

# زیبایم حُنی دانی که خاک آسید

## راهنمای بتن سبکدانه سازه‌ای

گزارش کمیته ICI-۲۱۳۰

از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن سازانجمن بتن ایران

راهنمای بتن سبکدانه سازه‌ای  
گزارش کمیته ICI-۲۱۳۰  
از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران

راهنمای بتن سبکدانه سازه‌ای

ناشر: اراده

نوبت چاپ: اول ۱۴۰۲

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

شابک

ISBN : 8-0

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیپا:

-۱

ویراستار: آیدین ریاضی

صفحه‌آرا: زهرا اسلامی

پایگاه اینترنتی: WWW.ICI.IR

## فهرست

۱۳	چکیده
۱۴	فصل ۱: مقدمه و گستره
۱۵	۱-۱- مقدمه
۱۵	۱-۲- گستره
۱۵	۱-۲-۱- پیشینه تاریخی
۱۶	۱-۲-۲- توسعه فرآیند تولید
۱۷	۱-۲-۳- کاربردهای مدرن اولیه
۱۹	فصل ۲- علائم و تعاریف
۲۰	۲-۱- علائم
۲۱	۲-۲- تعاریف
۲۳	فصل ۳- سبکدانه‌های سازه‌ای
۲۴	۳-۱- ساختار درونی سبکدانه‌ها
۲۴	۳-۲- تولید سبکدانه‌ها
۲۴	۳-۳- ویژگی‌های سنگدانه
۲۴	۳-۳-۱- شکل و بافت سطحی دانه‌ها
۲۵	۳-۳-۲- وزن مخصوص
۲۵	۳-۳-۳- چگالی انبوهی
۲۶	۳-۳-۴- مقاومت سبکدانه‌ها
۲۶	۳-۳-۴-۱- سقف مقاومت (مقاومت سیستم)
۲۷	۳-۳-۵- تخلخل کل
۲۹	۳-۳-۶- دانه‌بندی
۲۹	۳-۳-۷- درصد رطوبت و جذب آن
۳۰	۳-۳-۸- ضریب ارتجاعی سبکدانه‌ها
۳۱	فصل ۴- تعیین مشخصات، نسبت اجزای مخلوط، اختلاط و حمل
۳۲	۴-۱- گستره
۳۲	۴-۲- تعیین مشخصات بتن سبکدانه
۳۲	۴-۳- مصالح
۳۲	۴-۳-۱- مصالح سیمانی و پوزولانی
۳۳	۴-۳-۲- سبکدانه‌ها
۳۳	۴-۳-۴- سنگدانه‌ها با وزن معمولی

۳۳	۴-۳-۴- مواد افزودنی
۳۳	۴-۴- معیارهای تعیین طرح مخلوط
۳۴	۴-۴-۱- ویژگی‌های مشخص شده
۳۴	۴-۴-۱-۱- مقاومت فشاری
۳۴	۴-۴-۱-۲- چگالی
۳۵	۴-۴-۱-۳- ضریب ارتجاعی
۳۵	۴-۴-۱-۴- اسلامپ
۳۵	۴-۴-۱-۵- درصد حباب هوا
۳۶	۴-۴-۱-۶- سیر ویژگی‌ها
۳۶	۴-۴-۲- کارایی
۳۶	۴-۴-۳- گرمای هیدراته شدن
۳۷	۴-۴-۴- نسبت آب به مواد سیمانی
۳۷	۴-۵- تعیین طرح مخلوط و اصلاح آن
۳۷	۴-۵-۱- روش حجم مطلق
۳۸	۴-۵-۲- روش حجمی
۳۸	۴-۶- آماده‌سازی سنگدانه برای اختلاط
۳۹	۴-۷- بتن ریزی و پرداخت سطح
۴۰	۴-۷-۱- پمپ کردن بتن سبکدانه
۴۰	۴-۷-۱-۱- ملاحظات کلی
۴۰	۴-۷-۱-۲- تعیین طرح مخلوط بتن سبکدانه‌ای پمپی
۴۱	۴-۷-۱-۳- پمپ و سامانه پمپ کردن
۴۱	۴-۷-۲- پرداخت سطوح افقی
۴۲	۴-۷-۲-۱- اسلامپ
۴۲	۴-۷-۲-۲- آماده‌سازی سطح
۴۲	۴-۸- عمل آوری
۴۲	۴-۹- کنترل آزمایشگاهی و کارگاهی
۴۳	<b>فصل ۵- خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبکدانه سازه‌ای</b>
۴۴	۵-۱- گستره
۴۴	۵-۲- مقاومت فشاری
۴۴	۵-۳- چگالی بتن سبکدانه
۴۴	۵-۳-۱- چگالی بتن تازه



۴۵	۵-۳-۲- چگالی تعادلی
۴۶	۵-۴- مقاومت کششی
۴۶	۵-۴-۱- مقاومت کششی شکافتی
۴۶	۵-۴-۱- بتن عمل آوری شده با آب
۴۷	۵-۴-۱-۲- بتن خشک شده در هوا
۴۹	۵-۴-۲- مدول گسیختگی
۵۱	۵-۵- ضریب ارتجاعی
۵۲	۵-۶- ضریب پواسون
۵۲	۵-۷- کرنش نهایی
۵۳	۵-۸- خزش
۵۳	۵-۸-۱- عوامل موثر بر خزش
۵۴	۵-۸-۲- بتن عادی عمل آوری شده
۵۴	۵-۸-۳- بتن عمل آوری شده با بخار
۵۵	۵-۸-۴- تاثیر عمل آوری شده
۵۵	۵-۹- جمع شدگی
۵۶	۵-۹-۱- بتن عادی عمل آوری شده
۵۷	۵-۹-۲- بتن عمل آوری شده با بخار تحت فشار اتمسفر
۵۷	۵-۱۰- مقاومت پیوستگی
۵۹	۵-۱۱- انبساط حرارتی
۵۹	۵-۱۲- خواص جریان حرارتی
۵۹	۵-۱۲-۱- ضریب هدایت حرارتی
۶۱	۵-۱۲-۱-۱- تصحیح پیشنهاداتی برای ضریب رطوبت در رابطه با ضریب هدایت حرارتی
۶۲	۵-۱۲-۱-۲- رطوبت تعادلی بتن
۶۲	۵-۱۲-۱-۳- خمیر سیمان به عنوان مصالح عایق
۶۳	۵-۱۲-۲- ضریب انتقال حرارتی
۶۴	۵-۱۲-۳- ظرفیت گرمایی / گرمای ویژه
۶۴	۵-۱۲-۴- ضریب انشمار حرارتی
۶۵	۵-۱۳- دوام در برابر آتش
۶۷	۵-۱۴- جذب انرژی و مقاومت در برابر انفجار
۶۸	<b>فصل ۶- دوام بتن سبکدانه سازه‌ای</b>
۶۹	۶-۱- کلیات

۷۰	۲-۶- جذب آب
۷۰	۳-۶- ناحیه یا سطح مشترک انتقالی
۷۰	۱-۳-۶- تأثیر ناحیه انتقالی بر دوام
۷۲	۲-۳-۶- ناحیه انتقالی بتن سال خورده در معرض شرایط محیطی شدید
۷۴	۳-۳-۶- تأثیر ناحیه انتقالی روی سازوکار خرابی
۷۵	۴-۳-۶- سازگاری در محل سطح مشترک سنگدانه و خمیر
۷۵	۴-۶- مقاومت در برابر خوردگی
۷۵	۱-۴-۶- کربناته شدن در سازه‌های دریایی سالخورده
۷۵	۱-۴-۶- کلیات
۷۶	۲-۱-۴-۶- کشتی‌های بتنی شهر Cape Charles در ایالت ویرجینیای آمریکا
۷۷	۳-۱-۴-۶- پل خلیج Chesapeake واقع در شهر Annapolis ایالت مریلند آمریکا
۷۷	۴-۱-۴-۶- پل Cxsacike واقع در شهر نیویورک
۷۷	۵-۱-۴-۶- پل‌ها و دره گذرهای واقع در ژاپن
۷۷	۲-۴-۶- نفوذپذیری و حفاظت در برابر خوردگی
۷۹	۵-۶- واکنش قلیایی سبکدانه
۸۰	۶-۶- مقاومت سایشی
۸۱	<b>فصل ۷- طراحی بتن سبکدانه سازه‌ای</b>
۸۲	۷-۱- گستره
۸۲	۷-۲- ملاحظات کلی
۸۳	۷-۳- ضریب ارتجاعی
۸۳	۷-۴- مقاومت کششی
۸۵	۷-۵- تنش برشی و قطری
۸۵	۷-۶- طول مهارى
۸۵	۷-۶-۱- تسلیح غیر فعال
۸۷	۷-۶-۲- تسلیح فعال
۸۷	۷-۷- خیز
۸۷	۷-۷-۱- خیز اولیه
۸۷	۷-۷-۲- خیز بلند مدت
۸۷	۷-۸- ستون‌ها
۸۸	۷-۹- بتن سبکدانه پیش تنیده
۸۸	۷-۹-۱- کاربردها

- ۸۸ ۷-۹-۲- ویزگی‌ها
- ۸۸ ۷-۹-۲-۱- چگالی تعادلی
- ۸۸ ۷-۹-۲-۲- مقاومت فشاری
- ۸۹ ۷-۹-۲-۳- ضریب ارتجاعی
- ۸۹ ۷-۹-۲-۴- افت پیش‌تنیدگی
- ۸۹ ۷-۹-۲-۵- عایق حرارتی
- ۹۰ ۷-۹-۲-۶- مقاومت دینامیکی، مقاومت در برابر ضربه و ارتعاش و مقاومت لرزه‌ای
- ۹۰ ۷-۹-۲-۷- الزامات پوشش بتن
- ۹۰ ۷-۱۰- ملاحظات طراحی گرمایی
- ۹۱ ۷-۱۱- طراحی لرزه‌ای
- ۹۱ ۷-۱۱-۱- شکل‌پذیری
- ۹۲ ۷-۱۲- خستگی
- ۹۶ **فصل ۸- عملکرد و کاربردهای بتن سبکدانه**
- ۹۷ ۸-۱- گستره و سیر تحول
- ۹۷ ۸-۲- بازدهی سازه‌های بتن سبکدانه
- ۹۸ ۸-۳- کاربردهای بتن سبکدانه توانمند
- ۹۸ ۸-۳-۱- سازه‌های پیش‌ساخته
- ۹۹ ۸-۳-۲- ساختمان‌ها
- ۹۹ ۸-۳-۲-۱- ساختمان اداره پست ایالتی نیویورک ۱۹۶۷
- ۹۹ ۸-۳-۲-۲- برج ساختمانی Pier North در شیکاگو، ۱۹۹۱
- ۱۰۰ ۸-۳-۲-۳- ساختمان باک آمریکا در شارلوت، ۱۹۹۲
- ۱۰۲ ۸-۳-۳- پل‌ها
- ۱۰۳ ۸-۳-۳-۱- افزایش تعداد خطوط عبور و مرور در زمان بازسازی پل
- ۱۰۳ ۸-۳-۳-۲- افزایش ظرفیت باربری
- ۱۰۴ ۸-۳-۳-۳- پل‌هایی که در آن‌ها همزمان از دانه‌های بتن سبکدانه و معمولی استفاده شده است ۱۰۴
- ۱۰۶ ۸-۳-۳-۴- سازه‌های دریایی
- ۱۰۶ ۸-۳-۴-۱- جزیره Tarsiut محافظت شده توسط پی‌های صندوقه‌ای، ۱۹۸۱
- ۱۰۷ ۸-۳-۴-۲- سکوی شناور Heidrun، ۱۹۹۶
- ۱۰۸ ۸-۳-۴-۳- سکوی نفتی Hibernia، ۱۹۹۸
- ۱۰۸ ۸-۳-۵- پل‌های شناور
- ۱۰۹ ۸-۴- بتن سبکدانه خودتراکم (SCC)

۱۰۴	۸-۵- مزایای بتن سبکدانه
۱۱۰	۸-۵-۱- مزایای مرتبط با حمل و نقل
۱۱۳	۸-۶- توسعه پایدار بتن سبکدانه
۱۱۴	<b>فصل ۹- بهبود عملکرد به دلیل آب ذخیره شده درونی (عمل آوری درونی)</b>
۱۱۵	۹-۱- مفهوم عمل آوری درونی
۱۱۶	۹-۲- طرح مخلوط برای عمل آوری درونی
۱۱۹	۹-۳- ویژگی‌های سنگدانه برای عمل آوری درونی
۱۲۲	۹-۴- تأثیر عمل آوری درونی بر ویژگی‌ها و رفتار بتن
۱۲۳	۹-۴-۱- تأثیر عمل آوری درونی بر جمع شدگی خمیری
۱۲۳	۹-۴-۲- تأثیر عمل آوری درونی بر مقاومت بتن
۱۲۸	۹-۴-۳- تأثیر عمل آوری درونی بر ضریب ارتجاعی
۱۲۹	۹-۴-۴- تأثیر عمل آوری درونی بر خزش
۱۳۰	۹-۴-۵- تأثیر عمل آوری درونی بر تغییر حجم و ترک خوردگی
۱۳۳	۹-۴-۶- تأثیر عمل آوری درونی بر تخلخل
۱۳۴	۹-۴-۷- تأثیر عمل آوری درونی بر سیالات
۱۳۷	۹-۵- تجربیات میدانی
۱۳۹	<b>منابع</b>

## راهنمای بتن سازه‌ای سبکدانه

### ریاست هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران:

دکتر محمد شکرچی‌زاده

### مدیر افتخاری:

دکتر علیرضا نمدمالیان اصفهانی

### رئیس کمیته بتن سبک:

دکتر هرمز فامیلی

دکتر محسن تدین

### کمیته کار (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس حسن پارسیان

دکتر محسن تدین

مهندس حامد دشت‌آزاد

مهندس آیدین ریاضی

دکتر هرمز فامیلی

### اعضا پیوسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر علیرضا باقری

دکتر محسن تدین

مهندس محمدرضا جبروتی

دکتر محمد شکرچی‌زاده

مهندس محمدحسین رفعت‌خواه

مهندس آیدین ریاضی

دکتر هرمز فامیلی

دکتر علیرضا نمدمالیان

### اعضا وابسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر محمود ایراجیان

دکتر محمدحسین تدین

مهندس محمدامین جلیلی

مهندس محمدعلی دوستی

مهندس معین گودرزی

مهندس امیرمازیار رئیس قاسمی

دکتر سیدحسام مدنی

مهندس سید مهدی موسوی

دکتر رضا نعمت‌الهی

کاربرد سبکدانه‌ها در ساخت‌وساز به هزاره‌های قبل از میلاد بر می‌گردد. اولین سبکدانه‌ها، سبکدانه‌های طبیعی با منشاء غالباً آتشفشانی مانند پومیس، اسکوریا یا توف بودند. سپس با افزایش تقاضا و عدم دسترسی کافی به سبکدانه‌های طبیعی در سراسر جهان، تکنیک‌های تولید سبکدانه‌های صنعتی از مصالح خام طبیعی مانند رس منبسط‌شونده، شیل و اسلیت توسعه یافت و امروزه سبکدانه‌ها در محدوده وسیعی از چگالی که  $50 \text{ kg/m}^3$  برای پرلیت منبسط‌شده تا  $2000 \text{ kg/m}^3$  برای کلینکر متغیر است، تولید می‌شود و مصرف این سبکدانه‌ها در تولید بتن‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و قطعات پیش‌ساخته نظیر بلوک‌ها و پانل‌ها متداول است. حتی با بعضی از سبکدانه‌ها و با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی ساخت بتن‌های سازه‌ای تا ۸۰ مگاپاسکال هم میسر شده است.

در کشور ما خوشبختانه تولید سبکدانه صنعتی لیکا از دهه شصت انجام پذیرفته و این صنعت در طول چند دهه گذشته از لحاظ کیفی و کمی توسعه پیدا نموده است و اولین سازه با بتن سبک در دانشگاه علم و صنعت در دهه شصت احداث شد. همچنین در بهمن ماه ۱۳۹۰ اولین کنفرانس ملی بتن سبک در دانشکده فنی دانشگاه تهران برگزار گردید.

در حال حاضر خوشبختانه شاهد هستیم بتن‌های سبک پرمقاومت و خودتراکم به تدریج توسط کارخانه‌های بتن آماده، تولید و در ساختمان‌ها بکار می‌رود و امیدواریم با توجه به لرزه‌خیزی کشور و وزن مخصوص کمتر بتن‌های سبک، این صنعت در آینده توسعه یابد.

گزارش حاضر که ویرایش اول تهیه‌شده توسط کمیته علمی بتن سبک سازه‌ای انجمن بتن ایران می‌باشد، حاوی مطالب مفید و سودمندی در رابطه با خواص و کاربرد بتن سبکدانه‌ای سازه‌ای می‌باشد و جا دارد از همت جناب آقایان دکتر هرمز فامیلی و دکتر محسن تدین و سایر همکاران این بزرگواران قدردانی نمایم.

محمد شکرچی زاده

رئیس هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران

## پیش گفتار

مزایای بتن به عنوان یک مصالح ساختمانی به حدی است که آن را پس از آب به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح در آورده است. علی‌رغم این مزایا، سنگینی وزن بتن موجب ایجاد محدودیت در کاربری آن گردیده است.

از این رو تلاش‌های زیادی از دیر باز صورت گرفته است تا ضمن حفظ ویژگی‌های خوب بتن از وزن آن بکاهند. در این رابطه کوشش‌ها از دو جهت بوده است. از طرفی سعی بر کاستن از وزن سنگدانه‌ها و استفاده از سبکدانه و از طرف دیگر کاستن از وزن خمیر سیمان با ایجاد هوا در آن متمرکز شده است اولین استفاده شناخته شده از بتن سبکدانه به بیش از ۲۰۰۰ سال قبل بر می‌گردد که در سازه‌های متعددی در نواحی مدیترانه از این نوع بتن استفاده شد که نمونه‌هایی از آن مربوط به دوره امپراطوری روم معابد‌های Pantheon و coliseum می‌باشند. رومیان در احداث این معابد از پومیس که نوعی مصالح سبک است استفاده کرده‌اند. پس از کاربردهای اولیه تا قرن بیستم میلادی که تولید مصنوعی سبکدانه ابداع گردید سابقه‌ای از کاربرد بتن سبک موجود نمی‌باشد.

در ایران اگرچه ممکن است در گذشته از پوکه سنگ‌های موجود در ساخت بتن در مقیاس کوچک استفاده شده باشد ولی کاربردهای مهمی به ثبت نرسیده است. در دهه ۱۳۶۰ که کارخانه تولید پوکه صنعتی به نام لیکا راه‌اندازی گردید برای اولین بار در پروژه‌ای برای ساخت یک واحد ساختمانی دو طبقه در محوطه دانشگاه علم و صنعت ایران از سبکدانه لیکا استفاده شد. در این ساختمان از بتن سبکدانه با چگالی ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۸ Mpa استفاده شد.

تولید بتن سبک در ایران در گذشته به صورت سنتی با استفاده از سبکدانه‌های طبیعی مانند پوکه سنگ‌های معدنی برای کارهای غیرسازه‌ای بوده است.

در سال‌های اخیر با استفاده از پوکه صنعتی لیکا بتن سبکدانه سازه‌ای متداول گردید و در پروژه‌های بلند مرتبه و غیره مورد استفاده قرار رفته است. پروژه‌های متعددی نیز در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی در مورد کاربردهای بتن سبکدانه سازه‌ای انجام شده است و نتایج به صورت پراکنده موجود است.

