوده رفتار خطی (DCR)، بین ۱ تا ۲ متغیر می‌باشد. بر اساس معیار اراده شده در این روش (شکل ۹-۱۰)، مدت زمان تجمعی مجازی که تنش کششی بتن در تاریخچه زمانی تنش کششی می‌تواند بیش‌تر از f'_t باشد (DCR=1) معادل ۰/۳ ثانیه و مدت زمان تجمعی مجازی که تنش کششی می‌تواند بیش‌تر از $1.5f'_t$ باشد (DCR=1.5) معادل ۰/۱۵ ثانیه می‌باشد. اگر وضعیت تنش در نقاط مختلف ناحیه توسعه رفتار غیرخطی در مقطع سد، معیار فوق را ارضاء نماید، بدنه سد تحت اثر بار دینامیکی زلزله از پایداری و ایستایی لازم برخوردار می‌باشد، در غیر این‌صورت، ارزیابی پایداری بدنه سد در شرایط وقوع زلزله مستلزم انجام تحلیل‌های دینامیکی دقیق‌تر غیرخطی خواهد بود.



شکل ۹-۱۰- نمودار کارایی (عملکرد) دینامیکی بدنه سد بر اساس نتایج تحلیل‌های خطی [۳۵]

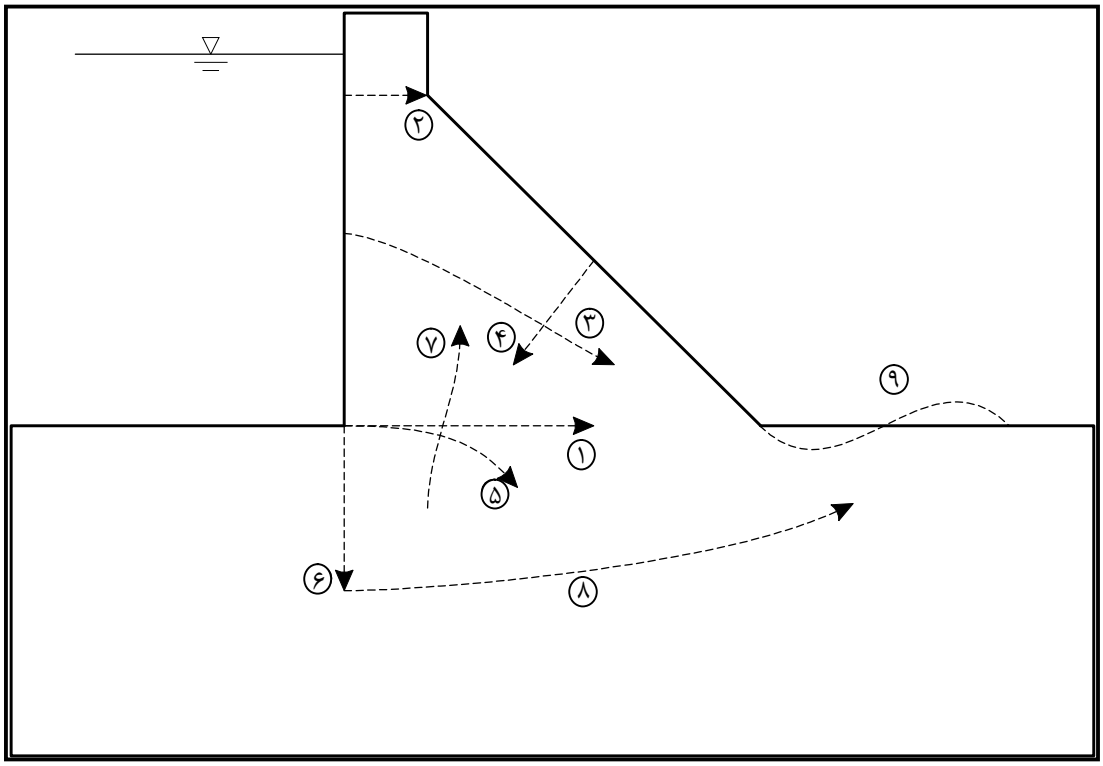
ج- مبانی و روش‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی

بر اساس معیارهای پذیرش برای بارگذاری‌های دینامیکی فوق‌العاده، توسعه رفتار غیرخطی در بدنه سد تا حدی پذیرفته می‌باشد که پایداری کلی سد به مخاطره نیفتد. بنابراین، مهم‌ترین هدف در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی علاوه بر شناسایی و تحلیل دقیق پتانسیل وقوع و گسترش رفتار غیرخطی در بدنه سد، ارزیابی ایمنی و ایستایی ناحیه‌ای و کلی بدنه می‌باشد.

در چند دهه اخیر مدل‌های رفتاری غیرخطی مناسب متنوعی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن غلتکی توسعه داده شده‌اند که شامل طیف گسترده‌ای از مدل‌هایی که بر اساس معیارهای کلاسیک پلاستیسیته استوار هستند تا مدل‌هایی که توانایی شبیه‌سازی تخریب در بتن را دارا هستند، می‌گردد. با استفاده از این مدل‌های رفتاری، مکانیزم‌های شکست و فرایند خرابی در بتن را می‌توان تحلیل و تعیین نمود. بر اساس مطالعات و تجارب موجود، پتانسیل‌های رفتار غیرخطی و مکانیزم‌های ناپایداری سدهای وزنی بتن غلتکی را می‌توان در ۹ گروه به ترتیب اهمیت و اولویت، به شرح زیر، دسته‌بندی نمود (شکل ۹-۱۱):

- مکانیزم ۱: ترک افقی (یا شبه‌افقی) در محل تماس بتن و سنگ در مجاورت رویه بالادست
- مکانیزم ۲: ترک افقی (یا شبه‌افقی) در یک سوم بالایی بدنه در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست
- مکانیزم ۳: ترک مورب عمود بر رویه پایین‌دست
- مکانیزم ۴ و ۵: ترک‌های منحنی در مجاورت رویه بالادست در مرز تماس بدنه سد و پی و در نیمه میانی ارتفاع سد
- مکانیزم ۶: ترک قائم در پی در محدوده مرز رویه بالادست
- مکانیزم ۷: ایجاد ترک قائم در بدنه سد در اثر انعطاف‌پذیری زیاد پی یا تداوم ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ پی

- مکانیزم ۸: لغزش و ناپایداری در توده سنگ پی
- مکانیزم ۹: فرسایش پی و یا کمانش لایه نازک پی (در پایین‌دست)



شکل ۹-۱۱- مکانیزم‌های محتمل شکست در یک سد بتنی وزنی: ترک‌های افقی (۱ و ۲)، ترک مورب پایین‌دست (۳)، ترک‌های منحنی در مجاورت رویه بالادست (۴ و ۵)، ترک قائم پی (۶)، ایجاد ترک قائم در بدنه سد (۷)، لغزش در پی (۸)، کمانش لایه نازک پی (۹)

از جمله مهم‌ترین مکانیزم‌های ناپایداری سدهای وزنی شامل ترک‌های افقی و یا شبه‌افقی به ترتیب در محل تماس بتن با سنگ (مکانیزم ۱) و یا در یک سوم بالایی بدنه سد (مکانیزم ۲) می‌باشند. در شرایطی که ضرایب اطمینان در برابر لغزش بدنه سد در تحلیل‌های پایداری به نحو مطلوب تامین نشده باشند، ریسک گسترش و تلفیق برخی مکانیزم‌های شکست (نظیر مکانیزم‌های ۱، ۵، ۶، ۸، و ۹) و وقوع ناپایداری لغزشی کلی در بدنه سد افزایش می‌یابد. در این موارد، با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و بررسی گسترش مکانیزم‌های شکست، پایداری کلی بدنه سد را نیز تحلیل و ارزیابی نمود.

فصل ۱۰

طراحی سیستم ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی

۱۰-۱- کلیات

در این فصل از راهنما، مبانی و ساختار طراحی سیستم ابزاردقیق و برنامه‌ریزی پایش سدهای وزنی بتن غلتکی بر پایه شرایط ساختگاه و ویژگی‌های طراحی هر سد ارائه می‌گردد. مطالب ارائه شده در این فصل شامل موارد زیر می‌باشند:

- فلسفه و مبانی ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی
- فرایند طراحی سیستم ابزاردقیق
- سطح حداقل ابزارها و پایش لازم در هر پروژه (با توجه به ویژگی‌های ساختگاه و بدنه سد)
- انواع متداول ابزارهای مورد استفاده
- برنامه زمانی پایش و قرائت ابزارها
- روش‌های مختلف قرائت و گردآوری داده‌ها

در فرایند مطالعات تفصیلی یک پروژه، طراحی سیستم ابزاردقیق و تنظیم برنامه پایش بدنه سد و پی باید هم‌ارز با سایر مطالعات طراحی و تحلیل بدنه سد و پی مورد توجه قرار گیرد. با طراحی و تنظیم یک سیستم ابزاردقیق و برنامه پایش مناسب، امکان سنجش و ارزیابی شناخت حاصل از ویژگی‌های ساختگاه (در زمان مطالعات) و فرضیات پایه طراحی، و نیز ارزیابی کیفیت ساخت و اجرای بدنه سد فراهم شده و در نهایت بر پایه نتایج حاصل از پایش، ارزیابی ایمنی و پایداری بدنه سد و پی بر پایه شواهد و تحلیل شاخص های رفتاری اندازه‌گیری شده، میسر خواهد شد. بر اساس این رویکرد، بدیهی است شناخت شاخص‌های رفتاری مهم بدنه سد و پی و همچنین ریسک‌های خطر محتمل در هر پروژه، پایه و اساس طراحی سیستم ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی خواهد بود.

هدف کلی در طراحی سیستم ابزاردقیق سدها، دستیابی به یک سطح لازم و کافی (بهینه) از ابزارها و یک برنامه پایش موثر بدنه سد و پی است. با این حال باید توجه داشت که سطح بهینه ابزارها و برنامه پایش موثر در هر پروژه تابع ابعاد (ارتفاع) سد، سطح خسارات ناشی از ناپایداری یا انهدام سد (Hazard Potential)، میزان پیچیدگی و عدم قطعیت رفتار توده سنگ پی و بدنه سد، مشکلات و ریسک‌های ناپایداری شناخته شده محتمل در سیستم بدنه سد و پی، و میزان محافظه‌کاری در مبانی طراحی بدنه سد می‌باشد.

با توجه به شرایط فوق، عملا ارائه یک «قواعد طراحی ساده» برای تحقق هدف کلی فوق امکان‌پذیر نبوده و تکیه بر قضاوت مهندسی و نیز استفاده از تجارب موجود برای دستیابی به سطح بهینه ابزارها و برنامه پایش موثر بدنه سد و پی در هر پروژه ضروری خواهد بود. در برخی موارد، میزان ابزارهای بهینه و برنامه پایش لازم برای یک سد با ارتفاع کم یا متوسط که در یک ساختگاه پیچیده احداث شده و خرابی یا انهدام آن ریسک آسیب جانی و مالی زیادی (به دلیل حجم مخزن قابل توجه یا وجود تاسیسات شهری یا استراتژیک مهم و حساس در پایین‌دست) به همراه دارد، ممکن است بیش‌تر و حساس‌تر از میزان ابزارها و برنامه پایش لازم و بهینه برای یک سد با ارتفاع نسبتا بلند که در یک ساختگاه مناسب و مطلوب احداث شده است، باشد [۳۶].

شایان ذکر این‌که بررسی و تشریح جزییات فرایند پردازش و تفسیر نتایج سیستم ابزاردقیق جزء اهداف این راهنما نبوده و لذا در این بخش صرفا به ملاحظات تاثیرگذار بر طراحی ابزاردقیق از دیدگاه الزامات «ارزیابی پایداری و ایمنی بدنه سد» اشاره می‌گردد.

۱۰-۲- فلسفه و مبانی ابزاردقیق و پایش بدنه سد و پی

بر مبنای اهداف و رویکرد کلی طراحی، هدف و منظور اصلی از طراحی سیستم ابزاردقیق و تنظیم برنامه پایش، شناسایی پارامترها و شاخص‌های رفتاری کلیدی بدنه سد و گردآوری منظم داده‌های لازم برای ارزیابی مستمر و بهبود سطح ایمنی بدنه سد و پی می‌باشد. بر این اساس، بر مبنای تحلیل داده‌های حاصل از پایش پروژه، همواره باید ارزیابی دقیقی از نحوه رفتار و واکنش سد به بارهای وارده در مقایسه با «رفتار پیش‌بینی شده و مورد انتظار در طراحی» وجود داشته و هر نوع تغییر رفتاری که می‌تواند ایمنی بدنه سد و پی را تهدید نماید، سریعا قابل تشخیص و ردیابی باشد. در صورت وقوع رفتار یا شواهد تهدید کننده ایمنی بدنه سد و پی، باید ساز و کارهای لازم برای ارزیابی اولیه سطح خطر ناشی از پدیده‌های مذکور در برنامه پایش پروژه پیش‌بینی شده و اقدامات جبرانی مناسب برای کنترل این تهدیدات بلافاصله برنامه‌ریزی و عملیاتی گردد.

بدیهی است برای تحقق فلسفه و مبانی فوق، علاوه بر نیاز به شناخت و پیش‌بینی رفتار مورد انتظار بدنه سد و توده سنگ پی تحت اثر بارهای دوره بهره‌برداری، آگاهی از مکانیزم‌های محتمل ایجاد ناپایداری در بدنه سد و پی نیز کاملا ضروری خواهد بود. همان‌گونه که در فصل ۹ این راهنما ذکر شد، مکانیزم‌های ناپایداری محتمل در انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی را بر اساس مطالعات و تجارب موجود می‌توان در ۹ گروه زیر دسته‌بندی نمود (شکل ۹-۱۱):

- مکانیزم ۱: ترک افقی (یا شبه‌افقی) در محل تماس بتن و سنگ در مجاورت رویه بالادست
- مکانیزم ۲: ترک افقی (یا شبه‌افقی) در یک سوم بالایی بدنه در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست
- مکانیزم ۳: ترک مورب عمود بر رویه پایین‌دست
- مکانیزم ۴ و ۵: ترک‌های منحنی در مجاورت رویه بالادست در مرز تماس بدنه سد و پی و در نیمه میانی ارتفاع سد
- مکانیزم ۶: ترک قائم در پی در محدوده مرز رویه بالادست
- مکانیزم ۷: ایجاد ترک قائم در بدنه سد در اثر انعطاف‌پذیری زیاد پی یا تداوم ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ پی
- مکانیزم ۸: لغزش و ناپایداری در توده سنگ پی
- مکانیزم ۹: فرسایش پی و یا کمانش لایه نازک پی (در پایین‌دست)

مهم‌ترین عوامل موثر در تحریک و رشد مکانیزم‌های ناپایداری فوق عبارتند از:

- تشدید نفوذ آب و توسعه فشار برکنش در داخل بدنه سد به دلیل اجرای نامناسب تمهیدات آب‌بندی درزهای اجرایی افقی بتن‌ریزی و یا درزهای انقباضی قائم

- تشدید نفوذ آب و توسعه فشار برکنش در داخل بدنه سد طی زمان به دلیل دوام و یا اجرای نامناسب رویه آب‌بند بالادست سد و یا عدم مقاومت کافی و شکست آن در زمان وقوع بارهای استثنایی نظیر زلزله
- گذر کنترل نشده سیلاب از روی تاج سد به دلیل ظرفیت ناکافی سرریز و یا طراحی نامناسب آن
- رفتار نامناسب و مخرب بتن در طی زمان (نظیر رفتار انبساطی بتن در اثر واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها)
- نشت کنترل نشده در توده سنگ پی به دلیل وجود لایه‌های با نفوذپذیری بالا و طراحی نامناسب پرده تزریق
- افزایش فشار برکنش در توده سنگ پی سد به دلیل کاهش تدریجی کارایی سیستم زهکشی (و پرده تزریق) پی
- عدم اجرای تمهیدات مناسب برای کنترل حرکات ناپیوستگی‌های توده سنگ در سطح تماس بدنه سد و پی
- نشست (تدریجی و یا سریع) بیش از حد توده سنگ پی (این سناریو بیش‌تر در سدهای وزنی بتن غلتکی - با مواد سیمانی کم - که بر روی پی‌های انعطاف‌پذیر احداث می‌شوند، محتمل می‌باشد)
- وجود مکانیزم‌های لغزش بحرانی (لایه‌ها یا ناپیوستگی‌های ضعیف) در داخل توده سنگ پی

با توجه به توضیحات فوق، پیش‌نیاز طراحی سیستم ابزاردقیق در هر سد وزنی بتن غلتکی، شناسایی مکانیزم‌های محتمل خرابی و نواحی مستعد ایراد خسارت در بدنه سد با توجه به ویژگی‌های ساختگاه (که برای هر سد تقریبا منحصر به‌فرد است)، معیارها و نتایج مطالعات طراحی و تحلیل، میزان کیفیت و دقت در اجرا، و همچنین تعیین میزان اهمیت و ریسک خطر ناشی از ایراد خسارت یا انهدام سد، می‌باشد. بر مبنای نتایج این بررسی‌ها، نوع، تعداد، و موقعیت مناسب ابزارها و برنامه پایش منطقی بدنه سد و پی در مقاطع زمانی مختلف بررسی و تدوین می‌گردد. سیستم ابزاردقیق و پایش بدنه سد باید داده‌های لازم برای:

- شناسایی ویژگی‌های ساختگاه قبل از احداث سد،
- ارزیابی و صحه‌گذاری فرضیات طراحی،
- ارزیابی رفتار بدنه سد در دوره ساخت، در فرایند اولین آبگیری مخزن، و در دوره بهره‌برداری،
- ارزیابی عملکرد تمهیدات ویژه طراحی شده،
- تشخیص و ارزیابی رفتارهای نامتعارف توده سنگ پی، و
- ارزیابی پارامترها و شاخص‌های کلیدی مرتبط با مکانیزم‌های محتمل ناپایداری و خرابی سد، را تامین نماید.

برای تحقق اهداف فوق، باید محدوده قابل انتظار (و ایمن) مقادیر قابل اندازه‌گیری توسط هر ابزار بر اساس نتایج مطالعات طراحی و تحلیل بدنه سد تعیین گردد. ثبت مقادیر خارج از حدود پیش‌بینی شده و مشاهده هر نوع روند مستمر تغییرات پارامتر اندازه‌گیری شده تحت اثر نوسانات عادی بارهای وارد بر بدنه سد، می‌تواند نشانگر رشد تدریجی یک مکانیزم ناپایداری (یا ایراد و عملکرد نامناسب ابزار) بوده و باید به دقت در کنار دیگر شواهد و نتایج سایر ابزارها بررسی و ارزیابی گردد.

نکته بسیار مهم در فرایند پایش رفتار بدنه سد و پی، گردآوری تاریخچه کامل (و مبنای مناسب) اندازه‌گیری‌های پارامترهای رفتاری شاخص بدنه سد و نیز نصب ابزارها در نواحی که بیش‌ترین ریسک ایراد خسارت در آن‌ها وجود دارد،

می‌باشد. باید توجه داشت عدم وقوع برخی پدیده‌های قابل انتظار و پیش‌بینی شده، نظیر نشت آب از یک سیستم زهکشی، هم می‌تواند یک علامت رفتار نامناسب بدنه سد و پی (برای مثال نشت و زهکشی آب از محل‌های پیش‌بینی نشده) باشد که می‌تواند تبعات و مشکلات جدی و غیر قابل کنترل به همرا داشته باشد.

نکته بسیار مهم در فرایند پایش و رفتارنگاری سدها توجه به اهمیت و ضرورت فوق‌العاده بازرسی‌های چشمی توسط تکنسین‌ها و کارشناسان مجرب می‌باشد. از آنجا که تخمین محل دقیق ایجاد خسارت در بدنه سد و پی در زمان طراحی و نصب ابزارهای مناسب دقیقا در همان نواحی امکان‌پذیر نیست، بازرسی‌های چشمی منظم و دوره‌ای همه سازه‌ها و اجزای بدنه سد و پی نقش تعیین‌کننده‌ای در شناسایی و تشخیص به هنگام نواحی با عملکرد ضعیف و نامطلوب، نظیر تغییرشکل‌های نامتعارف بدنه سد یا توده سنگ پی، وقوع ترک، تراوش بیش از حد آب در جسم بدنه سد یا پی، نشت متمرکز آب، مسدود شدن سیستم زهکشی، فرسایش و خوردگی پوشش مجاری آب، ایجاد چشمه‌های جدید یا تغییر (افزایش یا کاهش) بده چشمه‌های موجود در اطراف سد، تغییر کیفیت فیزیکی (گل آلود شدن) و شیمیایی چشمه‌ها، و ... دارد. پس از تشخیص به موقع هر نوع رفتار نامتعارف در بازدیدهای چشمی، پیش‌بینی و اجرای تمهیدات لازم و اقدامات جبرانی شامل نصب ابزارهای جدید در نواحی خسارت دیده بدنه سد یا پی، تنظیم برنامه پایش خاص برای بررسی روند تغییرات خسارات ایجاد شده، ارزیابی دقیق و ویژه رفتار موضعی نواحی خسارت دیده، و نهایتا طراحی و اجرای عملیات علاج‌بخشی در موارد لزوم، ضرورت می‌یابد.

اهمیت بازرسی‌های چشمی به حدی است که در هر نوع سدی و با هر سطحی از سیستم ابزاردقیق نصب شده، این بازرسی‌ها جزء لاینفک و اصولی برنامه پایش بدنه سد و پی بوده و در واقع می‌توان بازرسی‌های چشمی را به‌عنوان «پایش کیفی» مکمل (و حتی مقدم بر) سیستم ابزاردقیق به‌عنوان «پایش کمّی» ایمنی بدنه سد در نظر گرفت.

در بسیاری از پروژه‌ها علیرغم سطح آزمایش‌ها و اکتشافات مطلوب صحرایی و آزمایشگاهی، ویژگی‌های طبیعی ساختگاه و همچنین شرایط اجرایی بدنه سد کاملا منطبق بر سطح شناخت و فرضیات طراحی نمی‌باشد. بنابراین با طراحی یک سیستم ابزاردقیق و برنامه پایش مناسب، می‌توان میزان صحت فرضیات طراحی را ارزیابی نموده و در صورت وجود تفاوت‌های محسوس و معنی‌دار نسبت به فرضیات مذکور، مدل(های) تحلیلی بدنه سد و پی را مطابق با رفتار و شرایط واقعی پروژه کالیبره نمود. بدیهی است در این شرایط نتایج تحلیلی بدنه سد بر اساس مدل تحلیلی کالیبره شده باید مبنای ارزیابی رفتار و سنجش ایمنی بدنه سد و پی قرار گیرد.

مزیت جنبی و بسیار مهم دیگر طراحی سیستم ابزاردقیق و پایش سدها، ارزیابی و محک تکنیک‌های طراحی و ثبت تجارب برای بهبود دانش طراحی بدنه سد و تحلیل رفتار سدهای آتی است [۹].

۱۰-۳- فرایند طراحی سیستم ابزاردقیق

سیستم ابزاردقیق باید بر اساس یک برنامه و استراتژی جامع و دقیق طراحی و اجرا گردد به‌گونه‌ای که هر ابزاری دارای هدف و رسالت مشخصی باشد. در تدوین استراتژی طراحی سیستم ابزاردقیق، کلیه ریسک‌ها و خطراتی که ایمنی

و پایداری سد را تهدید می‌نمایند، مبانی انتخاب و جانمایی ابزارهای مناسب، برنامه پایش و قرائت ابزارها، و نحوه استفاده از نتایج سیستم ابزاردقیق در ارزیابی پایداری و ایمنی سد، باید مد نظر قرار گیرند. بنابراین صرف نصب و قرائت یک سری ابزار در بدنه سد و یا پی منجر به افزایش آگاهی و اطمینان از پایداری و ایمنی بدنه سد نخواهد شد.

در ادامه مطالب این فصل، مراحل گام به گام و منطقی طراحی یک سیستم ابزاردقیق ارائه می‌گردد [۳۶].

نکته مهم دیگری که در طراحی سیستم ابزار دقیق باید مد نظر قرار گیرد، اطمینان از سلامت و صحت عملکرد ابزارها می‌باشد. با توجه موقعیت و ماهیت ابزارها، آسیب‌های متعددی متوجه سلامت و صحت ابزارها و متعلقات آنها (سیم‌های رابط ابزارها به سیستم قرائت مرکزی، ایستگاه‌ها یا ادوات اندازه‌گیری و قرائت، و ...) در دوره اجرا (با توجه به نوع و محل تردد ماشین‌آلات اجرایی) و در دوره بهره‌برداری (با توجه به موقعیت قرارگیری و دما و رطوبت محل نصب و قرائت ابزارها) می‌گردد. بنابراین، با لحاظ نمودن ویژگیهای هر پروژه، تمهیدات حفاظتی لازم و متناسب با شرایط پروژه برای ابزارها بایستی در نظر گرفته شده و با انجام تست‌ها و کالیبراسیون دوره‌ای از صحت عملکرد ابزارها اطمینان حاصل نمود.

۱۰-۳-۱- شناسایی و ارزیابی شرایط پروژه

اولین گام در طراحی سیستم ابزاردقیق، شناسایی و ارزیابی پروژه، شامل شرایط و ویژگی‌های ساختگاه و توده سنگ پی، مبانی و معیارهای طراحی، نحوه طراحی و نتایج تحلیل‌های بدنه سد (میزان محافظه‌کاری در طراحی)، و بررسی روش اجرای بدنه سد می‌باشد. بر اساس شناخت حاصل از پروژه، موقعیت نقاط و نواحی ضعیف و تاثیر آن‌ها بر ایجاد یا توسعه مکانیزم‌های ناپایداری در بدنه سد و پی باید تعیین گردد. در این گام از طراحی، چارچوب کلی استراتژی طراحی سیستم ابزاردقیق بر مبنای ویژگی‌های رفتاری و مکانیزم‌های ناپایداری محتمل در بدنه سد تعیین می‌شود.

نظر به تنوع مبانی طراحی، نحوه رفتار بتن، و روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی، و همچنین با توجه به این که این نوع سدها از قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار بوده و احداث آن‌ها در طیف گسترده‌ای از ساختگاه‌ها (از ساختگاه‌های متشکل از توده‌های سنگ سخت تا ساختگاه‌های متشکل از توده‌های سنگ کاملا انعطاف‌پذیر و نرم) امکان‌پذیر می‌باشد، تعیین دقیق و منطقی مکانیزم‌های محتمل ناپایداری سد با توجه به شرایط فوق از اهمیت بسیار زیادی در تدوین استراتژی طراحی سیستم ابزاردقیق برخوردار می‌گردد. اگرچه مجموعه مکانیزم‌های محتمل ناپایداری انواع سدهای وزنی بتن غلتکی شناخته شده است، ولی صدور یک حکم و قاعده کلی برای مکانیزم‌های محتمل ناپایداری انواع مختلف سدهای وزنی بتنی غلتکی میسر نبوده و تعیین درصد احتمال و اولویت وقوع مکانیزم‌های ناپایداری در مورد هر پروژه با توجه به مجموعه شرایط ساختگاه و بدنه سد ضروری می‌باشد.

۱۰-۳-۲- تعیین اهداف سیستم ابزاردقیق

گام بعدی در طراحی سیستم ابزاردقیق تعیین اهداف ابزاردقیق بدنه سد و مشخص نمودن نقش و هدف هر ابزار در این چارچوب می‌باشد. برای این منظور، طراح باید دقیقا از نحوه عملکرد ابزار و ماهیت پارامتر اندازه‌گیری شده توسط آن

مطلع بوده و همچنین نسبت به نحوه پردازش و استفاده از آن در فرایند ارزیابی ایمنی سد اشراف داشته باشد. ابزارها ممکن است با هدف پایش بدنه سد در شرایط بهره‌برداری عادی، ارزیابی رفتار یک پدیده خاص در ساختگاه یا بدنه سد، و یا با هدف ارزیابی نحوه عملکرد و اثربخشی تمهیدات علاج‌بخشی اجرا شده، پیش‌بینی و طراحی شوند.

با توجه به اهداف سیستم ابزاردقیق، همان‌گونه که ذکر شد ممکن است ابزارهای مورد نیاز برای یک سد با ارتفاع کم یا متوسط که در یک ساختگاه پیچیده احداث شده و خرابی یا انهدام آن ریسک خسارت جانی و مالی زیادی (به دلیل حجم مخزن قابل توجه یا وجود تاسیسات شهری یا استراتژیک مهم و حساس در پایین‌دست) به همراه دارد، بیش‌تر از میزان ابزارهای لازم برای یک سد با ارتفاع نسبتا بلند که در یک ساختگاه مناسب و مطلوب احداث شده است، باشد [۳۶].

۱۰-۳-۳- تعیین پارامترهای شاخص در سیستم ابزاردقیق

با توجه به اهداف تعیین شده برای سیستم ابزاردقیق، گام بعدی در فرایند طراحی سیستم ابزاردقیق، تعیین پارامترهای شاخصی است که به نحو مستقیم یا غیرمستقیم بر رفتار بدنه سد و پی از دیدگاه هدف مورد نظر تاثیرگذار بوده و تغییرات آن‌ها باید توسط ابزارهای مناسب اندازه‌گیری گردد. برای فراهم شدن امکان ارزیابی رفتار بدنه سد از دیدگاه هدف مورد نظر، حدود تغییرات مجاز و قابل انتظار پارامترهای شاخص مورد نظر در نواحی مختلف بدنه سد و پی، متناظر با محل نصب و نوع اندازه‌گیری ابزارها، باید بر مبنای نتایج مطالعات طراحی و تحلیلی بدنه سد و پی تعیین گردد. برای انتخاب نوع ابزار مناسب، حدود مقادیر، بازه تغییرات، و دقت و حساسیت اندازه‌گیری پارامتر شاخص مورد نظر باید مشخص گردد.

به طور معمول پارامترهای شاخصی که در سیستم ابزاردقیق مد نظر قرار گرفته و اندازه‌گیری می‌شوند شامل تراز آب مخزن، تراز پایاب، درجه حرارت محیط (هوا)، درجه حرارت اعماق مختلف آب، درجه حرارت داخل جسم بدنه سد، درجه حرارت محل نصب ابزار، فشار آب منفذی، فشار برکنش، میزان نشت متمرکز (leakage)، میزان تراوش آب در جسم بدنه سد یا توده سنگ پی (Seepage)، حرکات و تغییرمکان‌های کلی بدنه سد، تغییرشکل‌های داخلی بدنه سد، حرکات موضعی بدنه سد در نواحی ترک‌خورده، میزان تنش یا کرنش، و شتاب‌های ناشی از زلزله می‌باشند.

۱۰-۳-۴- انتخاب نوع ابزار مناسب

برای هر اندازه‌گیری مورد نظر، به طور معمول ابزارهای با مارک‌های تجاری متنوع و نحوه عملکرد متفاوت وجود دارند. در این خصوص در زمان انتخاب ابزار، صرف نظر از هزینه و یا مارک تجاری، باید «قابلیت اطمینان» (Reliability) ابزار به طور ویژه مد نظر قرار گیرد. قابلیت اطمینان ابزار متاثر از عواملی نظیر سادگی، پایداری (دوام) در شرایط مختلف، طول عمر، دقت اندازه‌گیری، صحت، قابلیت تعمیر سریع و آسان، قابلیت تنظیم و کالیبره دقیق، و سابقه عملکرد مناسب ابزار مورد نظر می‌باشد. اهمیت نسبی هر یک از پارامترهای مذکور وابسته به هدف و منظور از استفاده از ابزار است، برای مثال از بعد اطمینان از عملکرد ابزار، پارامترهای موثر در ارزیابی ابزارهایی که فقط برای دوره ساخت در نظر گرفته شده‌اند کاملا متفاوت با ابزارهایی است که برای دوره بهره‌برداری پیش‌بینی و طراحی می‌شوند.

ابزارهایی که نسبت به درجه حرارت محیط حساس می‌باشند، نباید در فضاهای باز نصب گردند. در شرایطی کـه اسـتفاده از این نوع ابزارها در فضاهای در معرض نوسانات حرارتی اجتناب‌ناپذیر گردد، هم‌زمان با قرائت ابزار، دمـای محـل نصـب ابـزار نیـز باید اندازه‌گیری شده و هر قرائت ابزار متناظر با دمای زمان اندازه‌گیری (و بر اساس مشخصات فنی ابزار) اصلاح گردد.

در زمان انتخاب ابزار باید به نحوه قرائت پیش‌بینی شده در برنامه پایش سد (قرائت دستی یا اتوماتیک) نیز توجه داشت. البته کاربرد سیستم قرائت اتوماتیک نباید دلیل و توجیهی برای استفاده از ابزارهای الکتریکی مدفون و غیر قابل دسترس در نظر گرفته شود. برای مثال پیزومتر الکتریکی که یک ابزار مدفون در بتن (و غیر قابل دسترس) می‌باشد، نباید صرفا به دلیل امکان استفاده از سیستم قرائت اتوماتیک به پیزومتر کاساگرانده که یک ابزار مکانیکی کاملا قابـل دسترسـی و بـا قابلیـت اعتماد مناسب می‌باشد، ترجیح داده شود. توجه به این نکته ضروری است که با نصب مبدل‌های الکتریکی مناسب، قرائـت اتوماتیک بسیاری از ابزارهای متداول مکانیکی (که قابلیت قرائت دستی دارند) امکان‌پذیر می‌گردد.

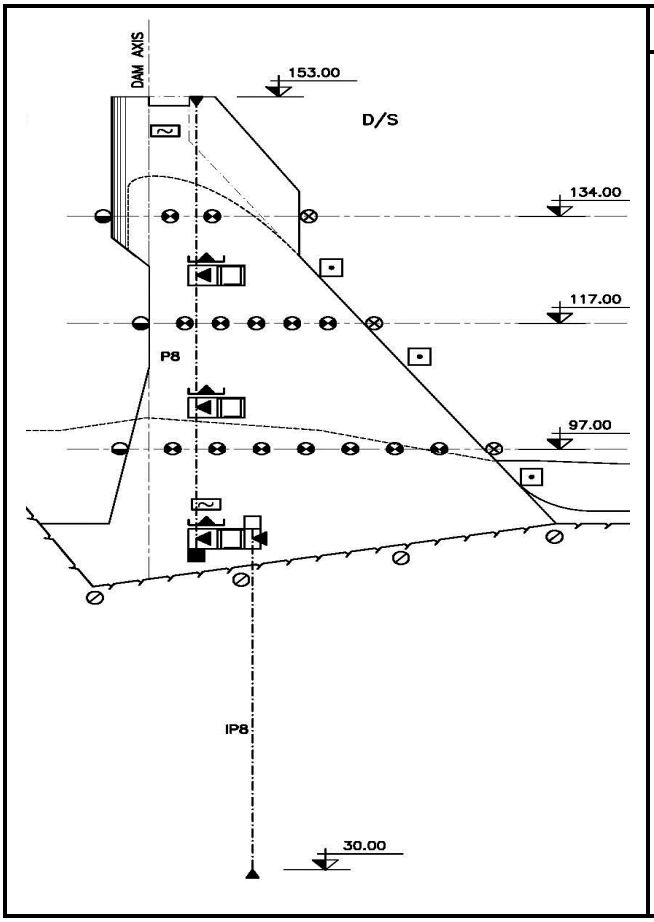
از بعد اقتصادی، مقایسه ابزارها باید بر مبنای «هزینه کل» هر ابزار، شامل هزینه خرید، هزینه‌هـای نصـب و نگهـداری (تعمیرات)، هزینه جایگزینی (طول عمر)، و هزینه قرائت ابزار؛ انجام پذیرد. بر این اساس، یک ابزار گـران درصـورتی‌کـه از دوام مناسب (هزینه‌های نگهداری کم) و طول عمر بالا برخوردار باشد، الزاما یک ابزار غیر اقتصادی نخواهد بـود. بنـابراین در زمان تهیه و استقرار سیستم ابزاردقیق باید بودجه کافی برای خرید ابزارهای با قابلیت اطمینان مناسب و توجیـه‌پـذیر از نظر اقتصادی (با توجه به «هزینه کل» سیستم ابزاردقیق) در نظر گرفته شود.