انجمن بتن ایران بر آن شد این انتشارات پراکنده را در قالب مجموعه‌ای به نام راهنمای

جامع بتن ساز گردآوری نماید و در اختیار علاقمندان قرار دهد. این فعالیت در قالب تشکیل کمیته‌های علمی تخصصی مربوط به بتن شکل گرفته است. آنچه از نظر می‌گذرد گزارش کمیته بتن سبکدانه سازه‌ای است که با حمایت مادی و معنوی شرکت محترم لیکا در انجمن بتن ایران تهیه گردیده است.

امید است این گزارش به دسترسی دانشجویان و کارشناسان به دانش مربوط به خواص و کاربرد بتن سبکدانه سازه‌ای کمک نماید و بهتر بتوانیم از مزایای این نوع بتن در ساخت و سازه‌های کشورمان ایران بهره بگیریم.

علی‌رغم تلاش‌های زیادی که صورت گرفته تا متن تخصصی تهیه شده بدون خطا باشد و لیکن مسلماً هنوز اشتباهاتی وجود دارند که از خوانندگان محترم درخواست می‌شود این خطاها را یادآوری نمایند تا انشاءالله در چاپ‌های بعدی گزارش مورد توجه قرار گیرد.

لازم است از حمایت شرکت محترم لیکا بویژه مدیریت جناب آقای دکتر نمدمالیان و جناب آقای مهندس محمدحسین رفعت‌خواه مدیرعامل محترم شرکت لیکا که با حمایت‌های مادی و معنوی امکان تهیه گزارش را فراهم نموده‌اند سپاسگزاری می‌شود.

زحمات جناب آقای مهندس محمدرضا اشرفی گل و آقای عزیزا... بریجانی کروایی و آقای مهندس آیدین ریاضی نیز موجب تقدیر است.



## چکیده

این راهنما، وضعیت فعلی تکنولوژی بتن سازه‌ای سبکدانه را خلاصه نموده و داده‌های بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی متعدد و تجربیات انباشته حاصل از استفاده موفقیت آمیز از این نوع بتن را ارائه و تفسیر می‌کند. علاوه بر این، عملکرد این نوع بتن در حال بهره‌برداری را نیز بررسی می‌کند.

این راهنما شامل تعریفی از بتن سبکدانه برای اهداف سازه‌ای است و روش‌های تولید و ویژگی‌های ذاتی سبکدانه‌های سازه‌ای را به صورت فشرده مورد بحث قرار می‌دهد. روش‌های حال حاضر برای تعیین طرح مخلوط، نحوه اختلاط، حمل، بتن‌ریزی، خواص بتن تازه و سخت‌شده و طراحی بتن سازه‌ای با استناد به ACI 318 همگی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

**کلمات کلیدی:** مقاومت سایشی، سنگدانه، پیوستگی، ناحیه انتقال (ITZ)، دوام، آتش‌پاد، عمل‌آوری درونی، سبکدانه، بتن سبکدانه، نسبت اجزای اختلاط، برش، جمع‌شدگی، وزن مخصوص بتن، مقاومت، هدایت حرارتی.

A black and white electron micrograph showing a dense field of cells with prominent nuclei and granular cytoplasm, serving as a background for the text.

# فصل ۱

مقدمه و گستره

## ۱-۱- مقدمه

هدف این راهنما، ارائه اطلاعات و دستورالعمل‌هایی برای طراحی و کاربرد بتن سبکدانه است. با استفاده از این دستورالعمل‌ها و روش‌های ساخت، می‌توان سازه‌ها را با همان قطعیت و قابلیت اطمینان بتن با وزن معمولی و سایر مصالح ساختمانی طراحی نمود و عملکرد آن‌ها را پیش‌بینی کرد.

این راهنما ویژگی‌های منحصربه‌فرد و عملکرد بتن سازه‌ای سبکدانه<sup>۱</sup> (LWA) را پوشش می‌دهد. تاریخچه کلی و اطلاعات جزئی در مورد سبکدانه‌ها در کنار روش‌های تعیین نسبت اجزای مخلوط، اختلاط و بتن‌ریزی برای این نوع بتن ارائه شده است. همچنین، خصوصیات فیزیکی سبکدانه‌های سازه‌ای به همراه اطلاعات طراحی و کاربری‌های آن‌ها نیز ذکر شده‌اند.

بتن سبکدانه سازه‌ای کاربردهای متعدد و متنوعی دارد. از جمله این کاربردها می‌توان از قاب و کف ساختمان‌های چندطبقه، دیوارهای نازک<sup>۲</sup>، سقف‌های پوسته‌ای، صفحات تاشده<sup>۳</sup>، عرشه و شاه‌تیرهای پل، انواع عناصر پیش‌تنیده یا پیش‌ساخته و سازه‌های دریایی نام برد. در بسیاری از موارد، بیان معماری فرم و طراحی کارکردی، با استفاده از بتن سبکدانه سازه‌ای ساده‌تر از هر روش دیگری حاصل می‌شود. بسیاری از معماران، مهندسان و پیمانکاران، مزایای اقتصادی و ذاتی این نوع مصالح را تصدیق می‌کنند. همانطور که بسیاری از سازه‌های شکوهمند بتنی سبک در سرتاسر جهان، گواه این مساله هستند.

از آنجایی که بسیاری از خصوصیات و عملکرد بتن سبکدانه، به نوع سبکدانه مورد استفاده بستگی دارد، تامین‌کننده مخلوط آماده، تولیدکننده سبکدانه یا هر دو، می‌توانند منبع مهمی از اطلاعات به خصوص برای دستیابی به اهداف پروژه باشند.

## ۱-۲- گستره

### ۱-۲-۱- پیشینه تاریخی

اولین استفاده شناخته شده از بتن سبکدانه به بیش از ۲۰۰۰ سال پیش باز می‌گردد. چندین سازه بتنی سبکدانه در منطقه مدیترانه وجود دارد، اما سه مورد از قابل توجه‌ترین آن‌ها در اوایل امپراتوری روم ساخته شده‌اند و شامل بندر کوزا<sup>۴</sup>، گنبد پانتئون<sup>۵</sup> و کولوسئوم<sup>۶</sup> هستند.

در احداث بندر کوزا که تقریباً در سال ۲۷۳ قبل از میلاد ساخته شده، از بتن سبکدانه بدست آمده از

<sup>1</sup> Lightweight aggregate

<sup>2</sup> Curtain walls

<sup>3</sup> Folded plates

<sup>4</sup> Port of Cosa

<sup>5</sup> Pantheon Dome

<sup>6</sup> Coliseum

مواد طبیعی آتشفشانی استفاده شده است. این سازندگان نخستین پی بردند که سنگدانه‌های منبسط‌شده برای استفاده در تاسیسات دریایی مناسب‌تر از شن و ماسه‌های موجود در ساحل هستند. آن‌ها به منظور استخراج سنگدانه‌های آتشفشانی برای استفاده در ساخت بندر کوزا، مسافتی ۴۰ کیلومتر را به سمت شمال شرقی سفر کردند (Bremner و همکاران، ۱۹۹۴). این بندر واقع در ساحل غربی ایتالیا شامل مجموعه‌ای از چهار اسکله است که به سمت دریا امتداد یافته‌اند. دو هزار سال است که این اسکله‌ها در برابر نیروهای طبیعت مقاومت کرده و تنها دچار سایش سطحی شده‌اند. در حال حاضر این بندر فقط به دلیل لای گرفتگی<sup>۷</sup> متروک شده است.

پانتئون که حدوداً در سال ۱۲۶ پس از میلاد ساخته شده، از بتن‌هایی با چگالی متفاوت از پایین تا بالای گنبد تشکیل شده است. مهندسان رومی چنان اطمینانی به بتن سبکدانه داشتند که از آن برای ساخت گنبدی با قطر ۴۳ متر استفاده کردند که انتظار نمی‌رفت برای تقریباً دو هزار سال دوام داشته باشد. این سازه اکنون در شرایط بی‌نظیری قرار داشته و همچنان برای مقاصد معنوی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bremner و همکاران، ۱۹۹۴).

این گنبد، شامل فرورفتگی‌های پیچیده‌ای است که به منظور کاهش بار مرده، با استفاده از قالب‌های چوبی شکل داده شده‌اند و هنوز هم اثر ذرات چوب بر روی آن‌ها قابل مشاهده است. سطوح بتنی عالی که برای بازدیدکنندگان قابل مشاهده است، به وضوح نشان می‌دهد که این سازندگان نخستین، به خوبی به مهارت ساخت بتن با سبکدانه‌ها مسلط شده بودند. نویسنده، معمار و مهندس رومی، ویتروویوس<sup>۸</sup>، که علاقه خاصی به ساخت‌وساز داشت، در مورد چندین ویژگی خارق‌العاده پانتئون اظهار نظر کرده است. این واقعیت که او در نظرات خود، به بتن سبکدانه به صورت جداگانه اشاره نکرده، می‌تواند به این معنی باشد که این سازندگان اولیه کاملاً با این مصالح آشنا بوده‌اند (Morgan، ۱۹۶۰).

کولوسئوم که در سال‌های ۷۵ تا ۸۰ بعد از میلاد ساخته شده، یک آمفی‌تئاتر عظیم با ظرفیت ۵۰۰۰۰ تماشاگر است. پی این سازه با بتن سبکدانه متشکل از گدازه‌های آتشفشانی خردشده ساخته شده است. دیوارها با استفاده از سنگدانه آجری متخلخل و خردشده ساخته شده‌اند. طاق‌ها و فضاها بین دیوارها نیز با استفاده از سنگ توف متخلخل تراش‌خورده ساخته شده است.

## ۲-۱- توسعه فرآیند تولید

پس از سقوط امپراتوری روم، استفاده از بتن سبکدانه تا قرن ۲۰ محدود شده بود تا اینکه در این دوره، نوع جدیدی از سبکدانه به صورت شیل منبسط‌شده<sup>۹</sup> برای کاربرد تجاری در دسترس قرار گرفت.

<sup>۷</sup> Siltation

<sup>۸</sup> Vitruvius

<sup>۹</sup> Expanded shale

فرآیند کوره دوار<sup>۱۰</sup> که از آن برای تولید شیل، رس و سنگ لوح منبسط شده استفاده می‌شود، در سال ۱۹۱۸ توسعه یافت. سبکدانه‌ها با حرارت دادن دانه‌های کوچک شیل، خاک رس یا سنگ لوح در کوره‌های دوار تولید می‌شوند. اندازه‌ای از دانه‌ها کشف شد که با خردشدگی ناچیز، دانه‌بندی سنگدانه مناسبی برای ساخت بتن سبکدانه بدست می‌دهد (موسسه شیل، رس و سنگ لوح منبسط شده<sup>۱۱</sup>، ۱۹۷۱). هنگام ساخت آجرهای رسی، مهم است که خاک رس از پیش شکل داده شده، به آرامی حرارت داده شود تا گازهای پدیدآمده برای خارج شدن از داخل رس فرصت داشته باشند. اگر حرارت دادن خیلی سریع انجام شود، تورمی در آجر به وجود می‌آید که یکنواختی ابعادی لازم برای آجر پخته‌شده را ندارد. Hayde، این آجرهای مردود را به عنوان مصالحی ایده‌آل برای ساخت یک بتن خاص معرفی کرد. هنگامی که اندازه و دانه‌بندی سنگدانه‌های این آجرهای پف کرده، به مقدار مناسبی کاهش یابد، می‌توان از آن‌ها در تولید بتن سبکدانه با خواص مکانیکی مشابه بتن معمولی استفاده نمود.

تولید تجاری سبکدانه منبسط‌شده<sup>۱۲</sup> (یعنی شیل، رس یا سنگ لوح منبسط‌شده) در سال ۱۹۲۸ آغاز شد و در سال ۱۹۴۸، اولین سبکدانه بصورت شیل متخلخل با کیفیتی مناسب برای کاربرد سازه‌ای در شرق پنسیلوانیا<sup>۱۳</sup> تولید شد.

در اوایل دهه ۱۹۰۰، یکی از اولین کاربردهای بتن مسلح سبک، استفاده در ساخت کشتی‌ها و لنج‌ها بود. شرکت ساخت ناوگان اضطراری ایالات متحده<sup>۱۴</sup> دریافت که برای اینکه بتن در ساخت کشتی قابل اجرا باشد، به حداکثر چگالی حدود  $1760 \text{ kg/m}^3$  و مقاومت فشاری تقریبی  $28 \text{ MPa}$  نیاز دارد (موسسه شیل، رس و سنگ لوح منبسط‌شده، ۱۹۶۰). با استفاده از شیل و سنگدانه‌های رسی منبسط تولید شده در کوره دوار، بتنی با مقاومت فشاری تقریبی  $34 \text{ MPa}$  و وزن مخصوص  $1760 \text{ kg/m}^3$  یا کمتر بدست آمد.

### ۳-۲-۱- کاربردهای مدرن اولیه

در اواخر دهه ۱۹۴۰ که یک بررسی بر روی کاربرد احتمالی بتن سبکدانه به منظور ساخت مسکن انجام شد، عزم راسخی برای توسعه بتن سبکدانه به وجود آمد. این موضوع به مطالعه گسترده بتن‌های ساخته‌شده با سبکدانه‌ها منجر شد. با حمایت اداره تامین مالی مسکن<sup>۱۵</sup> (۱۹۴۹)، مطالعات موازی به طور همزمان در آزمایشگاه‌های سازمان ملی استانداردها<sup>۱۶</sup> (Kluge و همکاران، ۱۹۴۹) و سازمان احیای اراضی ایالات متحده

<sup>10</sup> Rotary kiln process

<sup>11</sup> Expanded Shale, Clay and Slate Institute

<sup>12</sup> Expanded slag

<sup>13</sup> Pennsylvania

<sup>14</sup> U.S. Emergency Fleet Building Corporation

<sup>15</sup> Housing and Home Finance Agency

<sup>16</sup> National Bureau of Standards (NBS)

(Price)<sup>۱۷</sup> (USBR و Cordon، ۱۹۴۹) انجام شد تا خصوصیات بتن‌های ساخته‌شده با طیف وسیعی از انواع سبکدانه‌ها تعیین شود. تمرکز این مطالعات و کارهای قبلی، بر کاربرد سازه‌ای احتمالی برخی از بتن‌های ساخته‌شده با سبکدانه‌ها قرار داشت و در اوایل دهه ۱۹۵۰ تمایل مجددی به استفاده از قطعات سبک برای ساخت قاب‌ها، عرشه پل‌ها و محصولات پیش‌ساخته به وجود آورد. پس از فروریختن پل تاکوما نروژ<sup>۱۸</sup> در واشنگتن، در طراحی سازه معلق جایگزین، از بتن سبکدانه در عرشه استفاده شد تا خطوط سواره‌روی اضافی بدون نیاز به جایگزینی پایه‌های اصلی به پل اضافه شوند.

در طول دهه ۱۹۵۰ بسیاری از سازه‌های چند طبقه، از پی تا بالا با استفاده از بتن سبکدانه طراحی شدند تا بار مرده در آن‌ها کاهش داده شود. به عنوان مثال، ساختمان ۴۲ طبقه پرودنشال لایف<sup>۱۹</sup> در شیکاگو، که در آن از کف‌های بتنی سبک استفاده شد، و هتل ۱۸ طبقه استتler هیلتون<sup>۲۰</sup> در دالاس که با اسکلت و کف‌های صفحه‌ای تخت<sup>۲۱</sup> بتنی سبکدانه طراحی شده است.

این کاربردهای سازه‌ای، تحقیقات متمرکز بیشتری را در مورد خواص بتن سبکدانه برانگیخت. در صورت استفاده از مصالح سبک در سازه‌های شناور حوزه انرژی مانند دکل‌های حفاری نفت، بهره‌وری مطلوبی حاصل می‌شود. کاهش ۲۵ درصدی جرم در بتن مسلح با وزن معمولی، در هنگام غوطه‌وری باعث کاهش ۵۰ درصدی بار خواهد شد. به همین دلیل، دست‌اندرکاران صنعت نفت و گاز دریافتند که می‌توان از مزایای بتن سبکدانه در ساخت سازه‌های شناور و سازه‌هایی که در حوضچه تعمیرات<sup>۲۲</sup> ساخته و سپس به محل بهره‌برداری منتقل و در بستر دریا مستحکم می‌شوند<sup>۲۳</sup>، استفاده نمود. به منظور فراهم کردن اطلاعات فنی لازم برای ساخت سازه‌های دریایی بتنی عظیم، کنسرسیومی متشکل از شرکت‌های نفتی و پیمانکاران ایجاد شد تا ارزیابی کنند کدامیک از گزینه‌های سبکدانه‌ها برای ساخت بتن سبکدانه پرمقاومتی که الزامات طراحی آن‌ها را برآورده کند، مناسب هستند. ارزیابی‌ها در اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شده و نتایج در سال ۱۹۹۲ در دسترس قرار گرفت. در نتیجه این تحقیقات، اطلاعات طراحی به راحتی در دسترس قرار گرفت و این امکان را فراهم کرد تا از بتن سبکدانه برای کاربردهای جدید و نوآورانه که در آن‌ها به مصالح پرمقاومت و با دوام نیاز است، استفاده شود (Hoff، ۱۹۹۲). استفاده از سبکدانه لیکا برای ساخت یک ساختمان دوطبقه در فضای دانشگاه علم و صنعت ایران از اولین پروژه‌های بتن سبک سازه‌ای در کشور است. در این بنای دوطبقه از بتن با مقاومت فشاری ۱۸ MPa استفاده شد.

<sup>17</sup> U.S. Bureau of Reclamation

<sup>18</sup> Tacoma Narrows

<sup>19</sup> Prudential Life

<sup>20</sup> Statler Hilton

<sup>21</sup> Flat plate floor

یک دال با ضخامت یکنواخت که مستقیماً بر روی ستون‌ها یا دیوارهای باربر قرار داده می‌شود.

<sup>22</sup> Graving dock

<sup>23</sup> Bottom-founded





# فصل ٢

## علائم و تعاریف

۱-۲- علائم

نماد	توضیح
A	نسبت حجم جامد (بدون حفره) به حجم کل یک دانه واحد
B	نسبت حجم حفرات درونی دانه به حجم کل دانه
BD	چگالی انبوهی، $\text{kg/m}^3$
C	نسبت حجمی دانه‌ها
$C_f$	ضریب سیمان یا جرم سیمان در ۱ مترمکعب
CS	جمع‌شدگی شیمیایی چسباننده در واحد جرم آن در هنگام اتمام واکنش (معمولا برابر 0/07 mL/g cement)
c	ظرفیت حرارتی، $\text{kJ}/(\text{kg.K})$
D	نسبت حجم حفرات میان‌ذره‌ای (بین دانه‌ها)
E	چگالی تعادلی محاسباتی، $\text{kg/m}^3$
$E_c$	ضریب ارتجاعی، GPa
$E_{cd}$	ضریب ارتجاعی دینامیکی دانه‌ای، GPa
$f_c$	مقاومت فشاری بتن، MPa
$f_{ct}$	میانگین مقاومت کششی شکافتی (دو نیمه کردن یا برزیلی)، MPa
$f'_c$	مقاومت فشاری
k	ضریب هدایت حرارتی، $\text{W}/(\text{m.K})$
$M_{LWA}$	جرم سبکدانه
P	میانگین چگالی دانه‌ای خشک، $\text{kg/m}^3$
R	مقاومت حرارتی
RD	چگالی نسبی، $\text{kg/m}^3$
U	ضریب انتقال حرارتی، $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
S	درجه اشباع سبکدانه
V	حجم بتن تولید شده، $\text{m}^3$



چگالی بتن خشک شده در گرمچال، $\text{kg/m}^3$	$W_c$
وزن سیمان در پیمان، kg	$W_{ct}$
وزن درشت‌دانه در پیمان، kg	$W_{dc}$
وزن ریزدانه خشک در پیمان، kg	$W_{df}$
وزن مخصوص بتن معمولی یا چگالی تعادلی بتن سبکدانه، $\text{kg/m}^3$	$W_c$
چگالی در شرایط مرطوب، $\text{kg/m}^3$	$W_m$
چگالی در شرایط خشک‌شده در گرمچال، $\text{kg/m}^3$	$W_{od}$
حداکثر درجه واکنش مورد انتظار چسباننده، متغیر بین ۰ تا ۱	$\alpha_{max}$
ظرفیت جذب آب اندازه‌گیری شده سبکدانه	$\Phi_{LWA}$

## ۲-۲- تعاریف

ACI لیست جامعی از تعاریف‌ها را در قالب مرجعی تحت عنوان «واژگان سیمان و بتن» در دسترس قرار داده است. تعاریف‌های ارائه‌شده در این بخش، در تکمیل لیست یادشده هستند.

**بتن تمام سبکدانه:** بتنی که در آن، درشت‌دانه و ریزدانه از سبکدانه تشکیل شده است.

**ناحیه انتقالی:** لایه انتقالی مصالح که سنگدانه‌ها را به خمیره ملات پیوسته احاطه‌کننده متصل می‌کند.

**چگالی بتن تازه:** جرم واحد حجم بتن در حالت تازه و قبل از وقوع گیرش.

**بتن سبکدانه پرمقاومت:** بتن سبکدانه سازه‌ای با مقاومت فشاری ۲۸ روزه  $40 \text{ MPa}$  یا بیشتر.

**سنگدانه عایق:** سنگدانه غیرسازه‌ای که الزامات ASTM C332 را تامین می‌کند؛ شامل سنگدانه‌های گروه ۱،

پرلیت<sup>۲۴</sup> با چگالی انبوهی  $(120 - 192) \text{ kg/m}^3$ ، ورمیکولیت<sup>۲۵</sup> منبسط شده با چگالی انبوهی  $(88 - 160) \text{ kg/m}^3$

و سنگدانه‌های گروه ۲ که الزامات ASTM C330/C330M و ASTM C331/C331M را برآورده می‌کنند.

**آب ذخیره‌شده درونی:** آبی که درون سنگدانه است و در هنگام اختلاط بتن به آسانی قابل دسترس

نیست و بنابراین تاثیری روی نسبت آب به مواد سیمانی (cm/w) نخواهد داشت.

سبکدانه بنایی<sup>۲۶</sup> (MLWA): سنگدانه‌ای که الزامات ASTM C331/C331M را تامین می‌کند و چگالی

انبوهی برای ریزدانه کمتر از  $1120 \text{ kg/m}^3$  و برای درشت‌دانه کمتر از  $880 \text{ kg/m}^3$  باشد.

**آب خالص:** آب کل منهای آب جذب‌شده توسط سنگدانه.

<sup>24</sup> Perlite

<sup>25</sup> Vermiculite

<sup>26</sup> Masonry lightweight aggregate

۲۲ ..... راهنمای بتن سازه‌ای سبکدانه

**چگالی خشک‌شده در گرمچال:** چگالی بتن سبکدانه سازه‌ای پس از قرارگرفتن در گرمچال تحت

دمای  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  تا زمانی که مطابق ASTM C567/C567M به یک چگالی ثابت برسد.

**بتن با چگالی مشخصه:** بتن سازه‌ای با چگالی تعادلی مشخصه بین  $(800 - 2240)\text{kg/m}^3$  یا بیشتر از  $2480\text{kg/m}^3$ .

**سبکدانه سازه‌ای:** سبکدانه‌ای که الزامات ASTM C330/C330M را تامین می‌کند و چگالی انبوهی

برای ریزدانه کمتر از  $1120\text{kg/m}^3$  و برای درشت‌دانه کمتر از  $880\text{kg/m}^3$  باشد.



# فصل ۳

سبکدانه‌های سازه‌ای

### ۱-۳- ساختار درونی سبکدانه‌ها

سبکدانه‌ها (LWAها) به دلیل بافت متخلخل و حفره‌دار خود، چگالی نسبی دانه‌ای کمی دارند. ساختار حفره‌دار درون دانه‌ها معمولاً از طریق حرارت دادن مواد اولیه مشخص تا وقوع همجوشی اولیه<sup>۲۷</sup> ایجاد می‌شود. در این دما، گازهایی در داخل توده وجود می‌آیند که باعث انبساط شده و پس از سرد شدن نیز باقی می‌مانند. سبکدانه‌های محکم و بادوام، توزیع منافذ یکنواختی دارند که دارای محدوده اندازه تقریبی  $(5 - 300) \mu\text{m}$  هستند و در یک فاز پیوسته، نسبتاً بدون ترک و با مقاومت زیاد توسعه یافته‌اند. منافذ نزدیک به سطح به راحتی قابل نفوذ هستند و ظرف چند ساعت تا چند روز پس از قرار گرفتن در معرض رطوبت، با آب پر می‌شوند؛ در حالی که منافذ درونی بسیار آهسته پر می‌شوند و برای اشباع شدن به ماه‌ها غوطه‌ور شدن در آب نیاز دارند. بخش کوچکی از منافذ درونی هم اساساً به یکدیگر متصل نیستند و پس از سال‌ها غوطه‌وری هم پر نمی‌شوند.

### ۲-۳- تولید سبکدانه‌ها

سبکدانه‌ها با روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. برخی از آن‌ها در کارخانه‌های تولیدی، از مواد خام از جمله شیل‌های مناسب، رس‌ها، سنگ لوح، خاکستر بادی یا سرباره‌های کوره‌ی آهن‌گدازی بدست می‌آیند. سبکدانه‌های طبیعی از ذخایر آتشفشانی حاوی پومیس<sup>۲۸</sup> و اسکوریا<sup>۲۹</sup> استخراج می‌شوند. فرآیندهای حرارتی شامل کوره دوار و فرآیند ذوب سطحی<sup>۳۰</sup> هستند. در روش کوره دوار از یک استوانه بلند، با چرخش کند و کمی شیدار استفاده می‌شود که همچون کوره‌های سیمان با مواد نسوز پوشانده شده است. در فرآیند ذوب سطحی، بستری از مواد اولیه و سوخت توسط نوار نقاله در یک محفظه احتراق<sup>۳۱</sup> حمل می‌شوند. پس از عبور بستر از محفظه احتراق، سرباره مذاب با مقادیر کنترل‌شده هوا یا آب هم زده می‌شود. هیچ توضیح واحدی از پردازش مواد اولیه، جامع و شامل تمام موارد نیست. برای شناخت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سبکدانه‌ها و بتن تولید شده با آن‌ها، می‌توان با تولیدکنندگان محلی سبکدانه‌ها مشورت کرد.

### ۳-۳- ویژگی‌های سنگدانه

هر کدام از ویژگی‌های سبکدانه می‌تواند روی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده تاثیر بگذارد. باید توجه کرد که خواص بتن سبکدانه، همچون بتن معمولی، به شدت تحت تاثیر خمیره سیمانی است. فهرستی از خواص سنگدانه‌ها که می‌توانند بر ویژگی‌های بتن تاثیر بگذارند در بخش‌های ۱-۳-۳ تا ۸-۳-۳ ارائه شده‌اند.

#### ۱-۳-۳- شکل و بافت سطحی دانه‌ها

سبکدانه‌های بدست آمده از منابع مختلف یا تولید شده با روش‌های متفاوت ممکن است از نظر شکل و بافت دانه‌ها

<sup>27</sup> Incipient fusion

<sup>28</sup> Pumice

<sup>29</sup> Scoria

<sup>30</sup> Sintering

<sup>31</sup> Ignition hood

به میزان قابل توجهی متفاوت باشند. شکل دانه‌ها می‌تواند مکعبی و نسبتاً منظم، عمدتاً گرد، یا شکسته و نامنظم باشد. بافت سطحی دانه‌ها می‌تواند از نسبتاً صاف با منافذ کوچک نمایان تا نامنظم با منافذ کوچک تا بزرگ متغیر باشد. شکل و بافت سطحی ریزدانه و درشت‌دانه، بر طرح مخلوط و در عواملی مانند کارایی، قابلیت پمپ شدن، نسبت دانه‌های ریز به درشت، مقدار ماده چسباننده<sup>۳۲</sup> و مقدار آب موردنیاز تاثیرگذار است. این تاثیر، مشابه اثراتی است که در صورت استفاده از سنگدانه‌های با وزن معمولی دارای شکل دانه‌های متنوع همچون شن گرد گوشه، سنگ آهک خردشده، سنگ بازالتی یا ماسه شکسته حاصل می‌شود.

### ۲-۳-۳- وزن مخصوص

وزن مخصوص سبکدانه‌ها (چگالی نسبی تقسیم بر چگالی آب)، به دلیل ساختار حفره‌دارشان کمتر از سنگدانه‌های با وزن معمولی است. وزن مخصوص سبکدانه‌ها با توجه به اندازه دانه‌ها متفاوت است. به این صورت که برای دانه‌های ریز دارای بالاترین مقدار و برای دانه‌های درشت دارای کمترین مقدار است. میزان این تفاوت به روش‌های فرآوری دانه‌ها بستگی دارد. محدوده عملی وزن مخصوص سبکدانه‌های درشت اصلاح‌شده حالت خشک، تقریباً یک سوم تا دو سوم سنگدانه‌های با وزن معمولی است. سبکدانه‌های با چگالی دانه‌ای کمتر از این محدوده، ممکن است به سیمان بیشتری برای دستیابی به مقاومت موردنیاز احتیاج داشته باشند و در نتیجه الزامات چگالی بتن را برآورده نکنند.

### ۳-۳-۳- چگالی انبوهی<sup>۳۳</sup>

چگالی انبوهی سبکدانه‌ها به دلیل ساختار متخلخل آن‌ها، به طور قابل توجهی کمتر از سنگدانه‌های با وزن معمولی است. برای یک دانه‌بندی و شکل دانه‌های یکسان، چگالی انبوهی یک سنگدانه اساساً با چگالی‌های نسبی دانه‌ای متناسب است. با این حال، ممکن است سنگدانه‌های با چگالی دانه‌ای یکسان، به دلیل درصد متفاوت حفرات در حجم‌های حالت خشک غیرمتراکم یا متراکم<sup>۳۴</sup> سنگدانه‌های با اشکال مختلف، چگالی انبوهی متفاوتی داشته باشند. برای شن گرد گوشه و شکسته نیز شرایط مشابهی وجود دارد و برای چگالی دانه‌ای و دانه‌بندی یکسان در حالت خشک متراکم، تفاوت چگالی انبوهی می‌تواند به بزرگی  $160 \text{ kg/m}^3$  باشد. چگالی انبوهی سبکدانه‌های گرد گوشه و شکسته با چگالی دانه‌ای یکسان ممکن است در حالت خشک غیرمتراکم  $\text{kg/m}^3$  ۸۰ یا بیشتر تفاوت داشته باشند، اما جرم یکسان از هر کدام از آن‌ها، حجم یکسانی را در بتن اشغال می‌کند. هنگام استفاده از سنگدانه‌های مختلف، باید این موضوع را در ارزیابی کارایی در نظر گرفت. جدول ۳-۳-۳ مقادیر حداکثر چگالی انبوهی را برای سبکدانه‌های فهرست شده در ASTM C330/C330M و C331/C331M خلاصه می‌کند.

<sup>32</sup> Binder content

<sup>33</sup> Bulk density

<sup>34</sup> Dry loose or dry rodded

جدول ۳-۳-۳- الزامات چگالی انبوهی ASTM C330/C330M و C331/C331M برای سبکدانه‌های خشک غیرمترکم

اندازه و گروه سنگدانه	بیشینه چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
C331/C331M و ASTM C330/C330M	
ریزدانه	۱۱۲۰
درشت‌دانه	۸۸۰
مخلوط ریزدانه و درشت‌دانه	۱۰۴۰

#### ۴-۳-۳- مقاومت سبکدانه‌ها

مقاومت سبکدانه‌ها با توجه به نوع و منبعی که از آن بدست آمده‌اند، متفاوت است و فقط از نظر کیفی قابل اندازه‌گیری هستند. ممکن است برخی از دانه‌ها پرمقاومت و سخت باشند در حالی که برخی دیگر سست و شکننده هستند. در مورد سبکدانه‌های مصنوعی، معمولاً برای مقاومت فشاری بتن تا حدود ۳۵MPa، هیچ رابطه قابل اعتمادی بین مقاومت ذاتی سنگدانه و مقاومت بتن وجود ندارد. همان طور که توسط Videla و Lopez (۲۰۰۰، ۲۰۰۲) نشان داده شده، برای بتن ساخته شده با سبکدانه‌های طبیعی که معمولاً مقاومت کمتری دارند، ممکن است یک رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری بتن و مقدار و مقاومت سنگدانه وجود داشته باشد.

#### ۱-۴-۳-۳- سقف مقاومت<sup>۳۵</sup> (مقاومت تقسیم)

سقف مقاومت، حد بالای مقاومت فشاری و کششی بتن است که پس از آن، افزایش مقاومت خمیر دیگر عامل کنترل‌کننده اصلی مقاومت بتن نیست. زمانی که مخلوط‌های مشابه حاوی سنگدانه‌های یکسان و با نسبت آب به سیمان کمتر (w/c) افزایش مقاومت‌های ناچیزی داشته باشند، مخلوط به سقف مقاومتی خود رسیده است. در نقطه کاهش بازدهی، مخلوط دیگر با افزایش مقدار سیمان، افزایش مقاومت متناسبی ایجاد نمی‌کند. سقف مقاومت برای برخی از سبکدانه‌ها می‌تواند بسیار زیاد و به سقف مقاومت برخی از سنگدانه‌های با وزن معمولی نزدیک باشد.

سقف مقاومت عمدتاً تحت تاثیر درشت‌دانه‌هاست. برای اکثر سبکدانه‌ها، می‌توان سقف مقاومت را با کاهش حداکثر اندازه درشت‌دانه به میزان قابل توجهی افزایش داد. این اثر برای سنگدانه‌های ضعیف و شکننده‌تر، چشم‌گیرتر است. در یک مورد، مقاومت به دست آمده در آزمایشگاه، برای بتن حاوی حداکثر اندازه ۲۰ mm از یک سبکدانه خاص، ۳۵ MPa بود. با این حال، هنگامی که بدون تغییر مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه به ۱۳ mm و ۱۰ mm کاهش یافت، مقاومت به ترتیب به ۴۲ MPa و ۵۲ MPa افزایش

<sup>35</sup> Strength ceiling

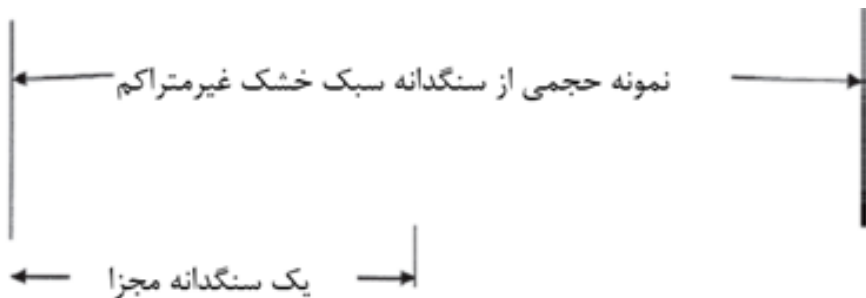
یافت. در نتیجه، زمانی که حداکثر اندازه سنگدانه به ۱۳ mm و ۱۰ mm کاهش یافت، وزن مخصوص بتن به ترتیب  $48 \text{ kg/m}^3$  و  $80 \text{ kg/m}^3$  افزایش یافت.

Meyer و همکاران (۲۰۰۳) گزارش دادند که ممکن است برای یک سبکدانه مشخص، مقاومت کششی با رفتاری مشابه با مقاومت فشاری افزایش نیابد. افزایش مقاومت کششی نسبت به افزایش مقاومت فشاری با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد. این اثر در مقاومت فشاری بیش از  $35 \text{ MPa}$  قابل توجه‌تر است.

### ۵-۳-۳- تخلخل کل<sup>۳۶</sup>

تعیین نسبت اجزای طرح مخلوط بتن و اعمال اصلاحات میدانی بتن سبکدانه به درک کامل تخلخل، جذب آب، و درجه اشباع سبکدانه‌ها نیاز دارد. درجه اشباع، که نسبت بخش پر شده با آب منافذ است، را می‌توان با استفاده از پیکنومتر<sup>۳۷</sup> اندازه‌گیری کرد. این اندازه‌گیری‌ها، چگالی نسبی را در مقادیر مختلف جذب آب تعیین می‌کنند و بنابراین امکان تعیین طرح مخلوط بتن به روش حجم مطلق را می‌دهند. در این راهنما، منافذ<sup>۳۸</sup> به عنوان فضای خالی درون یک سنگدانه و حفرات<sup>۳۹</sup> به عنوان فضای خالی بین سنگدانه‌ها تعریف شده‌اند. تخلخل کل که در داخل و بین سنگدانه‌ها وجود دارد، از مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی نسبی دانه‌ای و چگالی انبوهی تعیین می‌شود. در مثال زیر نشان داده شده که تخلخل کل چگونه تعیین می‌شود:

الف) چگالی انبوهی (BD) در حالت خشک غیرمتراکم  $BD = 0.77, 770 \text{ kg/m}^3$  و (ASTM C138/C138M و ACI 211.2)  
 ب) چگالی نسبی (RD) دانه‌ای خشک  $RD = 1/4, 1400 \text{ kg/m}^3$  و (ASTM C138/C138M و ACI 211.1)  
 پ) چگالی نسبی ماده جامد بدون منافذ  $RD = 2/6, 2600 \text{ kg/m}^3$  و (ASTM C138/C138M و ACI 211.1)



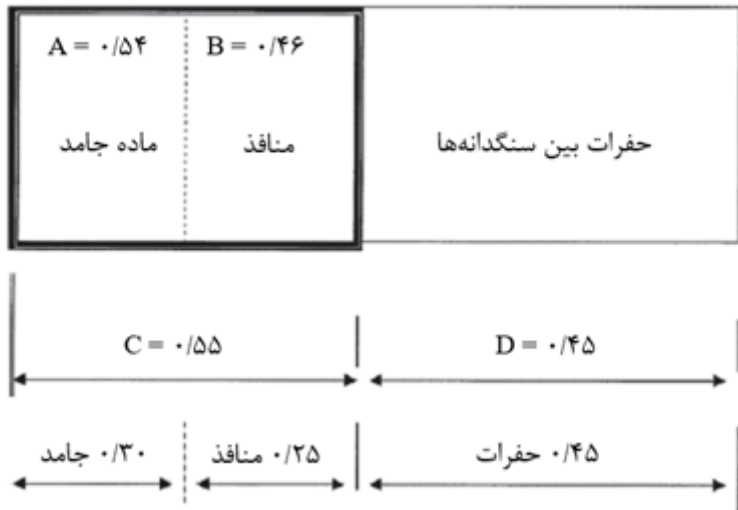
<sup>36</sup> Total porosity

<sup>37</sup> Pycnometer

<sup>38</sup> Pores

<sup>39</sup> Voids





شکل ۳-۳-۵- نمایش ماده جامد، منافذ و حفرات در سبکدانه

- توجه شود که چگالی نسبی دانه‌ای بخش جامد که در این مثال، یک مصالح سرامیکی بدون منفذ است ( $RD = 2/6$ ،  $2600 \text{ kg/m}^3$ )، برابر میانگین بدست آمده از روش زیر است.
- نمونه‌های کوچک از سه سبکدانه منبسط شده مختلف به مدت ۲۴ ساعت در آسیاب گلوله‌ای شیشه‌ای<sup>۴۰</sup> جداگانه آسیاب شدند. نمونه‌ها پس از آسیاب شدن طبق روش ASTM C188 آزمایش شدند و چگالی نسبی سبکدانه آسیاب شده بدست آمد.
- طبق نظر Weber و Reinhardt (۱۹۹۵)، درصد کوچکی از منافذ در سنگدانه‌های منبسط شده، کمتر از  $10 \mu\text{m}$  هستند و در دانه‌های با اندازه کوچک‌تر از الک  $200 (75 \mu\text{m})$  به صورت شکسته نشده باقی می‌مانند. چگالی نسبی بخش جامد شیشه‌ای سنگدانه منبسط شده معمولاً بیش از  $2600 \text{ kg/m}^3$  است. تخلخل واقعی سنگدانه‌ها ممکن است کمی بیش از آن چیزی باشد که توسط محاسبات زیر تعیین می‌شود. هنگامی که منافذ بسیار کوچک توسط یک ساختار شیشه‌ای محکم و نسبتاً بدون ترک محصور می‌شوند، این منافذ در هیچ گونه تبادل رطوبتی فعال نخواهند بود.
- سپس تخلخل کل (منافذ و حفره‌ها)، همانطور که به صورت شماتیک در شکل ۳-۳-۵ نشان داده شده، برابر است با:

$$0.70 = (0.55 \text{ (دانه‌ها)}) \times (0.46 \text{ (منافذ)}) + (0.45 \text{ (حفرات)})$$

که:

$$A : \text{نسبت حجم بخش جامد شیشه‌ای (بدون منفذ) یک سبکدانه به حجم کل، برابر } 0.54 = \frac{1/4}{2/6}$$

$$B : \text{نسبت حجم منافذ (در یک سبکدانه) به حجم کل، برابر } 0.46 = 1 - 0.54$$

<sup>40</sup> Jar ball mill



$$C: \text{ برای این مثال، نسبت حجم سنگدانه‌ها و برابر } 0/55 = \frac{0/77}{1/4}$$

$$D: \text{ نسبت حجم حفرات بین سنگدانه‌ها و برابر } 0/45 = 1 - 0/55$$

### ۳-۳-۶- دانه‌بندی

الزامات دانه‌بندی برای سبکدانه‌ها، با سنگدانه‌های با وزن معمولی (ASTM C33/C33M) متفاوت می‌باشد و نیاز است تا جرم بیشتری از سبکدانه‌ها از الک‌های ریزتر عبور کنند. این اصلاح دانه‌بندی (ASTM C330/C330M)، افزایش چگالی را با کاهش اندازه سبکدانه‌ها مشخص می‌کند. این اصلاح، توزیع حجمی یکسانی را برای سبکدانه‌ها و سنگدانه‌های با وزن معمولی به دست می‌دهد که روی مجموعه‌ای از الک‌ها باقی می‌مانند.