۱۰-۳-۵- جانمایی و تعداد ابزارهای لازم

به عنوان یک قاعده کلی نصب ابزار در هر موقعیتی که امکان اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای رفتاری شاخص بدنه سـد و توده سنگ پی وجود دارد، ضروری است. تعداد و جانمایی هر نوع ابزار باید به‌گونـه‌ای طراحـی و تنظـیم گـردد کـه بـر اساس نتایج قرائت این ابزارها، سیمای کامل و روشنی از نحوه تغییرات پارامتر شاخص مورد نظـر در کـل بدنـه سـد و یـا توده سنگ پی به‌دست آید. با توجه به اهمیت وجود اندازه‌گیری و پایش مستمر تغییرات پارامترهای رفتاری شـاخص، بـه طور معمول برای افزایش تضمین عملکرد موثر سیستم ابزاردقیق بسته به حساسیت و اهمیت پارامتر مـورد نظـر و هزینـه تامین ابزار، تعدادی ابزار اضافه بر حداقل‌های مورد نیاز در نواحی کلیدی بدنه سد طراحی و جانمـایی مـی‌گـردد. در ایـن شرایط، اولا با مقایسه نتایج ابزارها امکان تشخیص بهتر و سریع‌تر ابزارهای معیوب که عملکرد درست ندارند، فراهم شـده و ثانیا در دوره تعمیر یا جایگزینی ابزارهای معیوب، پایش پارامترهای رفتاری شاخص بدنـه سـد بـا خلـل و وقفـه مواجـه نمی‌گردد. در برخی موارد، برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم ابزاردقیق، این سیستم به‌نحوی طراحی می‌گردد که یک پارامتر رفتاری شاخص توسط چند ابزار (به صورت مستقیم یا غیر مستقیم) اندازه‌گیری می‌شود.

نظر به ضرورت تامین دسترسی به محل ابزارها (از نظـر اجرایـی و سـهولت بهـره‌بـرداری) و نیـز دریافـت و قرائـت همسـان پارامترهای رفتاری تاثیرگذار بر یکدیگر (از نظر سهولت پردازش و تفسیر نتایج) معمولا ابزارها در امتداد مقـاطع و یـا پـلان‌هـای مشخصی در امتداد بدنه سد و پی جانمایی شده و از پراکندگی بیش از حد ابزارها پرهیز می‌گردد. بدیهی است مقاطع و پلان‌های

منتخب برای ابزارها باید در نواحی از بدنه سد و پی تعیین گردند که معرف و شاخص رفتار کلی بدنه سد و پی باشند. به طور معمول بسته به ابعاد و ارتفاع سد، ابزارها در حداقل سه تا پنج مقطع قائم شامل طره مرکزی سد، و سه تا پنج پلان افقی در ارتفاع سد (بر مبنای نتایج مطالعات تحلیلی و هم‌تراز با گالری های بدنه سد و پی) جانمایی می‌گردند (شکل‌های ۱۰-۱ و ۱۰-۲). برای پرهیز از تداخل سیستم ابزاردقیق با سایر سازه‌های جنبی و تاسیسات موجود در بدنه سد، نقشه‌های جانمایی ابزاردقیق سد باید در زمان تهیه نقشه‌های تفصیلی (در زمان طراحی) و نقشه‌های اجرایی (هم زمان با اجرا) به دقت تهیه و ارائه گردند.

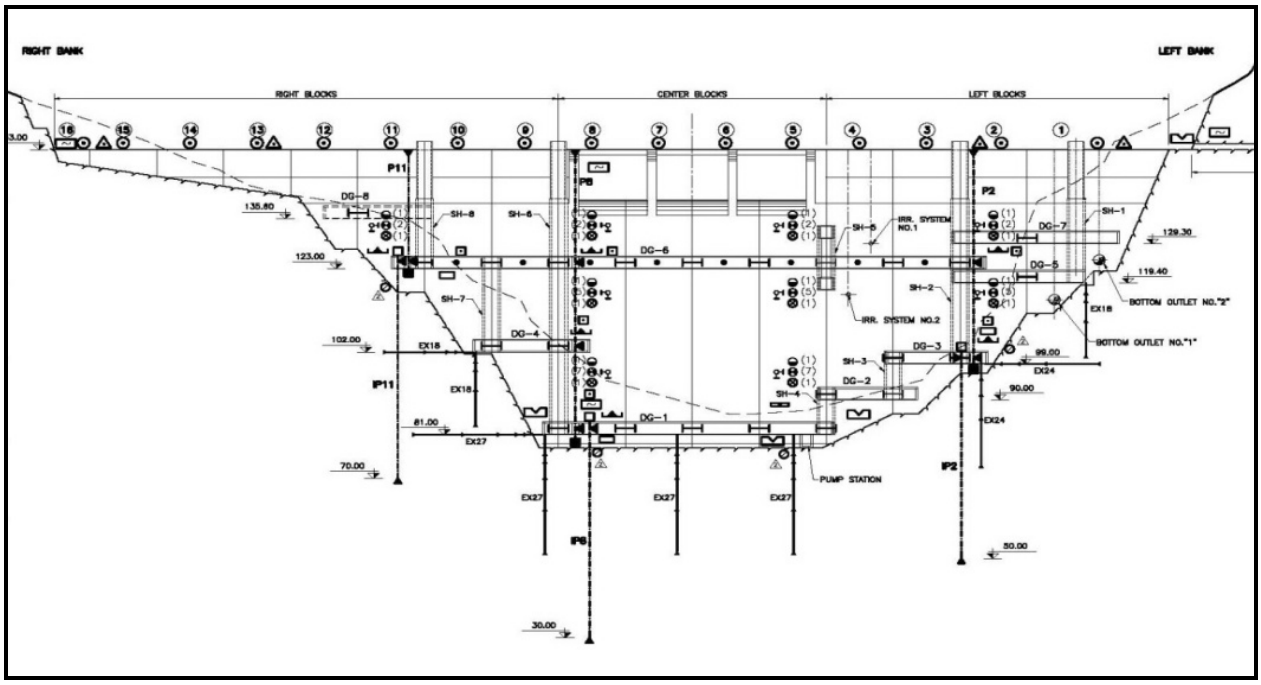


توضیحات	سمبل	
نقطه ثابت پاندول مستقیم	PS	▼
وزنه پاندول مستقیم	PB	■
شناور پاندول معکوس	PF	□
نقطه ثابت پاندول معکوس	PA	▲
ایستگاه اندازه‌گیری (قرائت) پاندول	MS	▶
درزسنج	DL	⊢
ایستگاه قرائت میکروژئودزی داخل گالری	TC	•
دماسنج تعداد ابزار (مدفون در بتن)	CT	(X)
دماسنج آب	WT	◒
دماسنج هوا	AT	⊗
شاخص اندازه‌گیری تراز مخزن	RW	▬
شیب‌سنج	CL	◢
شابنگار	SMS	▭
کشیدگی‌سنج (داخلی گمانه)	EX	▶▶
اندازه‌گیر فشار بر کنش	UM	⊘
ایستگاه اندازه‌گیری نشت (کانال ونتوری)	SM	▽
نقطه نشانه روی شبکه میکروژئودرزی	OP	△
نقطه کنترل روی شبکه میکروژئودرزی	CP	⊙
نقطه نشانه روی در رویه پایین دست	TA	⊡
جعبه تقسیم	TB	▭

شکل ۱۰-۱- سمت راست: لیست سمبل ابزارها، سمت چپ: شمای ابزاردقیق در مقطع طره مرکزی سد و پی (سد جگین) [۱۲]

حداقل‌های سیستم ابزاردقیق باید به‌نحوی تعیین گردد که داده‌های پایه لازم برای شناسایی خسارات و رفتارهای نامتعارف بدنه سد و پی را فراهم نموده و بستر لازم برای ارزیابی ایمنی و پایداری سد را ایجاد نماید. بدیهی است برای تدقیق و صحه‌گذاری فرضیات طراحی، کنترل و صحه‌گذاری نتایج ابزارهای مشابه (Redundancy)، و مقایسه جامع‌تر عملکرد بدنه سد با رفتار پیش‌بینی شده (بر اساس نتایج طراحی) در دوره‌های ساخت، اولین آبگیری، تخلیه مخزن، و همچنین در دوره بهره‌برداری، ممکن است ابزارهای بیش‌تری مورد نیاز باشند. علاوه بر این، حداقل‌های سیستم ابزاردقیق تابع سطح خطر پروژه نیز می‌باشد، به‌طور طبیعی در سدهایی که ریسک خطر ناشی از انهدام یا خرابی سد نسبتا زیاد و قابل توجه باشد، پایش جامع و دقیق رفتار بدنه سد و پی از اهمیت مضاعفی برخوردار بوده و متناسبا تعداد بیش‌تری ابزار مورد نیاز می‌باشد. شاخص‌ها و معیارهای طبقه‌بندی سدها از نظر اهمیت و ریسک خطر به‌طور غیرمستقیم در قالب مباحث طراحی در این راهنما مورد اشاره

قرار گرفته‌اند، ولی تبیین و تشریح جامع معیارهای رده‌بندی سدها از این بعد خارج از شمول موضوع این راهنما بوده و باید بر اساس مراجع ذیربط انجام پذیرد.



شکل ۱۰-۲- شمای ابزاردقیق در مقاطع مختلف سد و پی از نمای پایین‌دست (سد جگین) [۱۲]

با توجه به ویژگی‌ها و رفتار متفاوت پروژه‌ها و ساختگاه‌های سدسازی، صدور یک حکم کلی برای پارامترهای رفتاری شاخصی که باید اندازه‌گیری شده و سیستم ابزار دقیق متناظر با آن‌ها میسر نمی‌باشد. با این حال، به‌عنوان راهنما در جدول (۱۰-۱) سطح حداقل پارامترهای رفتاری شاخص و پایش‌هایی که در سدهای وزنی بتن غلتکی موجود و یا در دست مطالعه باید در نظر گرفته شوند، ارائه شده است [۳۶].

۱۰-۳-۶- برنامه‌ریزی پایش

برنامه‌ریزی پایش شامل موارد زیر می‌گردد:

- شرح وظایف، حدود اختیارات، و حداقل تخصص و صلاحیت‌های لازم برای پرسنل سیستم ابزاردقیق
- برنامه زمان‌بندی و نحوه انجام و ثبت قرائت‌ها (Data Collection)
- نحوه جمع‌بندی و تنظیم جداول خلاصه قرائت‌ها (Data Reduction)
- نحوه پردازش و ارائه گزارش نتایج پایش (Data Processing and Presentation)

این برنامه باید متناسب با ویژگی‌های هر پروژه و برای دوره‌ها و شرایط مختلف بهره‌برداری تدوین گردد. برای افزایش سطح اطمینان نسبت به فرایند پایش سد، هر یک از مراحل فوق باید به صورت گروهی و یا توسط افراد متفاوت انجام پذیرد (انجام کلیه مراحل توسط یک فرد ریسک خطا در انجام قرائت و پردازش نتایج را افزایش می‌دهد). ثبت نتایج قرائت‌ها باید در فرم‌های از پیش تنظیم شده‌ای که شامل نام پروژه، نوع و شماره مشخصه ابزار، محل ابزار، محل‌های لازم برای ثبت پارامترهای

اثرگذار بر عملکرد ابزار (نظیر دما)، زمان قرائت، نام فرد قرائت کننده، و محلی برای ثبت سایر توضیحات و مشاهدات حین انجام قرائت هستند، انجام پذیرد. افرادی که مسئولیت بازرسی و پایش چشمی بدنه سد و پی را بعهده دارند باید از تخصص‌های لازم برخوردار بوده و حتما دوره‌های آموزشی پایش و ارزیابی ایمنی سدها را گذرانده باشند.

در برنامه پایش، دستورالعمل‌های کاملی برای نحوه آماده‌سازی ابزار، نحوه انجام قرائت، نحوه ثبت قرائت، و برای ثبت مشاهدات حین انجام قرائت باید تنظیم و ارائه گردد. نحوه جمع‌بندی و پردازش داده‌های حاصل از قرائت ابزارها، صلاحیت‌های لازم افراد مسوول این فرایند، و نیز روال گردش گزارش‌ها و نتایج پایش باید به روشنی در برنامه‌ریزی پایش تدوین و مشخص گردد.

جدول ۱۰-۱- حداقل‌های سیستم ابزاردقیق و برنامه پایش برای سدهای موجود و در دست مطالعه [۳۶]

پارامتر اندازه‌گیری و برنامه پایش	سدهای وزنی بتن غلتکی (کوتاه) و با ریسک خطر پایین	سدهای وزنی بتن غلتکی با ریسک خطر متوسط و زیاد			
		سدهای موجود		سدهای در دست مطالعه و اجرا	
		بدنه سد	سازه‌های وابسته[۲]	بدنه سد	سازه‌های وابسته[۲]
بازرسی چشمی [۳]	☑	☑	☑	☑	☑
تراز مخزن		☑	☑	☑	☑
تراز پایاب		☑	☑	☑	☑
نشت و تراوش آب		☑	☑	☑	☑
فشار منفذی / فشار برکنش		☑	☑	☑	☑
حرکات و تغییرشکل‌های سد		☑	☑	☑	☑
کرنش‌های داخلی سد [۴ و ۶]				☑	☑
حرکات درز / ترک [۵]		☑	☑	☑	☑
تغییرشکل‌ها و حرکات پی [۱ و ۶]		☑	☑	☑	☑
درجه حرارت هوا، آب، و بتن		☑	☑	☑	☑
شتاب زلزله		☑	☑	☑	☑
نیروی پیش‌کشش تاندون‌ها [۷]		☑	☑	☑	☑

۱- اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و حرکات احتمالی توده سنگ ساختگاه قبل از شروع عملیات اجرایی (در زمان مطالعات) و هم‌زمان با اجرای پروژه، داده‌های بسیار با ارزشی برای شناخت رفتار توده سنگ پی و ارزیابی فرضیات طراحی به‌دست می‌دهد. برای این منظور، استقرار زودهنگام شبکه نقاط میکرژئودزی در ساختگاه راهکار مناسب و موثری می‌باشد.

۲- منظور از سازه‌های وابسته، سازه سرریز جانبی و سازه نیروگاه متصل به بدنه سد (و یا سازه‌های مشابه) می‌باشد.

۳- بازرسی چشمی شامل حرکت و بازبینی دقیق عوارض و شواهد سطحی در امتداد تاج سد، گالری‌های داخل بدنه سد و پی، سطح تکیه‌گاه‌ها، و حریم مخزن سد می‌گردد.

۴- برای سدهای وزنی بتن غلتکی با ارتفاع بیش از ۳۰ متر.

۵- فقط برای درزها و ترک‌های سازه‌ای که حرکات محسوسی دارند.

۶- جانمایی و تعداد ابزارهای پایش تغییرشکل‌ها و حرکات پی برای سدهای وزنی بتن غلتکی که بر روی پی انعطاف‌پذیر (نرم) و ضعیف احداث می‌شوند، باید با دقت و حساسیت بیش‌تر و منطبق بر مکانیسم‌های ناپایداری محتمل در توده سنگ پی طراحی گردد.

۷- پایش نیروی پیش‌کشش در تاندون‌هایی که برای تامین پایداری بدنه سد طراحی و اجرا می‌شوند، الزامی است.

نکته بسیار مهم در برنامه‌ریزی پایش سد، انجام قرائت‌های پایه (یا قرائت صفر) هر ابزار می‌باشد. در خصوص ابزارهای تکمیلی و یا ابزارهایی که به دلایلی دیرهنگام و بعد از شروع آبگیری مخزن نصب می‌گردند، باید در زمان انجام قرائت صفر شرایط پروژه شامل وضعیت بدنه سد، تراز آب مخزن، زمان انجام قرائت صفر، و سایر پارامترهای تاثیرگذار بر ابزار مورد نظر به دقت ثبت گردند.

از آنجا که سایر قرائت‌های ابزار با قرائت صفر آن ابزار مقایسه شده و مبنای قضاوت در ارزیابی نتایج پایش قرار می‌گیرد، قرائت صفر (یا قرائت پایه) ابزار باید با دقت زیاد انجام پذیرد. برای این منظور، قرائت صفر هر ابزار باید حداقل سه بار (در زمان‌های مختلفی از شبانه‌روز و با شرایط محیطی متفاوت محتمل، نظیر دماهای محیطی مختلف) انجام شوند. نتایج این قرائت‌ها در همه حالات باید تقریبا مساوی با یکدیگر و در حد قابل انتظار باشد، در غیر این صورت، صحت و نحوه عملکرد ابزار باید کنترل شده و انجام قرائت‌های پایه به روش فوق تا حصول نتیجه مطلوب ادامه یابد. در فرایند انجام قرائت صفر ابزارها باید به زمان انطباق و پایداری ابزارها (Stabilization time / Lag time) نیز توجه گردد.

برای دستیابی و تحقق یک ارزیابی اولیه از نحوه عملکرد و ایمنی بدنه سد و پی، حدود مجاز و قابل انتظار اندازه‌گیری‌های هر ابزار باید بر اساس نتایج طراحی و تحلیل‌های بدنه سد به صورت سازمان یافته در مستندات برنامه‌ریزی پایش تنظیم شده و در فرایند پردازش و ارائه گزارش نتایج پایش، مقادیر ثبت شده توسط هر ابزار در مقایسه با این حدود مجاز در قالب نمودارها و جداول به نحو مناسب منعکس گردد. باید توجه داشت که صرف ثبت یک قرائت خارج از حدود قابل انتظار الزاما به معنی ریسک وقوع ناپایداری در سد نبوده و اقداماتی که در این موارد باید به ترتیب اولویت انجام پذیرد شامل مراحل زیر می‌گردد:

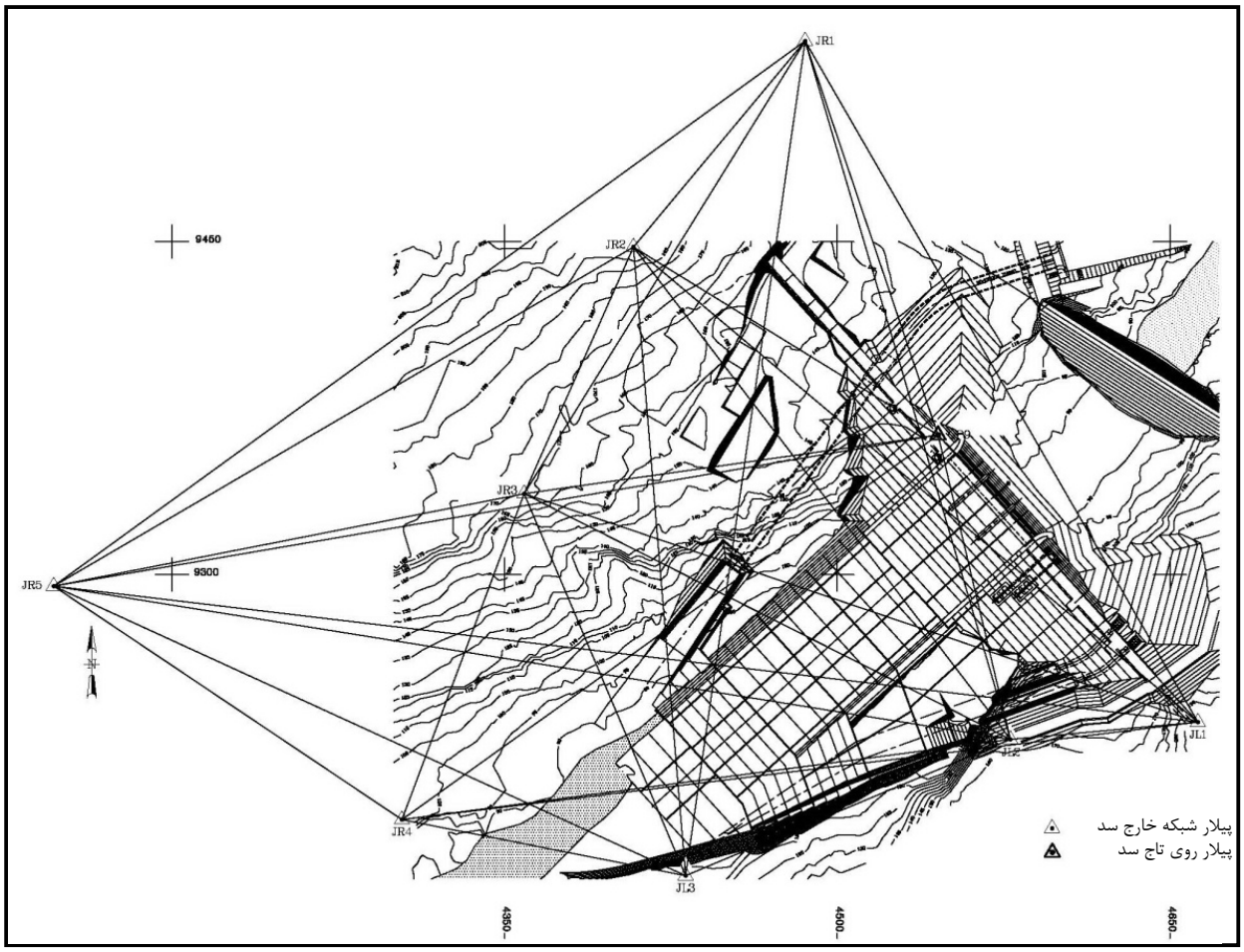
- انعکاس و ارسال موضوع در قالب گزارش و مستندات لازم به کارشناس و مدیران مسئول ذیربط
- صحه‌گذاری قرائت انجام یافته با تکرار قرائت مذکور (ترجیحا توسط فردی دیگر و یا به صورت گروهی)
- کنترل دقت و صحت ابزار و در صورت امکان انجام کالیبراسیون ابزار
- کنترل نتایج قرائت ابزار مورد نظر با نتایج قرائت‌های ابزارهای مشابه مجاور و یا ابزارهای پشتیبان (Redundant)
- بازرسی چشمی بدنه سد به خصوص در مناطقی که با توجه به نوع و ماهیت خسارت احتمالی، متاثر می‌گردند
- کاهش فواصل قرائت پارامتر اندازه‌گیری شده در ابزار مورد نظر و ابزارهای مشابه مجاور آن و نیز در سایر ابزارهای مرتبط
- ارزیابی حدود مجاز تعیین شده با کالیبراسیون مدل(های) تحلیلی و بازنگری حدود مجاز و قابل انتظار قرائت‌ها
- نصب ابزارهای اضافی در موقعیت‌های مناسب در موارد لزوم
- ریشه‌یابی و علت‌یابی رفتار نامتعارف (خارج از حدود قابل انتظار) بدنه سد و پی و ریشه‌یابی و علت‌یابی خسارات ایجاد شده (در صورت مشاهده خسارات احتمالی)
- انجام اقدامات ترمیمی و علاج‌بخشی لازم، برای مثال بازگشایی و تمیز کردن مجاری زهکشی، ترمیم خسارات ایجاد شده، و پیش‌بینی و اتخاذ تمهیدات بهسازی لازم
- انجام اقدامات سریع و اضطراری نظیر کاهش تراز مخزن در شرایط کاملا اضطراری

۱۰-۴- انواع متداول ابزارهای مورد استفاده [۱۱، ۱۲، ۳۷]

۱۰-۴-۱- شبکه میکروژئودزی (Geodetic Network)

شبکه میکروژئودزی متشکل از یک شبکه نقاط بر روی بدنه سد، تکیه‌گاه‌ها، و نواحی دورتر از بدنه سد است که با برداشت مختصات این نقاط در مقاطع مختلف و ارزیابی و تحلیل نتایج برداشت‌ها می‌توان سابقه حرکات و تغییرمکان‌های کلی نقاط شبکه را محاسبه نمود (شکل ۱۰-۳). موقعیت نقاط شبکه میکروژئودزی باید به نحوی تنظیم شوند که دید و قراول‌روی به هر نقطه حداقل از دو نقطه دیگر شبکه امکان‌پذیر باشد، با افزایش این امکان، خطای اندازه‌گیری‌ها و محاسبات شبکه کاهش می‌یابد.

کاربرد شبکه میکروژئودزی برای اندازه‌گیری و پایش حرکات کلی و نسبی بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها بوده و یکی از قابل اعتمادترین روش‌های پایش و اندازه‌گیری می‌باشد. در این روش، تغییرمکان‌های نقاط شاخص در امتداد تاج سد، رویه پایین‌دست سد، و سطوح تکیه‌گاه‌ها نسبت به نقاطی که به اندازه کافی دور از بدنه سد بوده و ثابت فرض می‌شوند (نقاط مبنا)، سنجیده می‌شود. علیرغم مزیت و دقت مطلوب این روش، برداشت شبکه میکروژئودزی و پردازش نتایج آن نسبتا زمان‌بر و پر هزینه بوده و لذا انجام این روش فقط در دوره‌ها و مقاطع خاص امکان‌پذیر می‌باشد. مشابه با سایر پایش‌ها، برداشت پایه (قرائت صفر) شبکه نقاط میکروژئودزی دقیقا قبل از آبگیری مخزن ضروری می‌باشد.

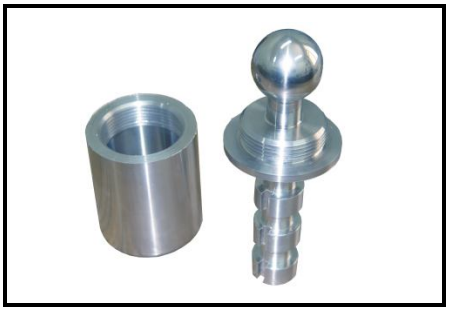
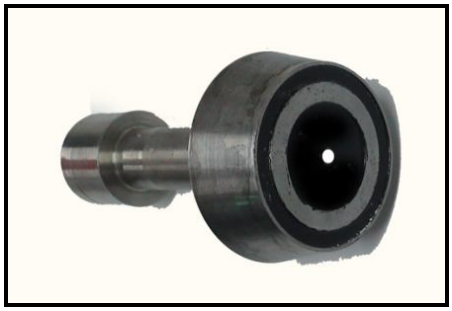


شکل ۱۰-۳- آرایش نمونه شبکه نقاط میکروژئودزی (سد جگین) [۱۲]

مجموعه نقاط شبکه میکروژئودزی با توجه به هدف و کاربری آن‌ها به چند گروه مختلف شامل نقاط نشانه‌روی، نقاط ترازیابی، نقاط پیمایش، و نقاط پیلار تقسیم می‌گردند. «نقاط نشانه‌روی» شامل نقاطی می‌گردد که بر روی تاج و رویه پایین‌دست سد (و سازه های وابسته) و همچنین بر روی تکیه‌گاه‌های مجاور سد واقع شده‌اند و هدف از استقرار شبکه میکروژئودزی در واقع برداشت سابقه حرکات و جابه‌جایی‌های آن‌ها می‌باشد.

برداشت سابقه تغییرات تراز «نقاط ترازیابی» نیز جزء اهداف استقرار شبکه میکروژئودزی می‌باشد. نقاط ترازیابی شامل نقاط داخل گالری‌های بدنه سد (در دیواره گالری)، نقاط واقع در گالری‌های تکیه‌گاهی (در کف گالری) و سایر نقاطی که پایش تغییرات تراز آن‌ها مد نظر می‌باشد، می‌گردد. برای شناسایی این نقاط، معمولا شاخص‌هایی (فلزی) در موقعیت آن‌ها نصب می‌گردد و معمولا سعی می‌گردد شاخص‌های مربوط به نقاط مختلف متفاوت با یکدیگر باشند.

برای نمونه در شکل (۱۰-۴) شاخص‌های مربوط به نقاط نشانه‌روی و ترازیابی نشان داده شده است.

شکل ۱۰-۴- شاخص نقاط نشانه‌روی (سمت راست) و نقاط ترازیابی (سمت چپ) [۱۱، ۱۲]

نقاط پیمایش، نقاط کمکی هستند که برداشت مختصات آن‌ها جزء اهداف اصلی استقرار شبکه میکروژئودزی نمی‌باشد ولی برای برداشت کل نقاط شبکه، برداشت نقاط پیمایش نیز ضروری می‌گردد. در واقع نقاط پیمایش نقاط کمکی در شبکه میکروژئودزی هستند. نقاط پیلار نیز نقاطی کمکی در خارج از شبکه نقاط مختصاتی هستند که دوربین نقشه‌برداری برای برداشت مختصات سایر نقاط بر روی آن‌ها مستقر می‌شوند. در شکل (۱۰-۵) شاخص‌های نمونه مربوط به نقاط پیمایش و پیلار نشان داده شده است. بدیهی است مجموعه نقاط اصلی و کمکی در شبکه میکروژئودزی باید در موقعیت‌های پایدار انتخاب گردند.

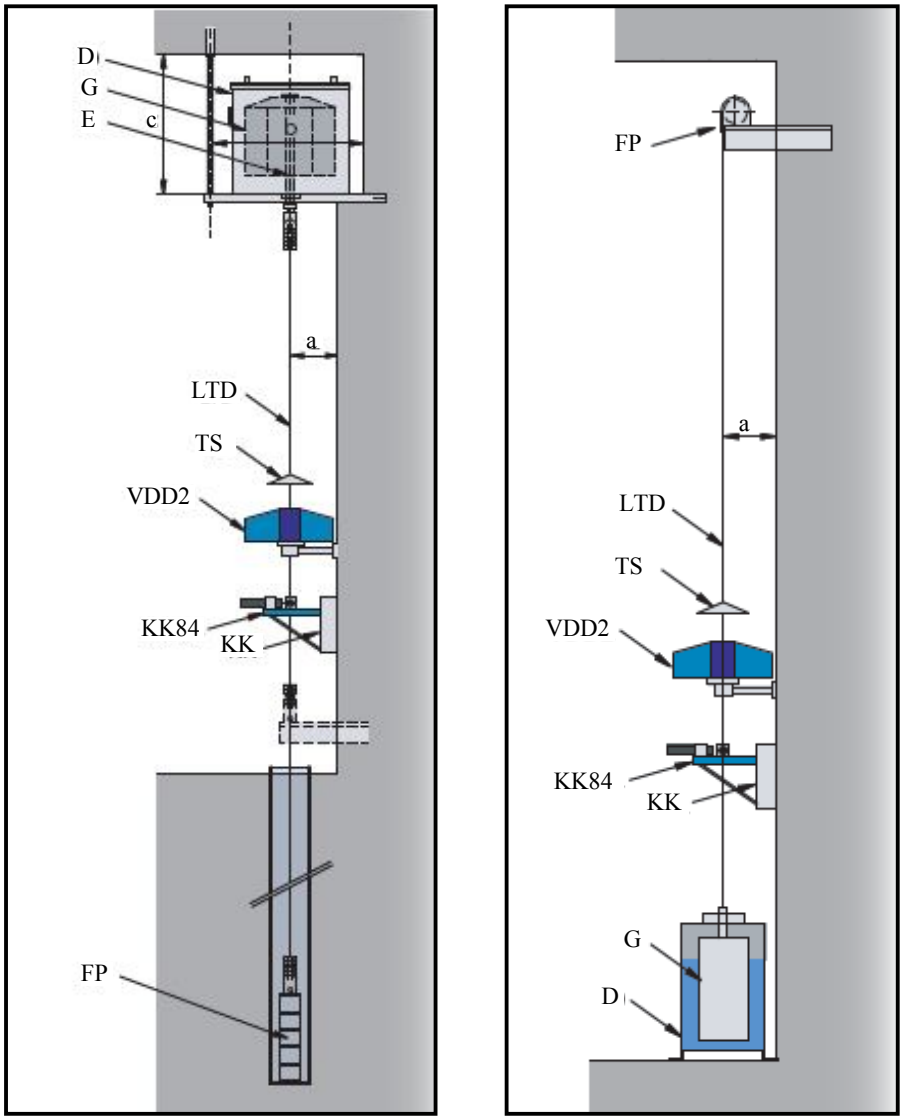
شکل ۱۰-۵- شاخص نقاط پیمایش (سمت راست) و نقاط پیلار (سمت چپ) [۱۱، ۱۲]

۱۰-۴-۲- پاندول‌های مستقیم و معکوس (Direct & Inverted Pendulums)

پاندول‌ها از موثرترین و ساده‌ترین ابزارها برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها و حرکات افقی بدنه سدهای بتنی و توده سنگ پی هستند و به طور معمول جزء ثابت سیستم ابزاردقیق در انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی می‌باشند. پاندول‌ها با توجه به مکانیزم عملکردشان به دو گروه پاندول‌های مستقیم و معکوس تقسیم می‌شوند.

پاندول مستقیم، همان‌گونه که در شکل (۱۰-۶) مشاهده می‌شود، سیستمی مشابه یک شاقول قائم داشته و شامل یک نقطه آویز (در بالاترین نقطه بدنه سد در مقطع مورد نظر)، یک رشته سیم، و یک وزنه در پایین‌ترین نقطه می‌گردد. برای جلوگیری از ارتعاش و تامین پایداری بهتر سیم پاندول مستقیم، معمولا وزنه پاندول در یک ظرف روغن قرار داده می‌شود. تنها نقطه اتصال پاندول مستقیم به بدنه سد، نقطه ثابت (Fixed Point) فوقانی آن است، بنابراین با اندازه‌گیری و قرائت موقعیت سیم پاندول در ترازهای مختلف (تراز گالری‌ها در محدوده ارتفاعی سیم پاندول)، جابه‌جایی افقی نقاط مذکور نسبت به نقطه

ثابت آویز (بالاترین نقطه پاندول) به‌دست می‌آید. قرائت موقعیت سیم پاندول را می‌توان توسط یک خط‌کش مدرج که در پشت سیم پاندول و بر روی یک دیواره بتنی ثابت کاملا متصل به بدنه سد نصب می‌گردد، انجام داد.



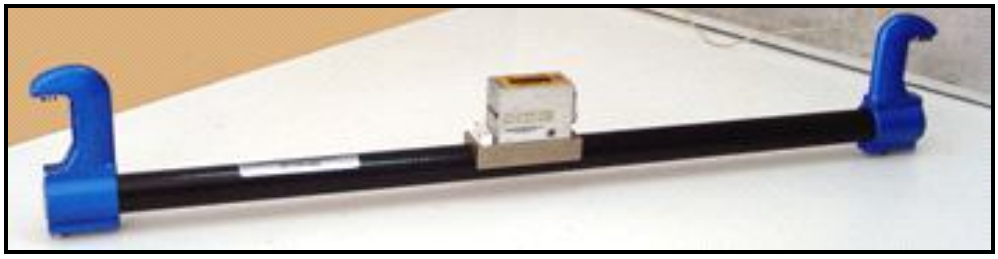
شکل ۱۰-۶- پاندول مستقیم (سمت راست) و پاندول معکوس (سمت چپ) [۱۱، ۱۲]

در پاندول معکوس، نقطه ثابت (Fixed Point) پاندول در پایین‌ترین نقطه و در عمقی از توده سنگ پی که تقریبا متاثر از تغییرمکان‌های سطحی نیست، قرار گرفته و شناور پاندول که موجب کشیدگی سیم پاندول می‌گردد، در یک تانک روغن در بالاترین نقطه پاندول غوطه‌ور می‌باشد (شکل ۱۰-۶). با افزایش ارتفاع پاندول معکوس، ابعاد شناور و تانک روغن پاندول برای ایجاد پیش‌کشش لازم در سیم پاندول، متناسبا باید افزایش یابد. نقطه ثابت پاندول معکوس معمولا در عمقی حدود $\frac{۱}{۳}$ تا $\frac{۱}{۲}$ ارتفاع مقطع سد در نظر گرفته می‌شود. بر اساس سیستم عملکرد پاندول معکوس، با این ابزار می‌توان جابه‌جایی افقی سطح پی و بدنه سد را نسبت به نقطه ثابت تحتانی پاندول به‌دست آورد.

با توجه به محدودیت دسترسی به سیم پاندول معکوس، اولین نقطه قرائت سیم پاندول در تراز پایین‌ترین گالری بدنه سد بوده و این قرائت عموما معرف تغییرمکان افقی سطح توده سنگ پی سد می‌باشد. در سدهای با ارتفاع کم و متوسط، می‌توان شناور پاندول معکوس را در تاج سد جانمایی نمود، در این شرایط جابه جایی توده سنگ و بدنه سد به صورت توام توسط پاندول معکوس قابل اندازه‌گیری خواهد بود.

۱۰-۴-۳- شیب‌سنج (Inclinometer)

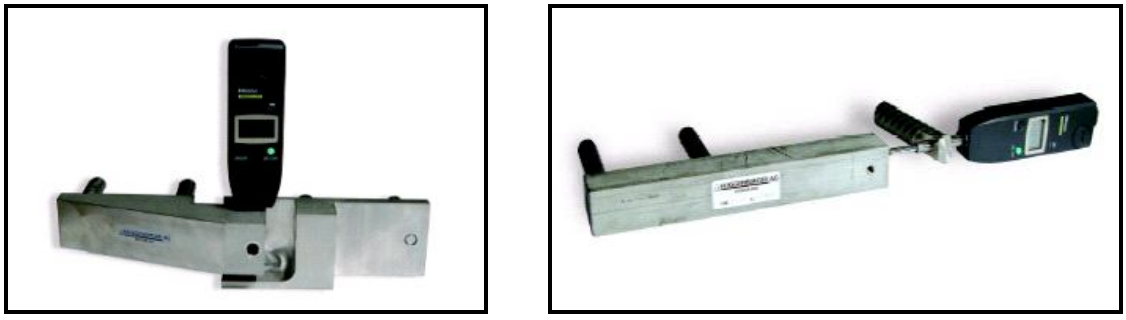
شیب‌سنج ابزار ساده‌ای برای اندازه‌گیری زاویه میل و چرخش بدنه سد در راستای مورد نظر می‌باشد. این ابزار متشکل از یک میله، که ابزار اندازه‌گیری شیب بر روی آن نصب می‌گردد، و دو پین ثابت است که در امتداد مورد نظر و در فاصله معینی از هم در بدنه سد نصب و تثبیت می‌گردند (شکل ۱۰-۷). فاصله بین پین‌های ثابت نصب شده باید مساوی با طول میله اندازه‌گیری باشد. میله اندازه‌گیری گران‌ترین جزء این ابزار است و باید از جنس بسیار مقاوم و غیرحساس نسبت به شرایط محیطی باشد. این میله قابل حمل بوده و برای تعداد زیادی ایستگاه اندازه‌گیری شیب قابل استفاده می‌باشد، بنابراین معمولا در هر پروژه یک میله اندازه‌گیری کفایت می‌نماید. به طور معمول شیب‌سنج‌ها در ایستگاه‌های قرائت پاندول و در دو راستای عمود بر هم نصب می‌شوند.



شکل ۱۰-۷- میله اندازه‌گیری ابزار شیب‌سنج [۱۱، ۱۲]

۱۰-۴-۴- درزسنج (Jointmeter)

درزسنج‌ها ابزاری برای کنترل و اندازه‌گیری حرکات بلوک‌های مجاور درزهای انقباضی قائم و یا بلوک‌های مجاور ترک های ایجاد شده در بدنه سد می‌باشند. درزسنج‌ها ابزارهایی غیر مدفون هستند که در سطوح قابل رؤیت درز یا ترک (در رویه‌های سد و یا در داخل گالری ها) نصب می‌شوند (شکل ۱۰-۸). درزسنج‌ها در دو نوع تک‌بعدی و سه‌بعدی می‌باشند، درزسنج‌های تک‌بعدی معمولا در راستای عمود بر درز یا ترک نصب شده و میزان بازشدگی را در امتداد سطح رویه بدنه سد و یا گالری اندازه می‌گیرند. با درزسنج‌های سه‌بعدی هر سه مولفه جابه‌جایی (بازشدگی، لغزش، و بیرون‌زدگی) بلوک‌های مجاور درز یا ترک را می‌توان اندازه گرفت. ابزار اندازه‌گیری درزسنج‌ها یک گیج مکانیکی قابل حمل است که برای ابزارهای متعددی قابل استفاده می‌باشند. هم ابزار اندازه‌گیری و هم فک‌های دوگانه درزسنج باید از جنس مقاوم و حتی‌الامکان غیرحساس نسبت به شرایط محیطی (به خصوص تغییرات درجه حرارت) باشند.



شکل ۱۰-۸- درزسنج تک‌بعدی و درزسنج سه‌بعدی به همراه گیج مکانیکی اندازه‌گیری [۱۱، ۱۲]

۱۰-۴-۵- دماسنج (Thermometer)

تغییرات دمای هوا و آب مخزن تاثیر محسوسی در تغییر دمای بتن و در نتیجه تغییرشکل بدنه سد داشته و به همین جهت معمولا اندازه‌گیری دما در سدهای بتنی مورد توجه قرار می‌گیرد. اگرچه با توجه به رفتار معین سدهای وزنی بتن غلتکی، تاثیرپذیری این نوع سدها از تغییرات درجه حرارت کم‌تر می‌باشد، ولی تاثیر دما بر روی بازشدگی و سایر مولفه‌های حرکتی درزها و ترک‌ها قابل توجه خواهد بود. دماسنج‌ها هم به صورت سطحی و هم به صورت مدفون می‌باشند و برای اندازه‌گیری تغییرات درجه حرارت هوا، اعماق مختلف آب و نواحی مختلف جسم بتن در سدها، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نوع ساده‌تری از دماسنج‌ها، با عنوان ترموکوپل (Thermocouple)، برای اندازه‌گیری تغییرات درجه حرارت و کنترل رفتار حرارتی بتن غلتکی در زمان ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترموکوپل‌ها ابزاری انعطاف‌پذیر، ارزان و با قابلیت نصب راحت‌تر بوده و معمولا در زمان اجرای بتن غلتکی در حجم لازم برای کنترل دمای بتن و ارزیابی روش و تمهیدات اجرایی بتن غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱۰-۴-۶- شتاب‌نگار (Accelerometer)

بار زلزله از جمله بارهای مهم وارد بر بدنه سد می‌باشد و با توجه به اهمیت این بار و عدم قطعیت های مربوط به ماهیت و نحوه اعمال آن، اندازه‌گیری تاریخچه شتاب‌های وارد بر بدنه سد در زمان وقوع زلزله‌های کوچک و بزرگ از اهمیت به‌سزایی در تحلیل رفتار دینامیکی و ارزیابی ایمنی بدنه سد برخوردار است. برای این منظور از ابزار شتاب‌نگار استفاده می‌شود و با توجه به تغییرات (تشدید) شتاب در بدنه سد، به طور معمول از سه تا پنج شتاب‌نگار در تکیه‌گاه‌ها، در بخش میانی تاج سد، و در ترازهای میانی و کف سد (در طره مرکزی) استفاده می‌گردد. شتاب‌نگارها معمولا دارای دستگاه ثبات مکانیکی یا الکترونیکی هستند.

با نصب زودهنگام شتاب‌نگارها امکان ثبت فعالیت های لرزه‌ای ساختگاه قبل و در زمان اجرای سد امکان‌پذیر گشته و مبنای بهتری برای ارزیابی تاثیر آبگیری مخزن بر فعالیت‌های لرزه‌ای در محدوده ساختگاه (زلزله‌های القایی مخزن) فراهم می‌گردد. نکته مهم در خصوص این ابزار، کنترل صحت و کارایی آن می‌باشد چرا که بخاطر عملکرد مقطعی و خاص این ابزار، در بسیاری موارد به دلیل عدم دقت در نگهداری آن، شتاب‌نگارها در زمان وقوع زلزله در شرایط کارکرد مناسب قرار نداشته‌اند.

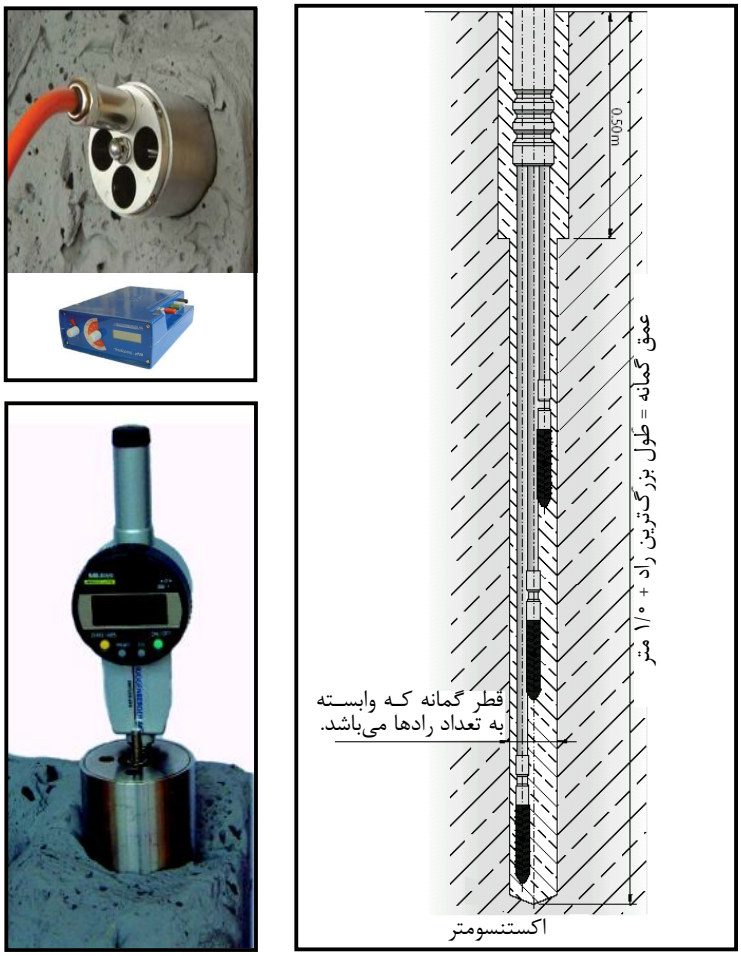
۱۰-۴-۷- ایستگاه‌های بده‌سنجی

برای اندازه‌گیری میزان نشت و آبگذری درزها و ترک‌های بتن و همچنین کنترل و اندازه‌گیری میزان نشت از سیستم زهکشی از ایستگاه‌های بده سنجی در خروجی‌های سیستم زهکشی (در گالری های بدنه سد و پی) استفاده می‌شود. این ایستگاه‌ها از یک حوضچه آرامش، دیواره‌هایی برای آرام کردن جریان آب ورودی به حوضچه، سرریز استاندارد که معمولا یک صفحه فولادی ضدزنگ V شکل یا U شکل می‌باشد، و یک خط‌کش یا شاخص اندازه‌گیری بده تشکیل می‌شوند (شکل ۱۰-۹). از سرریزهای استاندارد U شکل برای اندازه‌گیری بده های نشتی زیاد و از سرریزهای استاندارد V شکل برای اندازه‌گیری بده های نشتی کم استفاده می‌گردد. به منظور کنترل تلاطم آب و افزایش دقت اندازه‌گیری بده آب، از یک سری دیواره‌های سرعت‌گیر برای آرام کردن جریان آب ورودی به حوضچه ایستگاه بده‌سنجی استفاده می‌گردد.

شکل ۱۰-۹- ایستگاه بده‌سنجی با سرریز استاندارد V شکل [۱۱، ۱۲]

۱۰-۴-۸- اکستنسومتر (Extensometer)

اکستنسومترها به طور معمول ابزاری برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌های متمرکز یا گسترده توده سنگ پی در یک امتداد معین می‌باشند. این ابزار که متشکل از یک یا چند میله (Rod) و غلاف پوششی می‌باشد در گمانه حفاری شده در راستای مورد نظر در توده سنگ پی نصب می‌گردد. نقطه خروجی (بیرونی) اکستنسومترها ممکن است در داخل گالری یا شفت پیرامونی بدنه سد و یا در سطح آزاد پی (در مجاورت بدنه سد) باشد. میله‌های اکستنسومتر در نقاط انتهایی عمقی خود در توده سنگ مهار شده و تا نقطه بیرونی دستگاه امتداد می‌یابند. در انتهای بیرونی، مانعی برای حرکت و جابه‌جایی میله‌ها وجود ندارد، بنابراین، با اندازه‌گیری میزان حرکت انتهای هر میله در غلاف انتهایی، جابه‌جایی نسبی نقطه بیرونی ابزار به نقطه ثابت عمقی میله مذکور به‌دست می‌آید (شکل ۱۰-۱۰).



شکل ۱۰-۱۰- اکستنسومتر (سمت راست)، گیج قرائت اتوماتیک و گیج قرائت دستی آن [۱۱،۱۲]

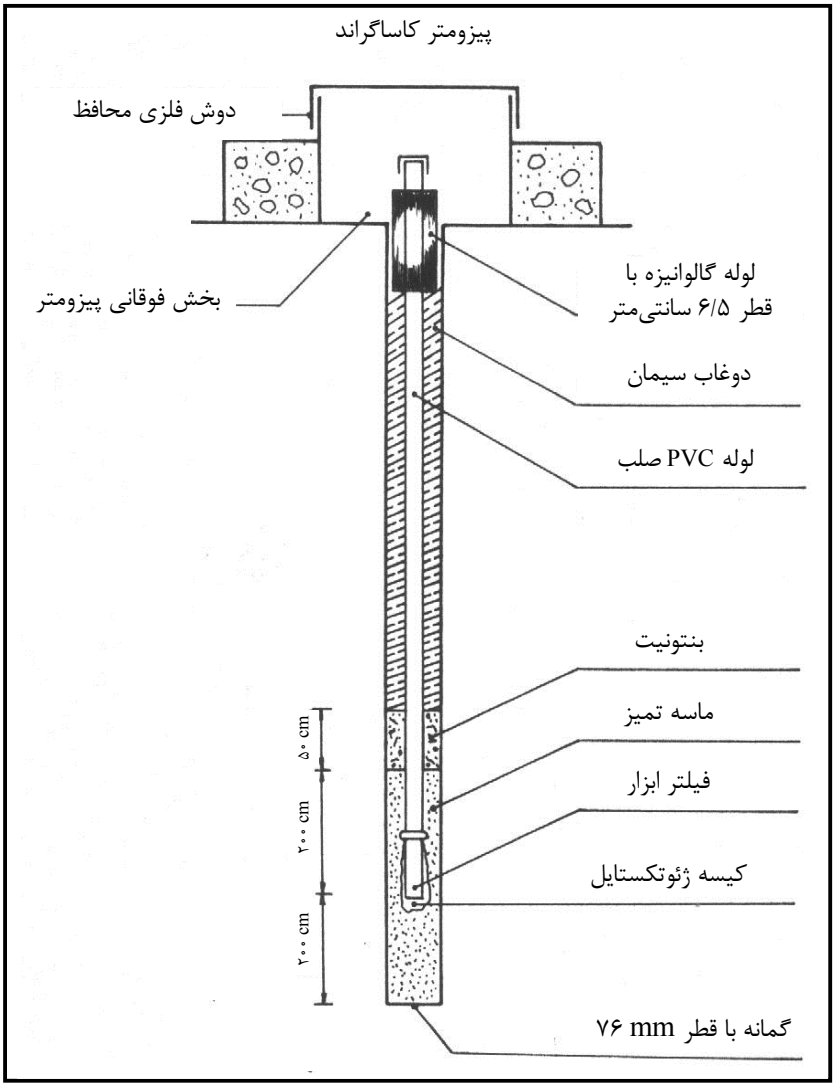
اکستنسومترها نیز ابزارهایی با مکانیزم عملکرد ساده و موثر برای ثبت جابه جایی‌های توده سنگ می‌باشند و به همین جهت کاربرد آن‌ها در انواع مختلف سدها، از جمله سدهای وزنی بتن غلتکی بسیار معمول می‌باشد. اگرچه اکستنسومترها معمولا برای کنترل جابه‌جایی‌های توده سنگ پی به‌کار می‌روند، ولی در شرایطی که پتانسیل ترک‌خوردگی بتن بدنه سد در اثر انعطاف‌پذیری زیاد پی وجود دارد (احداث سد بر روی پی ضعیف)، می‌توان از این ابزار در بدنه سد در راستایی تقریبا عمود بر امتداد محتمل ترک و در محدوده مستعد ایجاد ترک استفاده نمود.

درصورتی‌که اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نسبی محیط در اعماق مختلف مد نظر باشد، می‌توان از یک اکستنسومتر چندمیله‌ای یا چندشاخه که میله‌های با طول‌های مختلف دارد، و یا چند اکستنسومتر تک‌شاخه استفاده نمود. بر اساس تجارب موجود، از نظر قابل اطمینان بودن نتایج اندازه‌گیری‌ها، استفاده از چند اکستنسومتر تک‌شاخه ارجح‌تر از یک اکتنسومتر چندشاخه است چرا که اولا ریسک بروز اشکال در عملکرد اکستنسومترهای چندشاخه با توجه به پیچیدگی و حساسیت بیش‌تر عملیات نصب آن‌ها، بالاتر است و ثانیا در صورت اخلال در یک ابزار، داده‌های کم‌تری از دست خواهد رفت.

با توجه به نحوه عملکرد اکستنسومترها، از این ابزار برای کنترل حرکت ناپیوستگی‌های مستعد لغزش (کنترل پایداری تکیه‌گاه)، کنترل پایداری شیروانی‌های مشرف به بدنه سد و سازه‌های جنبی، پایش حرکت ترک‌ها در عمق و ... می‌توان استفاده نمود.

۱۰-۴-۹- پیزومترها (Piezometers)

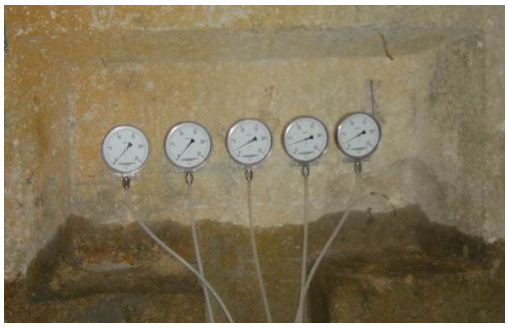
پیزومترها ابزاری برای اندازه‌گیری فشار برکنش و فشار منفذی در توده سنگ و بدنه سد می‌باشند. پیزومترها بسته به شرایط استفاده و نیاز در انواع مختلف باز (Open Standpipe or Casagrande-type Piezometers)، بسته (Closed Standpipe Piezometrs or Pressure Cells) الکتریکی و مکانیکی ساخته شده‌اند. پیزومترهای باز یا کاساگراند ابزارهایی بسیار ساده، قابل اعتماد و نسبتا ارزان می‌باشند و نحوه استفاده از آن‌ها نیزآسان می‌باشد (شکل ۱۰-۱۱).

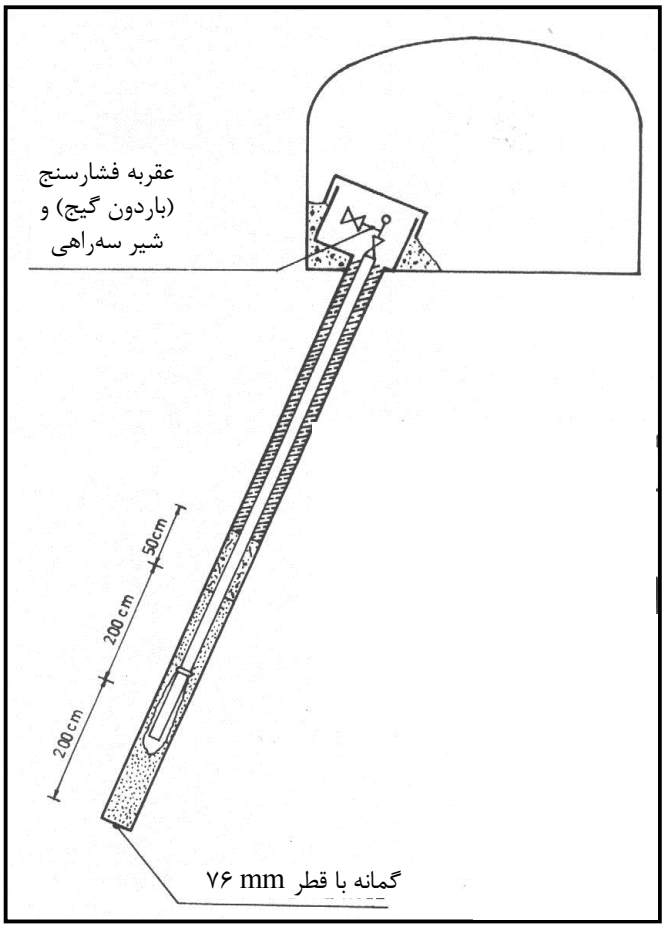


شکل ۱۰-۱۱- پیزومترهای باز یا کاساگراند [۱۱، ۱۲]

عملکرد پیزومترهای باز یا کاساگراند شبیه چاه‌ها یا گمانه‌های مشاهده‌ای است با این تفاوت که در پیزومترهای کاساگراند با مکانیزمی که در شکل (۱۰-۱۱) نشان داده شده است، فشار آب منفذی صرفا در عمق مشخصی اندازه‌گیری می‌گردد. در چاه‌ها یا گمانه‌های مشاهده‌ای امکان نشت آب از تمام جداره گمانه وجود دارد، به همین جهت در مناطقی که گرادیان فشار آب منفذی بالا باشد، فشار (تراز) آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای به نوعی معرف فشار متوسط آب بوده و سیمای شفافی از مقدار و توزیع فشار منفذی به‌دست نمی‌دهد.

با توجه به نحوه عملکرد پیزومترهای باز یا کاساگراند، این پیزومترها نسبت به پیزومترهای الکتریکی به زمان انطباق (Lag time) بیش‌تری برای پایدار شدن شرایط احتیاج دارند، در نتیجه در مواردی که تغییرات فشار آب منفذی سریع بوده و پایش این نوع تغییرات مد نظر باشد، استفاده از این نوع پیزومترها توصیه نمی‌گردد. در قرائت صفر پیزومترهای باز یا کاساگراند باید به زمان انطباق این پیزومترها دقت شده و قرائت اولیه آن ها نباید بلافاصله پس از نصب انجام پذیرد. در شرایطی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز فوقانی لوله پیزومتر باشد (نظیر فشار برکنش پی سد)، استفاده از پیزومترهای باز امکان‌پذیر نبوده و باید از پیزومترهای لوله بسته استفاده گردد. مکانیزم عملکرد پیزومترهای لوله بسته کاملا مشابه با پیزومترهای کاساگراند است با این تفاوت که تراز (یا فشار) آب زیرزمینی با استفاده از یک گیج مکانیکی یا الکتریکی که در بالای گمانه پیزومتر قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌گردد (شکل ۱۰-۱۲).





شکل ۱۰-۱۲- پیزومتر لوله بسته (Closed Standpipe Piezometers) برای اندازه‌گیری فشار برکنش [۱۱، ۱۲]

کاربرد این نوع پیزومتر برای اندازه‌گیری فشار برکنش در سطح تماس بدنه سد و پی کاملا مرسوم بوده و معمولا برای شناسایی توزیع فشار برکنش در امتداد ضخامت بدنه سد از سه تا پنج پیزومتر در فواصل مناسب (و در بالادست و پایین‌دست پرده‌های تزریق و زهکش) استفاده می‌گردد.

برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی در بدنه سد به طور معمول از پیزومترهای الکتریکی استفاده می‌شود. این پیزومترها ابعاد کوچکی داشته و به صورت مدفون در بتن (یا توده سنگ) قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-۱۳). پیزومترهای الکتریکی زمان انطباق بسیار کمی داشته و تغییرات فشار آب را بلافاصله نشان می‌دهند، به همین جهت استفاده از این ابزار در مناطقی که نوسانات فشار آب سریع بوده و یا گرادیان تغییرات فشار آب منفذی قابل توجه است، بسیار مناسب خواهد بود. با توجه به گرادیان بالای فشار آب منفذی (فشار برکنش) در توده سنگ پی در محدوده پرده تزریق و پرده زهکش، معمولا از پیزومترهای الکتریکی نیز (همراه با پیزومترهای مکانیکی لوله بسته) برای اندازه‌گیری فشار برکنش در این نواحی استفاده می‌گردد. با مقایسه و بررسی نتایج پیزومترهای مکانیکی و الکتریکی، سیمای شفاف‌تری از نحوه تغییرات فشار برکنش در امتداد ضخامت بدنه سد و در طی زمان به‌دست می‌آید.

شکل ۱۰-۱۳- پیزومتر الکتریکی [۱۱، ۱۲]

۱۰-۵- برنامه زمان‌بندی قرائت ابزارها

تدوین یک برنامه زمان‌بندی مناسب برای قرائت ابزارها به خصوص در پروژه‌های بزرگ و با ریسک خطر بالا از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد، زیرا کاهش غیرمنطقی فواصل قرائت‌ها سبب انباشت حجم داده‌های غیرضروری و همچنین کاهش دقت و حساسیت افراد مسوول اندازه‌گیری و ثبت قرائت‌ها شده، و از سوی دیگر، عدم انجام قرائت‌های کافی می‌تواند سبب از دست رفتن داده‌ها و اطلاعات با ارزش گردد. در تنظیم برنامه زمان‌بندی قرائت ابزارها، به ویژگی‌های هر پروژه توجه گردد، برای مثال، تواتر اندازه‌گیری تراز مخزن در سدهای تلمبه‌ای– ذخیره‌ای باید به‌مراتب بیش‌تر از سایر سدها نظیر سدهای با هدف تولید انرژی برقابی و تامین مصارف آب کشاورزی و شرب باشد.

علاوه بر این در دوره‌ها و مقاطع خاص در طول عمر سد؛ نظیر دوره ساخت، زمان اولین آبگیری، زمان تخلیه مخزن، دوره‌های پایش پس از وقوع حوادث نادر مانند سیل حداکثر یا زلزله، و ...؛ برنامه زمان‌بندی قرائت ابزارها باید با افزایش تواتر قرائت‌ها در حد لازم، متفاوت با شرایط بهره‌برداری عادی تنظیم گردد. در سدهای بلند، به منظور کنترل و ارزیابی دقیق‌تر رفتار بدنه سد و پی تحت اثر اعمال بار مخزن، معمولا آبگیری به صورت مرحله‌ای و با یک توقف زمانی در هر مرحله انجام می‌پذیرد. ترازهای توقف آب در فرایند آبگیری مخزن با توجه به امکانات کنترل تراز آب مخزن (خروجی‌های تحتانی، آبیاری، و نیروگاه) تعیین شده و در هر مرحله توقف آبگیری، علاوه بر قرائت کامل ابزاردقیق بدنه سد و پی، ارزیابی رفتار و ایمنی بدنه سد و ارزیابی عملکرد پرده آب‌بند انجام یافته و بر اساس آن، روند آبگیری ادامه یافته و یا تدابیر جبرانی مناسب اتخاذ می‌گردد.

در جدول (۱۰-۲)، تواتر قرائت سیستم ابزاردقیق در مقاطع زمانی و شرایط مختلف بهره‌برداری از سد به صورت عمومی ارائه شده است. زمان‌بندی ارائه شده در این جدول جنبه راهنما داشته و بسته به شرایط و الزامات خاص مطرح در هر پروژه، باید تغییرات لازم و متناسب در آن اعمال گردد.

جدول ۱۰-۲- برنامه زمان‌بندی پیشنهادی قرائت ابزارها در مقاطع زمانی و شرایط مختلف بهره‌برداری [۱۲، ۳۶]

پارامتر اندازه‌گیری و نوع پایش	تواتر قرائت‌ها[۲]			
	زمان اجرا	زمان اولین آبگیری	سال اول پس از آبگیری	سال‌های دوم و سوم پس از آبگیری	شرایط بهره‌برداری عادی در درازمدت
بازرسی چشمی	روزانه	روزانه	هفتگی	دو هفتگی / ماهانه	ماهانه
تراز مخزن	----	روزانه	هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	دو هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	ماهانه و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها
تراز پایاب	----	روزانه	هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	دو هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	ماهانه و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها
دمای آب و هوا	روزانه / هفتگی	روزانه	هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	دو هفتگی و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها	ماهانه و هم‌زمان با سایر قرائت‌ها
دمای بتن	ساعتی تا هفتگی	هفتگی	دو هفتگی	ماهانه	معمولا لازم نیست
بده تخلیه سیستم زهکشی	----	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
نشت و تراوش آب	ماهانه	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
فشار منفذی / فشار برکنش	روزانه / هفتگی	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
حرکات و تغییرشکل‌های سد	----	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
کرنش‌های داخلی سد	----	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
حرکات درز / ترک	----	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
تغییرشکل‌ها و حرکات پی[۱]	هفتگی	روزانه / هفتگی	هفتگی / ماهانه	ماهانه	ماهانه / فصلی
شتاب زلزله	مداوم (اتوماتیک)	مداوم (اتوماتیک)	مداوم (اتوماتیک)	مداوم (اتوماتیک)	مداوم (اتوماتیک)
نیروی پیش‌کشش تاندون‌ها	معمولا لازم نیست	ماهانه	ماهانه	فصلی	فصلی / سالانه

۱- اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و حرکات احتمالی توده سنگ ساختگاه قبل از شروع عملیات اجرایی (در زمان مطالعات) و هم‌زمان با اجرای پروژه، داده‌های بسیار با ارزشی برای شناخت رفتار توده سنگ پی و ارزیابی فرضیات طراحی به‌دست می‌دهد. برای این منظور، استقرار زودهنگام شبکه نقاط میکرژئودزی در ساختگاه راه‌کار مناسب و موثری می‌باشد.

۲- پس از وقوع حوادث نادر و بارگذاری‌های بحرانی نظیر سیل حداکثر، زلزله، تخلیه مخزن، و ...، تواتر قرائت‌ها باید متناسب با شرایط و سطح خسارات احتمالی وارد بر بدنه سد و پی افزایش یابد.

برنامه زمان‌بندی قرائت ابزارها باید به‌نحوی تنظیم گردد که حتی‌الامکان همه قرائت‌های لازم (مطابق برنامه تواتر قرائت‌ها) در هر مرحله به صورت هم‌زمان و یکجا برداشت گردد تا شرایط مناسب‌تری برای بررسی همبستگی بین قرائت‌ها و تفسیر نتایج پایش فراهم گردد. قرائت ابزارهایی که با تواتر کم (فصلی تا سالانه) پیش‌بینی شده‌اند، باید هم‌زمان با وقوع تراز آب حداقل یا حداکثر مخزن، وقوع دمای حداقل یا حداکثر محیط، و یا هم‌زمان با وقوع سایر بارها و شرایط محیطی بحرانی (متناسب با ماهیت پارامتر اندازه‌گیری) انجام پذیرد.

با توجه به تاثیر دمای محیط بر برخی پارامترها، نظیر تغییرمکان‌ها و حرکات بدنه سد و پی، کرنش های داخلی بدنه سد، و حرکات درز و ترک، اندازه‌گیری و قرائت این پارامترها همواره باید در صبح زود (زمانی که اثر نوسانات حرارتی روزانه و تابش خورشید حداقل می‌باشد) انجام پذیرد. با این حال، هم‌زمان با قرائت ابزارهایی که عملکرد آن‌ها ماهیتا نسبت به دما حساس بوده و در معرض نوسانات حرارتی قرار دارند، دمای محیط نصب ابزار نیز باید اندازه‌گیری شود.

۱۰-۶- روش‌های مختلف قرائت و گردآوری داده‌ها

همان‌گونه که ذکر شد قرائت غالب ابزارها به دو روش دستی و اتوماتیک امکان‌پذیر است. به‌کارگیری سیستم قرائت اتوماتیک، به خصوص در سدهایی که بنا به ضرورت تعداد ابزارها زیاد بوده، و یا در دوره‌هایی که تواتر قرائت ابزارها بالا می‌باشد، سبب تسهیل فرایند پایش سد و برداشت به موقع داده‌های سیستم ابزاردقیق خواهد شد. همچنین، در صورت عملکرد صحیح و بی‌نقص ابزارها، استفاده از سیستم قرائت اتوماتیک می‌تواند منجر به کاهش خطاهای انسانی (به دلیل حجم زیاد قرائت‌ها) و در نتیجه افزایش دقت قرائت‌ها گردد. از سوی دیگر، در صورت اتکای بیش از حد به فرایند قرائت اتوماتیک، در شرایطی که ابزارها با مشکلی مواجه شده و یا خللی در سیستم قرائت اتوماتیک پیش آید، احتمال بروز خطاهای فاحش در فرایند پایش و ارزیابی ایمنی بدنه سد و پی افزایش خواهد یافت.

با توجه به ملاحظات فوق، نحوه برداشت داده‌های سیستم ابزاردقیق باید به شکلی تنظیم گردد که دو عامل «دقت» و «سرعت» در قرائت‌ها به صورت توام تامین گردد تا هم از صحت فرایند پایش اطمینان کافی وجود داشته باشد و هم از شناسایی سریع خطرات و اعلام هشدارهای لازم و به موقع به مراجع ذیربط اطمینان حاصل گردد. بنابراین هیچ یک از روش‌های قرائت اتوماتیک و قرائت دستی جایگزین یکدیگر نبوده و هر دو روش بسته به شرایط و حجم ابزارها و قرائت‌ها باید مد نظر قرار گیرند.

انجام بازرسی‌های چشمی از اهمیت بالایی در شناسایی به موقع خسارات و مشکلات احتمالی در بدنه سد و پی برخوردار است زیرا همان‌گونه که ذکر شد، علیرغم پیش‌بینی تمام تمهیدات و ابزارها، الزاما خسارات وارد بر بدنه سد در محل یا در مجاورت ابزارها اتفاق نمی‌افتند. علاوه بر این، با انجام بازرسی‌های چشمی دقیق در زمان انجام قرائت‌های دستی، کنترل سلامت ابزارها و مشاهده عینی پدیده‌های مضر در محدوده محل نصب ابزارها میسر می‌گردد. بنابراین، بازرسی‌های چشمی جزء لاینفک و حیاتی فرایند پایش سدها بوده و در هیچ شرایطی نباید این بازرسی‌ها با اتکا به سیستم ابزاردقیق و یا به خصوص با توجه به استقرار سیستم قرائت اتوماتیک ابزارها، کم‌اهمیت و غیر ضروری تلقی گردد.

فصل ۱۱

ملاحظات اجرایی

۱۱-۱- کلیات

در سدهای بتنی وزنی متعارف، بتن‌ریزی در بلوک‌های مجزا و در لایه‌های ضخیم ۲ تا ۳ متری انجام پذیرفته و پیشرفت بتن‌ریزی در هر بلوک در راستای قائم محقق می‌گردد. با توجه به این که نیازی به تزریق درزهای انقباضی بین بلوک‌ها در سدهای بتنی وزنی وجود ندارد، عملا فرایند بتن‌ریزی در بلوک‌های بدنه سد تا حد زیادی مستقل از هم بوده و صرفا با توجه به ملاحظاتی نظیر تامین دسترسی به بلوک‌های مختلف و ایمنی محیط کارگاه، سعی می‌گردد بلوک‌های بدنه سد کم و بیش هم‌زمان پیشرفت داشته باشند. در مقابل در سدهای وزنی بتن غلتکی، بتن‌ریزی در لایه‌های نازک و در سطح وسیع (معمولا در کل سطح مقطع سد) اجرا می‌گردد. بنابراین جبهه‌های کاری در سدهای وزنی بتن غلتکی مستقل از یکدیگر نبوده و فعالیت‌هایی مانند آماده‌سازی پی و یا سطوح لایه بتن زیرین، مسیرهای انتقال بتن، کارگذاری قطعات مدفون، اجرای درزهای انقباضی قائم، و ... باید به صورت هماهنگ و یکپارچه برنامه‌ریزی شوند.

با توجه به شرایط فوق، سازمان و روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی، شامل آرایش و جانمایی تجهیزات و همچنین برنامه‌ریزی و تدارکات مورد نیاز، کاملا متفاوت با سدهای بتنی وزنی متعارف بوده و نحوه سازمان‌دهی عملیات اجرایی به همراه میزان و قابلیت‌های تجهیزات پیمانکار، تاثیر کاملا محسوس و در برخی موارد تعیین‌کننده‌ای بر فرضیات و مبانی طراحی بدنه سد دارد. به همین جهت در سدهای وزنی بتن غلتکی، تمایل بیش‌تری به قراردادهای طرح و ساخت (EPC)، هم از سوی پیمانکاران و هم از سوی کارفرما وجود دارد.

سرعت در اجرا و افزایش نرخ بتن‌ریزی (حجم بتن‌ریزی در واحد زمان) در سدهای بتن غلتکی یک عامل مهم و تعیین کننده هم از بعد حصول کیفیت مطلوب بتن و هم از بعد کاهش هزینه‌های عملیات اجرایی می‌باشد. مطابق الزامات مشخصات فنی عمومی سدهای بتن غلتکی، در مخلوط‌های بتن غلتکی که حاوی مواد افزودنی دیرگیر نباشند، فاصله زمانی بین شروع اختلاط تا تراکم کامل بتن در شرایط محیطی معمولی با میانگین دمای روزانه ۲۱ درجه سانتی‌گراد نباید از ۳۵ (تا ۴۰) دقیقه تجاوز نماید. بنابراین، مخلوط بتن غلتکی باید:

- طی مدت حدود ۱۰ دقیقه از زمان شروع اختلاط در دستگاه بتن‌ساز به محل بتن‌ریزی انتقال یابد،
- طی مدت حدود ۱۰ دقیقه از زمان تحویل به محل بتن‌ریزی، به طور کامل پخش گردد، و
- طی مدت حدود ۱۰ دقیقه کوبیده شده و در حد مطلوب متراکم گردد.

محدودیت‌های زمانی فوق در شرایط آب و هوایی سرد افزایش، و در شرایط آب و هوایی گرم متناسبا کاهش می‌یابد. همچنین در صورت جایگزینی بخش قابل توجهی از سیمان با پوزولان یا روباره آهن‌گدازی و یا استفاده از مواد افزودنی تاخیر در گیرش می‌توان محدودیت‌های زمانی فوق را تا حد مورد نیاز افزایش داد.