معمولا سبکدانه‌ها در چند اندازه استاندارد شامل سبکدانه‌های درشت، متوسط و ریز انباشته می‌شوند. می‌توان با ترکیب اندازه‌ها یا جایگزینی همه یا بخشی از ریزدانه با ماسه با وزن معمولی، طیف وسیعی از چگالی‌های بتن را به دست آورد. به عنوان مثال، جایگزین کردن ماسه دارای وزن معمولی با ریزدانه‌های سبک، معمولا چگالی تعادلی بتن را حدود  $80 \text{ kg/m}^3$  تا  $160 \text{ kg/m}^3$  کاهش می‌دهد.

با ظهور تکنولوژی بتن مدرن، به ندرت به افزایش قابل توجه مقدار سیمان برای کاهش  $w/cm$  با هدف دست‌یابی به مقاومت مشخص شده نیاز است. در عوض، این هدف را می‌توان با استفاده از افزودنی‌های روان‌کننده یا فوق‌روان‌کننده به دست آورد.

### ۳-۳-۷- درصد رطوبت و جذب آب

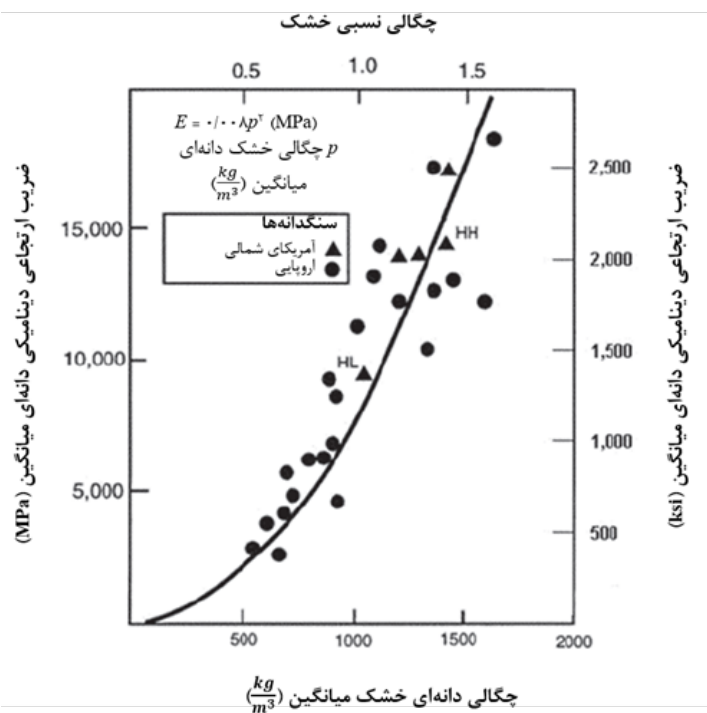
سبکدانه‌ها به دلیل ساختار متخلخل خود، می‌توانند آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های با وزن معمولی جذب کنند. بر اساس آزمایش جذب آب ASTM C127، سبکدانه‌ها پس از خیساندن به مدت ۲۴ ساعت، بسته به سیستم منافذ خود بین ۵ تا ۲۵ درصد جرم سنگدانه خشک، آب جذب می‌کنند.

در مقابل، بیشتر سنگدانه‌های با وزن معمولی کمتر از ۲ درصد رطوبت جذب می‌کنند. اگرچه، درصد رطوبت در یک انباشته سنگدانه با وزن معمولی می‌تواند به میزان ۵ درصد یا بیشتر هم باشد. تفاوت مهم اینجاست که محتوای رطوبتی سبکدانه‌ها، علاوه بر سطح سبکدانه، به منافذ داخل آن‌ها نیز جذب می‌شود در حالی که در سنگدانه‌های با وزن معمولی، رطوبت جذب شده عمدتاً به صورت رطوبت سطحی است. همان‌طور که در بخش‌های آتی بحث خواهد شد، این تفاوت در تعیین نسبت اجزای مخلوط، پیمان‌کردن و کنترل بتن حائز اهمیت است.

بسته به مشخصات منافذ، نرخ جذب آب نیز عامل دیگری است که بر طرح مخلوط، حمل و خواص بتن تاثیرگذار است. آبی که به داخل سبکدانه‌ها جذب می‌شود، بلافاصله در دسترس سیمان قرار نمی‌گیرد و نباید به عنوان بخشی از آب آزاد مخلوط در نظر گرفته یا در محاسبات  $w/cm$  دخالت داده شود. ACI 211.2 جزئیاتی را در مورد درصد رطوبت در بحث تعیین طرح مخلوط ارائه می‌دهد.

### ۳-۳-۸- ضریب ارتجاعی سبکدانه‌ها

ضریب ارتجاعی بتن، تابعی از ضریب ارتجاعی اجزای تشکیل دهنده آن است. بتن را می‌توان به عنوان یک ماده سه فازی (سنگدانه‌ها، خمیر سیمان، و ناحیه انتقالی سطح مشترک<sup>۴۱</sup>) در نظر گرفت. با این حال، همانطور که در بخش ۳-۶ توضیح داده شد، ممکن است بتن سبکدانه به صورت یک ماده دو فازی هم در نظر گرفته شود که از درشت‌دانه‌هایی که در یک ملات پیوسته شامل خمیر سیمان، حباب‌های هوا و ریزدانه قرار دارند، تشکیل شده است. به همین دلیل، توجه به ضریب ارتجاعی سبکدانه‌ها و تاثیر آن در ضریب ارتجاعی بتن ضروری است. یک تقریب برای ارزیابی ضریب ارتجاعی سبکدانه‌ها، استفاده از اندازه‌گیری‌های دینامیکی است، که رابطه‌ای مطابق با تابع  $E = 0.008 p^2$  نشان داده‌اند (برمنر و هولم<sup>۴۲</sup>، ۱۹۸۶)، که در آن E ضریب دینامیکی سنگدانه بر حسب MPa و p چگالی دانه‌ای خشک میانگین بر حسب  $kg/m^3$  است (شکل ۳-۳-۸). مدول دینامیکی سنگدانه‌های منبسط‌شده معمولی در محدوده (۱۶ - ۱۰) Gpa است، در حالی که برای سنگدانه‌های با وزن معمولی پرمقاومت، تقریباً در بازه (۱۰۰ - ۳۰) Gpa دارد (Muller-Rochholz، ۱۹۷۹).



شکل ۳-۳-۸- رابطه میان چگالی دانه‌ای میانگین و ضریب ارتجاعی دینامیکی دانه‌ای میانگین در سبکدانه‌ها (Bremner و

Holm، ۱۹۸۶)

<sup>41</sup> Interfacial transition zone

<sup>42</sup> Bremner and Holm

# فصل ۴

تعیین مشخصات، نسبت اجزای  
مخلوط، اختلاط و حمل

#### ۴-۱- گستره

تعیین طرح مخلوط بتن سبکدانه، با ترکیب فنی و اقتصادی اجزای آن که معمولاً شامل سیمان پرتلند، سنگدانه، آب، مواد افزودنی شیمیایی یا مواد افزودنی معدنی هستند، انجام می‌شود؛ به طوری که ویژگی‌های موردنیاز در بتن تازه و سخت شده ایجاد شود. پیش‌نیاز انتخاب طرح مخلوط، آگاهی از ویژگی‌های مصالح تشکیل‌دهنده و مطابقت آن‌ها با مشخصات استاندارد ملی ایران و یا ASTM مربوطه است. با آگاهی از خواص اجزای تشکیل‌دهنده و اثرات مرتبط آن‌ها بر بتن، می‌توان نسبت اجزای بتن سبکدانه را به گونه‌ای تعیین کرد تا ویژگی‌های مشخص شده برای سازه نهایی را داشته باشد.

#### ۴-۲- تعیین مشخصات بتن سبکدانه

ملاحظات کلی در زمان تعیین مشخصات بتن سبکدانه شامل موارد زیر است:

الف) الزامات مقاومت متوسط هدف طرح مخلوط بتن سبکدانه (هدف طرح مخلوط) برای درجه یکسان کنترل در محل، تفاوتی با بتن عادی ندارد.

ب) آزمایش‌های مقاومت کششی شکافتی (آزمایش برزیلی)، برای کنترل یا پذیرش مقاومت بتن در کارگاه در نظر گرفته نشده‌اند (ACI 318).

پ) تحلیل ظرفیت باربری یک سازه بتن سبکدانه به وسیله مغزه‌گیری یا آزمایش بارگذاری، مشابه سازه‌های بتنی معمولی است.

ت) حداکثر چگالی بتن تازه باید قبل از شروع فرآیند احداث پروژه مشخص شود.

ث) چگالی تعادلی مطابق با ASTM C567/C567M محاسبه شود.

#### ۴-۳- مصالح

بتن سبکدانه همچون بتن معمولی از سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی شیمیایی و معدنی تشکیل شده است. مواد افزودنی به منظور ایجاد حباب هوا، کاهش آب موردنیاز اختلاط و اصلاح زمان گیرش یا سایر ویژگی‌های بتن اضافه می‌شوند. آزمون‌های آزمایشگاهی باید بر روی تمام اجزای تشکیل‌دهنده انجام و مخلوط‌های آزمایشی<sup>۴۳</sup> از نسبت اجزای مخلوط بتن با مصالح موجود پیشنهادی برای استفاده، ساخته شوند.

#### ۴-۳-۱- مصالح سیمانی و پوزولانی

این مصالح باید الزامات ASTM C150/C150M، C595/C595M، C618، C1157/C1157M یا C1240 را برآورده کنند.

<sup>43</sup> Trial batches

#### ۴-۳-۲- سبکدانه‌ها

برای بتن سازه‌ای، سبکدانه‌ها باید الزامات ASTM C330/C330M را برآورده کنند. مقدار سیمان مورد نیاز برای سبکدانه‌های بدست آمده از منابع مختلف برای دستیابی به یک مقاومت مشخص بتن، به دلیل تفاوت مقاومت دانه‌هایشان متفاوت خواهد بود. این موضوع به خصوص برای مقاومت‌های زیادتر از ۳۵ MPa قابل توجه است. مثالی از یک طرح مخلوط معمولی بتن سبکدانه با مقاومت فشاری ۲۴ MPa توسط والتر پی. مور و همکاران<sup>۴۴</sup> (۲۰۱۲) در جدول ۴-۳-۲ نشان داده شده است. در صورت کاربرد یک سبکدانه برای اولین بار، همواره استفاده از مخلوط‌های آزمایشی توصیه می‌شود.

جدول ۴-۳-۲- مثال طرح مخلوط بتن سبکدانه با مقاومت ۲۴ MPa

مقدار (kg/m <sup>3</sup> )	مصالح
۳۰۳	سیمان
۷۷	خاکستر بادی
۵۲۰	سبکدانه درشت
۸۰۰	سنگدانه ریز با وزن معمولی

#### ۴-۳-۳- سنگدانه‌های با وزن معمولی

سنگدانه‌های با وزن معمولی استفاده شده در بتن سبکدانه باید مطابق با مشخصات استاندارد ASTM C33/ C33M باشند.

#### ۴-۳-۴- مواد افزودنی

مواد افزودنی باید مطابق با استاندارد ASTM یا استاندارد ملی مربوطه باشند. راهنمای استفاده از افزودنی‌ها را می‌توان از راهنماهای ACI 232.2R، ACI 233R، ACI 234R، مشخصات استاندارد ASTM C260/ C260M، و ASTM C1017/C1017M و C494/494M بدست آورد.

#### ۴-۴- معیارهای تعیین طرح مخلوط

فصل ۵، طیف گسترده‌ای از مشخصات فیزیکی بتن سبکدانه را شامل می‌شود. مقادیر مشخص شده، به ویژگی‌های سنگدانه خاصی که استفاده می‌شود و نیز سایر شرایط بستگی دارند. در تعیین نسبت اجزای یک

<sup>44</sup> Walter P. Moore and associates

مخلوط بتنی سبکدانه، مهندس ناظر علاقمند است تا برای یک کاربرد خاص، مقادیری قابل پیش‌بینی از ویژگی‌های مشخص را بدست آورد.

مشخصات فنی بتن سبکدانه معمولاً مقادیر حداقل مجاز را برای مقاومت‌های فشاری و کششی، مقدار حداکثر اسلالمپ و هر دو مقدار حداقل و حداکثر را برای درصد هوا تعیین می‌کنند. علاوه بر این، همواره محدودیتی برای حداکثر چگالی بتن تازه و چگالی تعادلی ذکر می‌شود.

از نقطه‌نظر ساخت‌وساز، کارایی بتن سبکدانه تازه نیز باید برای عملکرد بهینه تنظیم شود. برخی ویژگی‌ها به یکدیگر وابسته هستند. بنابراین، بهبود یک ویژگی همچون کارایی ممکن است روی سایر ویژگی‌ها مانند چگالی یا مقاومت تاثیر گذار باشد. عملکرد کلی سازه آن گونه که توسط مهندس ناظر تعیین شده، آخرین معیاری است که باید برآورده شود.

#### ۴-۱-۴-۱- ویژگی‌های مشخص شده

##### ۴-۱-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری در فصل ۵ مورد بحث بیشتری قرار خواهد گرفت. انواع مختلف سبکدانه‌های در دسترس، با مقدار سیمان، نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm) و اسلالمپ مشابه، همیشه مقاومت‌های فشاری یکسانی برای بتن ایجاد نمی‌کنند.

مقاومت فشاری بتن سازه‌ای مطابق الزامات طراحی سازه تعیین می‌شود. به طور معمول، مقاومت تعیین شده بین ۲۱ تا ۳۵ MPa و در موارد معدود تا حداکثر ۴۸ MPa متغیر است. اگرچه برخی از سبکدانه‌ها قادرند مقاومت‌های بیش از ۲۸ MPa را ایجاد کنند، اما نباید انتظار داشت که بتن ساخته شده با هر سبکدانه‌ای که در دسته سازه‌ای طبقه‌بندی شده، به صورت یکنواخت به مقاومت‌های بیش از این مقدار برسد.

##### ۴-۱-۲- چگالی

چگالی، یکی از ملاحظات مهم در تعیین نسبت اجزای مخلوط‌های بتن سبکدانه برای اعضای سازه‌ای است. در حالی که این ویژگی که در درجه اول به چگالی سنگدانه و نسبت سبکدانه‌ها و سنگدانه‌های با وزن معمولی بستگی دارد، تحت تاثیر سیمان، آب و درصد هوا نیز قرار می‌گیرد. چگالی بتن تا یک محدوده خاصی با تنظیم نسبت سبکدانه و سنگدانه با وزن معمولی حفظ می‌شود. برای مثال، اگر به منظور تامین مقاومت فشاری زیادتر مقدار سیمان افزایش داده شود، ممکن است چگالی بتن افزایش پیدا کند. در صورتی که چندین منبع مختلف از سبکدانه‌ها در دسترس باشد، برقراری تعادل بهینه بین هزینه و عملکرد بتن ممکن است به یک بررسی جامع نیاز داشته باشد. تنها با مقایسه بتن‌های دارای مقاومت فشاری و چگالی تعادلی یکسان می‌توان تفاوت‌های اساسی بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مختلف را به درستی ارزیابی کرد. در برخی مناطق، تنها یک منبع سبکدانه از نظر اقتصادی در دسترس است. در این حالت، تنها نیاز است تا چگالی بتنی که عوامل اقتصادی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشخص شده سازه را برآورده می‌کند تعیین شود.



#### ۴-۱-۳- ضریب ارتجاعی

اگرچه مقادیر  $E_c$  همیشه تعیین نمی‌شوند اما این اطلاعات معمولاً برای بتن ساخته‌شده با سبکدانه‌های مشخص در دسترس است. این ویژگی در فصول ۵ و ۷ به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

#### ۴-۱-۴- اسلامپ

اسلامپ باید به گونه‌ای باشد تا بتن‌ریزی، تراکم و پرداخت مناسب آن را میسر سازد. اسلامپ باید در زمان بتن‌ریزی اندازه گرفته شود.

#### ۴-۱-۵- درصد حباب هوا

در بتن سبکدانه نیز همچون بتن با وزن معمولی، وجود حباب‌های هوا برای مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب شدن مطابق آنچه در ACI 201,2R جدول ۱-۳-۱ نشان داده شده، لازم است. همچنین در بتن ساخته شده با برخی سبکدانه‌ها، این موضوع وسیله موثری برای ارتقای کارایی بتن نیز می‌باشد. از آنجایی که حباب‌های هوای ایجاد شده، با حفظ اسلامپ مشابه، آب موردنیاز اختلاط، آب‌انداختن<sup>۴۵</sup> و جداشدگی<sup>۴۶</sup> را کاهش می‌دهند، رویکرد معمول این است که در بتن سبکدانه صرف‌نظر از اینکه در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن قرار دارد یا نه، از حباب‌های هوا استفاده شود.

الزامات درصد هوای کل، بر اساس حداکثر اندازه اسمی سبکدانه و شرایط محیطی که در جدول ۴-۴-۱-۵ الف برای بتن در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن ارائه شده، برای بتن سبکدانه بکار می‌رود. درصد هوای کل توصیه شده بر اساس اندازه اسمی سنگدانه برای بتن سبکدانه دارای حباب‌های هوای ایجاد شده که در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن قرار ندارد، در جدول ۴-۴-۱-۵-ب ارائه شده است.