با توجه به این که از نظر فنی در غالب موارد تقریبا مانعی برای اجرای پیوسته بتن غلتکی وجود ندارد، از دیدگاه مدیریت اجرایی باید مشکلات فنی و سازمانی در کارگاه در اسرع وقت برطرف گردد. این موضوع مستلزم ارتباط و تعامل مستقیم میان تیم طراحی و عوامل اجرایی، و همچنین اختیارات کافی برای تصمیم‌گیری در کارگاه می‌باشد. از بعد

طراحی برای تحقق شرایط مناسب‌تر برای بتن‌ریزی پیوسته، سازه‌های جنبی داخل بدنه سد حتی‌الامکان باید به صورت متمرکز و در نواحی کناری بدنه سد جانمایی شوند.

از نظر اجرایی، فعالیت‌هایی نظیر قالب‌بندی و جایگذاری قطعات مدفون، اجرای درزهای انقباضی، نصب ابزاردقیق، تعمیرات و سوخت‌گیری ماشین‌آلات، و سایر فعالیت های مرتبط با فرایند بتن‌ریزی باید به نحوی برنامه‌ریزی شوند که مانع عملیات بتن‌ریزی نشده و در زمان‌های غیرموثر، مانند زمان تعویض شیفت کار، انجام شوند. همچنین مسیرهای دسترسی و ترافیک باید به نحوی برنامه‌ریزی گردد که مسیر تردد پرسنل غیرمرتبط با فعالیت بتن‌ریزی (شامل بازدیدکنندگان و خودروهای سرپرستان و ناظرین کارگاه) کاملا مجزا از مسیر تردد ماشین‌آلات بتن‌ریزی و خارج از محیط کاری نگه داشته شوند [۱۸].

در ادامه مطالب این فصل، اهمّ ملاحظات اجرایی سدهای وزنی بتن غلتکی از ابعاد مختلف برنامه‌ریزی، شرایط محیطی، و ماشین‌آلات اجرایی ارائه می‌گردد.

۱۱-۲- برنامه زمان‌بندی اجرای بتن غلتکی

به طور معمول برنامه زمان‌بندی سدهای بتن غلتکی بهتر است به نحوی تنظیم گردد که اجرای بتن غلتکی بدنه سد در فصول خشک سال انجام پذیرد. البته در مناطق با شرایط آب و هوایی بسیار گرم این موضوع صادق نبوده و اجرای بتن غلتکی باید در فصول مناسب سال برنامه‌ریزی گردد. در این شرایط، اجرای بتن غلتکی با مشکلات کم‌تری مواجه بوده و دستیابی به نرخ بتن‌ریزی مناسب امکان‌پذیر می‌گردد.

نرخ بتن‌ریزی مناسب برای سدهای کوتاه و فرازبندهای با حجم کم‌تر از ۲۵،۰۰۰ مترمکعب، ۵۰ تا ۱۵۰ مترمکعب در ساعت، و برای سدهای با حجم متوسط (۵۰،۰۰۰ تا ۲۰۰،۰۰۰ مترمکعب) ۱۵۰ تا ۳۰۰ مترمکعب در ساعت می‌باشد. برای سدهای با ابعاد بزرگ‌تر و حجم بتن بیش‌تر از ۳۰۰،۰۰۰ مترمکعب، می‌توان انتظار داشت نرخ بتن‌ریزی فراتر از ۴۰۰ مترمکعب در ساعت باشد.

۱۱-۳- شرایط آب و هوایی

نامناسب‌ترین شرایط آب و هوایی برای اجرای بتن غلتکی، هوای بارانی و گرمای زیاد می‌باشند. هوای گرم باعث افزایش حداکثر دمای درونی بتن می‌گردد و البته این موضوع تا زمانی که بدنه سد به طور نامناسب در معرض هوای سرد قرار نگیرد، معمولا مشکلی از نظر ترک‌خوردگی حرارتی بتن ایجاد نمی‌نماید. در هوای گرم، به دلیل شدت بالای تبخیر آب در مخلوط بتن، فاصله زمانی مجاز بین شروع اختلاط تا تراکم کامل بتن کاهش می‌یابد. همچنین در هوای گرم، پس از اجرای یک لایه بتن غلتکی، زمان مجاز برای اجرای لایه بعدی بدون استفاده از ملات چسباننده، کوتاه‌تر خواهد بود.

شرایط وقوع بارندگی خفیف، بارندگی کم‌تر از ۱ میلی متر در ساعت و با تداوم کم‌تر از ۸ ساعت، اغلب مشکلی برای اجرای بتن غلتکی ایجاد نمی‌نماید. در زمان وقوع بارندگی‌های شدیدتر، بتن‌ریزی در شرایطی مجاز خواهد بود که اجرای این عملیات مستلزم عبور ماشین‌آلات از روی بتن تازه نباشد. در مناطق پر باران، اجرای عملیات بتن‌ریزی بدون کاربرد کامیون یا سایر ماشین‌آلات حمل بتن و با استفاده از نوار نقاله سرپوشیده که به صورت کامل تا پای کار امتداد یافته باشد، توصیه می‌گردد [۱۸]. علاوه بر این، با برنامه‌ریزی عملیات اجرایی در فصول کم‌باران سال، عدم بتن‌ریزی در ساعاتی که احتمال بارندگی بیش‌تر است، حفاظت بتن از باران، و استفاده از تجهیزات با سرعت بتن‌ریزی زیاد، می‌توان مشکلات ناشی از بارندگی را مدیریت نموده و به حداقل ممکن رساند.

۱۱-۴- تجهیزات تولید سنگ‌دانه

جانمایی، ظرفیت و نحوه باراندازی و برداشت سنگ‌دانه‌ها از محل‌های انباشت باید با جانمایی مرکز تهیه بتن و نحوه تغذیه دستگاه بتن‌ساز هماهنگی داشته باشد تا ریسک جدایی سنگ‌دانه‌ها و بروز تغییرات ناخواسته به حداقل ممکن کاهش یابد. کاهش طول مسیر انتقال سنگ‌دانه‌ها از محل انباشت به دستگاه بتن‌ساز در سدهای بتن غلتکی از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا در اغلب موارد به علت نیاز به ظرفیت تولید بالا، عملکرد تجهیزات بارگیری دستگاه بتن‌ساز در سدهای بتن غلتکی باید سریع، موثر، و با حاشیه اطمینان مناسب باشد.

معمولا قبل از شروع عملیات اجرایی بتن غلتکی، سنگ‌دانه‌های مورد نیاز برای تولید نیمی از حجم بتن‌ریزی در فصل مناسب بتن‌ریزی در محل انباشت سنگ‌دانه‌ها ذخیره‌سازی می‌شود تا کارگاه در فرایند اجرای بتن غلتکی با کمبود مصالح روبرو نشود. ذخیره‌سازی حجم مناسبی از سنگ‌دانه‌ها قبل از شروع عملیات بتن‌ریزی، از ابعاد زیر نیز توجیه‌پذیر و مفید می‌باشد:

- با ذخیره‌سازی سنگ‌دانه‌ها در فصل سرد، دمای غالب سنگ‌دانه‌ها پایین باقی خواهد ماند و این موضوع به کاهش دمای بتن تازه در هنگام تولید بتن در فصل گرم و در نتیجه کاهش تمهیدات پیش‌سرمایش بتن کمک می‌نماید. بر اساس بررسی‌های کارگاهی انجام یافته، توده‌های عظیم سنگ‌دانه‌ها می‌توانند تا مدت طولانی از نفوذ گرما به سنگ‌دانه‌های زیرین جلوگیری نمایند. فرایند تهیه و انباشت سنگ‌دانه‌ها در شب نیز می‌تواند در کاهش دمای سنگ‌دانه‌ها و بتن تازه موثر واقع شود.
- تجهیز و تولید سنگ‌دانه با حداکثر ظرفیت تولید در زمان‌های آغازین پروژه سهل‌تر از تولید سنگ‌دانه در دوره اجرای عملیات بتن‌ریزی بدنه سد می‌باشد. اجرای زودهنگام عملیات تجهیز و تولید سنگ‌دانه‌ها از بعد اقتصادی نیز قابل توجیه می‌باشد زیرا به طور معمول پرداخت هزینه آماده‌سازی و انباشت سنگ‌دانه‌های مورد نیاز برای بتن، با تأیید دستگاه نظارت به عنوان مصالح پای‌کار، امکان‌پذیر می‌باشد.
- در زمان بتن‌ریزی، درصورتی‌که سرعت مصرف سنگ‌دانه‌ها از ظرفیت تولید سنگ‌دانه در دستگاه سنگ‌شکن کارگاه فزونی یابد، تاسیسات تولید مصالح با مشکل مواجه گردد، و یا به دلیل تغییر منابع قرضه مورد استفاده (یا

استهلاک تجهیزات سنگ شکن) کیفیت و مشخصات سنگ‌دانه‌های تولیدی از حدود مجاز خارج گردد، وجود حجم ذخیره مناسبی از سنگ‌دانه‌های با کیفیت مطلوب می‌تواند کمک شایانی به تداوم عملیات بتن‌ریزی و اجرای پروژه نماید. در این شرایط، می‌توان با اختلاط سنگ‌دانه‌های (قدیمی) با کیفیت مطلوب و سنگ‌دانه‌های (جدید) با کیفیت پایین، به یک مصالح سنگ‌دانه‌ای با دانه‌بندی و کیفیت قابل قبول دست یافت به نحوی که تاثیر محسوسی بر کیفیت بتن تولیدی نداشته باشد.

- مزیت دیگر وجود حجم ذخیره بزرگ سنگ‌دانه در کارگاه، ثبات و یکنواختی بیش‌تر رطوبت محتوی سنگ‌دانه‌ها و در نتیجه تغییرات کم‌تر روانی بتن غلتکی تولیدی می‌باشد.

هر چند دسته‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی در اندازه‌های مختلف برای تهیه بتن غلتکی مشابه با بتن‌های معمولی می‌باشد ولی چنانکه دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های معدن مناسب باشد، می‌توان سنگ‌دانه‌ها را در دو گروه کلی زیر ۲۰ و بالای ۲۰ میلی‌متر دسته‌بندی نموده و بدین ترتیب فرایند پیمانه کردن سنگ‌دانه‌ها را بسیار ساده‌تر، سریع‌تر، و کم‌هزینه‌تر نمود. در این شرایط، تداوم عملیات اجرای بتن غلتکی از تضمین بیش‌تری برخوردار خواهد بود. غالب دستگاه‌های تهیه بتن مرکزی حداقل ۴ محفظه انباشت موقت سنگ‌دانه دارند و در شرایطی که تولید بتن غلتکی با ۴ اندازه سنگ‌دانه طراحی شود، درصورت وقوع خرابی در هریک از این محفظه‌ها، فرایند تولی و اجرای بتن غلتکی به اجبار متوقف می‌شود. ولی اگر ۴ محفظه با ۲ اندازه سنگ‌دانه تغذیه شوند، هر اندازه سنگ‌دانه را می‌توان در ۲ محفظه انبار نمود و درصورت وقوع خرابی در هریک از محفظه‌ها، جریان ساخت بتن با استفاده از محفظه دیگر می‌تواند ادامه یابد [۱۸].

از بعد منبع قرضه یا معدن سنگ‌دانه، وضعیت ایده‌آل وجود معدن سنگ‌دانه رودخانه‌ای با دانه‌بندی مناسب برای ساخت بتن غلتکی در فاصله‌ای اقتصادی از ساختگاه سد است. در این شرایط، هر حجم سنگ‌دانه‌ای که از معدن استحصال می‌شود با کم‌ترین فرایند قابل مصرف در تولید بتن خواهد بود.

همان‌گونه که در فصل دوم این راهنما در خصوص مشخصات مصالح اشاره شد، در غالب موارد اضافه نمودن ریزدانه‌های غیرپلاستیک، مانند پودر سنگ عبوری از الک نمره ۲۰۰، به بتن غلتکی (به خصوص بتن‌های غلتکی با مواد سیمانی کم و متوسط) تاثیر مطلوبی بر تراکم‌پذیری و در نتیجه بهبود کیفیت بتن دارد. در این شرایط توجه به این نکته ضروری است که با افزودن مواد سنگ‌دانه ریز با اندازه زیر ۲۰ میلی‌متر، با اندکی رطوبت این سنگ‌دانه‌ها تمایل به تراکم (تحت اثر وزن خود) در درون محفظه مصالح دستگاه بتن‌ساز خواهند داشت و در این شرایط برای تخلیه سنگ‌دانه‌ها از محفظه‌های مصالح باید دریچه تخلیه این محفظه‌ها به اندازه کافی بزرگ‌تر در نظر گرفته شود تا تخلیه مصالح سنگی با مشکلی مواجه نگردد.

۱۱-۵- تجهیزات تولید بتن

جانمایی مناسب تجهیزات، به خصوص تجهیزات تولید بتن تاثیر زیادی در بهبود راندمان عملیات بتن‌ریزی و کاهش مصرف انرژی دارد. بر این اساس، دستگاه بتن‌ساز باید به‌گونه‌ای جانمایی گردد که کم‌ترین فاصله حمل بتن در دو مولفه

افقی و قائم تامین شده و حداقل تاثیرپذیری از شرایط آب و هوایی و گرمای خورشید حاصل شود. در غالب موارد دستگاه بتن‌ساز روی یک بلندی مستقر می‌شود تا دوغاب سیمان و زه‌آب حاصل از شستشوی دستگاه بدون نیاز به پمپاژ دفع شود. این شرایط به تسهیل جابه‌جایی و حمل بتن نیز کمک می‌نماید. به طور معمول دستگاه بتن‌ساز در بالادست ساختگاه سد و بالاتر از تراز فرازبند و درصورت احتمال آبگیری زودهنگام بالاتر از رقوم نرمال سد مستقر می‌شود. در صورت حمل بتن با تسمه نقاله تا محل بتن‌ریزی، بهتر است دستگاه مجهز به یک مسیر تخلیه اضطراری باشد تا تخلیه و خروج مخلوط‌های نامناسب بتن از سیستم امکان‌پذیر گردد. این مسیر اضطراری تخلیه می‌تواند به منظور نمونه برداری، تحویل بتن برای مقاطع آزمایشی و برای سایر مصارف اجرایی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

هر دو نوع مخلوط‌کن‌های دائمی و پیمانه‌ای برای تولید مخلوط بتن غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخلوط‌کن‌های دائمی معمولا ظرفیت بیش‌تری نسبت به نوع پیمانه‌ای دارند. در کارگاه‌های سدسازی ایران استفاده از نوع پیمانه‌ای معمول‌تر است. در صورت استفاده از دستگاه‌های تولید بتن متعارف برای تولید بتن غلتکی، باید به این نکته توجه داشت که به دلیل کاهش میزان آب و نیز افزایش درصد وزنی خمیر سیمان، ریسک چسبیدن (ملات) بتن غلتکی به جداره‌های محفظه مخلوط‌کن و پایین آمدن بهره‌وری دستگاه وجود خواهد داشت. برای پیش‌گیری از این مشکل، اعمال تغییراتی در دستگاه بتن‌ساز معمولی ضروری می‌باشد.

از نظر تضمین تداوم فرایند تولید بتن، به طور کلی استفاده از چند دستگاه با ظرفیت کم‌تر نسبت به کاربرد یک دستگاه با ظرفیت تولید بتن بالا، ارجحیت دارد، زیرا در حالت اول در صورت خرابی یکی از دستگاه‌ها، سایر دستگاه‌های بتن‌ساز می‌توانند عملیات تولید بتن را در زمان تعمیر دستگاه خراب ادامه دهند. علاوه بر این، پس از اتمام هر پروژه، امکان استفاده از دستگاه‌های کم ظرفیت تولید بتن در سایر پروژه‌ها به‌مراتب راحت‌تر از یک دستگاه ویژه و با ظرفیت بالا می‌باشد. البته انتخاب ویژگی‌ها و ظرفیت دستگاه‌های تولید بتن برای هر پروژه تابع حجم بتن‌ریزی، برنامه زمان‌بندی و نرخ بتن‌ریزی مورد نظر، و همچنین شرایط توپوگرافی و اقلیمی ساختگاه نیز بوده و جانمایی و انتخاب بهینه دستگاه‌های بتن‌ساز (و کلا تجهیزات تولید بتن) مستلزم یک بررسی جامع و همه‌جانبه می‌باشد.

با توجه به این‌که تولید بتن با ظرفیت اسمی دستگاه‌های بتن‌ساز همواره امکان‌پذیر نمی‌باشد، توصیه می‌شود ظرفیت اسمی دستگاه بتن‌ساز به اندازه کافی بیش از میانگین نرخ بتن‌ریزی مورد نیاز انتخاب شود. به عنوان راهنما حداکثر ظرفیت روزانه تجهیزات بتن‌ریزی در حدود دو الی سه برابر میانگین بتن‌ریزی روزانه طبق برنامه زمان‌بندی انتخاب می‌شوند. این نسبت برای پروژه‌های کوچک تر باید بیش‌تر و در پروژه‌های بزرگ و بدون پیچیدگی‌های فنی می‌تواند کم‌تر در نظر گرفته شود.

تغییرات در درصد رطوبت آزاد سنگ‌دانه‌ها می‌تواند در زمان شروع کار تولید بتن اشکالاتی ایجاد نماید. به همین دلیل در برخی موارد پیمانکاران در شروع کار دستگاه بتن‌ساز مقدار آب را کم‌تر از میزان پیشنهادی طرح اختلاط در نظر می‌گیرند. این کار از نظر فنی مشکلاتی بهمراه داشته و توصیه نمی‌شود، زیرا بتن‌های تولیدی در شروع کار معمولا روی

سطوح بتن سخت شده نوبت قبلی یا پی سد ریخته می‌شوند که باید چسبندگی و رطوبت بیش‌تری داشته باشد. بنابراین بهتر است تولید بتن غلتکی با رطوبت بیش‌تر از نیاز شروع شده و به تدریج رطوبت آن تا میزان مورد نیاز کاهش یابد.

مخلوط‌کن دستگاه تولید بتن غلتکی باید قابلیت کار مداوم را داشته و سیستم آن به‌گونه‌ای باشدکه در صورت بروز هر اشکالی در کم‌ترین زمان قابل تعمیر باشد. نکته مهم دیگر همسانی و یکنواختی کیفیت بتن در شرایط کارکرد مخلوط‌کن با نرخ‌های متفاوت تولید می‌باشد، زیرا برای بتن‌ریزی در فضاهای محدود در مجاورت تکیه گاه‌ها و یا در مقاطعی که سطح کوچکی دارند، دستگاه تولید بتن الزاما با ظرفیت کم‌تری (۵۰٪ ظرفیت اسمی یا کم‌تر) بتن تولید می‌کند و بلافاصله پس از رفع محدودیت، نرخ تولید بتن مجددا افزایش می‌یابد. بنابراین در صورت تفاوت کیفیت بتن غلتکی به ازای نرخ‌های متفاوت تولید، همسانی و یکنواختی کیفیت و مقاومت مقطع سد دچار خدشه و اشکال خواهد شد.

برای تولید بتن با کیفیت یکنواخت، در پروژه‌های بزرگ که تولید بتن توسط چند دستگاه بتن‌ساز انجام می‌شود، به راحتی می‌توان ظرفیت تولید را متناسب با نیاز با از کار انداختن یک یا دو دستگاه بتن‌ساز و یا راه‌اندازی دوباره آن‌ها تنظیم نمود. در پروژه‌های کوچک تر که با یک دستگاه تولید بتن کار می‌کنند، دستگاه بتن‌ساز باید ذاتا توانایی تولید بتن با کیفیت همسان با سرعت‌های خروجی مختلف را داشته باشد. از این بعد، دستگاه‌های با مخلوط‌کن دائمی کارایی مناسبی داشته و کیفیت بتن تولیدی آن‌ها در حد فاصل حداقل ظرفیت تا حدود ظرفیت اسمی تولید نسبتا همسان و یکنواخت می‌باشد.

کنترل دقیق میزان سیمان و پوزولان مصرفی در مخلوط‌کن‌های دائمی از اهمیت زیادی برخوردار است. به ویژه دستگاه‌هایی که برای ظرفیت بالای تولید طراحی می‌شوند معمولا در زمانی که سرعت بتن‌ریزی کاهش می‌یابد (به خصوص برای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم) فاقد دقت کافی در کنترل میزان سیمان مصرفی می‌باشند. برای رفع این مشکل می‌توان از تمهیداتی نظیر کنترل فشار سیمان در سیلوهای ذخیره، استفاده از پمپ‌های فشار هوا، استفاده از تسمه نقاله و پمپ‌های حلزونی استفاده نمود.

به حداقل رسانیدن زمان اختلاط اجزای متشکله بتن غلتکی مستلزم تعیین صحیح زمان‌های تخلیه سنگ‌دانه‌ها و مواد سیمانی روی نقاله انتقال مصالح به محفظه مخلوط‌کن می‌باشد. زمان درست برای اضافه نمودن آب به مخلوط و زاویه ورود آب به محفظه اختلاط نیز مهم است.

اغلب دستگاه‌های تولید بتن غلتکی حجیم برای تولید بتن با بزرگ‌ترین اندازه دانه سنگی ۷۵ میلی‌متر طراحی می‌شوند ولی تجربه نشان داده است که درصد وزنی سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر نباید بیش از ۸٪ باشد. البته در غالب موارد، بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه برای بتن غلتکی ۵۰ میلی‌متر توصیه شده است.

دقت در توزین و ورود صحیح مصالح به مخلوط‌کن فقط بخشی از فرایند اختلاط است. اختلاط یکنواخت و کامل مواد و تخلیه پیوسته و یکنواخت بتن نیز بخش دیگر فرایند است. ملاحظات مربوط به صحت وزنی بارگیری مواد مطابق با طرح اختلاط هدف و روش‌های کنترل یکنواختی مخلوط‌های بتن غلتکی در فصل کنترل کیفیت بتن (فصل دوازدهم این راهنما) ارائه شده است.

۱۱-۶- تجهیزات انتقال بتن

حجم بتن بدنه سد، نحوه دسترسی به محل بتن‌ریزی در ترازهای مختلف، کیفیت و نحوه تامین تجهیزات و ماشین‌آلات (خرید یا اجاره تجهیزات نو یا مستعمل)، و پارامترهای طراحی از جمله عوامل تاثیرگذار در انتخاب روش انتقال بتن غلتکی و تامین تجهیزات و ماشین‌آلات انتقال بتن از محل دستگاه بتن‌ساز تا محل بتن‌ریزی می‌باشند.

اصولا سه روش کلی زیر برای حمل بتن غلتکی متداول می‌باشد:

۱- انتقال بتن توسط پیمانه‌های جداگانه (کامیون)،

۲- انتقال بتن به طور پیوسته، و

۳- انتقال بتن با ترکیبی از دو روش فوق.

در شرایط انتقال بتن به روش ترکیبی، در ابتدا بتن غلتکی با استفاده از تسمه نقاله از محل دستگاه بتن‌ساز به قیف ذخیره‌سازی مستقر بر روی بدنه سد منتقل می‌گردد و سپس با استفاده از کامیون بتن غلتکی از قیف‌های ذخیره بارگیری شده و در محل بتن‌ریزی تخلیه می‌گردد. البته در برخی موارد ممکن است بتن در ابتدا توسط کامیون (یا تجهیزات دارای پیمانه‌های جداگانه) از محل دستگاه بتن‌ساز حمل شده و سپس توسط تسمه نقاله‌های متحرک در محل بتن‌ریزی مورد نظر تخلیه گردد. انتقال بتن با جرثقیل و جام نیز امکان‌پذیر می‌باشد اما این روش بتن‌ریزی اصولا کند بوده و احتمال جدایی سنگ‌دانه‌ها را در بتن افزایش می‌دهد.

بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه نیز می‌تواند بر انتخاب روش انتقال بتن تاثیرگذار باشد. بر اساس تجربیات موجود، حمل بتن غلتکی با حداکثر قطر سنگ‌دانه ۳۸ میلی‌متر با کامیون‌های معمولی، بدون ریسک جدایی دانه‌ها از بتن، امکان‌پذیر می‌باشد. در مخلوط‌های بتن غلتکی با حداکثر قطر سنگ‌دانه ۷۵ میلی‌متر، در زمان تخلیه بتن غلتکی از کامیون (به ویژه در شرایطی که که مخلوط بتن غلتکی بر روی سطوح سخت تخلیه می‌شود) ریسک جدایی سنگ‌دانه‌های درشت بتن افزایش یافته و عدم توجه به این موضوع می‌تواند تاثیرات نامطلوبی بر کیفیت بتن به همراه داشته باشد. یکی از راهکارهای کنترل و کاهش ریسک جدایی سنگ‌دانه‌های درشت بتن، تخلیه بتن غلتکی از کامیون بر روی بتن تازه پخش شده که هنوز با غلتک کوبیده نشده است، می‌باشد.

انتقال پیوسته بتن غلتکی بوسیله تسمه نقاله پر سرعت که مستقیما تا روی بدنه سد و محل بتن‌ریزی مورد نظر امتداد می‌یابد نسبت به سایر روش‌ها ارجح می‌باشد. طراحی و انتخاب نوع سیستم نوار نقاله باید با دقت انجام یابد چرا که سیستم نوارنقاله‌ای که برای حمل بتن معمولی، سنگ‌دانه، ذغال سنگ یا مصالح کارایی مناسبی داشته ممکن است برای انتقال بتن غلتکی از کارایی و بازدهی مطلوب برخوردار نباشد. گرفتگی مجاری انتقال، جدایی سنگ‌دانه‌ها در محل تخلیه، چسبیدن ملات در مجاری، عدم توانایی توقف و حرکت دوباره نوار نقاله با وجود مصالح روی نوار و احتمال ریزش ملات چسبیده به نوار زیرین سیستم که در وضعیت بازگشت می‌باشد، از جمله مسایل و مشکلاتی هستند که در فرایند طراحی و انتخاب نوع سیستم نوار نقاله باید مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این موارد، در طراحی سیستم نوار نقاله باید

پارامترهایی نظیر عرض نوار، سرعت نوار، طول سقف محافظ، سهولت تعمیر، شیب‌های مجاز نوار نقاله و در دسترس بودن وسایل یدکی سیستم نوارنقاله مورد توجه قرار گیرند.

سرعت نوار نقاله‌های حمل بتن غلتکی می‌تواند بین ۳ تا ۱۰ متر برثانیه باشد. برای جلوگیری از افت کیفیت و یا از دست رفتن آب بتن در زمان انتقال، مسقف نمودن طولی از نوار نقاله که در معرض باران یا اشعه خورشید است، راهکار مناسبی بوده و برای جلوگیری از ریزش ملات چسبیده به نوار برگشت بهتر است زیر نوار نقاله نیز پوشیده شده و یا از تیغه‌هایی برای تمیز نگه داشتن نوار برگشت استفاده گردد. با توجه به افزایش سریع ارتفاع مقطع بتن‌ریزی، سیستم نوار نقاله باید به راحتی قابلیت تنظیم ارتفاع داشته باشد.

سیستم نوار نقاله پیوسته که بتن غلتکی را از دستگاه تولید بتن تا محل نهایی بتن‌ریزی منتقل می‌کند سرعت بتن‌ریزی را افزایش داده و نیاز به نیروی کارگری و تجهیزات جانبی را کاهش می‌دهد. علاوه بر انتقال سریع‌تر بتن، با استفاده از سیستم نوار نقاله پیوسته برای انتقال بتن، موجب کاهش تراکم تجهیزات روی بدنه سد، حذف قیف‌های ذخیره، حذف جاده‌های سرویس و دسترسی به بدنه سد، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری، خراب نشدن سطوح تازه بتن‌ریزی شده در اثر تردد کامیون‌های حمل بتن، و فراهم شدن امکان نصب تاسیساتی نظیر کابل‌های برق، نورافکن‌ها، لوله‌های آب و هوای فشرده بر روی سیستم نوار نقاله، می‌گردد.

زمانی که از قیف‌های ذخیره مستقر روی بدنه سد برای بارگیری بتن توسط کامیون استفاده می‌شود، قیف‌ها باید به نحوی تغذیه شوند که هیچ گونه خللی در بتن ریزی رخ ندهد. حداقل حجم قیف ذخیره باید دو برابر ظرفیت هر کامیون حمل بتن باشد. در پروژه‌های کوچک از لودر نیز می‌توان برای انتقال بتن از قیف ذخیره تا محل نهایی بتن‌ریزی استفاده نمود.

علیرغم ارجحیت فنی و اجرایی استفاده از تسمه نقاله برای انتقال بتن، این روش انتقال معمولا نسبت به سایر روش‌ها پرهزینه‌تر می‌باشد و برای احجام کم بتن غلتکی اقتصادی نخواهد بود. با این حال در زمان انتخاب سیستم انتقال بتن، باید هزینه و مزایای انتقال کامل بتن توسط نوار نقاله در مقابل مزایا و معایب و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم سایر روش‌ها و نیز نرخ بتن‌ریزی مورد نظر (بر اساس برنامه زمان‌بندی قرارداد و محدودیت‌های بتن‌ریزی) مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

در صورت استفاده از کامیون برای حمل بتن از دستگاه بتن‌ساز تا محل بتن‌ریزی، طراحی راه‌های دسترسی به ترازهای ارتفاعی مختلف سد متناسب با پیشرفت عملیات اجرایی بتن‌ریزی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. مشکلات و چالش‌های اجرایی در این روش انتقال بتن شامل محدودیت‌های احداث راه‌های دسترسی (که می‌تواند منجر به احداث راه‌های با شیب زیاد گردد)، ضرورت استحصال مصالح مناسب برای راه‌سازی در محدوده ساختگاه، جانمایی دستگاه بتن‌ساز مرکزی و تاسیسات جانبی آن مانند سیلوهای سنگ‌دانه، سیمان و مواد افزودنی، و ملاحظات اجرایی و زیست‌محیطی (به دلیل حجم بالای راه‌های دسترسی) می‌باشند. شیب راه‌های دسترسی باید مطابق با توانایی‌های ماشین‌آلات حمل بتن و با رعایت الزامات فنی و ایمنی تعیین شده و عملیات اجرایی احداث راه دسترسی به ترازهای بالاتر باید در فرصت‌های زمانی محدود توقف عملیات اجرایی بتن‌ریزی در طی روز برنامه‌ریزی شود تا خللی در روند بتن‌ریزی بدنه سد به وجود نیاید. روسازی راه‌های دسترسی باید با شن تمیز و عاری از گل و لای اجرا گردد تا از آلودگی

سطوح بتن‌ریزی شده (یا آماده بتن‌ریزی) در اثر تردد کامیون‌ها جلوگیری شود. در صورت نیاز می‌توان ترتیبی قائل شد تا چرخ‌های کامیون‌های حمل بتن قبل از ورود به مقطع سد با جت آب شستو گردد ولی در این شرایط نیز باید توجه نمود که آب اضافی توسط چرخ‌ها و چکه از بدنه کامیون به مقطع سد در حال اجرا وارد نشود. تا حد امکان زاویه تلاقی راه دسترسی با مقطع سد باید ملایم طراحی گردد به‌گونه‌ای که تردد کامین‌ها به مقطع سد به راحتی میسر شده و اثر عبور چرخ کامیون‌های حمل بتن بر روی سطوح بتن‌ریزی قبلی به حداقل ممکن کاهش یابد. در صورت نیاز به دور زدن در سطح مقطع سد، شعاع چرخش کامیون باید حتی‌الامکان بزرگ اختیار شده و حرکت کامیون آهسته باشد. برای جلوگیری از جدایی سنگ‌دانه‌های درشت بتن، تخلیه بتن از کامیون باید همواره بر روی بتن تازه پخش شده ولی کوبیده نشده قبلی انجام پذیرفته و ارتفاع تخلیه بتن از کامیون از یک متر و نیم بیش‌تر نشود. سنگ‌دانه‌های درشتی که به هر دلیل از بتن جدا شده و روی سطوح سخت شده نوبت قبلی می‌غلتند باید جمع‌آوری شده و از مقطع سد خارج گردند.

تجربیات به‌دست آمده از بررسی نتایج آزمایش نمونه‌های مغزه‌گیری شده از بدنه سدهای بتن غلتکی نشان می‌دهد که علیرغم اتخاذ تمام تمهیدات و ملاحظات فوق، کیفیت بتن در شرایط حمل بتن با استفاده از تسمه نقاله پیوسته بهتر از کیفیت بتن در شرایط حمل با کامیون می‌باشد.

۱۱-۷- تجهیزات پخش بتن

به طور کلی فرایند بتن‌ریزی و پخش بتن باید از یک تکیه‌گاه شروع شده و به تکیه‌گاه مقابل ختم گردد. در مواردی که فاصله دو تکیه‌گاه مقطع سد به دلیل عرض باریک دره از فاصله سطوح بالادست تا پایین‌دست سد در آن مقطع کم‌تر است، می‌توان بتن‌ریزی را در جهت بالادست – پایین‌دست سد اجرا نمود. در پروژه‌های متعددی برای پخش بتن از دستگاه پخش آسفالت روسازی راه‌ها استفاده شده است ولی بر اساس تجربیات به‌دست آمده استفاده از این دستگاه‌ها برای بتن‌های غلتکی با روانی مطلوب (بتن غلتکی با مواد سیمانی زیاد و با حداکثر ابعاد سنگ‌دانه کوچک) بهینه و امکان‌پذیر می‌باشد.

بولدوزرهای چرخ زنجیری مناسب‌ترین وسیله برای پخش بتن غلتکی می‌باشند. این وسیله چابک و در عین حال با دقت کافی بوده و هم‌زمان با پخش بتن تا اندازه‌ای موجب تراکم یکنواخت بتن غلتکی نیز می‌گردد. بولدوزر با پخش دقیق بتن می‌تواند به اختلاط دوباره بتن و کاهش ریسک جدایی سنگ‌دانه‌ها از بتن کمک کند. بولدوزرهای مورد استفاده برای پخش بتن اغلب از نوع D6 یا کوچک تر می‌باشند. تردد بولدوزر فقط بر روی بتن تازه پخش شده و متراکم نشده مجاز می‌باشد زیرا حرکت بولدوزر بر روی بتن غلتکی کوبیده شده سبب خرابی سطح بتن می‌گردد.

در زمان اجرای اولین لایه بتن‌ریزی بر روی پی سد که قبلا با بتن تسطیح نشده است، از لودر و بیل مکانیکی نیز برای پخش بتن می‌توان استفاده نمود.

پخش بتن باید با دقت انجام یابد به‌گونه‌ای که سطح بتن پخش شده صاف و بدون پستی و بلندی قابل توجه باشد. به طور معمول رواداری مجاز پستی و بلندی سطوح بتن پخش شده در حدود ۵ ± سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. از

سوی دیگر، صرف وقت و تلاش زیاد برای پخش و تسطیح بتن در یک تراز خاص (مطابق نقشه‌های اجرایی) نیز ممکن است به از دست رفتن کارایی، خشک شدن و کاهش کیفیت کار بیانجامد [۱۸].

در محل‌هایی که از مخلوط‌های ویژه در بتن‌ریزی بدنه استفاده می‌شود، به طور مثال بتن رویه‌های بالادست و پایین‌دست، روش‌های بتن‌ریزی مناسب باید به کار گرفته شوند. اگر از بتن معمولی در رویه بالادست قالب‌بندی شده استفاده می‌شود و قرار است پشت آن با بتن غلتکی خشک پوشانده شود، ابتدا باید بتن معمولی در مقابل قالب رویه سد ریخته شده و بلافاصله بتن غلتکی در پشت آن پخش شود. بتن رویه معمولا به نحوی طراحی می‌شود که کارایی آن سریع کاهش یافته ولی زمان گیرش آن به تاخیر افتد. در این شرایط بتن غلتکی در زمان تراکم با بتن رویه یکپارچه شده و اتصال خوبی بین این دو بتن ایجاد می‌گردد. کاهش سریع اسلامپ بتن رویه به دلیل امکان‌پذیر شدن عبور غلتک بر روی آن در زمان تراکم بتن ضروری است. عرض بتن رویه بالادست سد معمولا ۱/۰ الی ۲/۰ متر بسته به نیازهای طراحی و کیفیت اجرا در نظر گرفته می‌شود. با افزایش ضخامت بتن معمولی در رویه، باید با در نظر گرفتن تمهیدات لازم ریسک ایجاد ترک حرارتی در بتن معمولی رویه را کنترل نمود.