جدول ۴-۴-۱-۵-الف- درصد هوای کل برای بتن در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن (جدول ۴-۴-۱ در ACI 318-11)

مقدار هوا (%)		حداکثر اندازه اسمی سنگدانه <sup>۱</sup> (mm)
رده‌بندی شرایط محیطی F2 و F3	رده‌بندی شرایط محیطی F1	
۷/۵	۶	۹/۵
۷	۵/۵	۱۲/۵
۶	۵	۱۹
۶	۴/۵	۲۵
۵/۵	۴/۵	۳۸

۱ برای رواداری اندازه‌های بزرگ‌تر از حد معمول در تعیین حداکثر اندازه اسمی مختلف به ASTM C33/C33M مراجعه شود.

<sup>45</sup> Bleeding

<sup>46</sup> Segregation

جدول ۴-۱-۵-ب- در صد هوای توصیه شده برای بتن سبکدانه دارای حباب‌های هوای ایجاد شده‌ای که در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن قرار ندارد (رده‌بندی شرایط محیطی F0)<sup>۱</sup>

مقدار هوا (%)	حداکثر اندازه سبکدانه (mm)
۴/۵ ± ۱/۵	۱۹
۵ ± ۱/۵	۱۲/۵
۵/۵ ± ۱/۵	۹/۵

۱ برای جزئیات بیشتر به ACI 211.2 مراجعه شود.

تلاش برای کاهش هزینه‌های بتن سبکدانه با استفاده از نسبت زیاد سنگدانه‌های با وزن معمولی با درصد هوای بیش از مقادیر توصیه شده، معمولاً پیامد معکوس دارد. این عملکرد اغلب با شکست مواجه می‌شود، چرا که مقاومت فشاری رفته رفته با افزایش درصد حباب‌های هوای ایجاد شده به بیش از مقادیر توصیه شده، کاهش پیدامی‌کند. اگرچه درصد حباب هوای مورد نیاز برای کارایی و مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب شدن، چگالی بتن را کاهش می‌دهد، اما توصیه نمی‌شود برای بتن سبکدانه‌ای که در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن قرار ندارد از محدودیت‌های ارائه شده در جدول ۴-۱-۵-ب تجاوز شود. همچنین توصیه می‌شود که درصد هوا برای بتن سبکدانه‌ای که در معرض این چرخه‌ها قرار دارد، بیش از مقادیر جدول ۴-۱-۵-الف باشد. در بتن غیرسازه‌ای یا بتن مورد استفاده برای عایق‌بندی حرارتی، می‌توان به منظور کاهش چگالی از درصد هوای بیشتری استفاده کرد.

#### ۴-۱-۶- سایر ویژگی‌ها

سایر ویژگی‌ها همچون جمع‌شدگی، خزش یا عایق‌بندی حرارتی که به طور معمول تعیین نمی‌شوند، ممکن است در برخی پروژه‌های خاص مورد توجه باشند. این ویژگی‌ها در فصول ۵ و ۶ مورد بحث قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۲-۴- کارایی

کارایی، یکی از ویژگی‌های مهم بتن سبکدانه تازه مخلوط شده است. آزمایش اسلامپ رایج‌ترین روش برای تعیین کارایی است. مشابه بتن با وزن معمولی، مخلوط‌های بتنی سبکدانه‌ای که طرح مخلوط مناسبی داشته باشند، ویژگی‌های درجاریختن قابل قبولی خواهند داشت.

#### ۴-۳-۴- گرمای هیدراته‌شدن

گرمای ایجاد شده در زمان هیدراته‌شدن، عمدتاً به نوع، نرمی و مقدار سیمان و نسبت  $w/cm$  بتن بستگی دارد. استفاده از سایر مصالح سیمانی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی دانه‌شده



و پوزولان‌های طبیعی، همچون بتن با وزن معمولی تاثیر چشمگیری بر مقدار و نرخ گرمای آزاد شده در بتن سبکدانه دارد. بخش جامد سبکدانه‌ها همچون سنگدانه‌های معمولی، ویژگی‌های گرمایی مشخصی دارند. اگرچه، به دلیل وجود حفراتی که ممکن است خالی، نیمه اشباع یا کاملاً اشباع باشند، مقدار گرمای موثر ماده و ضریب هدایت حرارتی آن می‌توانند به میزان زیادی متغیر باشند. به این معنی که برای مقدار گرمای هیدراته شدن یکسان که به وسیله مصالح سیمانی تولید شده، ممکن است بتن سبکدانه به بیشینه دمای بیش از بتن با وزن معمولی برسد و سرعت رسیدن به این دمای بیشینه نیز در مقایسه با بتن معمولی بیشتر باشد.

#### ۴-۴-۴- نسبت آب به مواد سیمانی

نسبت  $w/cm$  برای بتن سبکدانه را می‌توان همانطور که در ACI 211.2 تشریح شده، با استفاده از وزن مخصوص ویژه تعیین کرد. هنگامی که سبکدانه‌ها به نحو مناسب از پیش مرطوب شده باشند، در طول فرآیند اختلاط و بتن‌ریزی مقدار جذب آب آن‌ها حداقل خواهد بود. این روش محاسبه دقیق  $w/cm$  خالص را مانند بتن با وزن معمولی میسر می‌کند. زمان کافی و روش مناسب پیش‌مرطوب‌سازی<sup>۴۷</sup> با توجه به نوع سبکدانه متفاوت خواهد بود. روش حرارتی و اشباع‌سازی با خلا<sup>۴۸</sup> می‌تواند در زمانی کم، پیش‌مرطوب‌سازی کافی را فراهم کند. در روش آب‌فشانی یا خیس‌اندن، ممکن است روزها طول بکشد تا شرایط پیش‌مرطوب‌سازی مناسب ایجاد شود. بنابراین ضروری است که روش پیش‌مرطوب‌سازی و زمان موردنیاز برای آن تعیین گردد. درصد رطوبتی که در شرایط پیش‌مرطوب‌سازی کافی به آن می‌رسند، معمولاً برابر یا بیشتر از درصد رطوبت بدست آمده پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری است.

#### ۴-۵- تعیین طرح مخلوط و اصلاح آن

نسبت اجزای بتن باید به گونه‌ای انتخاب شود که اقتصادی‌ترین استفاده از مصالح در دسترس را برای ساخت بتنی با خواص فیزیکی موردنیاز امکان‌پذیر کند. روابط اولیه‌ای ایجاد شده‌اند که راهنمایی برای ترکیب بهینه مصالح باشند. اگرچه، نسبت‌های نهایی باید بر اساس داده‌های محلی باشند یا به وسیله مخلوط‌های آزمایشی که در آزمایشگاه ساخته و سپس مطابق با ACI 211.2 برای ساخت مخلوط‌های کاربردی در کارگاه اصلاح می‌شوند، مشخص گردند. در بسیاری موارد می‌توان اصول و فرآیندهای تعیین طرح مخلوط بتن با وزن معمولی مانند روش حجم مطلق<sup>۴۹</sup> را برای بتن سبکدانه نیز به کار برد.

#### ۴-۵-۱- روش حجم مطلق

هنگامی که از روش حجم مطلق استفاده می‌شود، حجم بتن تازه که با هر نسبتی از مصالح ایجاد شده،

<sup>47</sup> Prewetting

<sup>48</sup> Vacuum saturation

<sup>49</sup> Absolute volume method Vacuum saturation

معادل مجموع حجم‌های مطلق مصالح سیمانی، سنگدانه، آب خالص و هوای ایجاد شده در نظر گرفته می‌شود. در تعیین نسبت‌ها با استفاده از این روش، لازم است تا میزان جذب آب و ضریب چگالی نسبی دانه‌ای سبکدانه‌های با اندازه مختلف در رطوبتی که سبکدانه‌ها به مخلوط اضافه می‌شوند<sup>۵۰</sup>، مشخص گردند. اصل اساسی در روش حجم مطلق این است که حجم ملات از مجموع حجم‌های سیمان، ریزدانه، آب خالص و هوای ایجاد شده تشکیل می‌شود. این حجم ملات باید برای پر کردن حفرات موجود در حجمی از درشت‌دانه میله‌خورده و نیز فراهم نمودن کارایی مناسب کافی باشد. این رویکرد در ACI 211.1 توصیه شده و رایج‌ترین روش تعیین طرح مخلوط بتن با وزن معمولی در آمریکا است.

اساس مخلوط آزمایشی با روش ضریب چگالی به همراه مثال در ACI 211.2 تشریح شده است. حجم‌های جابجاشده توسط سیمان، هوا و آب خالص محاسبه شده و سپس باقیمانده حجم به ریزدانه و درشت‌دانه اختصاص داده می‌شود. از این ضریب در محاسبات به گونه‌ای می‌توان استفاده کرد که گویی معادل چگالی نسبی دانه‌ای ظاهری است و باید در درصد رطوبتی که سبکدانه‌ها به مخلوط افزوده می‌شوند محاسبه شود.

#### ۴-۵-۲- روش حجمی

روش حجمی که به همراه مثال در ACI 211.2 تشریح شده، شامل ساخت یک مخلوط آزمایشی با استفاده از حجم تخمینی مصالح سیمانی، درشت‌دانه، ریزدانه و آب کافی برای ایجاد اسلامپ مورد نیاز است. مخلوط حاصل از نظر کارایی و پرداخت‌پذیری بررسی می‌شود. آزمایش اسلامپ، درصد هوا و چگالی تازه روی مخلوط انجام می‌گیرد. محاسبه بازدهی<sup>۵۱</sup>، که حاصل تقسیم جرم کل مخلوط تقسیم بر چگالی بتن تازه است، و محاسبه مقادیر واقعی مصالح در واحد حجم بتن انجام می‌شود. اصلاحات لازم اعمال شده و مخلوط‌های آزمایشی بیشتری تا رسیدن به نسبت اجزای رضایت‌بخش ساخته می‌شود. اطلاعات مربوط به چگالی انبوهی خشک غیر متراکم سنگدانه‌ها، میزان رطوبت سنگدانه‌ها، نسبت بهینه سنگدانه‌های درشت به ریز، و تخمینی از مواد سیمانی مورد نیاز برای تامین مقاومت مورد نظر را می‌توان از تامین‌کننده سنگدانه بدست آورد.

#### ۴-۶- آماده‌سازی سنگدانه برای اختلاط

استاندارد ASTM C94/C94M برای بتن سبکدانه مانند بتن معمولی اعمال می‌شود. سبکدانه‌هایی با جذب آب نسبتاً کم یا زیاد، باید طبق رویه‌هایی که قبلاً اثبات شده موفقیت‌آمیز بوده‌اند مورد استفاده قرار گیرند. ماهیت جذبی سبکدانه‌ها، مستلزم پیش‌مرطوب‌سازی قبل از افزودن سایر مصالح به بتن به منظور حفظ یکنواختی رطوبت تا حد ممکن است. به این صورت، تناسب حجمی بتن حفظ و افت اسلامپ در حین حمل به حداقل رسیده یا حذف می‌شود.

آماده‌سازی سبکدانه‌ها را می‌توان با یکی از روش‌های زیر انجام داد:

<sup>50</sup> As-batched moisture condition

<sup>51</sup> Yield

**الف) روش اتمسفری<sup>۵۲</sup>** - مدت زمان مورد نیاز برای پیش مرطوب سازی کافی سبکدانه ها، به ویژگی های جذبی آن ها بستگی دارد. پیش مرطوب سازی یکنواخت را می توان با چندین روش از جمله آب افشانی، آب پاشی با شلنگ و غوطه وری در آب انجام داد. این فرآیندها را می توان در کارخانه تولید سبکدانه، کارخانه تولید بتن یا هر دو اعمال کرد.

**ب) روش حرارتی<sup>۵۳</sup>** - این روش از طریق خیس کردن سبکدانه های داغ انجام می شود. به دلیل تکانه حرارتی احتمالی، دمای سبکدانه هنگام خیس کردن باید به دقت برای هر سبکدانه خاص تعیین شود و معمولاً در تاسیسات تولید کننده سبکدانه انجام می شود.

**پ) روش خلأ<sup>۵۴</sup>** - سبکدانه خشک درون ظرفی ریخته می شود که می توان هوا را از آن تخلیه کرد. سپس ظرف با آب پر شده و به فشار اتمسفر باز می گردد.

پیش مرطوب سازی، آب جذب شده توسط سبکدانه حین اختلاط را به حداقل رسانده و در نتیجه افت اسلامپ در حین پمپ کردن را به حداقل می رساند. این رطوبت اضافی همچنین چگالی سبکدانه را افزایش می دهد که به نوبه خود باعث افزایش چگالی بتن تازه می شود. افزایش چگالی ناشی از پیش مرطوب سازی در نهایت در طول فرآیند خشک کردن در هوا از بین می رود و شرایط برای عمل آوری درونی بیشتر فراهم می شود.

#### ۴-۷- بتن ریزی و پرداخت سطح

تفاوت کمی بین روش های بتن ریزی مورد استفاده برای بتن سبکدانه و بتن معمولی وجود دارد. ACI 304R روش های مناسب و نامناسب بتن ریزی را به تفصیل مورد بحث قرار می دهد. مهم ترین نکته در جابجایی بتن و بتن ریزی، جلوگیری از جداشدگی درشت دانه از خمیر ملات است. تفاوت اصلی با بتن معمولی در این است که در بتن سبکدانه، جداشدگی درشت دانه ها به دلیل چگالی کمتر، به جای پایین رفتن، به صورت بالا آمدن بر روی سطح ملات اتفاق می افتد.

در بتن های سبکدانه، اصول اولیه مورد نیاز برای بتن ریزی مناسب عبارتند از:

الف) مخلوطی با کارایی مناسب با استفاده از حداقل مقدار آب

ب) تجهیزاتی که قابلیت حمل و بتن ریزی با سرعت زیاد را داشته باشند

پ) ابزار برای تراکم مناسب

ت) نیروی کار ماهر

پرداخت نهایی بتن باید مطابق ACI 309R به شیوه ای مناسب انجام شود. معمولاً بتن ریزی، شمشه گیری<sup>۵۵</sup> و تخته ماله کشی<sup>۵۶</sup> مخلوط های بتنی سبکدانه با نسبت اجزای اختلاط مناسب، با تلاش کمتری نسبت به بتن با

<sup>52</sup> Atmospheric

<sup>53</sup> Thermal

<sup>54</sup> Vacuum

<sup>55</sup> Screeding

<sup>56</sup> Floating

وزن معمولی انجام می‌شود. باید از زیاده لرزاندن یا کار بیش از حد با بتن سبکدانه اجتناب کرد. دستکاری بیش از حد تنها باعث می‌شود ملات سنگین‌تر، به دور از سطحی که برای پرداخت مورد نیاز است رانده شده و درشت‌دانه دارای چگالی کمتر به روی سطح بیاید. حرکت به سمت بالای سبکدانه درشت می‌تواند در مخلوط‌هایی که اسلامپ بیش از حد توصیه شده در این فصل را دارند نیز رخ دهد.

#### ۴-۷-۱- پمپ کردن بتن سبکدانه

##### ۴-۷-۱-۱- ملاحظات کلی

چنانچه سبکدانه‌ها به طور مناسب پیش مرطوب نشده باشند، ممکن است آب اختلاط را جذب سطحی کنند که می‌تواند در پمپ کردن بتن مشکل ایجاد کند. به این دلیل، مهم است که قبل از پیمانه کردن بتن، سبکدانه‌ها از قبل با پیش مرطوب‌سازی کافی آماده شوند (به ۴-۴-۲ و ۴-۴-۶ مراجعه کنید).

#### ۴-۷-۱-۲- تعیین طرح مخلوط بتن سبکدانه پمپی

برای پمپ کردن بتن سبکدانه، ممکن است برخی اصلاحات برای دستیابی به ویژگی‌های مورد نظر ضروری باشد. مهندس ناظر و پیمانکار باید قبل از تصمیم‌گیری در مورد روش بتن‌ریزی، با هرگونه اصلاحات مورد نیاز مخلوط آشنا باشند. پمپ کردن بتن سبکدانه به طور جامع در مرجع موسسه شیل، رس و سنگ لوح منبسط‌شده (۱۹۹۶) تشریح شده است.

هنگامی که الزامات پروژه، پمپ کردن بتن را ایجاب کند، لازم است دستورالعمل‌های عمومی زیر اعمال شوند. این دستورالعمل‌ها مبتنی بر استفاده از سبکدانه درشت و ریزدانه معمولی هستند.

الف) سبکدانه‌ها تا حد رطوبت توصیه شده پیش مرطوب شوند.

ب) مقدار سیمان کمتر از  $335 \text{ kg/m}^3$  نباشد.

پ) از مواد افزودنی مایع و معدنی مناسب که پمپ کردن بتن را تسهیل می‌کنند استفاده شود.

ت) برای تسهیل پمپ کردن، اصلاح نسبت استاندارد اجزای مخلوط ممکن است به کاهش اندک حجم درشت‌دانه و افزایش متناظر حجم ریزدانه آن منجر شود.

ث) مقدار مواد سیمانی باید برای فراهم کردن اسلامپ ۱۰۰ تا ۱۵۰ mm در محل جای‌دهی<sup>۵۷</sup> بتن کافی باشد.

ج) از ماسه طبیعی خوب دانه‌بندی شده با شکل دانه‌های مناسب و محدوده مدول نرمی ۲/۲-۲/۷ استفاده شود.

چ) از ترکیب مناسب درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شود. به جای دانه‌بندی بر اساس جرم، دانه‌بندی بر

اساس حجم مطلق انجام گیرد تا تفاوت در چگالی نسبی اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شود.

گاهی اوقات توصیه می‌شود به منظور احتساب تغییر ارتفاع سازه یا تغییر فاصله محل پمپ تا محل تخلیه در طول پروژه، طرح‌های مخلوط متنوعی استفاده شوند. ارزیابی نهایی بتن باید در محل تخلیه سامانه پمپ کردن انجام شود (ACI 304.2R).

### ۴-۱-۲-۳- پمپ و سامانه پمپ کردن

موارد زیر نکات کلیدی مرتبط با پمپ و سامانه پمپ کردن هستند:

الف) توصیه می‌شود از بزرگترین قطر لوله موجود، با حداقل قطر ۱۲۵ mm بدون کاهنده‌های قطر لوله استفاده شود.

ب) همه لوله‌ها باید در ابتدا تمیز، هم‌اندازه و با استفاده از دوغاب، آغشته به ملات شده باشند.

پ) از کاهش سریع قطر از پمپ به لوله خودداری شود.

ت) فشار عملیاتی با استفاده از روش‌های زیر کاهش داده شود:

۱- کاهش نرخ بتن‌ریزی

۲- استفاده از بیشترین میزان لوله‌های فولادی و کمترین میزان لوله‌های لاستیکی تا حد امکان

۳- محدود کردن تعداد خم‌ها

۴- اطمینان از درزگیری و مهاربندی لوله‌ها توسط بلوک مهاری<sup>۵۸</sup> در محل خم‌ها

ناظرانی که حضورشان در هنگام پمپ کردن بتن الزامی است، شامل نمایندگان پیمانکار، تولیدکننده بتن آماده، مهندس ناظر، نیروی کار عملیات پمپ کردن، عوامل آزمایش بتن و تامین‌کننده سبکدانه می‌شوند. در آزمایش پمپ کردن، باید ارتفاع و طولی که قرار است بتن تا محل تخلیه منتقل گردد، در نظر گرفته شود. از آنجایی که بیشتر مکان‌های آزمایش اجازه پمپ کردن عمودی بتن برای طولی که قرار است در پروژه بکار رود را نمی‌دهند، می‌توان قوانین سرانگشتی زیر را برای اجرای افقی با خطوط لوله فولادی به کار برد (انجمن پمپاژ بتن آمریکا<sup>۵۹</sup>، ۲۰۱۱):

۱ متر عمودی = ۴ متر افقی

۱ متر شلنگ لاستیکی = ۳ متر لوله فولادی

خم ۹۰ درجه = ۲/۷ متر لوله فولادی

### ۴-۲-۲-۴- پرداخت سطوح افقی

سطوح بتنی افقی مطلوب، با استفاده از مصالح با کیفیت، ناظران خبره و نیروی کار ماهر حاصل می‌شوند. کیفیت پرداخت با میزان تلاش برای اطمینان از برآورده شدن صحیح اصول طی فرآیند پرداخت متناسب خواهد بود. تکنیک‌های پرداخت کف‌های بتنی سبکدانه در ACI302.1R توضیح داده شده است. در ارتباط با خواص بتن سبکدانه‌ای که به عنوان بخشی از سامانه مقاوم در برابر آتش استفاده می‌شود، باید با فروشنده مشورت شود. بسیاری از سامانه‌های دارای رتبه‌بندی مقاومت در UL<sup>۶۰</sup>، به ویژگی‌های خاصی از جمله حباب‌های هوای ایجاد شده نیاز دارند (شرکت Underwriters Laboratories، ۲۰۱۴).