اگر روانی مخلوط بتن غلتکی به اندازه کافی زیاد بوده و از مواد افزودنی دیرگیر در بتن استفاده شده باشد، می‌توان بتن معمولی رویه را بعد از بتن غلتکی اجرا نمود. در این حالت محدوده تلاقی بتن رویه و بتن غلتکی با استفاده از ویبراتورهای معمولی متراکم می‌شوند. تجربیات موجود از نتایج بررسی مغزه‌های اخذ شده از بتن در این نواحی نشان داده‌اند که کیفیت اتصال بتن رویه و بتن غلتکی در این روش کاهش می‌یابد هر چند در ظاهر بتن کاملا متراکم به‌نظر برسد.

در اغلب مشخصات فنی سدهای بتن غلتکی، ضخامت هر لایه بتن‌ریزی ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. غلتک های ویبره چرخ آهنی که دارای دو غلتک دوار می‌باشند معمولا با ۴ یا ۵ عبور می‌توانند چنین ضخامتی را به طور کامل متراکم نمایند. حداکثر زمان مجاز برای پوشاندن هر لایه بتن با لایه بتن بعدی عامل تعیین کننده در انتخاب ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی می‌باشد. انتخاب لایه بتن‌ریزی ضخیم‌تر به معنی فاصله زمانی بیش‌تر بین دو لایه بتن متوالی، ولی تعداد درزهای اجرایی افقی و پتانسیل نشت آب کم‌تر می‌باشد. در مقابل با انتخاب ضخامت کم‌تر برای لایه‌های بتن‌ریزی، هر چند تعداد درزهای اجرایی افقی، که مسیرهای محتمل برای نشت آب می‌باشند، افزایش می‌یابد ولی درزهای افقی سریعتر و با چسبندگی بیش‌تری با لایه بعدی پوشیده می‌شوند.

۱۱-۸- تجهیزات تراکم

تراکم بتن غلتکی معمولا با استفاده از غلتک انجام می‌پذیرد و شاخص تراکم مطلوب، حصول چگالی مورد نظر برای بتن غلتکی می‌باشد. چگالی (یا دانسیته) بتن غلتکی تابع میزان نیروی دینامیکی تولید شده در واحد عرض غلتک می‌باشد. در انتخاب غلتک باید به عواملی چون قدرت مانور، نیروی تراکم، اندازه غلتک ها، فرکانس، دامنه ارتعاش، سرعت عملیاتی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری غلتک توجه نمود. هر چند میزان حجمی از بتن که غلتک می‌تواند در یک ساعت بکوبد با افزایش ابعاد غلتک و افزایش سرعت آن بیش‌تر می‌شود ولی این الزاما به معنی ایجاد دانسیته بیش‌تر برای بتن

نسبت به حالتی که از غلتک‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود، نیست. ابعاد پروژه، کارآیی بتن، ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی، میزانی از تراکم که توسط بولدوزر پخش تامین می‌شود، و فضای کار معمولا از جمله عوامل تاثیرگذار بر انتخاب نوع غلتک می‌باشند. غلتک‌های بزرگ فقط تا حدود ۱۵ سانتی‌متری قالب‌ها (در رویه‌های بالادست و پایین‌دست و یا سایر نواحی قالب‌بندی شده) می‌توانند تردد نموده و بتن را متراکم نمایند. برای تراکم بتن‌های نزدیک به قالب ها باید از تجهیزات تراکم دستی استفاده شود.

تجربه نشان داده است که اغلب غلتک‌های با فرکانس بیش‌تر و دامنه ارتعاش کم‌تر، بتن غلتکی را بهتر متراکم می‌سازند. برای تراکم بتن غلتکی به طور معمول غلتک‌های ۱۰ تن با دو یا یک استوانه چرخ آهنی، که معمولا برای تراکم روسازی و زیرسازی راه‌ها کاربرد دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

غلتک‌های بزرگ‌تر ۱۵ و ۲۰ تنی که معمولا در ساخت سدهای سنگریزه‌ای به کار می‌روند نیز در سدهای بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی چون دامنه ارتعاش آن‌ها بزرگ‌تر و فرکانس ارتعاش آن‌ها کم‌تر است، این غلتک‌ها با نسبت‌های دانه‌بندی معمول در مخلوط‌های بتن غلتکی تناسب کم‌تری دارند [۱۳].

۱۱-۹- حفاظت و عمل‌آوری

سطوح هر لایه بتن‌ریزی باید به طور پیوسته به مدت ۷ تا ۱۴ روز بسته به نیاز از خشک شدن یا یخ زدن محافظت گردد. سطح بتن باید قبل از بتن‌ریزی لایه بعدی تمیز و عاری از گل و لای یا آلودگی‌های دیگر بوده و از رطوبت کافی برخوردار باشد.

اگر بیش از دو روز از عمر بتن‌ریزی گذشته و بتن به اندازه کافی سخت شده باشد، استفاده از جریان آب علاوه بر دمیدن هوا برای تمیزکاری سطوح لایه بتن مجاز می‌باشد ولی استفاده از ماسه‌پاشی (sand blast) برای تمیزکاری سطوح بتن توصیه نمی‌شود.

اگر در حال تمیزکاری سطح بتن خشک شود، بهتر است قبل از بتن‌ریزی لایه بعدی با آب‌پاشی در حد لازم مرطوب گردد. فایده دیگر مرطوب نگه داشتن سطوح لایه‌های بتن، خنک شدن بتن است که موجب پایین آمدن دمای داخلی و کاهش میزان رشد یا پختگی درزهای اجرایی افقی می‌گردد. تجهیزات آب‌پاشی باید آب را به صورت پودر و مه روی سطوح بتن غلتک خورده بپاشند تا باعث خرابی و شسته شدن و فرسایش سطح لایه بتن نگردند. استفاده از شلنگ دستی برای آب‌پاشی محل‌هایی که ماشین‌آلات به آنجا دسترسی ندارند، مفید است.

در شرایطی که اجرای لایه بتن جدید بر روی لایه بتن قبلی بدون وقفه زیاد صورت گیرد، معمولا نیازی به تمهید خاصی برای آماده‌سازی سطح لایه بتن نخواهد بود. ولی در شرایطی که اجرای لایه‌های متوالی بتن با فواصل زمانی بیش از حد مجاز انجام شود، معمولا اجرای لایه ملات پر سیمان بین دو لایه بتن الزامی خواهد شد. فاصله زمانی مجاز بین لایه‌های متوالی بتن برای شرایط محیطی مختلف در جدول (۱۱-۱) ارائه شده است.

ملات چسباننده بین لایه‌های بتن‌ریزی از نوع ماسه سیمان با عیار ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب ملات و ضخامت ۲ الی ۳ سانتی‌متر توصیه می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که مشخصات و پارامترهای توصیه‌ای فوق در هر پروژه، باید با اجرای بستر آزمایشی (Test Pad) و انجام آزمایش‌های لازم بررسی شده و نتایج حاصله ملاک قضاوت قرار گیرد.

جدول ۱۱-۱- فاصله زمانی مجاز اجرای لایه‌های متوالی بدون ملات چسباننده

دمای متوسط محیط (سانتی‌گراد)	زمان بین دو نوبت بتن‌ریزی متوالی
کم‌تر از ۱۵	۱۰ ساعت
بین ۱۵ تا ۲۰	۸ ساعت
بین ۲۰ تا ۲۵	۶ ساعت
بین ۲۵ تا ۳۰	۵ ساعت
بیش از ۳۰	۴ ساعت

فصل ۱۲

کنترل کیفیت بتن غلتکی

۱۲-۱- کلیات

فرایند «کنترل کیفیت بتن» شامل مجموعه اقدامات لازم برای ارزیابی میزان تطابق بتن اجرا شده با مشخصات فنی خواسته شده پروژه است که در اسناد پیمان درج گردیده یا توسط مهندس مشاور به پیمانکار ابلاغ می‌گردد. هدف اصلی فرایند کنترل کیفیت ارزیابی و کنترل محصول تولید شده (بتن) بر مبنای خواسته‌های کارفرما می‌باشد و لذا این فرایند توسط نماینده فنی کارفرما (دستگاه نظارت) استقرار یافته و راهبری می‌گردد.

فرایند «تضمین کیفیت» شامل مجموعه فعالیت‌ها، سامانه‌ها، و تدابیر مورد نیاز برای اطمینان از اجرای صحیح کلیه مراحل عملیات بتن‌ریزی است به نحوی که از کفایت اقدامات و تمهیدات لازم برای تحقق کیفیت مطلوب بتن اطمینان حاصل گردد. بر این اساس، فرایند تضمین کیفیت در واقع مجموعه اقداماتی است که در خصوص همه مراحل قبل از تولید تا عمل‌آوری بتن باید توسط پیمانکار سازماندهی و اجرا گردد.

بر مبنای توضیحات فوق، حوزه شمول تدابیر و اقدامات پیمانکار در فرایند تضمین کیفیت در برگیرنده کلیه عوامل اثرگذار بر کیفیت نهایی بتن خواهد بود. این عوامل شامل کیفیت مصالح بتن (سنگ‌دانه‌ها، مواد سیمانی، مواد افزودنی، آب و ...)، کیفیت تهیه و نگهداری مصالح بتن، کیفیت و نحوه عملکرد کلیه ماشین‌آلات مورد استفاده در فرایند بتن‌ریزی (ماشین‌آلات تولید، حمل، پخش، عمل‌آوری، و آزمایش بتن)، کیفیت راه‌های دسترسی و سطح ایمنی استقرار یافته در کارگاه، کیفیت و نحوه آماده‌سازی سطوح بتن‌ریزی، کنترل و آزمایش بتن تولید شده در سنین مختلف، و کیفیت و نحوه عملکرد نیروهای انسانی درگیر با همه فعالیت های فوق می‌گردند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد حوزه شمول و تاثیر فرایند تضمین کیفیت کاملا فراتر از حوزه اعمال فرایند کنترل کیفیت بتن می‌باشد و با توجه به مطالب فوق فرایند کنترل کیفیت بتن را می‌توان به‌عنوان یک زیرمجموعه‌ای از فرایند تضمین کیفیت بتن در نظر گرفت که تمرکز و حوزه شمول آن بیش‌تر بر روی کنترل کیفیت بتن، مصالح تشکیل دهنده آن، و عملیات اجرایی مرتبط با بتن می‌باشد.

به طور معمول، علیرغم اعمال کلیه تدابیر و تمهیدات لازم، کیفیت بتن تولیدی به دلیل شرایط متغیر اجرایی و محیطی، تغییرات کیفی مصالح، و نیز خطاهای انسانی همواره ثابت و یکسان نبوده و معمولا متغیر می‌باشد. به همین جهت، طراحی و مطالعه طرح اختلاط بتن غلتکی همواره برای مشخصاتی فراتر از مشخصات تعیین شده در مشخصات فنی مورد نیاز تعین شده در قرارداد انجام می‌پذیرد.

در شرایطی که سیستم تضمین کیفیت بتن استقرار یافته در کارگاه به شکل موثر جاری نبوده و از پویایی لازم برخوردار نباشد، دامنه تغییرات کیفی بتن تولیدی به همان نسبت بزرگ‌تر بوده و برای تحقق اهداف و مشخصات تعیین شده برای بتن و پذیرش بتن تولیدی در فرایند کنترل کیفیت، مشخصات فنی مبنای طراحی طرح اختلاط بتن غلتکی باید به میزان قابل توجهی (برای تامین حاشیه اطمینان مناسب) بالاتر از مشخصات فنی مبنای قرارداد در نظر گرفته شود. این موضوع قطعا هزینه مصالح اولیه و تولید بتن غلتکی را به نحو محسوسی افزایش خواهد داد.

استقرار و پایش اجرا و اعمال صحیح یک سیستم تضمین کیفیت جامع و موثر در کارگاه، مستلزم صرف هزینه برای به خدمت‌گیری پرسنل ویژه برای این سیستم، استفاده از ماشین‌آلات با کیفیت مناسب، و نیزاستفاده از پرسنل اجرایی مجرب در کارگاه می‌باشد. در مقابل، در شرایط استقرار و اجرای یک سیستم تضمین کیفیت موثر و پویا، نوسانات کیفی بتن تولیدی به‌مراتب کم‌تر بوده و متناسب با آن مشخصات فنی مبنای طراحی طرح اختلاط بتن غلتکی را می‌توان به میزان اندکی بالاتر از مشخصات فنی مبنای قرارداد در نظر گرفت و این کاهش در مشخصات فنی مبنای طراحی طرح ختلاط بتن غلتکی به نوبه خود می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های پروژه (به خصوص در موادی که حجم بتن غلتکی زیاد و بیش‌تر از حد متوسط باشد) به همراه داشته باشد. بنابراین، در صورت وجود یک مدیریت منطقی و صحیح اجرایی، فرایند تضمین کیفیت بتن (و به موازات آن فرایند کنترل کیفیت بتن) به‌منزله یک فرایند دارای ارزش افزوده اقتصادی در پروژه نیز خواهد بود.

در سدهای بتنی وزنی متعارف، به طور معمول مقاومت فشاری و دوام بتن، دو شاخص مهم و تعیین کننده در کیفیت و مشخصات فنی مورد نیاز طراحی می‌باشند و در زمان اجرا به راحتی می‌توان با ارتقای دو پارامتر کلیدی فوق در مشخصات فنی مبنای طراحی طرح اختلاط بتن، حاشیه اطمینان لازم برای پوشش نوسانات کیفی بتن تولیدی را تامین نمود.

در سدهای وزنی بتن غلتکی شرایط و خواسته‌های مورد نیاز طراحی ممکن است کاملا متفاوت باشد به گونه‌ای که افزایش مقاومت بتن در طراحی طرح اختلاط بتن غلتکی (و افزایش مقاومت بتن تولید شده) نه تنها موجب ایجاد حاشیه اطمینان بیش‌تر نشده بلکه در برخی موارد می‌تواند عملکرد بتن غلتکی را از بعد نیازهای طراحی تضعیف نماید. در سدهای بتن غلتکی با مواد سیمانی کم و متوسط، ارتقای پارامترهای مورد نیاز طراحی در مشخصات فنی مبنای طراحی طرح اختلاط بتن غلتکی بسیار پیچیده بوده و به سادگی میسر نمی‌گردد. بنابراین به عنوان یک اصل بسیار مهم، فرایند عملیات اجرایی باید به نحوی برنامه‌ریزی و سازماندهی گردد که نوسانات کیفی بتن غلتکی تولیدی به حداقل ممکن کاهش یابد. در این شرایط، مشخصات فنی مبنای طراحی طرح اختلاط بتن غلتکی را می‌توان نزدیک به مشخصات فنی مورد نیاز طراحی بدنه سد در نظر گرفته و با اطمینان بیش‌تری خواسته‌های طراحی را برآورده نمود.

با توجه به شرایط فوق، اگرچه تکنیک و روش اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی آسان‌تر و ساده‌تر از سدهای بتنی وزنی متعارف می‌باشد ولی اجرای بهینه و مطلوب سدهای بتن غلتکی مستلزم یک سازماندهی و مدیریت کاملا منسجم و منضبط است. بر این اساس، تدوین و استقرار سیستم‌های تضمین کیفیت بتن (و یا سیستم کنترل کیفیت بتن) در سدهای بتن غلتکی از اهمیت و حساسیت مضاعفی برخوردار می‌گردد.

سازمان استانداردهای بین‌المللی (ISO) چهار سطح مختلف زیر را برای کنترل کیفی تعریف می‌نماید:

- سطح یک: سیستم کنترل کیفیت صرفا محدود به کنترل و ارزیابی کیفیت محصول نهایی می‌گردد.
- سطح دو: سیستم کنترل کیفیت شامل کنترل فرایند تولید و کنترل و ارزیابی محصول نهایی می‌گردد.
- سطح سه: سیستم کنترل کیفیت شامل ارزیابی و پایش مدیریت ساخت، کنترل فرایند تولید و کنترل و ارزیابی محصول نهایی می‌گردد.

- سطح چهار: سیستم کنترل کیفیت شامل ارزیابی، پایش، و کنترل کیفی مجموعه عوامل تاثیرگذار بر کیفیت تولید، اعم از مصالح، فرایندها، ماشین‌آلات، جریان داده‌ها، عملکرد پرسنل، و ... می‌گردد.

بر اساس رده‌بندی فوق، سیستم کنترل کیفیت بتن متداول را به طور عام در «سطح دو» کنترل کیفی، و سیستم تضمین کیفیت را نیز در «سطح چهار» کنترل کیفی فوق می‌توان در نظر گرفت. مطالب ارائه شده در این فصل از راهنما به صورت موضوعی مستقل از سطح کنترل کیفی هستند ولی سطح الزامات و کنترل های مورد اشاره غالبا منطق بر «سطح دو» کنترل کیفی می‌باشند.

یک نکته بسیار مهم در کلیه سیستم‌های کنترل یا تضمین کیفیت، مستندسازی نتایج و شواهد تمام مراحل فرایند اجرای این سیستم‌ها می‌باشد. در این خصوص باید توجه داشت نتایج این مستندسازی نه فقط در دوره اجرا بلکه در دوره بهره‌برداری نیز برای مقاصدی نظیر کنترل پایداری و ایمنی بدنه سد و برنامه‌ریزی و طراحی عملیات علاج‌بخشی در اثر صدمات احتمالی وارد بر بدنه سد، بسیار مفید و ضروری می‌باشند. با توجه به ملاحظات فوق، نظام مستندسازی مدارک در سیستم کنترل یا تضمین کیفیت باید به نحوی از قبل برنامه‌ریزی و تنظیم گردد که سطح داده‌ها و جزییات مناسبی برای استفاده‌های مختلف مورد نظر به راحتی قابل استخراج و برداشت باشد.

۱۲-۲- رابطه مشخصات فنی با کنترل کیفیت

در نتیجه مطالعات طراحی پروژه‌های سدسازی، نیازها و مشخصات فنی بتن و روش اجرا که رعایت آن‌ها برای تحقق رفتار و سطح ایمنی مورد نظر برای بدنه سد الزامی است، در قالب «نقشه‌ها و مشخصات فنی پروژه» ارائه می‌گردند. مشخصات فنی پروژه شامل مجموعه مستنداتی است که کیفیت بخش‌های مختلف سازه بدنه سد، اجزای متشکله آن و ملاحظات الزامی فرایند ساخت را تشریح می‌نماید. همچنین در مشخصات فنی پروژه، شاخص‌های مهم در کنترل کیفیت فرایند و محصول نهایی (بتن غلتکی) تعیین شده، نحوه آزمایش و اندازه‌گیری این شاخص‌ها، و حدود قابل پذیرش این شاخص‌ها بر مبنای نیازها و مبانی طراحی بدنه سد تعیین می‌گردند. علاوه بر این، سازمان و نحوه اعمال نظارت (کارفرما) بر تامین خواسته‌ها و نیازهای مذکور و نیز نحوه برخورد و تعامل با نتایج مشکوک یا با کیفیت نامطلوب به روشنی در اسناد و مشخصات فنی پروژه بیان می‌گردد. با توجه به گستردگی موضوعات مجموعه مستندات مشخصات فنی پروژه، در تنظیم این اسناد به طور معمول در موارد مرتبط به استانداردها و دستورالعمل‌های فنی رایج در سطح ملی و بین‌المللی (که در برخی موارد رعایت آن‌ها الزامی می‌باشد) ارجاع می‌گردد.

در سدهای وزنی بتن غلتکی، با توجه به ماهیت و نوع عملکرد متفاوت بتن غلتکی و بتن‌های متعارف و سازه‌ای، بهتر است مشخصات فنی «بتن غلتکی» و مشخصات فنی «بتن‌های متعارف» به صورت جداگانه تهیه و تنظیم گردند. همچنین به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهینه‌سازی اقتصادی پروژه، در تنظیم مشخصات فنی سدهای بتن غلتکی باید به ویژگی‌های مصالح موجود و در دسترس در محدوده ساختگاه توجه نموده و در طراحی بدنه سد نیز کیفیت مصالح موجود مد نظر قرار گیرد.

اسناد و مشخصات فنی تنظیم شده پروژه را بسته به ماهیت قرارداد و سطح جزییات و شمول مورد نظر، می‌توان به دو گروه کلی مشخصات فنی تفصیلی (Prescribed Specifications or Method Specifications) و مشخصات فنی عملکردی (Performance Specifications) دسته‌بندی نمود. در مشخصات فنی عملکردی عموما شاخص‌ها و ویژگی‌های عملکردی محصول نهایی (بتن غلتکی) مد نظر قرار گرفته و در اسناد مشخصات فنی تشریح می‌گردد. در حالی‌که در مشخصات فنی تفصیلی، شاخص‌ها و ویژگی‌های عملکردی محصول نهایی، تمامی جزییات و مراحل فرایند تولید محصول نیز تشریح شده و پیمانکار مقید به تبعیت از آن‌ها می‌گردد. این نوع اسناد به طور معمول در قراردادهای سه عاملی (کارفرما، مشاور، و پیمانکار) مورد استفاده قرار می‌گیرند و بدیهی است در شرایط تنظیم مشخصات فنی تفصیلی، نقش نظارتی و مسئولیت راهبری فنی مشاور به‌عنوان نماینده فنی کارفرما در دوره اجرا بسیار برجسته و تعیین کننده خواهد بود.

بر مبنای دسته‌بندی فوق، در صورت تنظیم مشخصات فنی تفصیلی برای پروژه، فرایند انجام کارها صرفا باید از روش‌ها و ضوابط از پیش تعیین شده صورت پذیرد. طبیعتا در این شرایط قدرت مانور و انعطاف‌پذیری پیمانکار برای به‌کارگیری روش‌ها و ایده‌های جدید در فرایند انجام کار نسبتا محدود می‌گردد. این شرایط می‌تواند سبب اطمینان از تطابق مطلوب کیفیت و ویژگی‌های بتن غلتکی با آنچه که در طراحی پیش‌بینی شده است، و همچنین یکنواختی کیفیت بتن تولیدی گردد. از سوی دیگر الزام روش‌ها و ضوابط از پیش تعیین شده برای انجام کار، ممکن است مانع از طرح خلاقیت‌ها و نوآوری‌هایی که می‌توانند منجر به بهینه شدن پروژه از ابعاد فنی و اقتصادی شوند، گردد.

در شرایط تنظیم مشخصات فنی تفصیلی، همان‌گونه که ذکر شد، مسئولیت راهبری فنی کار تا حد زیادی بر عهده مشاور (به‌عنوان نماینده فنی کارفرما) بوده و حضور مشاور در تصمیم‌گیری‌های فنی و اجرایی در خصوص تمام جزییات کارها در طول دوره اجرا ضروری خواهد بود.

در مقابل در شرایطی که مشخصات فنی عملکردی برای پروژه تنظیم گردد، مسئولیت تیم (یا همکار) فنی پیمانکار در خصوص راهبری فنی و تضمین و ارتقاء کیفیت فرایندهای انجام کار و نیز ارتقاء کیفیت محصول تولیدی نهایی، متناسب با سطح انعطاف‌پذیری مشخصات فنی، افزایش یافته و این امکان را برای پیمانکار فراهم می‌آورد که بر اساس شناخت دقیق‌تر شرایط ساختگاه، امکانات و ماشین‌آلات در دسترس، قابلیت‌های پرسنل، و تجارب قبلی خود، فرایندهای اجرایی بدنه سد را از نظر فنی (و اقتصادی) بهینه سازد. بدیهی است در این شرایط تضمین کیفیت و ویژگی‌های مورد نیاز طراحی و بهینه‌سازی فنی فرایندها (و محصول نهایی) بیش‌تر مورد توجه مشاور، به‌عنوان نماینده فنی کارفرما، بوده و بر بهینه‌سازی اقتصادی پروژه اولویت می‌یابد.

انتخاب نوع و سطح انعطاف‌پذیری مشخصات فنی به عوامل مختلفی از جمله ابعاد و احجام کار پروژه، سطح جزییات و میزان شناخت شرایط طبیعی و ژئوتکنیکی ساختگاه در زمان طراحی، نحوه شناسایی منابع قرضه و معادن سنگ‌دانه در محدوده ساختگاه، برنامه زمانی پروژه، و قابلیت‌ها و توانمندی‌های پیمانکاران بستگی دارد.

بر مبنای توضیحات فوق، کاملا مشخص می‌گردد که تعریف و تنظیم سازمان و گستردگی شمول سیستم کنترل کیفیت (توسط نماینده فنی کارفرما) ارتباط تنگاتنگی با نحوه تنظیم مشخصات فنی و ماهیت اسناد قرارداد دارد. بر این اساس، در

شرایطی که مشخصات فنی پروژه به صورت تفصیلی (Prescribed Specifications or Method Specifications) تنظیم شده باشد، سیستم کنترل کیفیت مشاور، به‌عنوان نماینده فنی کارفرما، متناسبا تفصیلی و فراگیر خواهد بود و در مقابل، در شرایط تنظیم مشخصات فنی پروژه به صورت عملکردی (Performance Specifications)، سیستم کنترل کیفیت مشاور محدودتر بوده و صرفا شامل کنترل و ارزیابی کیفیت مطلوب کارایی‌ها و عملکردهای کلیدی پروژه بر اساس مشخصات فنی خواهد بود.

۱۲-۳- الزامات کنترل کیفی موثر

سرعت اجرا در سدهای بتن غلتکی، یکی از موثرترین عوامل در دستیابی به کیفیت مطلوب بتن و در عین حال عملکرد بهینه و کاهش هزینه تمام شده می‌باشد. هر چه سرعت اجرای لایه‌های بتن‌ریزی افزایش یابد، یکپارچگی و نفوذناپذیری بدنه سد افزایش یافته و عملکرد بدنه سد بهبود می‌یابد. با توجه به سرعت پیشرفت بتن‌ریزی، زمانی که نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی اخذ شده از یک لایه بتن در حین اجرا در سنین مورد نظر به‌دست می‌آید، لایه بتن مربوطه در عمق بخش اجرا شده سد (در عمق ۱۰ متری یا بیش‌تر) قرار گرفته است. بدیهی است در این شرایط، در صورت عدم تطابق نتایج به‌دست آمده با الزامات مشخصات فنی، برداشتن لایه مورد نظر از نظر اجرایی غیرممکن خواهد بود. بر این اساس در فرایند کنترل کیفیت بتن، تا حد امکان باید در زمان پخش و تراکم بتن غلتکی روی مقطع سد از برآورده شدن الزامات مشخصات فنی اطمینان کافی حاصل گردد. بنابراین فرایند کنترل کیفیت سدهای بتن غلتکی فقط محدود به کنترل کیفیت بتن سخت شده به عنوان محصول نهایی نیست، بلکه شامل کنترل کیفیت اجزای متشکله، خواص بتن تازه و روش‌های بتن‌ریزی و بررسی ارتباط میان این عوامل و مقاومت طولانی مدت بتن غلتکی نیز می‌گردد.

نکته مهم دیگر در استقرار یک سیستم کنترل (و تضمین) کیفیت موثر، آموزش مستمر کارگران و تکنسین‌های اجرایی پیمانکار است. در پروژه‌های بزرگ سدسازی، درصد قابل توجهی از کارگران فنی و ساده مشغول به‌کار در کارگاه بنا به ملاحظات اقتصادی و اجتماعی، از بین ساکنین محلی انتخاب و جذب می‌گردند که الزاما از توانایی‌ها و مهارت‌های لازم برخوردار نیستند. بنابراین برای حفظ یکنواختی و ارتقاء کیفیت عملیات اجرایی، آموزش حین کار پرسنل پیمانکار (شامل کارگران و پرسنل فنی) بسیار ضروری و تاثیرگذار خواهد بود. این آموزش‌ها باید با حضور بازرسان کنترل کیفی و توسط تکنسین‌های مجرب انجام پذیرد. تکنسین‌های آزمایشگاه و سرپرستان کار باید قبل از شروع عملیات اجرایی بدنه سد آموزش‌های لازم را دریافت نموده باشند به‌گونه‌ای که سطح مهارت آن‌ها در زمان اجرای بستر آزمایشی بتن غلتکی مطلوب و در حد قابل پذیرش باشد.

۱۲-۴- اجرای بستر آزمایشی بتن غلتکی (Test Pad)

یکی از موثرترین روش‌های حصول اطمینان از کیفیت مطلوب طرح اختلاط طراحی شده برای مخلوط بتن غلتکی و کفایت فرایند اجرایی بتن توسط پیمانکار، اجرای بستر آزمایشی (Test Pad) می‌باشد. با اجرای این بستر آزمایشی بتن غلتکی توسط پیمانکار قبل از شروع عملیات بتن‌ریزی اصلی، کلیه مصالح، تجهیزات، ماشین‌آلات، طرح اختلاط بتن، روش‌های حمل، پخش، تراکم، عمل‌آوری، سطح آمادگی پرسنل فنی و اجرایی پیمانکار، و کارایی نظام کنترل و تضمین کیفیت پیمانکار ارزیابی شده و شرایط لازم برای رفع نواقص و نارسایی‌های احتمالی فراهم می‌گردد. بنابراین زمان اجرای بستر آزمایشی باید به نحوی برنامه‌ریزی شود که فرصت زمانی کافی برای ترمیم (افزایش احتمالی) ظرفیت تجهیزات توزین، اختلاط یا انتقال بتن، یا هرگونه اصلاحات مورد نیاز دیگر توسط پیمانکار وجود داشته باشد.

با توجه به اهمیت اهداف و نتایج اجرای بستر آزمایشی، در فرایند اجرای بستر آزمایشی باید تا حد امکان شرایط واقعی عملیات بتن‌ریزی بدنه سد شبیه‌سازی گردد. بنابراین، مصالح، تجهیزات و ماشین‌آلات اصلی مورد استفاده در احداث سد باید قبل از اجرای بستر آزمایشی بتن غلتکی تامین شده و به طور کامل در اختیار کارگاه قرار گرفته باشد. نوع و ظرفیت تجهیزات لازم برای اختلاط، انتقال، پخش و تراکم بتن غلتکی، و همچنین نرخ بتن‌ریزی بستر آزمایشی باید متناسب با برنامه زمان‌بندی اجرای بتن غلتکی بدنه سد در نظر گرفته شود.

۱۲-۵- کنترل کیفیت مصالح

الف- سنگ‌دانه‌ها

به طور کلی رواداری‌ها و ملاحظات مربوط به کیفیت مطلوب سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن غلتکی مشابه با حدود متناظر برای سنگ‌دانه‌های بتن متعارف در نظر گرفته می‌شوند. البته با توجه به مبانی طراحی سدهای بتن غلتکی، در شرایط عدم وجود منابع قرضه مناسب در محدوده ساختگاه و یا هزینه بالای استحصال و حمل مصالح سنگ‌دانه‌ای مرغوب، انعطاف‌پذیری بیش‌تری برای کاربرد طیف گسترده‌تری از مصالح سنگ‌دانه‌ای در بتن غلتکی (در مقایسه با بتن متعارف) وجود دارد به شرط آنکه تاثیر افت کیفیت مصالح سنگ‌دانه‌ای در طراحی بدنه سد و تعیین طرح اختلاط بتن غلتکی لحاظ شده باشد. برای مثال رواداری‌های مربوط به حداکثر درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها و یا درصد مجاز عبوری از الک ۲۰۰ را در سدهای وزنی بتن غلتکی می‌توان افزایش داد (توضیحات تفصیلی در این خصوص در فصل‌های دوم و سوم این راهنما ارائه شده است). در این موارد، پیمانکار باید با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و ارزیابی نتایج حاصل از بستر آزمایشی، مدارک و مستندات فنی لازم برای تأیید کیفیت سنگ‌دانه‌های مصرفی را تنظیم نموده و در اختیار مهندس مشاور قرار دهد [۱۸].

در جدول (۱۲-۱) شرح آزمایش، شماره استاندارد، و تواتر انجام آزمایش‌هایی که در زمان اجرای سدهای بتن غلتکی برای کنترل کیفیت و پذیرش سنگ‌دانه‌ها به طور معمول انجام می‌شوند، ارائه شده است [۱۳]. نمونه‌برداری از سنگ‌دانه‌ها نیز به طور معمول مطابق استانداردهای رایج مانند ASTM D75 و یا دت۲۰۴ انجام می‌گردد.

جدول ۱۲-۱- شرح آزمایش، شماره استاندارد و تواتر انجام آزمایش‌های کنترل کیفی سنگ‌دانه‌های بتن غلتکی

شرح آزمایش	شماره استاندارد	تواتر آزمایش
وزن مخصوص و جذب آب	ASTM C127, ASTM C128 دت ۲۱۰ و دت ۲۱۱	یکبار در ماه یا هر ۵۰۰۰۰ مترمکعب
دانه‌بندی	ASTM C117, ASTM C136 دت ۲۱۸ و دت ۲۰۶	یک بار در روز یا در هر شیفت کاری
درصد رطوبت	ASTM C566, ASTM C70 دت ۲۰۷	قبل از شروع شیفت یا مواقع لزوم
درصد سنگ‌دانه‌های طویل و مسطح	BS 812, ASTM D4791 دت ۲۲۰	یکبار در ماه یا هر ۵۰۰۰۰ مترمکعب
سایش لوس آنجلس	ASTM C131, ASTM C535 دت ۲۱۵	یکبار در ماه یا هر ۵۰۰۰۰ مترمکعب

ب- سیمان

استفاده از سیمان‌های پرتلند نوع ۲، ۴ و ۵ و بعضی سیمان‌های آمیخته پرتلند پوزولانی و روباره‌ای در بتن غلتکی متداول بوده و کنترل کیفیت انواع سیمان‌های پرتلند مطابق استانداردهای ASTM C150 و یا دت ۱۰۱ انجام می‌پذیرد. مشخصات سیمان‌های آمیخته پرتلند روباره‌ای نوع IS (حاوی ۲۵ الی ۷۰ درصد روباره کوره آهن‌گدازی) و پرتلند پوزولانی نوع IP که در استاندارد ملی ایران با شماره ۳۴۳۲ به نام سیمان پرتلند پوزولانی ویژه معرفی شده و ۱۵ الی ۴۰ درصد پوزولان دارد، برای ساخت سدهای بتن غلتکی مناسب بوده و کیفیت آن‌ها مطابق استاندارد ASTM C595 و یا دت ۱۰۲ و دت ۱۰۳ قابل بررسی و کنترل می‌باشد.

کنترل کیفیت سیمان‌های مصرفی در کارگاه را می‌توان بر اساس ارزیابی نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی که توسط کارخانه تولید کننده ارائه می‌گردد و یا در موارد لزوم انجام آزمایش‌های مربوطه در آزمایشگاه مورد تأیید دستگاه نظارت، انجام داد. در پروژه‌های بزرگ (با احجام بتن‌ریزی بالا) کنترل کیفیت سیمان را می‌توان به صورت ویژه در محل کارخانه و هم‌زمان با فرایند تولید انجام داد. در این صورت سیلوهای خاصی در کارخانه برای پروژه تخصیص یافته و فقط سیمان‌های مورد تأیید در این سیلوها ذخیره می‌گردند. بنابراین، سیمان‌هایی که از سیلوهای مذکور به کارگاه ارسال می‌شوند، نیازی به کنترل مجدد نخواهند داشت.

ج- مواد افزودنی

بازدهی و عملکرد مواد افزودنی شیمیایی، مانند مواد کاهنده آب یا هوازا در مخلوط‌های بتن غلتکی، به علت حجم کم آب و مقدار نسبتا کم سیمان، مطلوب نبوده و لذا استفاده از مواد افزودنی شیمیایی در مخلوط‌های بتن غلتکی محدود به

موارد خاص می‌گردد. در هر حال، در صورت نیاز به استفاده از مواد افزودنی، کیفیت این مواد را می‌توان مطابق استانداردهای ASTM C260 و ASTM C494 یا دستورالعمل‌های دت ۴۰۲ و دت ۴۰۱ کنترل نمود.

افزودنی‌های معدنی شامل پوزولان‌ها و مواد شبه‌سیمانی در سدهای بتن غلتکی کاربرد فراوانی دارند. استفاده از پوزولان‌ها سبب تسهیل تراکم، کاهش نفوذپذیری و کاهش روند تولید گرمای هیدراتاسیون در بتن غلتکی و در نتیجه بهبود کیفیت و کاهش هزینه تولید بتن می‌شوند. کنترل کیفیت انواع پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی را بر اساس استاندارد ASTM C618 یا دت ۴۰۳ و کنترل کیفیت روباره کوره آهن‌گدازی را بر اساس استاندارد ASTM C989 یا دت ۴۱۰ می‌توان انجام داد.

د- آب

رواداری‌ها و مشخصات مربوط به آب مصرفی در بتن غلتکی مشابه با بتن‌های متعارف باید مطابق با الزامات استانداردهای BS3148، ACI-318، و یا CRD-C400 کنترل گردد.