<sup>58</sup> Thrust block

<sup>59</sup> American Concrete Pumping Association

<sup>60</sup> شرکتی بین‌المللی که الزامات مربوط به عملکرد و قابلیت اطمینان محصولات و سیستم‌های مختلف در برابر حریق را آزمایش کرده و بر اساس آن گواهی‌نامه‌های مختلفی صادر می‌کند.

#### ۴-۷-۲-۱- اسلامپ

اسلامپ عامل مهمی برای دستیابی به یک کف بتنی مطلوب با استفاده از بتن سبکدانه است و به طور کلی باید مقدار آن در محل جای‌دهی به ۱۲۵ mm محدود شود. اسلامپی کمتر و در حدود ۷۵ mm کارایی کافی را فراهم کرده و چسبندگی و انسجام بتن را نیز حفظ می‌کند و در نتیجه از به روی سطح آمدن درشت‌دانه‌های با چگالی کمتر جلوگیری می‌کند. این موضوع برعکس بتن با وزن معمولی است که در آن جداسازی به بالا آمدن ملات در سطح منجر می‌شود. از آنجا که وزن بتن بر مقدار اسلامپ تاثیر گذار است، بتن سبکدانه‌ای که اسلامپی برابر ۷۵ mm داشته باشد، معمولاً نسبت به بتن مشابه با وزن معمولی، کارایی بیشتری دارد.

#### ۴-۷-۲-۲- آماده‌سازی سطح

آماده‌سازی سطح قبل از ماله‌کشی<sup>۶۱</sup>، با شمشه‌ها و تخته‌ماله‌های منیزیمی یا آلومینیومی به بهترین وجه انجام می‌شود به نحوی که پاره‌شدگی و بیرون کشیدگی سطح را به حداقل می‌رساند.

#### ۴-۸- عمل‌آوری

عمل‌آوری بتن سبکدانه را می‌توان به روش سنتی یعنی اعمال رطوبت به سطح بتن و یا با عمل‌آوری درونی که با آزاد شدن آب جذب شده در منافذ سبکدانه اتفاق می‌افتد، انجام داد. عملکرد نهایی بتن تحت تاثیر میزان عمل‌آوری خواهد بود. عمل‌آوری بیرونی بتن باید پس از اتمام عملیات پرداخت آغاز شود. دستورالعمل‌های ACI 308,1 و ACI 302,1R حاوی اطلاعاتی در مورد عمل‌آوری بیرونی مناسب دال‌های کف بتنی هستند.

#### ۴-۹- کنترل آزمایشگاهی و کارگاهی

تغییر رطوبت جذب‌شده یا تغییر چگالی نسبی سبکدانه‌ها که ناشی از تغییر میزان رطوبت اولیه یا دانه‌بندی و تغییر میزان حباب‌های هوای ایجاد شده است، نشان می‌دهد که بتن تازه باید در کارگاه بصورت مداوم بررسی شود تا از کیفیت یکنواخت بتن اطمینان حاصل گردد (ACI 211.1). نمونه‌برداری باید مطابق با الزامات استاندارد ASTM C172/C172M باشد. آزمایش‌هایی که معمولاً مورد نیاز هستند عبارتند از ASTM C567/ASTM C31/C31M، ASTM C143/C143M، ASTM C173/C173M و C567M.

در شروع کار، باید ویژگی‌های بتن تازه شامل چگالی، درصد هوا، و اسلامپ برای یک یا دو پیمانانه ابتدایی تعیین شوند تا مطابقت بتن با مخلوط آزمایشگاهی مورد تایید قرار گیرد. سپس در صورت لزوم ممکن است اصلاحات کوچکی انجام شود. به طور کلی، زمانی که تغییر چگالی بتن تازه از ۵۰ بیشتر باشد، ممکن است برای مطابقت با مشخصات فنی نیاز به اصلاح وزن پیمانانه باشد. درصد هوای بتن سبکدانه نباید بیش از  $\pm 1/5$  درصد از مقدار مشخص شده متفاوت باشد تا از اثرات نامطلوب بر چگالی، مقاومت فشاری، کارایی و دوام بتن جلوگیری شود.

<sup>61</sup> Troweling





# فصل ۵

خواص فیزیکی و مکانیکی  
بتن سبکدانه سازه‌ای

### ۵-۱- گستره

در این فصل خلاصه‌ای از خواص بتن سبکدانه ارائه می‌شود. داده‌ها بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و سوابق تعداد زیادی از سازه‌های موجود هستند که برای بیش از هشت دهه بهره‌برداری مطلوبی داشته‌اند.

### ۵-۲- مقاومت فشاری

سطوح مقاومت فشاری که معمولاً در صنعت ساختمان برای طراحی بتن درجاریخته‌شده، پیش‌ساخته یا پیش‌تنیده موردنیاز است را با استفاده از بتن سبکدانه با صرفه اقتصادی قابل بدست می‌آورند (Shideler، Hanson؛ ۱۹۵۷؛ ۱۹۶۴؛ Trumble؛ Holm، a؛ ۱۹۸۰؛ Santizo و؛ ۱۹۹۲). مقادیر ۲۱ تا ۳۵ MPa برای طراحی رایج هستند. در کارخانه‌های تولید محصولات پیش‌ساخته و پیش‌تنیده، مقاومت‌های طراحی بیشتر از ۳۵ MPa نیز متداول است. در چندین سازه عمرانی مانند سکوی میدان نفتی Heidrun و پل‌های نروژ، مقاومت مشخصه مکعبی ۶۰ MPa تعیین شده است (FIP، ۲۰۰۰). در آمریکای شمالی تجارب مقاومت طراحی بیشتر از ۶۹ MPa برای شاهتیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده گزارش شده است (Kahn و Meyer، ۲۰۰۴؛ Kahn و Lopez، ۲۰۰۵). همانطور که در فصل ۳ بحث شد، همه سنگدانه‌ها سقف مقاومت دارند و در مورد سبکدانه‌ها عموماً می‌توان سقف مقاومت را با کاهش حداکثر اندازه درشت‌دانه افزایش داد. در مخلوط‌های بتنی سبکدانه نیز همچون بتن با وزن معمولی، افزودنی‌های کاهنده آب روان‌کننده و افزودنی‌های معدنی با هدف افزایش کارایی و تسهیل در بتن‌ریزی و پرداخت، به صورت مکرر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۵-۳- چگالی بتن سبکدانه

#### ۵-۳-۱- چگالی بتن تازه

چگالی بتن سبکدانه تازه تابعی از نسبت اجزای طرح مخلوط، درصد هوا، مقدار آب موردنیاز، چگالی نسبی دانه‌ای و رطوبت جذب شده سبکدانه است. کاهش چگالی بتن نمایان<sup>۶۲</sup> به دلیل افت میزان رطوبت است که به نوبه خود تابعی از شرایط محیطی و نسبت سطح به حجم عضو است. مهندس ناظر باید پیش از مشخص نمودن بیشینه چگالی تازه قابل پذیرش در زمان بتن‌ریزی با تامین‌کننده سبکدانه مشورت کند. چگالی بتن تازه برای کنترل در کارگاه با استفاده از پیمانانه وزن واحد حجم<sup>۶۳</sup> مشخص می‌شود. چگالی بدست آمده با پیمانانه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متری به طور متوسط  $40 \text{ kg/m}^3$  بیشتر از چگالی بدست آمده از پیمانانه وزن واحد با حجم  $0.14 \text{ m}^3$  که در کارگاه اندازه‌گیری می‌شود خواهد بود (ASTM C567/C567M). اگرچه بتن‌های سبکدانه‌ای که درشت‌دانه و ریزدانه آن‌ها از سبکدانه تشکیل شده کاربردهای سازه‌ای بسیاری دارند، اما رویکرد تجاری رایج در آمریکای شمالی، طراحی بتن با ریزدانه‌های متشکل از ماسه طبیعی است. پل‌های دهانه بلند که با استفاده از بتن با مخلوط سه جزیی (سبکدانه ریز و درشت و مقدار

<sup>62</sup> Exposed concrete

<sup>63</sup> Unit weight bucket: پیمانانه آلومینیومی سبک وزنی که برای تعیین وزن مخصوص سنگدانه یا مخلوط بتن استفاده می‌شود.



اندکی ماسه طبیعی) ساخته شده‌اند، دوام و بازدهی سازه‌ای<sup>۶۴</sup> (نسبت چگالی به مقاومت) مطلوبی داشته‌اند (Holm و Bremner، ۱۹۹۴). گزارش‌های تحقیقاتی اولیه (Kluge و همکاران، ۱۹۴۹؛ Price و Cordon، ۱۹۴۹؛ Reichard، ۱۹۶۴؛ Shideler، ۱۹۵۷) بتن حاوی سبکدانه ریز و درشت را با بتن مرجع با وزن معمولی مقایسه کردند. مطالعات بعدی (Hanson، ۱۹۶۴؛ Pfeifer، ۱۹۶۷) یافته‌های اولیه را با داده‌های مربوط به بتن سبکدانه‌ای که ریزدانه‌های آن از ماسه طبیعی تشکیل شده بود تکمیل کردند. همچنین چندین پروژه گزارش شده‌اند که در آن‌ها از بتن ساخته‌شده با سبکدانه‌های ریز و درشت‌دانه‌های با وزن معمولی در کف کاذب واقع روی عرشه‌های فولادی و اعضای پس‌کشیده استفاده شده است.

### ۵-۳-۲- چگالی تعادلی

بارهای مرده ناشی از وزن عضو که برای طراحی بکار می‌روند باید بر اساس چگالی تعادلی باشند که برای اکثر حالات و قطعات، پس از ۹۰ روز خشک‌شدن در هوا حاصل می‌شود. مطالعات گسترده در آمریکای شمالی نشان داده که علیرغم تغییرات اولیه زیاد رطوبت کل، چگالی تعادلی بتن سبکدانه بین ۵۰ تا ۸۳ kg/m<sup>3</sup> بیشتر از چگالی بتن خشک‌شده در گرمچال است (شکل ۵-۳-۲). توصیه آیین‌نامه‌های اروپایی برای چگالی زمان بهره‌برداری نیز مشابه هستند (FIP، ۱۹۸۳). بتن حاوی مقادیر سیمان زیاد، به ویژه آن‌هایی که حاوی پوزولان‌های موثر هستند، تمایل به خشک‌شدن کمتری دارند و چگالی تعادلی آن‌ها به چگالی بتن تازه نزدیک‌تر است و در دوره‌های طولانی‌تری خشک می‌شوند.

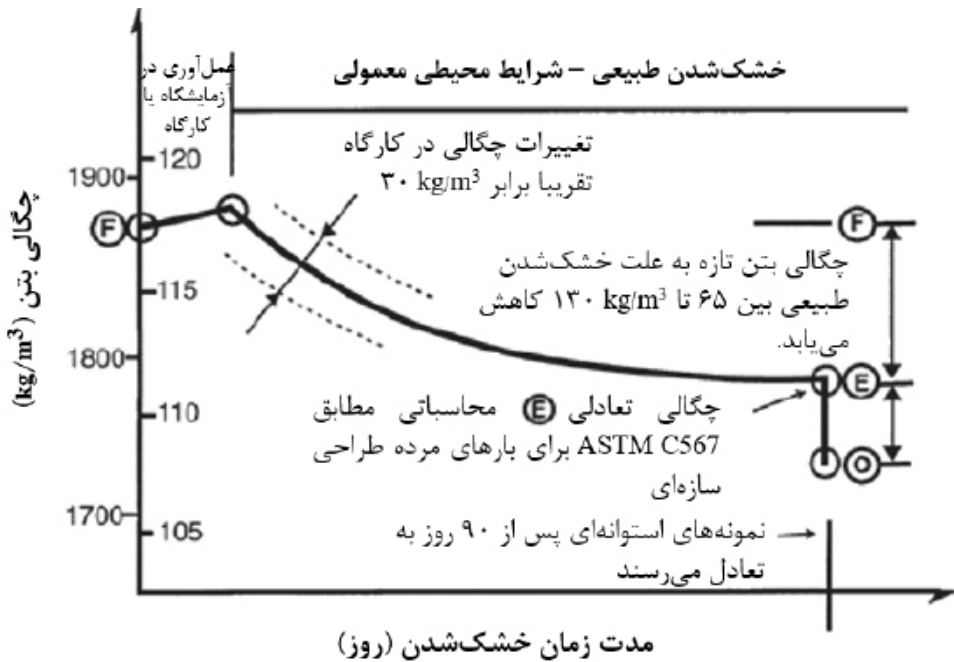
در اعضای پیش‌ساخته یا زمانی که حالت بار بحرانی پیش از رسیدن به چگالی تعادلی رخ دهد، در طراحی‌ها باید از چگالی بتن تازه برای محاسبه بار ناشی از وزن عضو استفاده شود.

زمانی که وزن‌ها و مقادیر رطوبت تمام اجزای تشکیل‌دهنده بتن مشخص باشند، می‌توان چگالی تعادلی را بر اساس ASTM C567/C567M از معادلات (الف - ۵-۳-۲) و (ب - ۵-۳-۲) محاسبه کرد.

$$O = \frac{W_{df} + W_{dc} + 1.2W_{ct}}{V} \quad (\text{الف - ۵-۳-۲})$$

$$E = 0 + 50 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{ب - ۵-۳-۲})$$

ضریب ۱/۲ برای در نظر گرفتن اثر تبخیر آب است.



اندازه‌گیری‌های انجام شده روی پیمانه استوانه  $150 \times 300$  mm بطور میانگین،  $40 \text{ kg/m}^3$  بیشتر از اندازه‌گیری‌های انجام شده در کارگاه یا پیمانه وزن واحد با حجم  $0.014 \text{ m}^3$  خواهد بود. E-چگالی تعادلی: معمولاً  $50 \text{ kg/m}^3$  بیشتر از وزن مخصوص بتن خشک شده در گرمچال (O) است.

شکل ۵-۳-۲- چگالی بتن برحسب مدت زمان خشک شدن برای بتن سبکدانه سازه‌ای

#### ۵-۴- مقاومت کششی

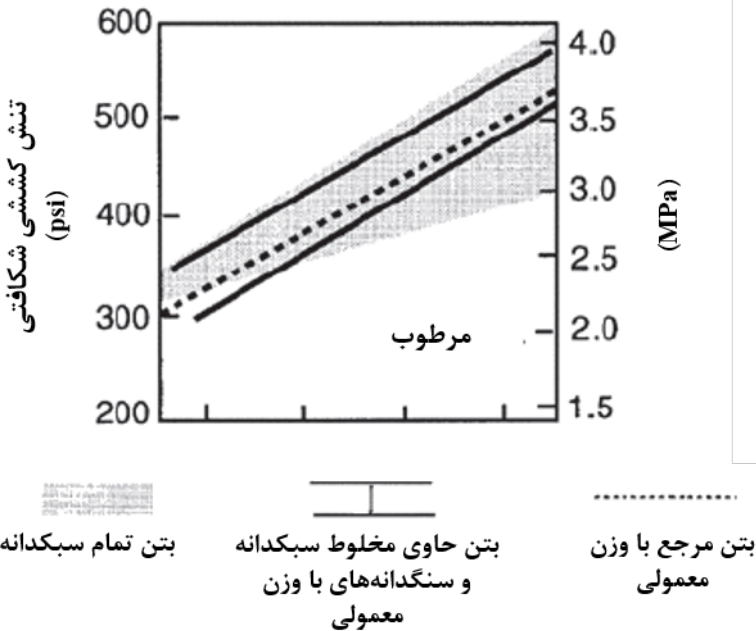
##### ۵-۴-۱- مقاومت کششی شکافتی<sup>۶۵</sup>

مقاومت کششی شکافتی آزمونه‌های بتنی استوانه‌ای که مطابق ASTM C496/C496M و ACI 318 تعیین می‌شود، برای کنترل یا پذیرش مقاومت بتن در کارگاه در نظر گرفته نشده است.

##### ۵-۴-۱-۱- بتن عمل‌آوری شده با آب

شکل ۵-۴-۱-۱-۱- محدوده باریک مقاومت‌های کششی را برای بتن سبکدانه که بصورت پیوسته با آب عمل‌آوری شده است را نشان می‌دهد. مقاومت کششی شکافتی بتن مرجع با وزن معمولی تقریباً در وسط این محدوده قرار دارد.

<sup>65</sup> Splitting tensile strength

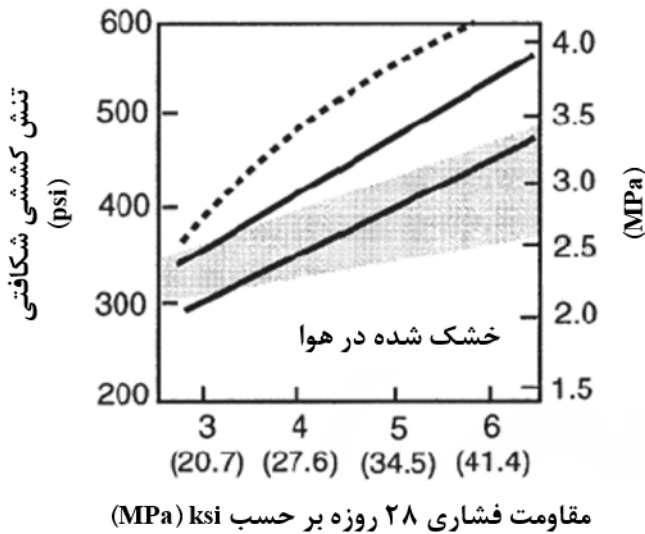


### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۴-۱-۱- تنش کششی شکافتی بتن عمل‌آوری شده با آب

### ۵-۴-۱-۲- بتن خشک‌شده در هوا

مقاومت کششی بتن سبکدانه‌ای که تحت خشک‌شدن قرار دارد بیشتر با رفتار مقاومت برشی بتن سازه‌ای مرتبط است. در زمان خشک‌شدن بتن، افت رطوبت با سرعت کمی به سمت درون اعضای بتنی پیش‌روی کرده و در نتیجه باعث ایجاد تنش‌های کششی در سطوح خارجی و تنش‌های فشاری متعادل‌کننده در سطوح داخلی که همچنان مرطوب هستند می‌شود. بنابراین پس از خشک‌شدن، مقاومت کششی بتن سبکدانه در برابر بارگذاری خارجی از مقاومت کششی بتنی که پیوسته با آب عمل‌آوری شده، کمتر خواهد بود (Hanson, ۱۹۶۱؛ Pfeifer, ۱۹۶۷). شکل ۵-۴-۱-۲ این کاهش مقاومت را برای بتنی که ۷ روز با آب عمل‌آوری شده و سپس ۲۱ روز در رطوبت نسبی ۵۰ درصد (ASTM C۳۳۰/C330M) نگهداری شده است را نشان می‌دهد. مقاومت کششی شکافتی بتن سبکدانه، در مقاومت‌های فشاری یکسان، بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد با بتن مرجع با وزن معمولی تغییر می‌کند. جایگزینی سبکدانه ریز با ماسه معمولی، اغلب مقاومت کششی شکافتی بتن قرار گرفته در معرض خشک‌شدن را افزایش می‌دهد (Pfeifer, ۱۹۶۷؛ Ivey و Bluth, ۱۹۶۶). در بعضی موارد، رابطه این افزایش با مقدار ماسه بصورت غیرخطی است به طوری که برای برخی از سنگدانه‌ها، جایگزینی بخشی از ماسه به اندازه جایگزینی کامل آن سودمند است.