۱۲-۶- کنترل کیفیت فرایند ساخت

الف- قبل از شروع بتن‌ریزی بدنه سد

به طور کلی در فرایند طراحی بدنه سد یک حاشیه اطمینان مشخصی برای پوشش دادن اثرات ناشی از عدم قطعیت های داده‌ها و فرضیات پایه طراحی، از جمله تغییرات خواص مصالح در نظر گرفته می‌شود. عدم رعایت مشخصات فنی و دستورالعمل‌های اجرایی استاندارد در زمان ساخت سد، سبب تغییرات بیش از حد کیفیت مصالح و در نتیجه کاهش حاشیه ایمنی یاد شده می‌گردد.

اجرای بستر آزمایشی قبل از شروع بتن‌ریزی بدنه سد، بخش اصلی برنامه کنترل کیفی فرایند ساخت سدهای بتن غلتکی به شمار می‌آید. علاوه بر مزایای پیش‌گفته، با انجام آزمایش‌های لازم بر روی بتن غلتکی بستر آزمایشی، می‌توان کفایت طرح‌های اختلاط مقدماتی، و تجهیزات و روش‌های تولید، انتقال، بتن‌ریزی، پخش، تراکم و عمل‌آوری پیمانکار را در مقایسه با الزامات مندرج در مشخصات فنی پروژه محک زد. طرح‌های اختلاط مقدماتی قبل از اجرای بستر آزمایشی و با استفاده از مصالحی که برای احداث سد در نظر گرفته شده است، در آزمایشگاه ساخته شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. به منظور انتخاب بهترین طرح اختلاط برای استفاده در بستر آزمایشی، می‌توان نوارهای بتنی به عرض ۳ متر و طول ۱۰ متر و ضخامت حدود ۶۰ سانتی‌متر را با استفاده از چند طرح برتر اجرا نمود. حمل بتن از محل تجهیزات تهیه بتن تا محل اجرای بستر آزمایشی می‌تواند توسط لودر یا کامیون انجام شده، توسط بولدوزر کوچک یا وسایل مشابه پخش و با غلتک های ویبره سنگین متراکم گردد. پس از هر ۲ بار عبور غلتک ویبره چگالی بتن تازه اندازه‌گیری می‌شود تا به حداکثر چگالی یا چگالی هدف دست یابند. با بررسی روند افزایش چگالی بتن تازه در برابر تعداد عبور غلتک

می‌توان ارزیابی اولیه‌ای از مشخصه‌های تراکم‌پذیری طرح های اختلاط مورد نظر و تعداد عبور مورد نیاز غلتک برای هریک از آن‌ها به دست آورد.

پس از این مرحله، نوبت به اجرای بستر آزمایشی با استفاده از تحلیل کلیه اطلاعات و تجربیات کسب شده در آزمایش‌های فوق و با طرح اختلاط منتخب می‌رسد. اهدف اجرای بستر آزمایشی و مشخصه‌های ویژه‌ای که طی این فرایند مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، به شرح زیر می‌باشند:

- ارزیابی عملکرد طرح اختلاط
- ساختن بلوک نمونه از بتن غلتکی به منظور کالیبراسیون ابزار سنجش تراکم بتن غلتکی (چگالی‌سنج اتمی)
- ارزیابی فعالیت‌های مرتبط با انتقال و جابه‌جایی بتن غلتکی
- ارزیابی فعالیت‌های بتن‌ریزی و پخش بتن غلتکی
- بررسی و ارزیابی راه‌کارهای جلوگیری از جدایش سنگ‌دانه‌ها از مخلوط بتن
- ارزیابی روش‌های تراکم بتن غلتکی
- ارزیابی روش‌ها و تمهیدات عمل‌آوری بتن غلتکی
- ارزیابی عملکرد تجهیزات و ماشین‌آلات
- ارزیابی میزان تولید دستگاه تهیه بتن مرکزی و کفایت آن با توجه به حجم عملیات بتن‌ریزی
- آموزش و توجیه کارکنان نسبت به وظایف محوله
- ارزیابی نحوه قالب‌بندی یا روش اجرای رویه‌های بالادست و پایین‌دست بدنه سد
- بررسی و ارزیابی نحوه تراکم دستی اطراف قالب‌ها، مجاری عبور آب و سایر محل‌های مورد نیاز
- ارزیابی تمهیدات آماده‌سازی بستر به منظور بتن‌ریزی نوبت بعدی (تمیزکاری، پخش ملات، ...)
- ارزیابی فرایند رشد یا پختگی بتن و زمان ایجاد درز سرد
- تعیین چگالی هدف
- ارزیابی کارایی آزمون تعیین چگالی
- اخذ نمونه‌های لازم از بتن غلتکی برای انجام سایر آزمایش‌های مورد نیاز

ابعاد و حجم بستر آزمایشی تابع حجم بتن غلتکی پروژه می‌باشد، با این حال حداقل حجم بتن بستر آزمایشی در حدود ۱۰۰ مترمکعب توصیه شده است. اهداف مورد نظر از بستر آزمایشی را می‌توان با اجرای بتن غلتکی در سازه‌های موقت پروژه مانند فرازبند و نشیب‌بند تامین نمود.

تعیین مقاومت فشاری تسریع شده ۲۴ ساعته نمونه‌های بتن غلتکی اخذ شده در فرایند اجرای بستر آزمایشی (به کمک نگهداری در آب گرم) و مقایسه آن ها با مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های نگهداری شده در شرایط استاندارد یا مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاصل از مغزه‌گیری، می‌توان شاخص مناسبی برای ارزیابی سریع کیفیت هر لایه بتن غلتکی در زمان اجرا، قبل از پوشیده شدن آن با لایه بتن بعدی، به‌دست آورد.

ب- حین اجرا

پیمانکار باید پس از اجرای بستر آزمایشی و قبل از اجرای بدنه سد، برنامه مدیریت و تضمین کیفیت پیشنهادی خود را بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و نتایج اجرای بستر آزمایشی تهیه و به نماینده فنی کارفرما (دستگاه نظارت) ارائه دهد. اجرای سیستم تضمین کیفیت پیمانکار باید به فردی با تحصیلات مهندسی صنایع یا عمران با گرایش مدیریت ساخت و تجربه کافی که در جریان اجرای بستر آزمایشی آموزش‌های لازم را نیز کسب نموده باشد، واگذار گردد.

برنامه سیستم تضمین کیفیت پیمانکار باید شامل برنامه‌های پیمانکار برای برآورده شدن مشخصات فنی پیمان در مورد تولید سنگ‌دانه‌ها، کنترل دانه‌بندی و سایر مواد متشکله بتن، دستگاه بتن‌ساز، حمل، پخش، تراکم، پاک‌سازی و آماده‌سازی درزهای اجرایی بتن‌ریزی، عمل‌آوری، کنترل دما، تهیه نمونه‌های بتن و کلیه آزمایش‌های کارگاهی و آزمایشگاهی لازم باشد.

دستگاه بتن‌ساز مرکزی باید همواره تحت کنترل و مراقبت عوامل اجرایی پیمانکار و دستگاه نظارت قرار داشته باشد و توصیه می‌شود پس از هر ۳۰ شیفت کاری، یا ماهانه یک بار عملکرد دستگاه با آزمایش CRD-C55 روی سه پیمانه مختلف بتن تولیدی کنترل و درصورت نیاز نسبت به کالیبراسیون دستگاه اقدام شود.

انتخاب سیستم حمل بتن از محل تولید تا محل بتن‌ریزی باید بر اساس برنامه زمان‌بندی و به صورتی باشد که کیفیت بتن تغییر محسوسی نکند، یعنی رطوبت و دمای بتن تا حد امکان ثابت مانده و جدایی در دانه‌بندی رخ ندهد.

درصد رطوبت بتن غلتکی تولیدی باید در چند نوبت در هر شیفت کاری کنترل شود. رطوبت بتن غلتکی در محل بتن‌ریزی و بلافاصله پس از پایان عملیات تراکم توسط دستگاه چگالی‌سنج اتمی با میله مضاعف اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه چگالی‌سنج اتمی باید مطابق مشخصات فنی دستگاه در دوره‌های زمانی مشخصی با استفاده از روش نمونه‌برداری و خشک کردن نمونه در گرمچال مطابق روش ASTM C566،کالیبره شود. آزمایش تعیین درصد رطوبت بوسیله چگالی‌سنج اتمی باید حداقل در ۶ نقطه از هر لایه بتن انجام گرفته و میانگین نتایج به عنوان رطوبت بتن غلتکی لایه مورد نظر در نظر گرفته شود. افزایش درصد رطوبت نسبت به درصد بهینه ممکن است سبب موجدار شدن قابل ملاحظه سطح بتن ضمن عبور غلتک و پس از تراکم لایه گردد. این اتفاق به ویژه پس از وقوع بارندگی در ساختگاه و افزایش رطوبت سنگ‌دانه‌هایی که در سیلوهای روباز پشت دستگاه بتن‌ساز انباشته شده‌اند، رخ می‌دهد. در این صورت باید سریعا نسبت به تعیین درصد رطوبت سنگ‌دانه‌های مصرفی و کاهش میزان آب آزاد مخلوط بتن اقدام گردد. درصد رطوبت سنگ‌دانه‌های پشت دستگاه تهیه بتن را می‌توان به روش CRD-C143 به صورت اتوماتیک اندازه‌گیری و ثبت نمود.

قوام و کارایی بتن غلتکی به روش CRD-C53 یا ASTM C1170 با دستگاه «وی‌بی» (Vebe) اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌برداری معمولا از روی نوار نقاله حامل بتن غلتکی یا در محل بتن‌ریزی و قبل از تراکم باید انجام شود. زمان وی‌بی در خلال آزمایش‌های مقدماتی طرح اختلاط تعیین و سپس در زمان انجام آزمایش‌های اولیه در کارگاه اصلاح و طی مرحله اجرای بستر آزمایشی نهایی می‌گردد. باید سعی شود زمان وی بی حاصل از آزمایش نمونه بتن غلتکی در زمان اجرا همواره ثابت بماند، البته اگر با توجه به تجربه به‌دست آمده در حین اجرا تغییر زمان تعیین شده وی‌بی اولیه (و یا

ذکر شده در مشخصات فنی) سبب بهبود تراکم‌پذیری و چگالی بتن غلتکی گردد، باید مقدار مبنای زمان وی‌بی با زمان جدید جایگزین گردد. در شرایطی که زمان قرائت شده در ۲ بار آزمایش وی‌بی بر روی نمونه‌های متوالی با زمان وی‌بی تعیین شده در مشخصات فنی بیش از ۱۰ ثانیه تفاوت داشته باشد، میزان آب آزاد طرح اختلاط (یا مواد افزودنی روان‌کننده) باید اصلاح گردد.

دمای بتن غلتکی می تواند به ازای هر ۱۰۰ مترمکعب بتن تولیدی مطابق ASTM C1064 یکبار قبل از حمل به محل بتن‌ریزی و یکبار در زمان پخش در محل بتن‌ریزی کنترل شده و با توجه به فصل سرد یا گرم با حدود ذکر شده در مشخصات فنی مقایسه شود.

سطوح لایه‌های بتن‌ریزی، یا سایر سطوحی که بتن‌ریزی بر روی آن انجام می‌یابد، باید قبل از بتن‌ریزی تمیز و عاری از گل و لای و مواد سست یا روغنی باشند تا چسبندگی بین لایه‌های بتن به نحو مطلوبی ایجاد شده و بدنه سد عملکردی یکپارچه و بدون نشت آب زیاد داشته باشد.

هم‌زمان با سنجش درصد رطوبت بتن غلتکی، چگالی بتن پس از هر نوبت بتن‌ریزی و تراکم با دستگاه چگالی‌سنج اتمی با میله مضاعف مطابق با ASTM C1040 روش B یا CRD-C64 باید در حداقل ۶ نقطه اتفاقی کنترل شود. قرائت‌ها باید در پایین، وسط و ۷۵ میلی‌متر زیر سطح لایه بتن‌ریزی شده انجام گیرد و میانگین نتایج به‌دست آمده ملاک تصمیم‌گیری قرار گیرد.

برای کالیبراسیون اولیه دستگاه چگالی‌سنج اتمی، علاوه بر آزمایش‌های آزمایشگاهی، می‌توان در مرحله اجرای بستر آزمایشی بلوکی از بتن غلتکی به طول و عرض ۵۰۰ میلی‌متر و در ضخامتی معادل ۵۰ میلی‌متر بیش‌تر از ضخامت لایه‌های بتن‌ریزی و آن را تا ۹۸ الی ۱۰۰ درصد چگالی هدف متراکم نمود. سپس با اندازه‌گیری جرم و ابعاد بلوک یا مغزه‌های اخذ شده از آن، می‌توان چگالی دقیق بلوک آزمایشی مذکور را اندازه‌گیری و با مقدار حاصل از قرائت چگالی‌سنج اتمی (با روش فوق) مقایسه نمود. با این روش دقت اندازه‌گیری دستگاه مشخص شده و در صورت لزوم دستگاه کالیبره می‌گردد. از بلوک آزمایشی فوق می‌توان به صورت روزانه برای تنظیم و کالیبره نمودن دستگاه چگالی‌سنج اتمی استفاده نمود.

در ارزیابی و قضاوت در خصوص کیفیت بتن، مقاومت فشاری همواره به عنوان یکی از مشخصه‌های کلیدی همواره مورد توجه بوده است. تهیه نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی با استفاده از میز لرزان به روش CRD-C-160 یا ASTM C1176 انجام می‌گیرد. در این روش نمونه بتن غلتکی در سه لایه درون قالب استوانه‌ای استاندارد ریخته شده و هر لایه با قرار دادن وزنه اضافه استاندارد بر سطح لایه روی میز لرزان متراکم می‌گردد تا زمانی که مقداری ملات دور تا دور محیط وزنه اضافه بار در فاصله میان وزنه و سطح درون قالب مشاهده شود.

ج – پس از اجرا

برای تعیین مشخصات بتن غلتکی سخت شده بدنه سد به صورت درجا می‌توان از روش مغزه‌گیری استفاده نمود. تعیین مقاومت فشاری و چگالی مغزه‌های اخذ شده از بدنه سد بهترین شاخص برای سنجش و ارزیابی کیفیت بتن اجرا شده، وضعیت تراکم بتن در اعماق مختلف (و در ارتفاع هر لایه بتن)، و تشخیص میزان چسبندگی و یکپارچگی بین لایه‌های متوالی بتن در مقایسه با مبانی و فرضیات طراحی باشد. معمولا عملیات مغزه‌گیری پس از اتمام عملیات بتن‌ریزی بدنه یا در خلال توقف عملیات بتن‌ریزی به دلایل مختلف (نظیر اجرای گالری‌ها یا سایر تاسیسات مدفون) انجام می‌شود تا خللی در روند کار بتن‌ریزی پیش نیاید. قطر معمول مغزه‌های بتن حدود ۱۵۰ میلی‌متر و طول مغزه‌ها معمولا تا حدود ۱/۵ متر در نظر گرفته می‌شود. گاهی اوقات مغزه‌ها در حین عملیات حفاری و مغزه‌گیری از محل درزهای اجرایی افقی به دلیل چسبندگی ضعیف این درزها می‌شکنند. در این موارد استفاده از محلول حفاری پلیمری و تکنسین‌های حفاری باتجربه کمک شایانی به پیش‌گیری از این مشکل می‌نماید.

پس از اتمام عملیات اجرایی بتن‌ریزی بدنه سد، کلیه مستندات تهیه شده از فرایند اجرا و کنترل کیفیت بتن باید گردآوری، تنظیم و دسته‌بندی شده و «گزارش پایانی عملیات بتن‌ریزی بدنه سد» با تشریح و ارائه مباحث و نتایج کلیدی فرایندهای مذکور تهیه گردد. این گزارش هم از بعد تامین داده‌ها و مستندات لازم برای پایش و ارزیابی پایداری و ایمنی بدنه سد در دوره بهره‌برداری و هم از بعد ارتقاء تجربه و دانش بومی برای طراحی و اجرای سدهای وزنی بتن غلتکی آتی بسیار مهم و کاربردی خواهد بود.

با توجه به اهداف و رسالت گزارش پایانی عملیات بتن‌ریزی بدنه سد، این گزارش باید شامل اطلاعاتی نظیر کلیه نمودارهای حاصل از آزمایش‌های کنترل کیفی ادواری و مقطعی، تفسیر نتایج آزمایش‌ها و اقدامات اصلاحی و جبرانی انجام یافته در جهت رفع نقایص و بهبود کیفیت اجرای کار در مقاطع مختلف، و همچنین تغییرات مشخصات فنی به همراه و دلایل توجیهی آن، باشد.

شایان ذکر این که گزارش‌های پایانی پروژه محدود به گزارش پایانی عملیات بتن‌ریزی نبوده و این گزارش‌ها معمولا به صورت موضوعی برای فعالیت های مختلف اجرایی نظیر بتن‌ریزی، ابزار دقیق، تزریق‌های تحکیمی و تماسی، تزریق‌های آب‌بندی پی، تجهیزات هیدرومکانیک، تاسیسات برقی و مکانیکی، و .... تهیه می‌گردند.

بدیهی است همان‌گونه که ذکر شد مستندات مربوط به گزارش پایانی عملیات بتن‌ریزی بدنه سد (و سایر گزارش‌های در نظر گرفته شده در سیستم کنترل کیفیت) باید به صورت سازمان یافته و هم‌زمان با پیشرفت عملیات اجرایی تهیه و گردآوری شود به‌گونه‌ای که از ثبت همه اطلاعات و داده‌های مهم و ارزشمند پروژه اطمینان حاصل شده و این اطلاعات به دلایل مختلف نظیر تغییر کارشناسان و پرسنل پیمانکار (و یا دستگاه نظارت) مخدوش نگردند.

۱۲-۷- معیارهای پذیرش

معیارهای پذیرش نتایج آزمایش‌های مختلف انجام یافته در فرایند اجرای سیستم کنترل کیفیت بتن معمولا بر مبنای نیازهای طراحی به طور شفاف در اسناد و مشخصات فنی پروژه ارائه شده و یا به مراجع و دستورالعمل‌های ذیربط ارجاع می‌گردد. در ادامه مطالب این بخش، به حدود متعارف معیارهای پذیرش برای پارامترهای کلیدی موثر در کیفیت بتن غلتکی، شامل روانی و تراکم‌پذیری مخلوط بتن غلتکی، چگالی بتن غلتکی، و مقاومت فشاری بتن غلتکی، اشاره می‌گردد. البته با توجه به مبانی و فرضیات پایه طراحی بدنه سد، معیارهای پذیرش برای سایر پارامترهای رفتاری بتن غلتکی که بر ایمنی و رفتار بدنه سد اثرگذار هستند، در مشخصات فنی پروژه باید تنظیم و ارائه گردد.

الف- روانی و تراکم‌پذیری مخلوط بتن غلتکی

مهم‌ترین شاخص کنترل و ارزیابی میزان روانی و تراکم‌پذیری مناسب در مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش زمان تراکم ارتعاشی Vebe می‌باشد. زمان تراکم ارتعاشی (Vebe) مدت زمان لازم برای ارتعاش وزنی مخلوط بتن غلتکی به‌منظور پر کردن فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها توسط خمیر موجود در مخلوط می‌باشد. درصورتی‌که زمان تراکم ارتعاشی وی‌بی نمونه‌های اخذ شده در محل بتن‌ریزی بیش از ۱۰ ثانیه با زمان تراکم ارتعاشی وی بی طرح‌های اختلاط مصوب اختلاف داشته باشد، مخلوط بتن غلتکی قابل پذیرش نبوده و باید هر چه سریع‌تر نسبت به اصلاح فرآیند تولید اقدام گردد.

ب- چگالی بتن غلتکی

بر اساس معیار پذیرش نتایج چگالی بتن غلتکی تازه کوبیده شده در غالب پروژه‌ها، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی بتن غلتکی باید بیش‌تر از:

- ۹۸ درصد چگالی حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده ASTM D1557، یا
- چگالی بتن غلتکی تعیین شده با استفاده از میز لرزان (Vebe) طبق ASTM C1170، یا
- چگالی هدف تعیین شده در مشخصات فنی، باشد.

درصورتی که میانگین چگالی هر لایه بتن غلتکی معیار پذیرش فوق را برآورده نسازد، عملیات تراکم بتن (با غلتک) باید تا زمان تحقق شرایط فوق ادامه یابد. درصورتی که با تداوم عملیات تراکم، باز هم چگالی مطلوب برای بتن اجرا شده به‌دست نیاید، با نظر نماینده فنی کارفرما (دستگاه نظارت) لایه بتن مشکوک باید از سطح کار برداشته شده و دور ریخته شود.

ج- مقاومت فشاری بتن غلتکی سخت شده

با توجه به سرعت بالای بتن‌ریزی در سدهای بتن غلتکی، تصمیم‌گیری در خصوص کفایت یا عدم کفایت بتن غلتکی تازه باید در مدت زمان کوتاهی پس از اجرا انجام یابد. بنابراین کنترل کفایت هر لایه بتن باید بر مبنای نتایج مقاومت تسریع شده ۲۴ ساعته نمونه‌های بتن اخذ شده از آن لایه انجام یابد.

در فرایند اجرای بستر آزمایشی، بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام یافته یک سری روابط همبستگی بین مقادیر مقاومت فشاری تسریع شده ۲۴ ساعته و مقاومت نمونه‌های نگهداری شده در شرایط استاندارد در سن ۹۰ روز (یا سنین دیگر تعیین شده در مشخصات فنی) تدوین می‌گردد. بنابراین بر مبنای نتایج مقاومت تسریع شده ۲۴ ساعته نمونه‌های بتن مورد نظر، می‌توان مقاومت فشاری هر لایه بتن را در سن مورد نظر تخمین زده و با مقاومت هدف تعیین شده در مشخصات فنی مقایسه نمود. به طور معمول معیارهای پذیرش ارائه شده در آیین‌نامه بتن حجیم ایران قابل اعمال بر روی نتایج مقاومت فشاری (تخمینی) نمونه‌های بتن غلتکی اخذ شده از هر لایه بتن می‌باشد. در صورتی که نتایج نمونه‌های اخذ شده معیارهای پذیرش را ارضا نکند باید هر چه سریع‌تر نسبت به اصلاح فرآیند تولید یا اجرا و در صورت عدم موفقیت نسبت به اصلاح طرح‌های اختلاط اقدام گردد.

پیوست ۱

مشخصات سدهای وزنی بتن غلتکی

توضیح اعداد به کار رفته در جدول برای انواع رویه‌های سد:			
رویه پله‌ای	(*)	(*)	Stepped face
رویه بتن متعارف با قالب	(1)	(1)	Traditional concrete against formwork
رویه بتن متعارف با قالب و پوشش ژئوممبرین	(2)	(2)	Traditional concrete against formwork with external geomembrane
رویه بتن غلتکی با قالب	(3)	(3)	RCC against formwork
رویه بتن غلتکی با قالب و پوشش ژئوممبرین	(4)	(4)	RCC against formwork with external geomembrane
رویه بتن متعارف با پانل‌های پیش‌ساخته بتنی	(5)	(5)	Traditional concrete against precast concrete panels
رویه بتن متعارف با پانل‌های پیش‌ساخته بتنی و ژئوممبرین	(6)	(6)	Traditional concrete against precast concrete panels with geomembrane
رویه بتن غلتکی با پانل‌های پیش‌ساخته بتنی	(7)	(7)	RCC against precast concrete panels
رویه بتن غلتکی با پانل‌های پیش‌ساخته بتنی و ژئوممبرین	(8)	(8)	RCC against precast concrete panels with geomembrane
رویه بتن غلتکی با پانل‌های پیش‌ساخته بتنی و پوشش غشایی (گرم اجرا شده)	(9)	(9)	RCC against precast concrete panels with hot poured membrane
رویه بتن متعارف با بلوک‌های پیش‌ساخته بتنی	(10)	(10)	RCC against precast concrete blocks
رویه بتن مسلح (که قبل از بتن غلتکی اجرا شده است)	(11)	(11)	Reinforced conventional concrete cast before RCC placement
رویه بتن مسلح (که بعد از بتن غلتکی اجرا شده است)	(12)	(12)	Reinforced conventional concrete cast after RCC placement
رویه بتن مسلح که در مقابل قطعات پیش‌ساخته یا قالب‌های لغزان اجرا شده‌اند	(13)	(13)	Reinforced concrete cast against precast units or slip-formed facing elements
رویه با المان‌های جداگانه	(14)	(14)	Slip-formed/extruded facing elements
رویه بتن غلتکی متکی به خاکریز	(15)	(15)	RCC supported by fill shoulders
رویه بتن غلتکی متراکم شده بدون قالب	(16)	(16)	Mechanically compacted unformed face of RCC
رویه بتن غلتکی بدون قالب	(17)	(17)	Unformed face of RCC
سایر موارد	(18)	(18)	Other
توضیح حروف اختصاری به‌کار رفته در جدول برای نوع پوزولان‌های مورد استفاده در بتن غلتکی:			
پوزولان مصنوعی (خاکستر بادی) با آهک زیاد	C	C	High-lime flyash (ASTM Class C)
پوزولان مصنوعی (خاکستر بادی) با آهک کم	F	F	Low-lime flyash (ASTM Class F)
ماسه نرم	M	M	Milled sand
پوزولان طبیعی	N	N	Natural pozzolan (ASTM Class N)
مخلوط خاکستر بادی و روباره کوره آهن‌گدازی با یا بدون آهک ریزدانه	R	R	ROLAC (mixture of flyash and slag with or without limestone fines)
روباره آتشفشانی	S	S	Ground-granulated blast-furnace slag

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Pie Pol	Iran	Gravity	Karkeh	01/07/1999	01/07/2000	15	300	130	270	-	-12	-	-12	300	300	130	0
Kahir	Iran	Hardfill	Kahir	-/2014	16/07/2016	55	380	485	665	V	-12	0.8	-12	300	300	80	0
Cheshmeh Ashegh	Iran	Gravity	Cheshmeh Ashegh	-/2012	-/2013	60	360	200		V / 0.30	-5	0.70	-5	300	300	135	60 (N)
Zirdan	Iran	Gravity	Kajoo	07/08/2016	10/08/2016	65	350	265	465		-5		-3	300	300	98	42 (N)
Jahgin	Iran	Gravity	Jahgin	04/05/2016	05/05/2016	78	220	232	382	V / 0.3	(3) (3)	0.75	-3	300	300	105 /160	90 (N) / 90
Higher Dehroud	Iran	Gravity	Firooz Abad	-/2010	-/2014	91	200	310	338	V	-3	0.80	-3	300	300	140	0
Javeh	Iran	Hardfill	Javeh Roud	11/07/2016	13/02/2016	98	319	650	720	0.9	-3	1.2	-3	300	300	94	31 (N)
Shafaroud	Iran	Gravity	Shafaroud	14/03/2016	15/12/2016	127	394	950	1180	0.1 / 0.5	-3	0.8	-3	300	300	140	0
Chamsir	Iran	Gravity	Zohreh	-/2015	-/2017	155	580	1600		V	-3	0.70	-3	300	300	140 / 180	0
Boussiaba	Algeria	Gravity	Boussiaba	08/05/2016	08/11/2016	51	310	160	190	V	-2		-1	300	300	112	28 (F)
Boussiaba	Algeria	Gravity	Boussiaba	08/05/2016	08/11/2016	51	310	160	190	V	-2		-1	300	300	112	28 (F)
Beni Haroun	Algeria	Gravity	El Kebir	01/10/1998	01/07/2000	118	714	1690	1900	V	-1	0.8	-1	300	300	82	143 (F)
Koudiat Acerdoune	Algeria	Gravity	Wadi Isser	06/05/2016	08/06/2016	121	500	1650	1850	0.65	-1	0.65	-1	300-400	300-400	77	87 (F)
Capanda	Angola	Gravity	Kwanza	01/10/1989	01/05/1992	110	1203	757	1154	V	-6	0.7	(14)(10)	400	400	70	100 (M)
Urugua-i	Argentina	Gravity	Urugua-i	01/04/1988	01/04/1989	77	687	590	626	V	-6	0.8	-17	400	400	60	0
Wright's Basin	Australia	Gravity	Point Hut Creek	01/06/1989	01/08/1989	18	86	9	9	V	-7	1	-16	300	300	145	73 (F)
Craigbourne	Australia	Gravity	Coal	01/04/1986	01/06/1986	25	247	22	24	V	-7	1	-17	300	300	70	60 (F)
Kroombit	Australia	Gravity	Kroombit Creek	01/06/1992	01/10/1992	26	250	84	110	V	-1	0.7	-1	300	300	82	107 (F)
Burton Gorge	Australia	Gravity	Isaac	01/09/1992	01/11/1992	26	285	64	68	V /1	(8)(17)	0.80 /1	-3	300	300	85	0
Loyalty Road	Australia	Gravity	Darling Mills Creek	01/12/1995	01/04/1996	30	111	20	22	V	-7	0.8	-7	300	300	80	0 (S)
Lower Molonglo	Australia	Gravity	Unnamed creek	01/06/1994	01/08/1994	32	120	22	27	V	-1	0.8	-1	300	300	96	64 (F)
North Para	Australia	Gravity	North Para	07/06/2016	07/09/2016	33	206	50	50	V	-3		-3	300	300	60	160 (F)
Copperfield	Australia	Gravity	Copperfield	01/05/1984	01/09/1984	40	340	140	156	V	-3	V / 0.9	(3)(17)	300	300	80	30 (F)
Cadiangullong	Australia	Gravity	Cadiangullong	01/05/1997	01/12/1997	43	356	114	123	V	-3	0.75	-1	300	300	90	90 (F)
Meander	Australia	Gravity	Meander	07/01/2016	07/08/2016	47	180	85	85	V	-4	0.7	-10	300	300	70	
Wyaralong	Australia	Gravity	Teviot Brook	10/04/2016	10/12/2016	48	464	173			-1		-1	300	300	85	85 (F)
Paradise	Australia	Gravity	Burnett	04/06/2016	05/09/2016	50	940	400	400	V	-8		-3	310	310	63	
New Victoria	Australia	Gravity	Munday Brook	01/03/1991	01/08/1991	52	285	121	135	V	-14	0.325 / 0.8	-14	300	300	79	160 (F)
Enlarged Cotter	Australia	Gravity	Cotter	11/08/2016	12/12/2016	82	350	369	400	V	-3	0.75	-3	300	300 400	70	120 (F)
Carnaúba	Brazil	Gravity	Quixeré	02/02/2016	02/11/2016	19	700						*	300	300	100	0
Rio do Peixe	Brazil	Gravity	Do Peixe	01/12/1996	01/12/1997	20	300	20	34	V	-1	0.8	-1	300	300	120 /90	0
Bandeira de Melo	Brazil	Gravity	Paraguaçu	03/09/2016	-/2004	20	320	75	87		-1		-1	300	300	70	0
Pedras Altas	Brazil	Gravity	Itapicuru	-/2000	-/2001	24	1090	172	192					300	300	80	0
Sitio Trairas	Brazil	Gravity	Seridó	01/10/1994	-/1995	25	440	27	28		-1			300	300	80	0
Caraibas	Brazil	Gravity	Caraibas	01/07/1990	01/09/1990	26	160	18	22	0.1	-1	0.8	-3	300	300	58	16 (N)
Do Prata	Brazil	Gravity	Do Prata	01/09/1993	01/11/1994	26	405	61	75				*	300	300	80	0
Arthur Tavares de Melo	Brazil	Gravity	Itambé	-/2004	-/2005	27	306	50					*	300	300	80	0

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Gameleira	Brazil	Gravity	Gameleira	01/12/1990	01/04/1991	29	150	27	29	V	-1			400	400	65	0
Berarello	Brazil	Gravity	Arroio Burati	01/08/1998	01/07/1999	29	210	60	70	V	-13		-12	300	300	72	18 (N)
Varzea Grande	Brazil	Gravity	Picuí	01/10/1994	01/10/1994	31	135	27	28		-1		-3	300	300	56	14 (N)
Cova da Mandioca	Brazil	Gravity	Cova da Mandioca	01/09/1993	01/12/1994	32	360	71	75	V	-1	0.75	-3	400	400	80	0
Ponto Novo	Brazil	Gravity	Itapicuru-açu	01/07/1998	01/12/1999	32	266	90	105		-1		-3	300	300	72	18 (N)
Pelo Sinal	Brazil	Gravity	Taperobá	-/1992	-/1993	34	296	69	80		-1			300	300	100	0
Lajeado	Brazil	Gravity	Tocantins	01/06/2016	01/12/2016	34	2100	210	1330					300	300	30	40 (S)
Val de Serra	Brazil	Gravity	Ibicui-Mirim	01/11/1997	01/07/1998	37	675	69	95	V	-13		-12	300	300	60	30 (F)
Rosal	Brazil	Gravity	Itabapoana	-/1998	01/09/1999	37	212	45	75		-1		-3	300	300	45	55 (S)
Estreito	Brazil	Gravity	Tocantins	-/2000	-/2001	40	534	12	15					300	300	64	16 (N)
Guilman- Amorin	Brazil	Gravity	Piracicaba	-/1998	-/1999	41	143	23	72					300	300	80	20 (N)
Umari	Brazil	Gravity	do Carmo	-/1999	-/2001	42	2308	644	658		-12			300	300	70	0
Pirapama	Brazil	Gravity	Pirapama	-/2000	-/2001	42	300	87	137		-1			300	300	90	0
Belo Jardim	Brazil	Gravity	Ipojuca	01/09/1996	-/1997	43	420	81	93		-1		-1	300	300	58	15 (N)
Fundão	Brazil	Gravity	Jordao	-/2003	-/2004	43	445	180	210					300	300	80	0
Pindobaçu	Brazil	Gravity	Itapicuru-Aço	-/2003	-/2004	44	210	75	85					300	300	70	0
Acauã	Brazil	Gravity	Paraíba	-/1993	-/1994	46	375	674			-1		-3	300	300	56	14 (N)
Camará	Brazil	Gravity	Riachão	01/09/2016	02/06/2016	50	465			V	-1	0.8	-1	300	300	80	0
Peixe Angical	Brazil	Gravity	Tocantins	-/2004	-/2005	50	400	500	982					300	300	70	0
Camará	Brazil	Gravity	Riachão	01/09/2016	02/06/2016	50	465			V	-1	0.8	-1	300	300	80	0
Peixe Angical	Brazil	Gravity	Tocantins	-/2004	-/2005	50	400	500	982					300	300	70	0
Canoas	Brazil	Gravity	Saõ Gonçalo	01/08/1994	01/05/1995	51	116	87	93	0.1	-1	0.8	-10	300	300	64	16 (N)
Candonga	Brazil	Gravity	Doce	-/2003	-/2004	53	311	236	356					300	300	90	0
Candonga	Brazil	Gravity	Doce	-/2003	-/2004	53	311	236	356					300	300	90	0
João Leite	Brazil	Gravity	João Leite	03/01/2016	-/2003	55	380	270	290					300	300	100	0
João Leite	Brazil	Gravity	João Leite	03/01/2016	-/2003	55	380	270	290					300	300	100	0
Saco de Nova Olinda	Brazil	Gravity	Gravata	01/07/1986	01/10/1986	56	230	132	143	V	-1	0.8	-3	400	400	55	15 (N)
Santa Cruz do Apodi	Brazil	Gravity	Apodi	-/1999	-/2000	58	1660	1023	1120					300	300	80	0
Castanhão	Brazil	Gravity	Congonhas	-/2000	01/12/2016	60	668	890	1030					300	300	85	0
Castanhão	Brazil	Gravity	Congonhas	-/2000	01/12/2016	60	668	890	1030					300	300	85	0
Jucazinho	Brazil	Gravity	Capiibaribe	01/11/1996	01/10/1998	63	442	472	500	V	-12	0.75	-1	300	300	64	16 (N)
Dona Francisca	Brazil	Gravity	Jacuí	01/06/1999	01/10/2000	63	670	485	665		-1		-3	300	300	72	18 (N)
Jucazinho	Brazil	Gravity	Capiibaribe	01/11/1996	01/10/1998	63	442	472	500	V	-12	0.75	-1	300	300	64	16 (N)
Dona Francisca	Brazil	Gravity	Jacuí	01/06/1999	01/10/2000	63	670	485	665		-1		-3	300	300	72	18 (N)
Salto Caxias	Brazil	Gravity	Iguaçu	01/01/1996	01/07/1998	67	1083	912	1438	V	-13	0.75	-1	300	300	80	20 (F)
Santa Clara-Jordão	Brazil	Gravity	Jordão	03/12/2016	-/2004	67	588	438	504		-1		-1	300	300	60	30 (F)
Santa Clara	Brazil	Gravity	Mucari	-/2008	-/2009	67	540	520	600					300	300	80	0
Salto Caxias	Brazil	Gravity	Iguaçu	01/01/1996	01/07/1998	67	1083	912	1438	V	-13	0.75	-1	300	300	80	20 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Santa Clara-Jordão	Brazil	Gravity	Jordão	03/12/2016	-/2004	67	588	438	504		-1		-1	300	300	60	30 (F)
Santa Clara	Brazil	Gravity	Mucari	-/2008	-/2009	67	540	520	600					300	300	80	0
Cana Brava	Brazil	Gravity	Tocantins	01/02/2000	01/10/2016	71	510	400	620		-1		-3	300	300	45	55 (S)
Tucuruí-2nd Phase	Brazil	Gravity	Tocantins	01/06/1999	01/09/2000	78	1541	76	8800		-3		-3	300	300	70	30 (N)
Serra do Facão	Brazil	Gravity	Sao Marcos	02/09/2016	-/2003	80	326	600	700					300	300	90	0
Mauá	Brazil	Gravity	Tibagi	10/01/2016	11/05/2016	85	745	633	783	V	-2	0.8	-10	300	2400	75	0
Jordão	Brazil	Gravity	Jordão	01/01/1995	01/02/1996	95	550	570	647	V	-1	0.74	-3	400	400	65	10 (N)
Pangue	Chile	Gravity	Bio-Bio	01/01/1995	01/02/1996	113	410	670	740	V	-1	0.8	-3	300	300	80	100 (N)
Ralco	Chile	Gravity	Bio-Bio	02/01/2016	03/09/2016	155	360	1596	1640	V	-3	0.8	-3	300	300	133 / 95	57 (N) / 50
Wenquanbao	China	Thin Arch	Tanghe	01/10/1992	01/06/1994	48	188	55	63	V	-4	0.3	-3	300	300	110 / 69	68 (F) / 85
Shankou N°3	China	Thin Arch	Chengjiang	01/02/2000	01/01/2016	57	179	90	119	V	-3	0.75	-3	330	3000	105 /63	86 (F) / 80
Puding	China	Thin Arch	Sanchahe	01/06/1992	01/05/1993	75	196	103	145	V	-1	0.35	-1	300	300	85 /54	103 (F) / 99
Linhekou	China	Thin Arch	Lanhe	01/12/2016	03/06/2016	100	311	229	293	curve	-3	curve	-3	300	3000	74 /66	111 (F)/111
Bailianya	China	Thin Arch	Dongpi	-/2006	-/2007	105	422	485	560	V	-1	0.335	-1	300	3000	72 /56	108 (F) /84
Zhaolaihe	China	Thin Arch	Duhe	03/03/2016	05/05/2016	107	206	166	254	curve	-3	curve	-3	300	3000	84 /126	126 (F)/103
Huanghuazhai	China	Thin Arch	Getu	-/2007	-/2008	110	275	280								52	96 (F)
Shapai	China	Thin Arch	Caopo	01/03/1999	01/06/2016	132	230	365	392	V /-0.1	-3	0.21	-3	300	300	115 /91	77 (F) /91
Dahuashui	China	Thin Arch	Qingshui	05/04/2016	06/11/2016	135	198	550	650	curve	-3	curve	-3	300	3000	81 /94	81 (F) /94
Hongpo	China	Arch-Gra.	Qinggoushui	01/07/1998	01/11/1999	55	244	71	77	V	-3	0.5	-1	300	3000	54	99 (F)
Xibingxi	China	Arch-Gra.	Longshanxi	01/12/1994	01/07/1995	64	93	25	33	V / 0.08	(4) (4)	0.65	-3	300 - 350	300 - 350	80 /79	120 (F)/105
Longshou N°1	China	Arch-Gra.	Heihe	01/03/2000	01/06/2016	80	258	187	210	V / 0.2	(1) (1)	0.75	-1	300	3000	96 /58	109 (F)/113
Helong	China	Gravity	Hailanhe	01/08/1999	02/01/2016	30	244	43	89	V	-1	0.75	-10	300	2000	113	113 (F)
Songyue(1st Stage)	China	Gravity	Hailanhe	01/01/1998	01/04/1999	31	271	44	77	V	-1	0.73	-10	300	2000	80	100 (F)
Bailongtan	China	Gravity	Hongshuihe	01/10/1995	01/04/1996	34	247	62	80	V	-1	0.7	-10	300	300	73 /99	110 (F) /60
Yanwangbizi	China	Gravity	Dalinghe	-/1997	-/2001	35	383	87	224							64	118 (F)
Mantaicheng	China	Gravity	Gayahe	01/01/1993	01/12/1996	37	337	78	100	V	-1	0.75	-10	300	1000	60	120 (F)
Shimantan	China	Gravity	Gunhe	01/04/1994	01/12/1995	40	650	272	351	V	-3	0.75	-3	300	300	98 /51	98 (F) /107
Guangzhou PSS - L	China	Gravity	Liuxihe	01/10/1991	01/12/1992	43	153	32	57	V	-1	0.7	-3	300	300	62	108 (F)
Xiao Yangxi	China	Gravity	Xiaoyangxi	02/01/2016	02/10/2016	45	118	47	49	V	-3	0.75	-3	350	3500	138 /60	113 (F) /90
Baishi	China	Gravity	Dalinghe	01/04/1997	01/09/1999	50	513	111	503	V/0.1	(1) (1)	0.7	-1	300	300	72	58 (F)
Yushi	China	Gravity	Biliuhe	-/1999	-/2001	50	267		233							70	70 (F)
Rongdi	China	Gravity	Dulanghe	01/11/1988	01/07/1989	53	136	61	74	V	-7	0.75	-10	300	300	90 / 69	140 (F)/111
Huizhou PSS - U	China	Gravity	Xiaojinhe	05/12/2016	07/05/2016	56	168	84	93	V	-1	0.75	-1	300	300	64	125 (F)
Gaobazhou	China	Gravity	Qingjiang	01/11/1998	01/04/2000	57	440	210	940	V	-9	0.75	-1	300	300	123 /86	100 (F) /86
Kengkou	China	Gravity	Youxi	01/11/1985	01/04/1986	57	123	43	62	V	-9	0.75	-10	250&500	250&500	60 /60	120 (F) /80
Daguangba	China	Gravity	Changhuajiang	01/12/1991	01/12/1993	57	827	485	857	V	-1	0.75	(10)(3)	300	300	55	96 (F)
Longmentan N°1	China	Gravity	Dazhangxi	01/12/1987	01/08/1989	58	150	71	93	V/0.3	(12)(12)	0.75	-10	300	300	72 /54	82 (F) /86
Tukaihe	China	Gravity	Lixian	05/12/2016	-/2006	59	300	255	570	V	-3		-3	300	3000	65 /93	110 (S)/113

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد	کشور	نوع سد	نام رودخانه	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
Name	Country	Type	River	Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Shuangxi	China	Gravity	Meixihe	01/03/1996	01/10/1997	60	221	113	172	V	-9	0.8	-1	300	300	90 /55	110 (F)/105
Tianshenqiao N°2	China	Gravity	Nanpanjiang	01/04/1987	01/06/1990	61	471	143	284	V	-1	V / 0.4	-10	250	250	79	79 (F)
Shuidong	China	Gravity	Youxi	01/11/1992	01/10/1993	63	197	126	184	V	-7	0.75	-10	300	300	50	90 (F)
Wanmipo	China	Gravity	Youshui	02/11/2016	03/05/2016	65	238	141	375	V	-3	0.75	-12	300	3000	86 /68	103 (F) /83
Shanzai	China	Gravity	Aojiang	01/11/1993	01/05/1994	66	274	180	272	V	-5	0.8	-10	300	300	65 /55	125 (F) /95
Wan'an	China	Gravity	Gangjiang	01/12/1990	01/12/1992	68	1104	156	1480	V	-1	0.8	-1	300	300	65	105 (F)
Jinjiang	China	Gravity	Jinjianghe	01/10/1991	01/03/1993	68	229	182	267	V	-1	0.75	-1	300	3000	70	80 (F)
Changshun	China	Gravity	Yujiang	01/03/1997	01/12/1998	69	279	170	200	V	-3	0.74	-3	300	5000	134 /72	89 (F) /48
Zhouning	China	Gravity	Muyangxi	03/04/2016	04/03/2016	73	206	159	199	V	-3	0.72	-3	300	300	67 /50	100 (F) /92
Zhouba	China	Gravity	Mabianhe	-/2005	-/2006	73	163	229	405	V	-1	0.7	-1	300	300	110 /66	73 (F) /66
Taolinkou	China	Gravity	Qinglonghe	01/12/1994	01/12/1997	75	501	585	1350	V / 0.15	-1	0.78	-1	300	300	135 /70	70 (F) /85
Guanyinge	China	Gravity	Taizihe	01/09/1991	01/09/1995	82	1040	1240	1815	V / 0.1	(1) (1)	0.7	-1	270 - 280	750	91	39 (F)
Wanyao	China	Gravity	Dahexi	01/01/1995	01/05/1997	83	390	320	458	V / 0.2	(1) (1)	0.7	-5	300	300	64	96 (F)
Shibanshui	China	Gravity	Longxihe	01/04/1994	01/12/1997	84	445	335	564	V	-3	0.65	-1	300	1000	126 /60	84 (F) /90
Huatan	China	Gravity	Yunhe	01/06/1996	01/12/1998	85	173	240	290	0.2	-1	0.8	-1	300 - 400	300 - 400	78 /74	95 (F) /90
Fenhe N°2	China	Gravity	Fenhe	01/08/1998	01/03/1999	87	350	362	448	V / 0.2	(1) (1)	0.75	-5	300	3000	127 /60	84 (F) /93
Yongxi N°3	China	Gravity	Dazhangxi	01/10/1997	01/10/1998	87	198	170	255	V	-3	0.73	-10	280	3000	115 /80	95 (F) /90
Tongjiezi	China	Gravity	Daduhe	01/10/1988	01/12/1989	88	284	407	855	V	-1	0.75	-10	300 - 500	300 - 500	79 /82	79 (F) /83
Zaoshi	China	Gravity	Xieshui	-/2005	-/2006	88	351	450	930	V / 0.25	-3	0.8	-3	300	3000	53 /83	99 (F) /102
Shuikou	China	Gravity	Minjiang	01/10/1990	01/05/1992	101	791	600	1710	V	-1	0.73	-1	200 - 330	200 - 330	60 / 70	110 (F) / 90
Jing Hong	China	Gravity	Lancang	-/2005	-/2008	108	619	848	1140	V	-3	0.8	-3	300		64 /93	93 (S) /93
Yantan	China	Gravity	Hongshui	01/02/1989	01/03/1992	110	525	626	905	V	-1	V / 0.8	(1) (1)	300	300	55	104 (F)
Shimenzi	China	Gravity	Taxi	01/06/1999	01/06/2016	110	176	188	211	V/0.142	(3) (3)	V / 0.18	(3) (3)	300	3000	93 /62	110 (F)/110
Mianhuatan	China	Gravity	Tingjiang	01/12/1998	01/11/2016	111	302	500	615	V	-9	0.75	-10	300	3000	82 59 /48	100 (F) /88
Dachaoshan	China	Gravity	Lancang	01/12/1998	01/10/2016	111	460	757	1287	V / 0.2	-3	0.7	-10	300	300	94 /67	94 (N) /101
Gelantan	China	Gravity	Lixian	06/09/2016	08/08/2016	113	466	903	1200	V / 0.2	-3	0.75	-3			77 /93	77 (S) /93
Longkaikou	China	Gravity	Jinsha	08/09/2016	-/2012	116	768	2840	3853	V	-3	0.75	-3	300	3000	83 /60	101 (F) /90
Suofengying	China	Gravity	Wujiang	03/06/2016	05/08/2016	116	165	421	739	V / 0.25	(3) (3)	0.7	-3	300	3000	64	95 (F)
Silin	China	Gravity	Wujiang	06/11/2016	08/03/2016	117	310	825	1100	V	-1	0.7	-1			66 /89	100 (F)/109
Pengshui	China	Gravity	Changxi	-/2004	-/2006	117	326	608	1330	V	-3	0.7	-3			64 /81	96 (F) /121
Baise	China	Gravity	Yojiang	03/10/2016	06/10/2016	130	734	1995	2672	V	-9	0.8	-1	300	3000	80 /50	132 (F)/110
Jiangya	China	Gravity	Loushui	01/10/1996	01/04/1999	131	368	1100	1386	V	-3	0.8	-3	300	3000	87 64 /46	96(F)/107
Jin'anqiao	China	Gravity	Jinsha	07/05/2016	-/2011	160	640	2400	3920	V	-3	0.75	-3			72 /96	108 (F)/117
Guangzhao	China	Gravity	Beipan	06/02/2016	08/05/2016	201	412	2420	2870	V / 0.25	-9	0.75	-1	300	300	61 /71	91 (F) /87
Longtan	China	Gravity	Hongshui	04/10/2016	08/04/2016	217	832	4952	7458	V / 0.25	-3	0.7	-3	300	300	99 / 86	121 (F)/109
Porce II	Colombia	Gravity	Porce	01/12/1996	01/09/2000	123	425	1305	1445	0.1	-14	0.35 / 0.5	-14	300	300	132 /120	88 (N) /80
Miel I	Colombia	Gravity	La Miel	01/04/2000	02/07/2016	188	345	1669	1730	V	-4	-0.75/1	-3	300	300	85 to 160	0

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Peñas Blancas	Costa Rica	Gravity	Peñas Blancas	01/07/2016	02/01/2016	48	211	120	170	V	-1	0.8	-1	300	300	90	35 (N)
Pirris	Costa Rica	Gravity	Pirris	09/04/2016	10/05/2016	113	265	695	755	0.33	-3	0.5	-3	300	300	100 /80	100 (N) /80
Contraembalse de Monción	Dominican Republic	Hardfill	Mao	01/02/1996	01/03/1998	20	254	130	155	0.7	-1	0.67	-1	300	300	80±8	0
Panalito	Dominican	Gravity	Tireo	05/11/2016	07/03/2016	52	210	73	100					300	300	98	8 (M)
El Chaparral	El Salvador	Gravity	Torola	10/01/2016	-/2011	74	321	375			-3		-3			60	0
Toker	Eritrea	Gravity	Toker	01/02/1998	01/05/1999	73	263	187	210	V	-1	0.8	-1	330	330	110	85 (F)
Grand Ethiopian Renaissance	Ethiopia	Gravity	Blue Nile	13/01/2016	-/2016	160	1790	10100	10500	0.22	-3	1	-3	300/400	300/400	105 to 125	0
Gibe III	Ethiopia	Gravity	Omo	11/12/2016	15/04/2016	246	630	6100	6300	0.25	-3	1	-3	300	300	70 to 120	50 to (S) 60
Villaunur	France	Gravity	Le Cantache	01/10/1993	01/12/1993	16	147	11	15	V	-11	0.75	-1	300	300	0	90 (R)
Riou	France	Gravity	Riou	01/06/1990	01/07/1990	26	308	41	46	V	-2	0.6	-14	300	300	0	120 (R)
Les Olivettes	France	Gravity	La Peyne	01/12/1986	01/10/1987	36	255	80	85	V	-1	0.75	-16	300	300	0	130 (R)
Choldocogagna	France	Gravity	Lessarte	01/07/1991	01/10/1991	36	100	19	23	0.1	-1	0.75	-16	300	300	0	110 (R)
La Touche Poupard	France	Gravity	Chambon	01/04/1994	01/08/1994	36	200	34	46	V	-1	0.75	-3	300	300	0	115 (R)
Rizzanese	France	Gravity	Rizzanese	11/04/2016	12/02/2016	41	140	64	72	V /1	(6)(10)	V / 0.8		300	300	80	0
Sep	France	Gravity	Sep	01/09/1993	01/01/1994	46	145	49	58	V	-11	0.72	-16	300	300	0	120 (R)
Petit Saut	French Guyana	Gravity	Sinnamary	01/07/1992	01/02/1993	48	740	250	410	V	-11	V / 0.8	(7)(16)	300	300	0	120 (R)
Marathia	Greece	Hardfill	Marathia	01/12/1992	01/04/1993	28	265	31	48	0.5	-13	0.5	-10	200 - 300	200 - 300	55	15 (N)
Ano Mera	Greece	Hardfill	Ano Mera	01/03/1995	-/1995	32	170	49	64	0.5	-13	0.5	-10	200 - 300	200 - 300	55	15 (N)
Steno	Greece	Hardfill	Steno	01/07/2016	02/10/2016	32	170	69	70	0.7	-13	0.7	-10	200 - 300	200 - 300	55	5 (N)
Lithaios	Greece	Hardfill	Lithaios	08/07/2016	10/03/2016	32	526	160	220	0.8	-13	0.8	-3	300	300	50	10 (N)
Koris Yefiri	Greece	Hardfill	Partheni	07/03/2016	10/12/2016	42	221	170	190	0.8	-13	0.8	-3	300-450	300-450	50	10 (N)
Valsamiotis	Greece	Hardfill	Valsamiotis	07/05/2016	10/12/2016	65	330	640	820	0.8	-13	0.8	-3	300	300	60	0
Valsamiotis	Greece	Hardfill	Valsamiotis	07/05/2016	10/12/2016	65	330	640	820	0.8	-13	0.8	-3	300	300	60	0
Platanovryssi	Greece	Gravity	Nestos	01/10/1995	01/03/1997	95	305	420	440	0.1	-14	0.75	-14	300	300	50	225 (C)
Nacaome	Honduras	Gravity	Rio Grande Nacaome	01/08/1994	-/1995	54	320	250	300	0.15	-2	0.8	-3	400	400	64	21 (N)
Concepción	Honduras	Gravity	Concepción	01/12/1989	01/06/1990	68	694	270	290	0.075	-2	0.8	-3	400	400	65	15
Ghatghar (Upper)	India	Gravity	Pravara	03/05/2016	04/01/2016	15	503	35	40	V	-3	0.78	-3	300	300	88	132 (F)
Krishna Weir	India	Gravity	Krishna	07/05/2016	08/08/2016	40	305	42	72		-17		-17	300	300	75	75 (F)
Teesta Low (IV)	India	Gravity	Teesta	13/01/2016	15/04/2016	44	196	160	170	0.4	-3	0.8	-3	300	300	85	135 (F)
Ghatghar (Lower)	India	Gravity	Shahi Nallah	04/12/2016	06/05/2016	86	447	638	646	0.141	-3	0.782	-3	300	300	75	150 (F)
Middle Vaitarna	India	Gravity	Vaitarna	10/05/2016	12/04/2016	102	565	1202	1500	0.15	-3	0.75	-3	300	300	75	145 (F)
Karebbe	Indonesia	Gravity	Larona	09/04/2016	11/04/2016	73	216	195	250	V	-2	0.8	-1	300	300	80	0
Balambano	Indonesia	Gravity	Larona	01/04/1998	01/06/1999	95	351	528	534	V	-2	0.8	-1	420	420	81	54 (F)
Kasegawa	Japan	Gravity	Kase	09/10/2016	10/06/2016	29	116	52	65	0.8	-2	0.8	-2	250	750	80	0
Nagashima	Japan	Hardfill	Ohi	01/04/1999	01/12/1999	33	127	23	55	1.2	-12	1.2	-12	250	500 750	40	50 (S)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Kimu (Okukubi)	Japan	Hardfill	Okukubi	10/11/2016	11/03/2016	39	461	205	300	0.8	-5	0.8	-5	300	750	80	0
Pirika	Japan	Gravity	Shirobeshit	-/1988	-/1989	40	755	163	360	V / 0.8	(1) (1)	0.8	-1	250	750	84	36 (F)
Miyatoko	Japan	Gravity	Miyatoko	01/06/1990	01/12/1993	48	256	172	280	0.6	-1	0.8	-1	180	500	96	24 (F)
Takisato	Japan	Gravity	Sorachi	-/1993	01/07/1997	50	445	327	455	0.06	-1	0.8	-1	250	750	84	36 (F)
Tobetsu	Japan	Gravity	Tobetu	09/06/2016	10/09/2016	52	432	67	80	0.8	-5	0.8	-5	250	750	100 / 60	0 / 0
Shiromizugawa	Japan	Gravity	Shiromizu	01/10/1985	01/06/1988	55	367	142	314	V	-1	0.8	-1	150 - 200	500	96	24 (F)
Hinata	Japan	Gravity	Kasshi	01/11/1992	01/05/1994	57	290	113	232	V	-1	0.75	-1	180 - 250	750	84	36 (F)
Kamuro	Japan	Gravity	Kaneyama	01/07/1988	01/10/1990	61	257	136	307	V / 0.6	(1) (1)	0.75	-1	150 - 200	500	96	24 (F)
Ohmatsukawa	Japan	Gravity	Matsu	01/10/1992	01/06/1995	65	296	141	294	V / 0.7	(1) (1)	0.76	-1	250	750	91	39 (F)
Koyama	Japan	Gravity	Ohkita	01/05/2000	02/12/2016	65	462	270	531	V	-1	0.78	-1	250	750	84	36 (S)
Fukuchiyama	Japan	Gravity	Fukuti	-/1999	01/12/2016	65	255	115	201	V	-1	0.78	-1	250	750	84	36 (F)
Mano	Japan	Gravity	Mano	01/04/1985	01/01/1988	69	239	104	219	V	-1	0.8	-1	180	500	96	24 (F)
Shinmiyagawa	Japan	Gravity	Miya	01/07/1997	01/08/2000	69	325	393	480	V	-1	0.83	-1	250	750	91	39 (F)
Dodairagawa	Japan	Gravity	Kabura	01/06/1988	01/01/1990	70	300	167	350	V / 0.4	(1) (1)	0.75	-1	180	500	96	24 (F)
Hiyoshi	Japan	Gravity	Katsura	01/10/1994	01/07/1996	70	438	440	670	V / 0.8	(1) (1)	0.8	-1	250	750 1000	84 /77	36 (F) /33
Nunome	Japan	Gravity	Nunome	01/01/1988	01/10/1988	72	322	110	330	V / 0.4	(1) (1)	0.76	-1	250	750	78	42 (F)
Ohnagami	Japan	Gravity	Sutu	01/04/1998	01/04/2000	72	334	284	362	V / 0.25	(1) (1)	0.79	-1	250	750	84	36 (F)
Asari	Japan	Gravity	Asari	01/10/1987	01/09/1990	74	390	259	517	V / 0.3	(1) (1)	0.8	-1	180	500	96	24 (F)
Hayachine	Japan	Gravity	Hienuki	01/10/1995	01/06/1998	74	333	141	333	V / 0.2	(1) (1)	0.76	-1	250	750	84	36 (F)
Yoshida	Japan	Gravity	Yoshida	01/07/1993	01/02/1995	75	218	193	304	V	-1	0.75	-1	250	750	84	36 (F)
Tsugawa	Japan	Gravity	Kamo	01/10/1991	01/07/1993	76	228	222	342	V / 0.6	(1) (1)	0.76	-1	250	750	96	24 (F)
Kutani	Japan	Gravity	Daishoji	01/04/2000	02/07/2016	76	280	188	360	V / 0.8	(1) (1)	0.8	-1	250	750	84	36 (F)
Toppu	Japan	Gravity	Toppu	05/06/2016	08/10/2016	78	309	270	530	V / 0.8	(1) (1)	0.8	-1	250	1000	84	36 (F)
Shiokawa	Japan	Gravity	Shio	01/08/1993	01/11/1995	79	225	299	388	0.10 / 0.7	(1) (1)	0.76	-1	250	750	96	24 (F)
Asahi Ogawa	Japan	Gravity	Ogawa	01/05/1986	01/06/1988	84	260	268	361	V / 0.9	(1) (1)	0.8	-1	180	500	96	24 (F)
Hattabara	Japan	Gravity	Ashida	-/1989	-/1992	85	325	228	500	V / 0.2	(1) (1)	0.75	-1	150 - 200	750	84	36 (F)
Chubetu	Japan	Gravity	Chubetu	01/09/1997	01/08/2016	86	290	523	1007	V / 0.8	(1) (1)	0.8	-1	250	750 1000	84	36 (F)
Shimajigawa	Japan	Gravity	Shimaji	01/10/1978	01/04/1980	89	240	165	317	V / 0.3	(1) (1)	0.8	-1	150 - 200	500 700	84	36 (F)
Shimagawa	Japan	Gravity	Shima	-/1994	01/05/1996	90	330	390	516	V / 0.5	(1) (1)	0.8	-1	250	750	84	36 (F)
Kido	Japan	Gravity	Kido	03/06/2016	05/08/2016	94	350	291	501	V / 0.1	(1) (1)	0.78	-1	250	750 1000	84	36 (F)
Kubusugawa	Japan	Gravity	Kubusu	01/04/1998	-/1999	95	253	364	469	V / 0.4	(1) (1)	0.78	-1	250	750	84	36 (F)
Tsugaru	Japan	Gravity	Iwaki	12/06/2016	13/08/2016	97	342	378	717	V /1	(1) (1)	0.74	-1	250	1000	91	39 (F)
Chiya	Japan	Gravity	Takahashi	01/09/1992	01/04/1995	98	259	396	670	V	-1	0.77	-1	250	750	91	39 (F)
Ryumon	Japan	Gravity	Sakoma	01/03/1990	01/11/1992	100	378	521	836	V / 0.3	(1) (1)	0.8	-1	150 - 200	750-1000	91	39 (F)
Tamagawa	Japan	Gravity	Tama	01/09/1983	01/07/1986	100	441	772	1150	V / 0.6	(1) (1)	0.81	-1	150 - 200	750-1000	91	39 (F)
Kodama	Japan	Gravity	Kodama	01/05/1991	01/12/1993	102	280	358	570	V / 0.2	(1) (1)	0.76	-1	250	750	91	36 (S)
Gokayama	Japan	Gravity	Naka	14/06/2016	15/07/2016	103	556	634	935	V /1	(1) (1)	0.76	-1	250	1000	104	26 (F)
Sabigawa (lower)	Japan	Gravity	Kosabi	01/03/1990	01/12/1991	104	273	400	590	0.1	-1	0.8	-1	250	750	91	39 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Satsunaigawa	Japan	Gravity	Satsunai	01/04/1991	01/10/1995	114	300	536	770	0.4	-1	0.8	-1	250	750	78	42 (S)
Origawa	Japan	Gravity	Ori	01/11/1996	01/07/2000	114	331	673	742	V / 0.6	(1) (1)	0.77	-1	250	750	91	39 (F)
Sakaigawa	Japan	Gravity	Sakai	-/1987	01/07/1991	115	298	373	713	V / 0.8	(1) (1)	0.78	-1	180	750	84	36 (F)
Yunishigawa	Japan	Gravity	Yunishi	09/09/2016	11/05/2016	119	320	967	1053	V / 0.6	-1	0.78	-1	250	1000	91	39 (F)
Ueno	Japan	Gravity	Jinryu	-/1998	-/2001	120	350	269	720	V / 0.3	-1	0.84	-1	200	1000	77 /70	33 (F) /30
Gassan	Japan	Gravity	Bonji	01/06/1994	01/10/1998	123	393	731	1160	V	-1	0.8	-1	250	750 1000	91	39 (F)
Nagai	Japan	Gravity	Okitamano	02/10/2016	06/11/2016	126	381	703	1200	V / 0.5	(1) (1)	0.73	-1	250	1000	91	39 (F)
Takizawa	Japan	Gravity	Nakatu	01/10/2016	03/06/2016	139	424	810	1670	0.15 / 0.7	(1) (1)	0.72	-1	250	1000	84 /72	36 (F) / 48
Miyagase	Japan	Gravity	Nakatsu	01/11/1991	01/02/1995	156	400	1537	2060	0.20 / 0.6	(1) (1)	0.625	-1	150 - 200	750	91	39 (F)
Urayama	Japan	Gravity	Urayama	01/12/1992	01/12/1995	156	372	1294	1750	V / 0.65	(1) (1)	0.8	-1	250	750 1000	91	39 (F)
Wala	Jordan	Gravity	Wala	01/10/2000	02/04/2016	52	300	240	260	0.3	-1	0.7	-1	300	300	120 /100	0 / 0
Tannur	Jordan	Gravity	Wadi al Hasa	01/12/1999	01/12/2000	60	270	250	250	V / 1	-3	0.8	-3	300	1200	125 /120	75 (N) / 50
Mujib	Jordan	Gravity	Mujib	01/01/2016	03/02/2016	67	490	654	694	0.1	-2	0.8	-1	300	300	85	0
Al Wehdah	Jordan/Syria	Gravity	Yarmouk	05/02/2016	06/07/2016	103	485	1426	1478	V / 0.6	-3	0.8	-3	300	300	70 /60	60 (F) / 60
Tashkumyr	Kyrgyzstan	Gravity	Naryn	01/03/1987	01/12/1989	75	320	100	1300	V	-1	0.78	-1	400	400	90	30 (N)
Buchtarma	Kazakhstan	Gravity	Irtysh	01/09/1957	01/10/1961	90	450	587	988	V	-10	0.8	-3	300	1200	135	80 (F)
Nakai	Laos	Gravity	Nam Theun	06/02/2016	07/03/2016	39	436	155	200		-1		-10	300	300	100	100 (F)
Nam Gnouang	Laos	Gravity	Nam Gnouang	10/03/2016	11/12/2016	70	470	383		V	-1	0.8	-1	300	300	90	100 (C)
Xekaman 1	Laos	Gravity	Xe Kaman	13/05/2016	15/04/2016	120	335	870	1065		-3		-3	300	300	70	130
Metolong	Lesotho	Gravity	South Phutiatsana	13/08/2016	14/11/2016	83	278	280	314		-3		-3	300	300	60	145 (F)
Bengoh	Malaysia	Gravity	Sungai Bengoh	09/06/2016	10/05/2016	63	267	130	172	V	-3	0.8	-3	300	3000	60	120 (F)
Batu Hampar	Malaysia	Gravity	Batu Hampar	09/10/2016	10/04/2016	75	236	200	203		-3		-10	300	300	65	120 (F)
Ulu Jelai/Susu	Malaysia	Gravity	Bertam	-/2013	-/2015	88		740	1600							85	85 (F)
Kinta	Malaysia	Gravity	Kinta	04/02/2016	06/03/2016	90	792	952	975	V	-3	0.8	-3	300	300	100	100 (F)
Amata	Mexico	Gravity	San Lorenzo	04/11/2016	05/04/2016	30	218	53	60	V /1	-8	1	-3	300	300	120	0
Las Blancas	Mexico	Gravity	Álomo & Soso	01/03/1999	01/12/1999	32	2795	221	316	V	-8	V / 0.75	(7) (3)	300	300	100	100 (F)
La Manzanilla	Mexico	Gravity	Ibarrilla	01/01/1987	01/05/1987	36	150	20	30	V / 0.15	(5) (5)	V / 0.8	(5)(17)	300	300	135	135 (N)
San Lazaro	Mexico	Gravity	San Lazaro	01/04/1994	01/06/1994	38	176	35	53	V / 0.2	-5	0.8	-3	300	300	100 /90	220(M)/220
San Rafael	Mexico	Gravity	Santiago	01/05/1994	01/07/1994	48	176	85	110	V	-5	0.66 / 0.8	-3	300	300	90	130 (N)
Vindramas	Mexico	Gravity	El Bledal	01/04/1993	01/12/1993	50	807	117	184	V	-5	0.8	-3	300	300	100	100 (M)
Los Panales	Mexico	Gravity	Tecolotán	-/2012	-/2013	78	440	496	561	V / 0.20	-5	0.8	-3	300	300	110	0 (N)
Picachos	Mexico	Gravity	Presidio	07/09/2016	-/2008	79	256	85		V / 0.15	(12)(12)	0.85	-12	300	3000	50	45 (S)
Francisco J. Múgica	Mexico	Gravity		-/2009	-/2010	90	375	367	451	V / 0.3		1		300	300	65	0
El Realito	Mexico	Gravity	Santa Maria	09/07/2016	11/06/2016	90	270	420		V	-1	0.85		300	300	33 to 66	27 (S) / 54
Trigomil	Mexico	Gravity	Ayuguila	01/02/1991	01/12/1992	107	250	362	681	V / 0.24	-5	V / 0.8	(5)(17)	300	300	148	47 (F)
Rompepicos at Corral des Palmas	Mexico	Gravity	Santa Catarina	03/03/2016	-/2003	109	250	380	400	V	-8	V / 0.75	(5)(17)	300	300	65	35 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	U/S بالادست		D/S پایین‌دست		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
El Zapotillo	Mexico	Gravity	Verde	11/11/2016	-/2015	132	271	1100	1200	V	-4	0.83	-3	300	300	60 to 80	50 (S) / 70
Rouidat Amont	Morocco	Hardfill	Rwedat	01/09/1987	01/10/1988	24	125	25	27	0.4	-7	0.4	-7	400	400	100	15 (N)
Sidi Yahya	Morocco	Gravity	Oued Khellata	07/05/2016	08/07/2016	25	213	60	65	0.2	-5	0.8	-1	300	300	105	0
Ain al Koreima	Morocco	Gravity	Akreuch	01/09/1987	01/02/1988	26	124	17	20	0.2	-5	0.20 / 0.75	(5)(17)	350	350	70 /140	30 (S) / 60
Ait Mouley Ahmed	Morocco	Gravity	Ain Leuh	-/2010	11/01/2016	29	136	18	20	V	-5	0.75	-1	300	300	70	30 (N)
Sehb El Merga	Morocco	Gravity	Sehb el merga	-/2008	-/2009	40	480	70	92	V	-5	0.8	-1	300	300	70	30 (N)
Ahl Souss	Morocco	Gravity	Izig	03/01/2016	03/05/2016	41	222	49	76	0.2	-1	0.8	-1	300	300	80 /100	0
Imin el Kheng	Morocco	Gravity	Oueld Berhil	01/09/1992	01/07/1993	41	170	109	118	0.2	-5	0.8	-1	300	300	100 /110	20 (N) /20
Enjil	Morocco	Gravity	Taghoucht	01/03/1994	01/10/1995	43	80	45	57	0.2	-5	0.8	-1	300	300	110 /150	0 (N) / 0
El Maleh	Morocco	Gravity	El Maleh	07/09/2016	09/06/2016	49	174	100	140	0.2	-5	0.6	-5	300	300	120	0
Bab Louta	Morocco	Gravity	Bousebaa	01/02/1998	01/02/1999	55	110	63	77	V	-5	0.75	-1	300	300	65 /80	15 (N) /20
Bouhouda	Morocco	Gravity	Sraa	01/04/1996	01/05/1998	55	174	165	187	0.2	-5	0.8	-1	300	300	100 /120	0 (N)
Sahla	Morocco	Gravity	Sahla	01/11/1992	01/12/1993	55	160	130	160	0.2	-5	0.9	-1	300	300	85 /125	15 (N) /25
Timkit	Morocco	Hardfill	Assif N'Ifer	-/2010	-/2011	56	183	90	136	0.65	-5	0.65	-1	300	300	100	0
Joumoua	Morocco	Gravity	Joumoua	01/06/1990	01/11/1992	57	250	150	200	0.2	-5	0.8	-1	350	350	105 /180	45 (N) / 0
Tamalout	Morocco	Hardfill	Ansegmir	-/2010	-/2011	61	320	380	415	0.5	-5	0.7	-1	300	300	60	0
Tamesna	Morocco	Gravity	Zamrine	04/04/2016	04/09/2016	66	220	190	215	0.2	-5	0.8	-1	300	300	100	
Sfeissif	Morocco	Gravity	Safsaf	-/2010	-/2011	70	390	300	390	V	-5	0.85	-1	300	300	120	0
Wirgane	Morocco	Gravity	N'Fis	06/10/2016	07/07/2016	71	233	202	215	V	-11	0.75	-1	300	3000	100	
Taskourt	Morocco	Gravity	Al Mal	09/04/2016	10/09/2016	75	416	370	420	V	-5	0.8	-1	300	300	105	0
Aoulouz	Morocco	Gravity	O. Souss	01/11/1989	01/09/1990	79	480	680	830	V	-1	0.85	-1	500	500	120 / 90	0 (M) / 0
Oued R'Mel	Morocco	Gravity	R'Mel	06/06/2016	07/06/2016	79	250	230	243	V	-11	0.75	-1	300	3000	100 /90	0
Hassan II (Sidi Said)	Morocco	Gravity	Moulouya	03/03/2016	04/04/2016	122	577	590	690	V	-5	0.8	-1	300	300	65 /80	15 (N) /20
Upper Paung Laung	Myanmar	Gravity	Paung Laung	11/01/2016	13/12/2016	103	530	963	1100	V	-3	0.8	-3	300	300	90	140 (N)
Yeywa	Myanmar	Gravity	Myitinge	06/02/2016	08/12/2016	135	680	2473	2843	V	-3	0.8	-3	300	300	75	145 (N)
Wadi Umti	Oman	Hardfill	Wadi Umti	13/11/2016	14/07/2016	26	145	54	58	0.7	-12	0.7	-12	300	300	60	0
Wadi Dayqah	Oman	Gravity	Wadi Dayqah	08/01/2016	09/04/2016	75	410	590	650	V	-3	0.75	-3	300	1200	126 /112	54 (M) / 48
Mangla Weir	Pakistan	Gravity	Jhelum	07/12/2016	08/11/2016	17	370	54	79	V / 0.3	(3) (3)	V / 0.7	(3) (3)	300	300	60	120 (S)
Gomal Zam	Pakistan	Arch-Gra.	Gomal	08/12/2016	11/03/2016	133	231	390	474	V		0.6		300	3000	91	91 (F)
San Bartolo	Panama	Gravity	San Pablo	-/2014	-/2015	41	371	77		V		0.85		300	300	90	0
Changuinola 1	Panama	Arch-Gra.	Changuinola	09/12/2016	11/04/2016	105	595	884	910	V	-3	0.50 / 0.7	-3	300	300	70 / 65	145 (F)/150
Capillucas	Peru	Gravity	Canete	08/10/2016	09/04/2016	34	60	75	75	0.375	-3	0.75	-3	300	300	65	90 (N)
Can Asujan	Philippines	Hardfill	Can Asujan	-/2004	-/2005	42	135	75	85	0.6	-8	0.6	-7	170	170	100	
Pedrógão	Portugal	Gravity	Guadiana	04/04/2016	04/08/2016	43	448	149	354	V	-3	0.8	-3	300	300	55	165 (F)
Tirgu Jiu	Romania	Gravity	Jiu	01/06/1988	01/05/1989	24	61	13	26	-	-12	-	-12	300	900	125	0
Vadeni	Romania	Gravity	Jiu	01/05/1988	01/10/1988	25	55	14	17	-	-12	-	-12	300	900	125	0
Bureyskaya	Russia	Gravity	Bureya	01/01/1985	-/2005	139	798	709	3538	V	-1	0.7	-1	300 - 500	300 - 500	95 / 110	25 (N) /30

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Spitskop	South Africa	Gravity	Harts	01/09/1988	01/06/1989	15	100	17	36	V	(1)(15)	0.7	-15	250	250	91	92 (F)
Paxton	South Africa	Gravity	Tsorwo	01/01/1991	01/12/1992	17	70	3	3	V / 0.5	-3	V	-3	150	150	70	100 (F)
Thornlea	South Africa	Gravity	Mlazi	01/10/1990	01/12/1990	17	135	16	17	V	-1	0.9	-3	170	170	38	87 (S)
Qedusizi	South Africa	Gravity	Klip	01/03/1995	01/08/1997	28	490	78	156	V	-1	V 8/0.7	(1) (1)	250	250	46	108 (S)
De Mist Kraal	South Africa	Gravity	Little Fish	01/05/1986	01/08/1986	30	300	35	65	V	-1	0.6	-1	250	250	58	58 (F)
Glen Melville	South Africa	Gravity	Ecca	01/04/1989	01/12/1990	32	380	66	114	V	-1	V / 0.75	(1) (1)	330	330	65	65 (F)
Wriggleswade	South Africa	Gravity	Kubusie	01/07/1989	01/07/1990	34	737	134	165	V	-1	V / 0.62	-1	250	250	44	66 (F)
Arabie	South Africa	Gravity	Olifants	01/03/1986	01/11/1986	36	455	101	142	V	-1	0.50 / 0.75	-1	300	300	36	74 (S)
Braamhoek	South Africa	Gravity	Braamhoekspruit	09/06/2016	10/06/2016	37	330	90	98	V	-3	0.67	-3	300	1200	70	95 (F)
Spring Grove	South Africa	Gravity	Mooi	12/06/2016	13/05/2016	39	300	96	114		-3		-3	300	300	50	110 (F)
Nandoni	South Africa	Gravity	Luvuvhu	01/12/1999	03/08/2016	47	392	150	316	V	-1	0.75	-1	250	250	54	129 (F)
Zaaihoek	South Africa	Gravity	Slang	01/11/1985	01/03/1987	47	527	97	134	V	-1	V / 0.62	-1	250	250	36	84 (S)
Knellpoort	South Africa	Arch-Gra.	Rietspruit	01/05/1988	01/11/1988	50	200	45	59	V	-1	0.6	-1	250	250	61	142 (F)
Taung	South Africa	Gravity	Harts	01/08/1991	01/09/1992	50	320	132	153	V	-1	V / 0.75	(1) (1)	250	250	44	66 (F)
Inyaka	South Africa	Gravity	Marite	01/06/1997	01/10/2000	53	350	160	327	V	-1	0.68	-1	250	250	60	120 (F)
Wolwedans	South Africa	Arch-Gra.	Great Brak	01/10/1988	01/09/1989	70	268	180	210	V	-1	0.5	-1	250	250	58	136 (F)
De Hoop	South Africa	Gravity	Steelpoort	09/07/2016	13/05/2016	85	1015	880	950	V	-3		-3	300	1200	62	145 (F)
Hantangang	South Korea	Gravity	Hantan	10/07/2016	14/07/2016	84	690		709	V	-1		-1	250	750	91	39 (F)
Caballar I	Spain	Gravity	Belán	01/09/1991	01/12/1991	16	98	6	7	0.05	-3	0.75	-3	300	300	73	109 (F)
Amatisteros III	Spain	Gravity	Belén	01/09/1991	01/12/1991	19	75	4	5	0.05	-3	0.75	-3	300	300	73	109 (F)
El Esparragal	Spain	Gravity	Viar	03/05/2016	03/08/2016	21	383	62	89	0.3	-3	0.9	-3	300	300	68	157 (F)
Burguillo del Cerro	Spain	Gravity	Ribera de los Montes	01/05/1991	01/09/1991	24	167	25	33	V	-14	0.13 / 0.6	-14	300	300	80	135 (F)
Castilblanco de los Arroyos	Spain	Gravity	Cala	01/05/1985	01/10/1985	25	124	14	20	V	-1	V / 0.75	(1) (1)	450	450	72 /61	116 (F) /120
Belén-Flores	Spain	Gravity	Belén	01/11/1991	01/01/1992	28	87	10	12	0.05	-3	0.75	-3	300	300	73	109 (F)
Los Morales	Spain	Gravity	Morales	01/02/1987	01/10/1987	28	200	22	26	V	(1) (3)	0.75	-3	300 - 400	300 - 400	80 /74	140 (F)/128
Belén-Cagüela	Spain	Gravity	Belén	01/06/1991	01/10/1991	31	160	24	29	0.05	-3	0.75	-3	300	300	73	109 (F)
Los Canchales	Spain	Gravity	Lácara	01/07/1988	01/11/1988	32	240	25	54	V	-3	0.50 / 0.8	-3	250	250	84 /70	156 (F)/145
Hervás	Spain	Gravity	Hervás	01/03/1990	01/09/1990	33	210	24	43	0.15	-1	0.7	-1	300	300	80	155 (F)
Belén-Gato	Spain	Gravity	Belén	01/09/1991	01/11/1991	34	158	36	41	0.05	-3	0.75	-3	300	300	73	109 (F)
El Puente de Santolea	Spain	Gravity	Guadalope	10/04/2016	11/02/2016	35	203	65	70	0.2	-3	0.6	-3	300	300	65	153 (F)
Atance	Spain	Gravity	Salado	01/04/1997	01/07/1997	45	184	65	75	V	-3	0.8	-3	300	300	57	133 (F)
Cenza	Spain	Gravity	Cenza	01/03/1993	01/08/1993	49	609	200	225	V	-3	0.122/0.75	-3	300	300	70	130 (F)
Maroño	Spain	Gravity	Izoria and Idas	01/11/1989	01/08/1990	53	182	80	91	0.05	-3	V / 0.75	(3) (3)	300	300	80 / 50	160 (F)/170
Sierra Brava	Spain	Gravity	Pizarroso	01/06/1992	01/11/1993	54	835	277	340	0.05	-14	0.75	-14	300	300	80	140 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Arriarán	Spain	Gravity	Arriarán	01/04/1992	01/09/1992	58	206	110	113	0.05	-3	0.7	-3	300	300	85	135 (F)
Boqueron	Spain	Gravity	Rambla del Boqueron	01/02/1996	01/08/1996	58	290	137	145	0.05	-3	0.73	-3	300	300	55	130 (F)
Urdalur	Spain	Gravity	Alzania	01/08/1991	01/07/1992	58	396	150	240	V	-1	0.75	-3	300	300	72	108 (F)
La Puebla de Cazalla	Spain	Gravity	Corbones	01/08/1989	01/10/1991	71	220	205	220	V / 0.2	(3) (3)	0.8	-3	300	300	80	130 (F)
Queiles y Val	Spain	Gravity	Val	01/10/1995	01/05/1997	82	375	480	520	V / 0.33	(1) (1)	0.8	-5	300	300	80	145 (F)
Santa Eugenia	Spain	Gravity	Xallas	01/06/1987	01/06/1988	84	290	225	254	0.05	-3	0.75 / 0.35	-3	250	250	88	152 (F)/145
Rialb	Spain	Gravity	Segre	01/10/1995	01/12/1998	99	630	980	1016	0.15/0.35	(1) (1)	0.40 / 0.65	(1) (1)	330	330	70 / 65	130 (F)/130
Enciso	Spain	Gravity	Cidacos	14/09/2016	15/10/2016	103	376	670	718	V	-1	0.8	-1	300	300	60	140
La Breña II	Spain	Gravity	Guadiato	07/02/2016	08/10/2016	119	685	1441	1600	0.05 / 0.3	(3) (3)	0.75	-3	300	300	69	115 (F) / 46
Pak Mun	Thailand	Gravity	Mun	01/12/1993	01/03/1994	26	323	48	50	V/V	(13)(15)	V / 0.8	(13)(15)	300	300	58	124 (F)
Mae Suai	Thailand	Gravity	Mae Suai	01/10/2000	02/01/2016	59	340	300	350	0.15	-15	0.8	-1	300	300	70	80 (F) / 100
Tha Dan	Thailand	Gravity	Nakhon Nayok	01/03/2016	04/07/2016	95	2600	4900	5400	V / 0.4	-14	0.8	-14	300	300	90	100 (F)
R'mil	Tunisia	Gravity	R'mil	01/10/2000	01/05/2016	18	260	64	160	V	-15	0.9	-16	300	300	100	0
Moula	Tunisia	Gravity	Bou Terfess	-/2008	-/2010	84	324	422	450	V	-3		-3	300	300	120	0
Devecikonagi	Turkey	Gravity	Emet	11/03/2016	12/09/2016	29	313	54	150	0.1	-2	0.75	-3	300	300	80	40 (F)
Su Çati	Turkey	Gravity	Güredin Creek	01/02/1999	01/10/1999	36	192	55	60	V	-7	0.8	-7	300	300	50	100 (S)
Çetintepe	Turkey	Gravity	Robozik	-/2013	-/2014	39	173	60	64	0.1	-3	0.8	-3	300	1200	95	0
Narli	Turkey	Gravity	Göksu	08/01/2016	-/2010	47	153	49	68		-14		-14	300	300	65	50 (F)
Camlica III	Turkey	Hardfill	Zamanti	10/04/2016	10/12/2016	52	186	160	182	0.7	-7	0.7	-3	300	300	88	37 (F)
Gölgeliyamaç	Turkey	Gravity	Guzeldere	-/2013	-/2014	52	150	85	99	V	-3	0.8	-3	300	1200	95	0
Akköy I	Turkey	Gravity	Harsit	06/10/2016	07/04/2016	53	146	46	101	0.1	-1	0.8	-1	300	300	100	100 (N)
Beyyurdu	Turkey	Gravity	Bembo	-/2013	-/2014	54	176	186	209	0.1	-3	0.8	-3	300	1200	95	0
Akköy II	Turkey	Gravity	Karaovacik	12/05/2016	12/09/2016	60	260	101	196	V	-1	0.8	-1	300	300	85	85 (N)
Kotanli II	Turkey	Arch-gra.	Kura	14/05/2016	15/03/2016	60	201	240	247		-3		-3			85	130 (N)
Musatepe	Turkey	Gravity	Robozik	-/2013	-/2014	66	165	130	138	0.1	-3	0.8	-3	300	1200	95	0
Simak	Turkey	Gravity	Ortasui	09/11/2016	10/08/2016	67	198	245	265	0.1	-3	0.8	-3	300	300	95	
Astandag	Turkey	Gravity	Bembo	11/11/2016	14/02/2016	69	210	162	202	0.1	-1	0.8	-3	300	1200	95	0
Gokkaya	Turkey	Gravity	Goksu	10/07/2016	12/05/2016	69	118	96	122	0.067	-3	0.8	-3	300	300	55	55 (F)
Burç	Turkey	Gravity	Göksu	08/01/2016	-/2010	70	235	232	260	0.07	-8	0.8	-3	300	300	60	50 (F) / 60
Feke II	Turkey	Gravity	Göksu	08/12/2016	10/02/2016	71	256	194	227	0.07	-6	0.8	-3	300	300	60 /60	60 (F) / 50
Güllübag	Turkey	Gravity	Çoruh	11/02/2016	11/06/2016	72	97	160	175	V	-3	0.50 / 0.7	-3	300	300	70	70 (F)
Menge	Turkey	Gravity	Göksu	10/08/2016	11/10/2016	73	304	321	384	0.25	-3	0.8	-3	300	300	80	40 (F)
Naras	Turkey	Gravity	Manavgat	12/12/2016	14/01/2016	78	448	600	677	0.15	-3	0.7	-3	300	300	150	0
Silopi	Turkey	Gravity	Hezil	-/2010	-/2011	80	356	693	727	0.1	-7	0.7	-3	300	1200	95	0
Pembelik	Turkey	Hardfill	Peri	13/03/2016	14/10/2016	88	500	760	838	0.75	-3	0.47	-3	300	1200	120	0
Beydag	Turkey	Hardfill	Kucuk Menderes	06/07/2016	08/04/2016	96	800	2350	2650	0.35	-6	0.8	-1	300	300	60	30 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Beyhan-I	Turkey	Hardfill	Murat	12/03/2016	14/03/2016	97	361	1480	1661	0.7	-7	0.7	-1	300	300	130	0 (M)
Asagi Kalesköy	Turkey	Gravity	Murat	-/2014	-/2016	103	346	1192	1342	0.25	-7	0.8	-1	300	300	130	0 (M)
Köprü	Turkey	Gravity	Göksu	10/12/2016	12/04/2016	103	413	880	1050	V / 0.6	-1	0.8	-1	300	300	85	45 (F)
Çindere	Turkey	Hardfill	Buyuk Menderes	02/07/2016	05/05/2016	107	280	1500	1685	0.7	-6	0.7	-3	300	300	50	20 (F)
Goktas	Turkey	Hardfill	Zamanti	13/03/2016	15/03/2016	135	200	750	900	0.30 /1	(3) (3)	0.60 /1	(3) (3)	300	300	50	50 (F)
Çine	Turkey	Gravity	Çine	04/11/2016	10/04/2016	137	300	1560	1650	0.10 / 0.2	-7	0.85	-7	300	300	85 /75	105 (F)/ 95
Yukan Kalesköy	Turkey	Gravity	Murat	14/03/2016	16/08/2016	150	404	2224	2414	0.25	-7	0.8	-1	300	300	130	0 (M)
Ayvali	Turkey	Gravity	Oltu	13/02/2016	16/06/2016	178	405	1650	1900	V	-3	0.75	-3	300	300	50	115 (F)
Safad	UAE	Gravity		01/05/2016	01/06/2016	19	100	9	10	V	-1	0.8	-1	300	300	90	0
Showkah	UAE	Gravity		01/08/2016	01/10/2016	24	105	18	20	0.1	-11	0.8	-1	300	300	90	0
Bullard Creek	USA	Gravity	Bullard Creek	01/08/1999	-/1999	16	110	7	7	V	-3	V / 0.75	-3	300	300	148	44 (F)
Pickle Jar	USA	Gravity		01/03/2000	01/05/2000	16	57	3.31	3.31	V	-1	0.8	-1	300	300	90	0
Freeman diversion	USA	Gravity	Santa Clara	01/07/1990	01/09/1990	17	366	101	110	V	-1	0.8	-17	300	300	125	83 (F)
Nickajack	USA	Gravity	Tennessee	01/07/1990	01/02/1991	17	427	79	79	0.25	-3	0.6	-3	300	600	85	119 (F)
Barnard Creek Canyon Debris	USA	Gravity	Barnard Creek	01/11/1999	01/11/1999	18	46	3	3	V	-18	0.75	-18	300	300	108	84 (F)
Rocky Gulch	USA	Gravity	Rocky Gulch	01/05/1994	01/06/1994	18	55	6	7	V	-1	0.8	-17	300	300	184	0
Town Wash	USA	Gravity	Town Wash	01/03/1992	01/05/1992	18	264	43	45	V	-14	1.5	-3	200	200	107	71 (F)
Lower Chase Creek	USA	Gravity	Lower Chase Creek	01/05/1987	01/06/1987	20	122	14	22	V	-1	0.7	-1	300	300	64	40 (F)
Hudson River N°11	USA	Gravity	Mountain Creek	01/04/1993	01/08/1993	21	168	26	28	V	-6	0.8	-1	300	300	119	84 (F)
New Peterson Lake	USA	Gravity	Cache La Poudre	01/09/1995	01/11/1995	21	70	7	8	V	-1	0.8	-1	300	300	145	48 (F)
Deep Creek N°5D	USA	Gravity	Deep Creek	09/04/2016	09/12/2016	22	226	39	45	V	-3	0.8	-3	300	300	89	89 (F)
Winchester (now Carroll E. Ecton)	USA	Gravity	Upper Howard Creek	01/08/1984	01/11/1984	23	363	24	27	V	-6	V /1	(5)(17)	300	300	104	0
Alan Henry Spillway	USA	Gravity	Double Mountain Fork	01/12/1991	01/04/1992	25	84	22	23	V	-13	1.1	-17	300	300	119	59 (F)
Dry Comal Creek	USA	Gravity	Unamed	12/03/2016	12/08/2016	26	457	62	67					300	300	60	100
North Fork Hughes	USA	Gravity	North Fork Hughes	01/03/2016	01/07/2016	26	200	65	65	V	-8	0.8	-10	300	300	59 /107	59 (F) / 65
Pine Brook	USA	Gravity		05/10/2016	06/04/2016	26	170	27	30	V	-7		-17	300	300	95	59 (F)
Big Haynes	USA	Gravity	Big Haynes Creek	01/02/1995	01/06/1996	27	427	72	74	V	-8	0.8	-10	300	300	42 /39	42 (F) / 39
Randleman Lake	USA	Gravity	Deep	02/04/2016	02/07/2016	31	280	70	76	V	-1	0.75	-1	300	300	89	104 (F)
Stacy - spillway	USA	Gravity	Colorado	01/05/1988	01/04/1989	31	173	89	158	V	-13	0.831	-17	300	300	125	62 (C)
Trout Creek	USA	Gravity	Trout Creek	01/04/2000	01/05/2000	31	38	9	10	V	-1	0.8	-1	300	300	163	0
Elmer Thomas	USA	Gravity	Little Medicine	01/01/1993	01/02/1993	34	128	29	34	V	-1	0.64	-1	300	300	89	89 (F)
Elk Creek	USA	Gravity	Elk Creek	01/04/1987	01/01/1988	35	365	266	348	V	-1	0.8	-14	150	600	70	33 (F)
Thornton Gap	USA	Gravity	-	11/06/2016	11/09/2016	35	69	25	25	V	-3		-3	300	300	48	79 (F)
Hunting Run	USA	Gravity	Hunting Run	01/02/2016	02/01/2016	36	720	115	128	V	-8		-17	300	300	74	37 (F)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Pajarito Canyon	USA	Gravity	Pajarito	01/07/2000	01/08/2000	36	112	48	48	V	-15	1	-17	300	300	148	0
Victoria	USA	Gravity	West branch	01/08/1991	01/10/1991	37	100	36	40	V	-12	0.8	-3	300	300	67	67 (C)
Middle Fork	USA	Gravity	Middle Fork	01/07/1984	01/09/1984	38	125	42	43	V	-1	0.8	-1	300	300	66	0
Elkwater Fork	USA	Gravity	Tygart Tributory	-/2006	-/2007	39	204	106	113	V	-8	0.8	-3	300	300	59	89 (F)
Zintel Canyon	USA	Gravity	Zintel	01/07/1992	01/10/1992	39	158	54	55	V	-7	0.85	-17	300	300	74	0
C.E. Siegrist	USA	Gravity	Mill	01/04/1992	01/07/1992	40	213	69	70	V	-6	0.8	-17	300	300	59	34 (F)
Tie Hack	USA	Gravity	South Fork Clear	01/10/1996	01/08/1997	41	170	62	69	V	-1	0.8	-1	300	300	89	83 (F)
Grindstone Canyon	USA	Gravity	Grindstone	01/05/1986	01/07/1986	42	432	88	96	V	-1	0.75	-1	300	300	76	0
Quail Creek South	USA	Gravity	Quail Creek	01/03/1990	01/05/1990	42	610	130	150	V	-1	V / 0.85	(1)(17)	300	300	80	53 (F)
Stagecoach	USA	Gravity	Yampa	01/06/1988	01/07/1988	46	116	34	39	V	-1	0.8	-1	300	300	71	71 (F)
Monksville	USA	Gravity	Wanaque	01/03/1986	01/08/1986	48	670	219	232	V	-1	V / 0.78	(1)(17)	300	300	64	0
Penn Forest	USA	Gravity	Wild Creek	01/09/1997	01/10/1998	49	610	283	283	V	-6	0.5	(15)(7)	300	300	58	41 (F)
Taum Sauk	USA	Hardfill	East Fork of Black	07/10/2016	09/11/2016	49	2060	2448	2500	0.6	-1	0.6	-1	300	300	59	59 (F)
Cuchillo Negro	USA	Gravity	Cuchillo Negro	01/03/1990	01/05/1991	50	186	75	82	V	-7	0.9	-17	300	300	77	59 (F)
Galesville	USA	Gravity	Cow Creek	01/05/1985	01/08/1985	50	290	161	171	V	-1	0.8	-17	300	300	53	51 (F)
Willow Creek	USA	Gravity	Willow Creek	01/04/1982	01/09/1982	52	543	331	331	V	-7	0.8	-17	300	300	47	19 (F)
Hickory Log Creek	USA	Gravity	Hickory Log Creek	06/12/2016	07/06/2016	55	290	165		V	-8	0.8	-3	300	300	89 /80 74	89 (F) / 98
Saluda dam	USA	Gravity	Saluda	03/12/2016	05/04/2016	65	2439	1004	1410		-5		-5	300	300	89	89 (F)
Portugues	USA	Arch-Gra.	Portugues	11/01/2016	12/05/2016	67	375	300	320	V	-3	0.35	-3	300	300	114	51 (F)
San Vicente	USA	Gravity		11/08/2016	12/09/2016	67	474			V				300	300	86	127 (F)
Spring Hollow	USA	Gravity	off-stream	01/03/1993	01/08/1993	74	302	222	223	V	-6	0.8	-17	300	300	53	53 (F)
Upper Stillwater	USA	Gravity	Rock Creek	01/09/1985	01/08/1987	91	815	1125	1281	V	-14	0.32 / 0.6	(14)(14)	300	300	79	173 (F)
Olivenhain	USA	Gravity	Escondido Creek	02/02/2016	02/10/2016	97	788	1070	1140	V	-4	0.8	-3	300	300	74	121 (F)
El Guapo	Venezuela	Gravity	El Guapo	06/04/2016	06/12/2016	50	138	320	342	0.6	-1	0.8	-17	300	300	75	
Dinh Binh	Vietnam	Gravity	Kon	05/08/2016	07/12/2016	55	571	183	430	V	-11	0.75	-3	300	900	70 /126	175 (F)/141
Nuoc Trong	Vietnam	Gravity	Tra Kluc	09/07/2016	12/12/2016	69	454	450	600	V	-3			300	300	125 /80	218(N)/230
Pleikrong	Vietnam	Gravity	Po Ko	05/02/2016	06/12/2016	71	495	326	450	V	-1	0.8	-1	300	300	80	210 (N)
Se San 4	Vietnam	Gravity	Poko	05/03/2016	-/2008	74	834	753	1300	V	-1	0.8	-1	300	300	80	160 (N)
Dong Nai 2	Vietnam	Gravity	Dong Nai	10/12/2016	12/05/2016	80	429	786	1025					300	300	80 /90	120(N)/110
A Vuong	Vietnam	Gravity	Vugia Thubon	06/01/2016	07/10/2016	83	240	260	350	V	-1	0.8	-1	300	30	90	150 (N)
Huong Dien	Vietnam	Gravity	Bo	-/2011	-/2012	83		260	400							90	100 (N)
Trung Son	Vietnam	Gravity	Ma	14/04/2016	17/08/2016	88	498	770	1140	V / 0.35	(3) (3)	0.65	-3	300	300	60 70	140(N)/150
Dak Mi 4	Vietnam	Gravity	Vu Gia	-/2011	-/2012	90	472	720	800	V	-3	0.48/0.8	-3	300	300	95	125 (N)
Song Bung 2	Vietnam	Gravity	Bung	11/01/2016	-/2013	95				0.4		0.8				80 /60	120 (N)/140
Song Bung 4	Vietnam	Gravity	Vu Gia	12/06/2016	14/12/2016	96	367	764	954	0.4		0.8		300	300	80 /60	120N/140F
Song Tranh 2	Vietnam	Gravity	Song Tranh	08/04/2016	11/08/2016	96	640	1032	1315	V	-3	0.8	-1	300	300	70	110 (N)
Dak Dring	Vietnam	Gravity	Dak Dring	11/09/2016	12/12/2016	100	466	788			-3		-3	300	300	80	115 (N)

مشخصات تعدادی از سدهای وزنی بتن غلتکی ایران و جهان [۳۸]

نام سد Name	کشور Country	نوع سد Type	نام رودخانه River	دوره اجرای بتن غلتکی		ابعاد سد		حجم بتن		رویه‌های سد Facings				ضخامت بتن غلتکی		مواد سیمانی	
				Start	Finish	Height	Length	RCC	Total	بالادست U/S		پایین‌دست D/S		Layers	Lifts	Cement	Pozzolan
				RCC	RCC	(m)	(m)	(m^3x10^3)	(m^3x10^3)	Slope	Type	Slope	Type	(mm)	(mm)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
Dong Nai 3	Vietnam	Gravity	Dong Nai	08/05/2016	10/12/2016	108	594	1138	1235	V	-1	0.75	-1	300	300	75	0
Dong Nai 4	Vietnam	Gravity	Dong Nai	09/03/2016	11/06/2016	128	481	1305	1370	V	-1	0.8	-1	300	300	85	115 (N)
Ban Chat	Vietnam	Gravity	Nam Mu	09/08/2016	12/08/2016	130	425	1600	2	V	-3	0.8	-3	300	300	60	160 (F)
Lai Chau	Vietnam	Gravity	Song Da	13/03/2016	15/06/2016	131	620	2100	2500	V	-3	0.75	-3	300	300	60	160 (F)
Ban Ve	Vietnam	Gravity	Ca	07/02/2016	10/10/2016	136	480	1520	1750	V / 0.3	-3	0.85	-3	300	300	80	120 (N)
Son La	Vietnam	Gravity	Sond Da	08/01/2016	10/08/2016	138	962	2677	4800	V	-3	0.73	-3	300	300	60	160 (F)
Gwayi-Shangani	Zimbebwe	Gravity	Gwayi	-/2010	-/2015	70	305		300							60	140 (F)

منابع و مراجع

۱- مشخصات فنی عمومی سدها، ضابطه شماره ۳۹۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۲.

۲- آیین‌نامه سازه‌های بتنی حجیم، ضابطه شماره ۳۴۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵.

۳- آیین‌نامه بتن ایران، ضابطه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۳.

۴- هنسن و راینهارد، مترجم: بندار د.، «سدهای بتن غلتکی»، نشریه شماره ۱۴ کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۶.

۵- بندار د.، «پوزولان‌های طبیعی و اثر آن‌ها بر خواص بتن تازه و سخت شده»، انجمن بتن ایران، سال سوم، شماره هشتم، پاییز و زمستان ۱۳۸۱.

۶- قاضی مرادی ا.، «ارزیابی پوزولان‌های ایران»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۱۵۳، ۱۳۷۱.

۷- جبروتی م.ر.، منوچهری دانا ف.، «بررسی استفاده از پوزولان‌های طبیعی در صنعت سدسازی»، نشریه شماره ۷۳ کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۸۶.

۸- شریعتمداری، س. زهتاب، س. جبروتی، م. ر.، «کتاب دستی بتن»، انتشارات مهاب قدس، مرداد ۱۳۸۹.

۹- البهشتی ن.، کریمی م.ع.، «نقش حیاتی ابزار دقیق در برقراری تعامل موثر بین رفتار واقعی بدنه سد و پی با مطالعات تحلیلی ارزیابی ایمنی سدها»، فصلنامه شماره ۴۸ شرکت مهاب قدس، صفحات ۱۶ تا ۲۵، پاییز ۱۳۸۸.

۱۰-البهشتی ن.، «ویژگی ابزار دقیق سدهای بتنی – مطالعه موردی سد کارون ۴»، مجموعه مقالات کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، صفحات ۱۰۰۴ تا ۱۰۱۳، ۱۳۸۲.

۱۱-هزارخوانی ف.، سراج ح.، باسره ق.، «ابزار دقیق سدهای بتنی»، نشر کتاب دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۹.

۱۲-گزارش‌ها و نقشه‌های آرشیو شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس.

13- ICOLD Bulletin 126, "Roller-compacted concrete dams - State of the art and case histories", 2003.

14- Shigeyoshi Nagataki, Tadahiko Fujisawa, Hideaki Kawasaki, "State of the art of RCD dams in Japan", 2008.

15- Dunstan M.R.H., "Table of RCC Dams", Malcolm Dunstan & Associates, 2007.

16- ACI 207.5R-99, "Roller compacted mass concrete", 1999.

17- Andriolo F. R., "The use of roller-compacted concrete", Oficina de Textos, Sao Paulo – Brazil, 1998.

18- Scherader E.K. (Nawy E. G.), "Concrete construction engineering handbook, Section 20: Roller-compacted concrete", 1997.

19- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-2006, "Roller-compacted concrete", Washington DC, 2000.

20- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-2000, "Standard practice for concrete for civil works structures", Washington DC, 1994.

21- Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., "Design and control of concrete mixtures", Portland Cement Association, Illinois, USA, 1994.

22- Raphael J. M., "Tensile strength of concrete", ACI Journal, Proceeding Vol. 81, page 158-165, 1984.
23- Serafim J.L., Clough R.W., "Arch Dams", International workshop on arch dams, Coimbra, April 1987.
24- French Committee on Large Dams, "Small dams, guidelines for design, construction and monitoring", France, 2002.
25- Portland Cement Association, "Design manual for small RCC gravity dams", Skokie, Illinois, 2003.
26- Forbes B.A., "Innovations of significance and their development on some recent RCC dams", Proceeding of the 6th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dam, Zaragoza-Spain, page 69-93, 2012.
27- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-2100, "Stability analysis of concrete structures", Washington DC, 2005.
28- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-2200, "Gravity dam design", Washington DC, 1995.
29- US Army Corps of Engineers, EP 1110-2-12, "Seismic design provision for roller compacted concrete dams", Washington DC, 1995.
30- Jansen R. B., "Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation", Springer, New York, 1988.
31- US Army Corps of Engineers, ETL 1110-2-542, "Thermal studies of mass concrete structures", Washington DC, 1997.
32- ACI 207 2R.95, "Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete", Reapproved 2002.
33- Fenves G., and Chopra A.K., "Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete gravity dams", University Of California, Berkeley, 1986.
34- Chopra A. K., "Earthquake resistant design of concrete gravity dams", Journal of the Structural Division, ASCE, 104(ST6), 1978.
35- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-6051, "Time-history dynamic analysis of concrete hydraulic structures", Washington DC, 2003.
36- FERC, "(Chapter IX) Instrumentation and monitoring", 2001.
37- US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-4300, "Instrumentation for concrete structures", Washington DC, 1980.
38- Malcum Dunstan & Associates Consulting Engineers, Official Website, 2016.

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هفتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

Ali Yousefi	ZAPCE (ZAMIN AB PEY Consulting Engineers)	M. Sc. in Mining Engineering and Geological Engineering

Steering Committee:

Alireza Toutounchi	Deputy of Technical and Executive Affairs Department
Farzaneh Agharamezanali	Head of Water & Agriculture Group, Technical and Executive Affairs Department
Seyed Vahidoddin Rezvani	Expert in Irrigation & Drainage Engineering, Technical and Executive Affairs Department

Guideline for Productivity Improvement with Re-Engineering of Dam Construction Projects [No.723]

Executive Body:	Mahab Ghodss Consulting Engineers
Project Adviser:	Nahid Albeheshti

Authors & Contributors Committee:

Mohammad Taghi Ahmadi	Mahab Ghodss Consulting Engineers Tarbiat Modaress University	Ph D in Structures
Gholamreza Khoshrang	Saad-Tunnel Pars Consulting Engineers	B. Sc. in Civil Engineering
Mohammad Ali Karimi	Aban Pazhouh Consulting Engineers	M. Sc. in Structures
Mahdi Shakouri Rad	Mahab Ghodss Consulting Engineers	M. Sc. in Earthquake Engineering
Amir Kaveh Amini	Mahab Ghodss Consulting Engineers	M. Sc. in Hydraulic Structures
Mohammad Reza Jabarooti	Mahab Ghodss Consulting Engineers	B. Sc. in Civil Engineering
Farzad Manouchehri Dana	Mahab Ghodss Consulting Engineers	M. Sc. in Earthquake Engineering
Mojtaba Farrokh	Mahab Ghodss Consulting Engineers Khajeh Nasiroddin Tousi University	Ph D in Structures
Nahid Albeheshti	Mahab Ghodss Consulting Engineers	M. Sc. in Structures
Armin Monir Abbasi	Mahab Ghodss Consulting Engineers Payam –e- Noor University	Ph D in Construction Management

Supervisory Committee:

Dali Bondar	Freelance Expert	Ph D Civil Engineering
Seyed Mohammad Alavi Moghadam	Iran Water and Power Development Company	M. Sc. in Hydraulic Structures
Farhad Ghaderi	Babol Noshirvani Industrial University	Ph D in Civil Engineering

Confirmation Committee:

Masoud Hadidi Moud	Mahab-E Ghods Consulting Engineers	M. Sc. in Mechanical Engineering
Reza Rasti Ardakani	Shahid Beheshti University	Ph D in Civil Engineering
Seyed Mahdi Zandian	Iran Water Resources Management of Iran	M. Sc. in Counstruction and Project Management
Mohammad Taher Taheri Behbahani	Tavan-Ab Consulting Engineers	M. Sc. in Water Resources (Hydraulic) Engineering
Taghi Ebadi	Ministry of Energy- Water and Wastewater Standards and Projects Bureau	M. Sc. in Hydraulic Strcture Engineering
Mohammad Reza Askari	Bandab Consulting Engineers	Ph D in Civil Engineering
Najmeh Fouladi	Ministry of Energy- Water and Wastewater Standards and Projects Bureau	M. Sc. in Civil Engineering – Water Engineering

Abstract

This report's aim is to provide philosophical basis, material properties, design principles, construction considerations, and quality control of different types of RCC gravity dams.

The contents of this guideline provide the basis for selection of the appropriate RCC gravity dam type corresponding to the site conditions and purpose of the dam. It also provides key points of dam design and construction considerations for an engineer familiar with the dam industry.

Although this design guideline is not as a "standard code", but it provides the required allowable tolerances and safety factors based on the national and international design standards (with the reference).

It is worth to note that this design guideline only covers the gravity RCC dams. Considerations and principals of the dam appurtenant structures are not included in this design guideline.

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Design Guideline for Gravity Roller Compacted Concrete (RCC) Dams

No.723

Office of Deputy for Technical and Infrastructure Development Affairs

Department of Technical and ExecutiveAffairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Water and Wastewater Standards and Projects Bureau

http://seso.moe.gov.ir

2017

این ضابطه

این ضابطه با عنوان «راهنمای طراحی سدهای وزنی بتن غلتکی» با هدف ارائه و تشریح مبانی فلسفی، خواص و مشخصات مصالح بتن غلتکی، اصول طراحی، و ملاحظات اجرایی و کنترل کیفی انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلتکی و با بهره‌گیری از تجارب کارشناسی و آموزه‌های کسب شده از پروژه‌های اجرا شده در سطح کشور، استانداردهای معتبر بین‌المللی، و متناسب با شرایط و امکانات طبیعی کشور تهیه و تدوین گشته است.