- بتن تمام سبکدانه
- بتن حاوی مخلوط سبکدانه و سنگدانه‌های با وزن معمولی
- بتن مرجع با وزن معمولی

### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۴-۱-۲- مقاومت کششی شکافتی بتن خشک‌شده در هوا

آزمایش‌ها نشان داده است که مقاومت کششی قطری تیرها و دال‌ها با مقاومت کششی شکافتی بتن سبکدانه ارتباط نزدیکی دارد (Hanson, ۱۹۶۱).

آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های بتن سبکدانه‌ای که تا حدی خشک شده‌اند، به خوبی با رفتار بتن در سازه‌های واقعی مطابقت دارد. افت تدریجی رطوبت در درون اعضای بتنی منجر به ایجاد تنش‌های کششی روی سطح خارجی می‌شود که تنش‌های فشاری نواحی داخلی که هنوز مرطوب هستند را متعادل می‌کند.

ASTM C496/C496M لازم می‌داند که قبل از انجام آزمایش‌های کشش شکافتی، ۷ روز عمل‌آوری مرطوب و ۲۱ روز خشک‌شدن در هوا تحت دمای ۲۳ درجه‌سانتیگراد در رطوبت نسبی ۵۰ درصد انجام شود. مقاومت کششی شکافتی بتن سبکدانه در مقاومت فشاری‌های یکسان، حدود ۷۵ تا ۱۰۰ درصد با بتن

با وزن معمولی متفاوت است. جایگزینی سبکدانه ریز با ریزدانه با وزن معمولی معمولاً مقاومت کششی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، خشک شدن طبیعی نیز باعث افزایش مقاومت کششی شکافتی خواهد شد.

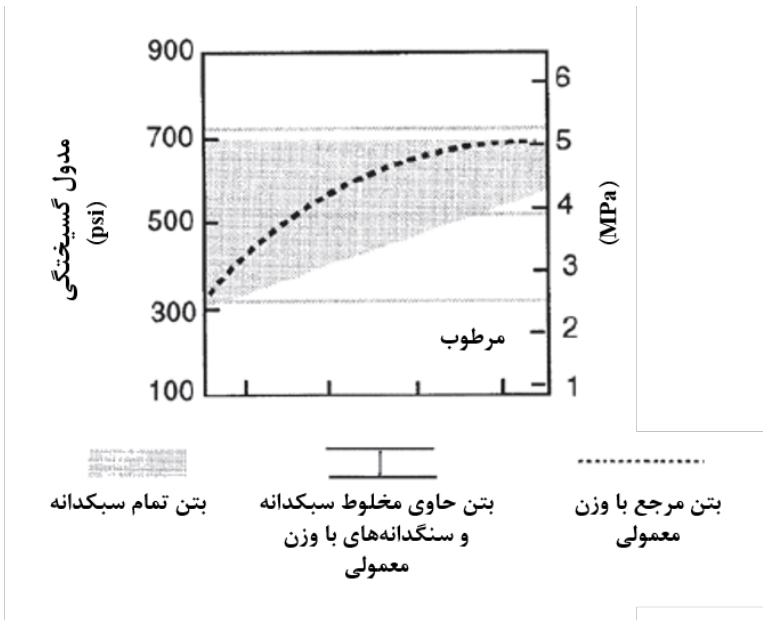
#### ۵-۴-۲- مدول گسیختگی<sup>۶۶</sup>

مدول گسیختگی (ASTM C78/C78M) نیز معیار دیگری برای سنجش مقاومت کششی بتن است. شکل الف-۵-۴-۲ و ب-۵-۴-۲ به ترتیب محدوده مدول گسیختگی را برای بتن عمل آوری شده بصورت معمول و عمل آوری شده با بخار که در حالت مرطوب آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. در نمونه‌های منشوری، توزیع غیریکنواخت رطوبت، مدول گسیختگی را کاهش می‌دهد، اما تاثیر توزیع رطوبت عضو سازه‌ای مشخص نیست و بعید است که کاملاً اشباع یا کاملاً خشک شود. مطالعات نشان داده‌اند که آزمایش‌های مدول گسیختگی بتنی که در معرض خشک شدن قرار گرفته‌اند، به شدت به تغییرات رطوبت حساس هستند و تحت این شرایط، ممکن است این آزمایش‌ها نتایج قابل اعتمادی را که تکرارپذیری مطلوبی داشته باشند ارائه نکنند (Hanson, ۱۹۶۱).

مقادیر مدول گسیختگی بدست آمده از آزمایش بتن سبکدانه پرمقاومت، رابطه ناسازگاری با الزامات آیین‌نامه‌ای دارند. در حالی که Huffington (۲۰۰۰) گزارش نمود که نتایج آزمایش‌های کشش شکافتی و مدول گسیختگی عموماً الزامات اش تو<sup>۶۷</sup> برای بتن سبکدانه پرمقاومت را برآورده می‌کنند، Nassar (۲۰۰۲) دریافت که مدول گسیختگی بتن سبکدانه پرمقاومت تقریباً ۶۰ تا ۸۵ درصد الزامات آیین‌نامه یعنی  $\lambda \times \sqrt{f_c}$  است که در آن مقدار  $\lambda$  برای بتن سبکدانه ماسه‌ای برابر ۰/۸۵ توصیه می‌شود. با این حال، Meyer (۲۰۰۲) دریافت که ضریب کاهش اضافی برای مخلوط‌های بتنی سبکدانه پرمقاومت لازم نیست. به منظور حصول اطمینان از تایید ضریب ۰/۸۵ برای بتن سبکدانه پرمقاومت توصیه می‌شود برای مخلوط‌های ویژه همچون مخلوط‌های سبکدانه، آزمایش‌های اضافی انجام پذیرد.

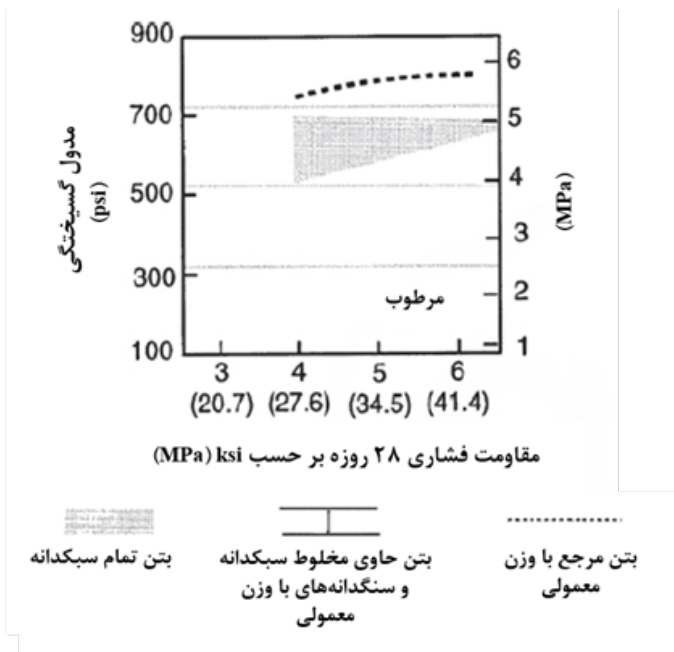
<sup>۶۶</sup> Modulus of rupture

<sup>۶۷</sup> AASHTO



ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۴-۲-الف- مدول گسیختگی بتن عادی عمل‌آوری شده

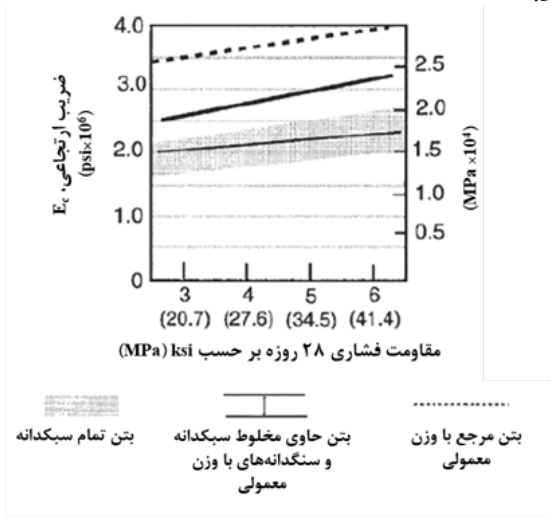


ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۴-۲-ب- مدول گسیختگی بتن عمل‌آوری شده با بخار

### ۵-۵- ضریب ارتجاعی

ضریب ارتجاعی بتن به مقادیر نسبی خمیر و سنگدانه و نیز ضریب ارتجاعی هر جزء بستگی دارد (LaRue، ۱۹۴۶؛ Pauw، ۱۹۶۰). بتن با وزن معمولی،  $E_c$  بیشتری نسبت به بتن سبکدانه دارد زیرا ضرایب ارتجاعی ماسه و شن معمولی در آن بیشتر از ضریب ارتجاعی سبکدانه است. شکل ۵-۵ محدودده مقادیر ضریب ارتجاعی را برای بتن سبکدانه نشان می‌دهد. به طور کلی در یک مقاومت فشاری یکسان، ضریب ارتجاعی بتن سبکدانه بین ۵۰ تا ۷۵ درصد ضریب ارتجاعی بتن با وزن معمولی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که حجم نسبی خمیر سیمان و سنگدانه تقریباً ثابت باقی بماند، تغییر دانه‌بندی سبکدانه معمولاً تاثیر کمی بر ضریب ارتجاعی بتن دارد.



ویژگی‌های بتن سبکدانه  
 شکل ۵-۵- ضریب ارتجاعی

در حالی که این توافق وجود دارد که ضریب ارتجاعی بتن مطابق رابطه  $E_c$  که در ACI 318 ارائه شده است، به چگالی و مقاومت فشاری آن بستگی دارد، برخی تحقیقات نشان داده‌اند که ممکن است این گونه روابط ارتباط بین چگالی، مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی را بطور مناسب نشان ندهند. Cook (۲۰۰۷) رابطه‌ای جدید برای ضریب ارتجاعی ارائه کرده است که در مقایسه با معادله زیر تخمین بهتری برای بتن سبکدانه و بتن پر مقاومت ارائه می‌دهد.

$$E_c = Wc^{2.687} \cdot (f_c)^{0.24} \quad (۵-۵)$$

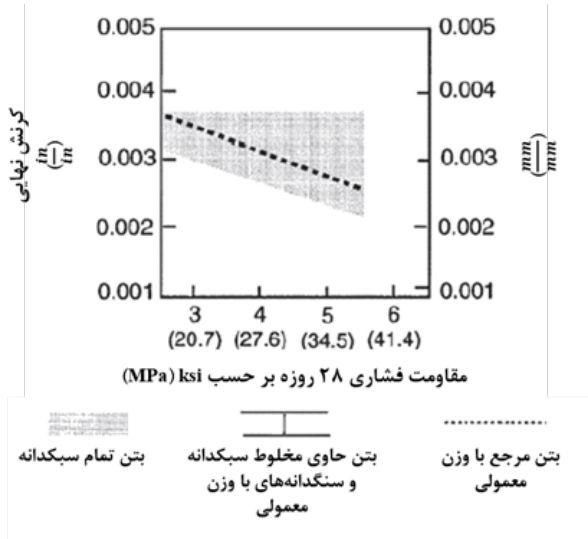
ثابت شده است که می‌توان از رابطه فوق برای مقادیر  $Wc$  بین ۱۶۰۰ تا ۲۴۸۰ و مقادیر مقاومت در محدوده ۷ تا ۱۵۸ MPa استفاده کرد. ممکن است بتن‌های در حال بهره‌برداری با این رابطه مطابقت نداشته باشند؛ بنابراین، هنگامی که برای یک بتن خاص ارزیابی دقیق  $E_c$  مورد نیاز باشد، باید آزمون آزمایشگاهی مطابق با روش‌های ارائه‌شده در ASTM C469/C469M انجام شود.

### ۵-۶- ضریب پواسون<sup>۶۸</sup>

آزمایش‌های تعیین ضریب پواسون بتن سبکدانه با استفاده از روش‌های تشدید<sup>۶۹</sup>، نشان داده‌اند که تغییرات این نسبت با تغییر سن، مقاومت یا سنگدانه‌های مصرفی ناچیز است و مقادیر آن در محدوده ۰/۱۶ - ۰/۲۵ با مقدار میانگین ۰/۲۱ متغیر هستند (Reichard, ۱۹۶۴). آزمایش‌های تعیین ضریب پواسون بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی به روش استاتیکی نیز مقادیری در محدوده ۰/۲۵ - ۰/۱۵ با مقدار میانگین ۰/۲ نشان داده‌اند. با وجود اینکه این ویژگی با توجه به سن، شرایط آزمایش و خواص فیزیکی بتن اندکی تغییر می‌کند، ممکن است برای طراحی‌های عملی اغلب مقدار آن برابر ۰/۲۰ در نظر گرفته شود. برای یک بتن بخصوص، ارزیابی دقیق را می‌توان با آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C469/C469M به دست آورد.

### ۵-۷- کرنش نهایی

شکل ۵-۷، محدوده مقادیر کرنش فشاری نهایی بتن حاوی سبکدانه درشت و ریز و همچنین بتن با وزن معمولی را نشان می‌دهد. این داده‌ها از نمونه‌های غیرمسلحی که به منظور شبیه‌سازی رفتار وجه فشاری تیر مسلح در خمش، بصورت خارج از محور<sup>۷۰</sup> بارگذاری شده‌اند، به دست آمده است (Hognestad و همکاران، ۱۹۵۵). نمودار نشان می‌دهد که کرنش فشاری نهایی بیشتر بتن‌های سبکدانه و بتن مرجع با وزن معمولی ممکن است از مقدار ۰/۰۰۳ که در طراحی‌ها فرض می‌شود، اندکی بیشتر باشد.



ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۷- کرنش نهایی

<sup>68</sup> Poisson's ratio

<sup>69</sup> Resonance method

<sup>70</sup> Eccentric



### ۵-۸- خزش

خزش، افزایش کرنش بتن تحت یک تنش ثابت<sup>۷۱</sup> است. تاثیر خواص خزشی بتن بسته به شرایط سازه‌ای ممکن است مفید یا مضر باشد. خزش، به وسیله کاهش تنش‌های نامطلوب ناشی از جمع‌شدگی و سایر تغییرشکل‌های تحمیلی مانند دماهای اولیه شدید، یا نشست تکیه‌گاه و تسلیم شدن قیود، تاثیری سودمند دارد. با این حال، از آنجایی که خزش می‌تواند به افت پیش‌تنیدگی و خیز منفی، خیز بلندمدت بیش از حد و در حالت ساخت مرحله‌ای<sup>۷۲</sup>، در نتیجه تاخیر در سیستم سازه‌ای به بازتوزیع تنش<sup>۷۳</sup> نامطلوب منجر شود که ممکن است آثار نامطلوبی بر قابلیت اطمینان درازمدت سازه‌ها را به همراه داشته باشد. در سازه‌های غیرهمگن و ترکیبی<sup>۷۴</sup>، بازتوزیع تنش ناشی از خزش، تنش‌ها را از قسمت‌هایی از سازه که خزش بیشتری دارند به قسمت‌هایی که خزش کمتری دارند یا از بتن به اعضای فولادی منتقل می‌کند.

رفتار وابسته به زمان بتن (خزش و جمع‌شدگی) همچنین می‌تواند در سازه‌های لاغر<sup>۷۵</sup> همچون ستون‌ها، دیوارها، قوس‌ها و پوسته‌های نازک با مهارشدگی کم و هر زمانی که آثار ثانویه<sup>۷۶</sup> حائز اهمیت باشند، بر حالت حدی نهایی کماتش تاثیر بگذارد. در این موارد، افزایش خیز با گذشت زمان باعث کاهش حاشیه ایمنی در برابر ناپایداری می‌شود که ممکن است به گسیختگی کماتشی بلندمدت منجر شود. تاثیر بر حاشیه ایمنی در برابر حالت حدی نهایی مقاومت، به شکل‌پذیری سازه بستگی داشته و در مواردی که حالت حدی نهایی به وسیله گسیختگی غیرخمیری<sup>۷۷</sup> (غیرشکل‌پذیر) بتن کنترل می‌شود، می‌تواند نگران‌کننده باشد.

اثرات خزش به همراه اثرات جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، باید در طراحی‌های سازه‌ای در نظر گرفته شوند. راهنمای ارزیابی این اثرات را می‌توان در ACI 209,1R و ACI 209,2R یافت. خزش، افزایش کرنش بتن تحت تنش ثابت است. خواص خزشی بتن بسته به شرایط سازه‌ای می‌توانند مفید یا مضر باشند. تمرکز تنش، چه بصورت فشاری و چه بصورت کششی، ممکن است با انتقال تنش از طریق خزش کاهش یابد. از طرفی خزش می‌تواند به خیز بلندمدت اضافی و افت پیش‌تنیدگی یا افت خیز منفی منجر شود. اثرات خزش، در کنار اثرات جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، باید در طراحی سازه در نظر گرفته شوند.

### ۵-۸-۱- عوامل موثر بر خزش

خزش و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن پدیده‌های مرتبطی هستند که تحت تاثیر عوامل متعددی مانند نوع و مقدار سنگدانه، نوع سیمان، دانه‌بندی سنگدانه، مقدار آب مخلوط، میزان رطوبت سنگدانه در زمان اختلاط، مقدار هوای ایجادشده، سن بتن در زمان بارگذاری اولیه، بزرگی تنش اعمالی، روش عمل‌آوری، ابعاد نمونه یا سازه، رطوبت نسبی هوای اطراف و دوره زمانی بارگذاری ثابت قرار دارند.

<sup>71</sup> Sustained stress

<sup>72</sup> Sequential construction

<sup>73</sup> Stress redistribution

<sup>74</sup> Hybrid

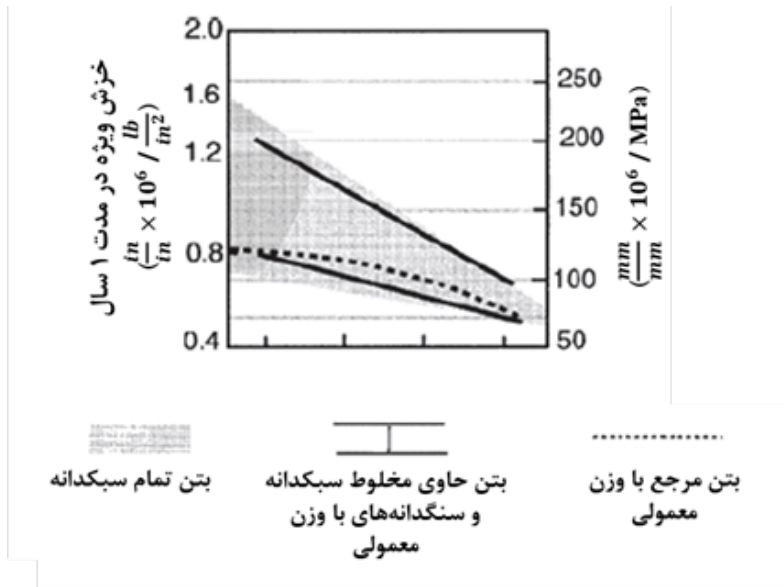
<sup>75</sup> Slender structures

<sup>76</sup> Second-order effects

<sup>77</sup> Nonplastic failure

### ۵-۸-۲- بتن عادی عمل آوری شده

شکل ۵-۸-۲ محدوده مقادیر خزش ویژه<sup>۷۸</sup> (خزش در هر واحد تنش MPa ثابت اعمالی) را برای بتن عادی عمل آوری شده را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه و پس از آنکه به مدت ۱ سال تحت بارهای ثابت قرار گرفت، اندازه‌گیری شده است (ASTM C512/C512M). این نمودارها با دو فرض متداول تهیه شده‌اند: اصل جمع آثار<sup>۷۹</sup> خزش معتبر است (یعنی خزش در محدوده‌های تنش بهره‌برداری با تنش متناسب است)؛ و کرنش‌های جمع‌شدگی که از نمونه‌های بارگذاری نشده اندازه‌گیری می‌شوند را می‌توان مستقیماً از کرنش‌های خزشی تفکیک کرد. در نمودار، محدوده بتن سبکدانه حاوی ماسه با وزن معمولی به میزان قابل توجهی باریک‌تر از بتنی است که درشت‌دانه و ریزدانه آن از سبکدانه‌ها تشکیل شده‌اند. شکل ۵-۸-۲ نشان می‌دهد که یک روش بسیار موثر برای کاهش خزش بتن سبکدانه، استفاده از بتنی با مقاومت زیادتر است. افزایش مقاومت از ۲۱ MPa به ۳۵ MPa خزش را به مقدار چشم‌گیری کاهش می‌دهد.



#### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۸-۲- خزش بتن عادی عمل آوری شده

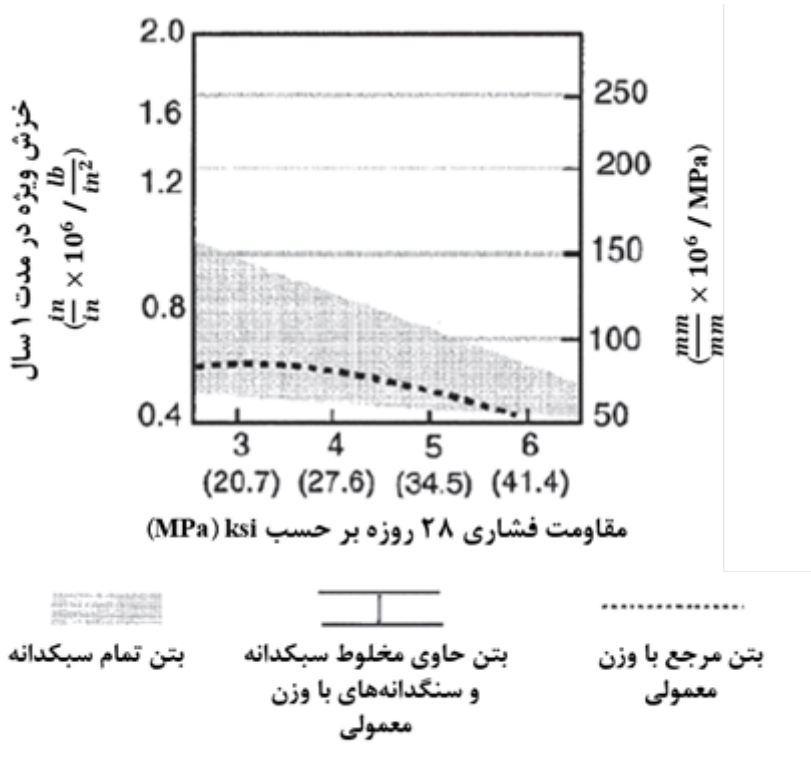
### ۵-۸-۳- بتن عمل آوری شده با بخار

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که خزش را می‌توان به وسیله عمل آوری با بخار تحت فشار کم، به مقدار قابل توجه و به وسیله عمل آوری با بخار تحت فشار زیاد، به میزان بسیار قابل توجهی کاهش داد. شکل

<sup>78</sup> Specific creep

<sup>79</sup> Superposition

۳-۸-۵ نشان می‌دهد که این کاهش برای بتن عمل‌آوری شده با بخار تحت فشار کم می‌تواند از ۲۵ تا ۴۰ درصد خزش بتن مشابهی باشد که تنها تحت عمل‌آوری با رطوبت قرار داشته است.



### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۳-۸-۵- خزش بتن عمل‌آوری شده با بخار

### ۳-۸-۵-۴- تاثیر عمل‌آوری درونی

یک مطالعه (Lopez, ۲۰۰۵) نشان داده است که آب ذخیره شده درونی در سبکدانه می‌تواند خزش را به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش رطوبت نسبی درونی کاهش دهد. هر دو عامل ذکر شده، توسعه سازه‌کارهای خزش را با دشواری روبرو می‌کنند (به فصل ۹ مراجعه شود).

### ۳-۸-۵-۹- جمع‌شدگی

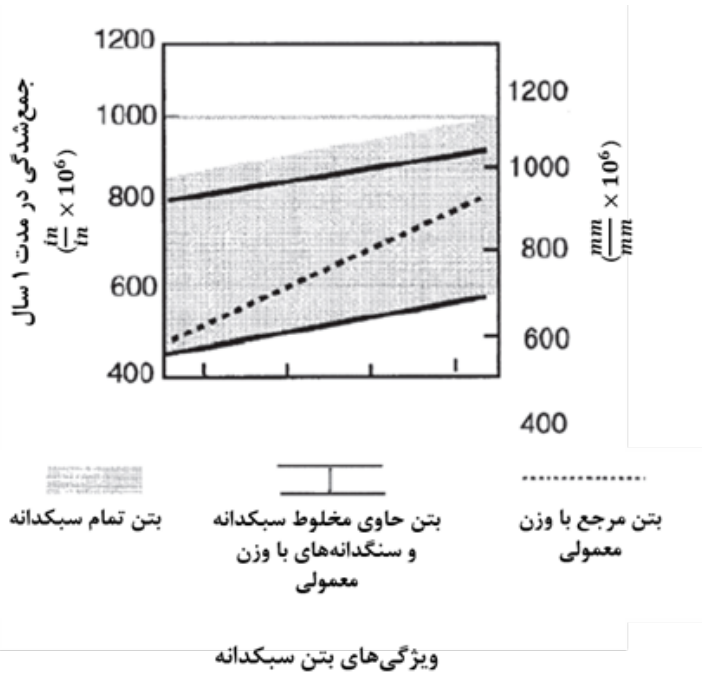
جمع‌شدگی، چه خودزا<sup>۸۰</sup> باشد و چه ناشی از خشک شدن، ویژگی مهمی است که می‌تواند بر میزان ترک خوردگی، افت پیش‌تندگی، مقاومت کششی موثر و تاب برداشتن<sup>۸۱</sup> بتن تاثیر بگذارد. باید توجه نمود

<sup>80</sup> Autogenous shrinkage

که اعضای بتنی با اندازه بزرگ، یا اعضای که در محیطی با رطوبت نسبی زیاد قرار دارند، ممکن است به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی کوچکی که در رطوبت نسبی ۵۰ درصد نگهداری شده‌اند، جمع‌شدگی کمتری داشته باشند.

### ۵-۹-۱- بتن عادی عمل‌آوری شده

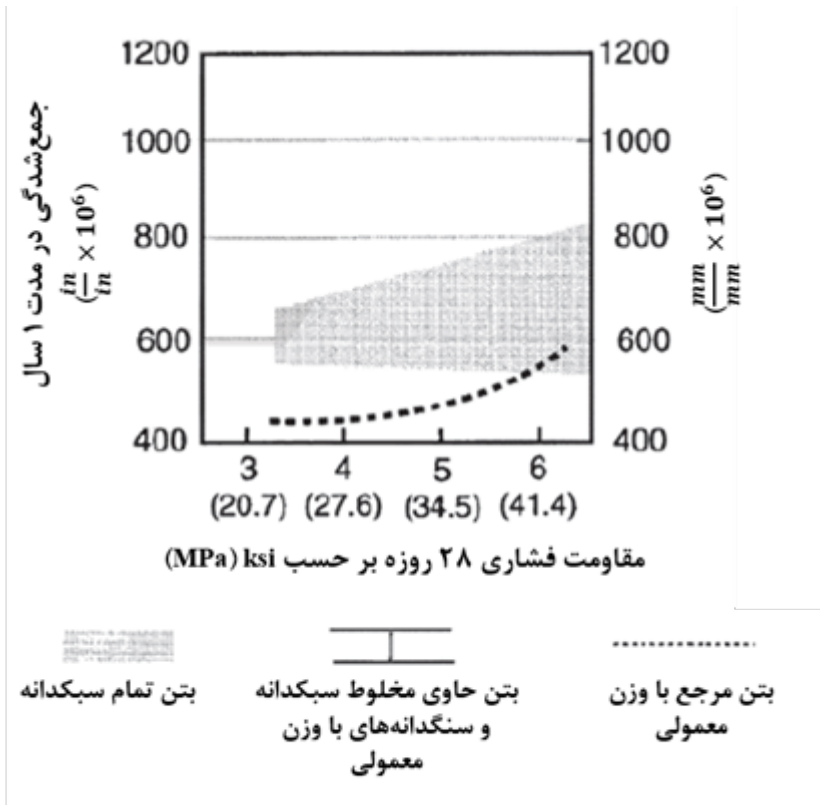
شکل ۵-۹-۱ محدوده وسیع مقادیر جمع‌شدگی بتن سبکدانه حاوی ماسه با وزن معمولی پس از خشک‌شدن به مدت ۱ سال را نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت بتن مرجع در این محدوده‌ها، به نظر می‌رسد که بتن سبکدانه کم‌مقاومت عموماً جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بیشتری نسبت به بتن مرجع دارد. اگرچه در مقاومت‌های زیادتر، برخی از بتن‌های سبکدانه جمع‌شدگی کمتری از خود نشان می‌دهند. جایگزینی بخشی از سبکدانه ریز یا جایگزینی کامل آن با ماسه طبیعی معمولاً جمع‌شدگی بتن تولیدشده با تقریباً تمام سبکدانه را کاهش می‌دهد.



شکل ۵-۹-۱- جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن برای بتن عادی عمل‌آوری شده

### ۵-۹-۲- بتن عمل‌آوری شده با بخار تحت فشار اتمسفر

شکل ۵-۹-۲ کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن در عمل‌آوری با بخار را نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند بین ۱۰ تا ۴۰ درصد متغیر باشد. قسمت زیرین این محدوده تفاوت زیادی با بتن مرجع با وزن معمولی ندارد.

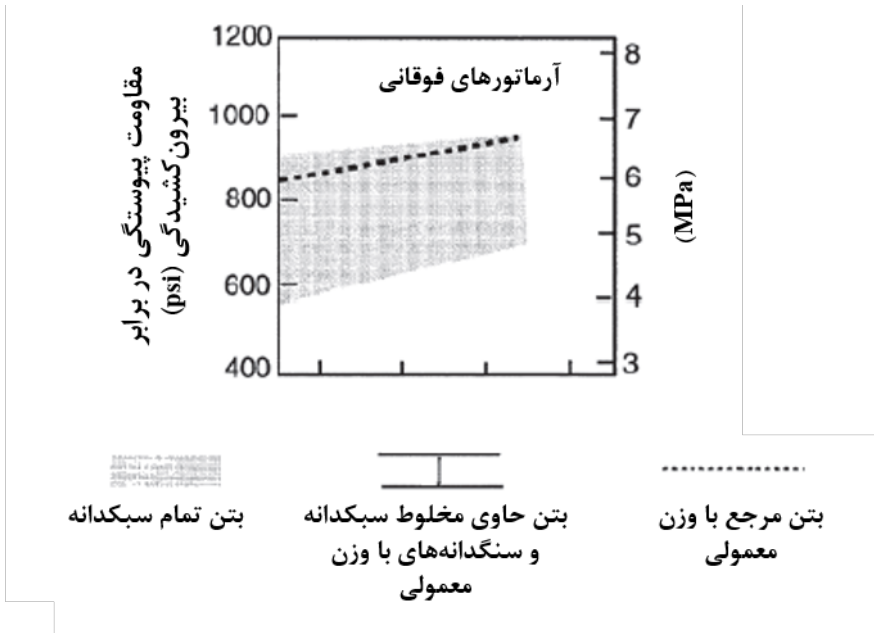


### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۹-۲- جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن برای بتن عمل‌آوری شده با بخار

### ۵-۱۰-۱۰- مقاومت پیوستگی<sup>۸۲</sup>

در ACI 318 ضریبی برای طول مهاری  $1/3$  وجود دارد تا مقاومت کششی کمتر بتن سبکدانه در نظر گرفته شود و در صورتی که میانگین مقاومت شکافتی ( $f_{ct}$ ) بتن سبکدانه مشخص شده باشد، اجازه داده شده این ضریب برابر  $1 > \sqrt{\frac{f_c}{f_{ct}}}$  در نظر گرفته شود. به طور کلی، ضوابط طراحی بتن سبکدانه، طول‌های مهاری بزرگتری را ملزم می‌کنند.



### ویژگی‌های بتن سبکدانه

شکل ۵-۱۰- مقاومت پیوستگی بدست آمده از آزمایش‌های بیرون کشیدگی

با توجه به مقاومت کمتر سبکدانه، انتظار می‌رود که در یک مقاومت فشاری یکسان، بتن سبکدانه دارای مقاومت کششی، انرژی شکست<sup>۸۳</sup> و ظرفیت باربری موضعی کمتری نسبت به بتن با وزن معمولی باشد. در نتیجه، مقاومت پیوستگی آرماتورهای مدفون در بتن سبکدانه، با یا بدون آرماتور عرضی، کمتر از بتن با وزن معمولی است، با این تفاوت که در مقاومت‌های زیادتر افزایش می‌یابد (شکل ۵-۱۰، Shideler، ۱۹۵۷).

کمیته ۴۰۸ انجمن بتن آمریکا (۱۹۶۶) بر کمبود داده‌های تجربی از مقاومت پیوستگی عناصر بتنی مسلح که با بتن سبکدانه ساخته شده‌اند تاکید می‌کند.

در تحقیقات انجام گرفته (Lyse، ۱۹۳۴؛ Petersen، ۱۹۴۸؛ Shideler، ۱۹۵۷؛ Berg، ۱۹۸۱؛ Martin، ۱۹۸۲؛ Clarke و Birjandi، ۱۹۹۳) به این نتیجه رسیدند که مقاومت پیوستگی فولاد در بتن سبکدانه با بتن معمولی مشابه است. در مقابل، مطالعاتی وجود دارند که تفاوت زیادی بین مقاومت پیوستگی در بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی نشان می‌دهند (Mor و Standish، ۱۹۸۲؛ Mor، ۱۹۹۲). در این مطالعات مقاومت پیوستگی بتن سبکدانه بین ۴۵ تا ۸۸ درصد مقداری بود که در بتن با وزن معمولی مشاهده شد.

در مجموع، داده‌ها نشان می‌دهند که استفاده از بتن سبکدانه می‌تواند به مقاومت پیوستگی از ۶۵ درصد تا مقادیر مشابه یا حتی بیشتری از مقاومت‌های پیوستگی بدست آمده از بتن با وزن معمولی منجر شود. برای

<sup>83</sup> Fracture energy

فصل ۵- خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبکدانه سازه‌ای ..... ۵۹

سازه‌های ویژه مانند پل‌های دهانه بلند با مقاومت بسیار زیاد و سکوه‌های دریایی عظیم، در نظرگیری یک برنامه آزمایشی مبتنی بر مصالح انتخاب شده برای پروژه توصیه می‌شود.

#### ۱۱-۵- انبساط حرارتی<sup>۸۴</sup>

در تعیین ضرایب انبساط حرارتی خطی بتن سبکدانه (Cordon و Price، ۱۹۴۹) بسته به میزان ماسه طبیعی مورد استفاده، مقداری بین  $7 \times 10^{-6}$  تا  $11 \times 10^{-6}$  mm/mm/°C را نشان می‌دهند.

#### ۱۲-۵- خواص جریان حرارتی

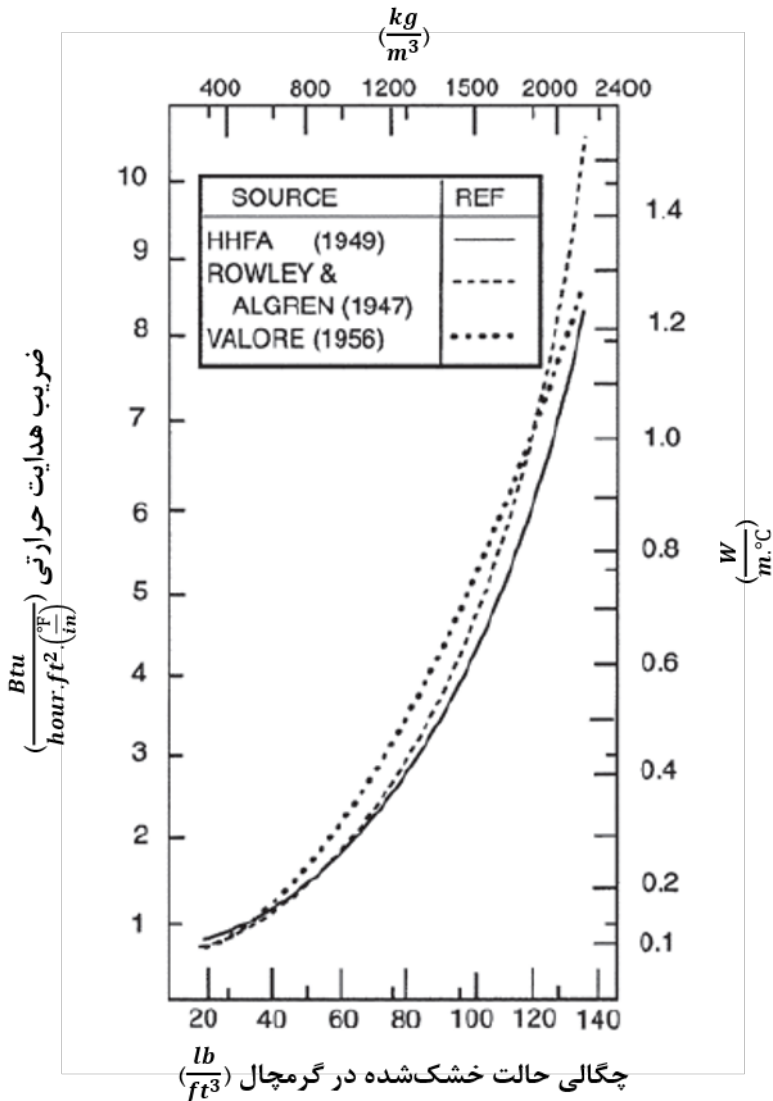
##### ۱-۱۲-۵- ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی  $k$ ، یک ویژگی خاص مربوط به مصالح است و نه سازه. این ضریب، نرخ است که حرارت (انرژی) در اثر وجود اختلاف دمایی به اندازه ۱ درجه به صورت عمود بر واحد سطح مصالحی همگن و با ضخامت واحد عبور می‌کند (مقدار  $k$  بر حسب  $W/m \cdot ^\circ C$  بیان می‌شود). مقاومت حرارتی، مقاومت در واحد ضخامت بوده و برابر با  $1/k$  است.

ضریب هدایت حرارتی برای بتن‌هایی که چگالی حالت خشک شده در گرمچال آن‌ها در محدوده کمتر از  $3200 \text{ kg/m}^3$  تا بیش از  $3200 \text{ kg/m}^3$  هستند، تعیین شده است. این ضریب معمولاً از نمونه‌های خشک شده در گرمچال که در دستگاه لوح گرم محافظت شده<sup>۸۵</sup> آزمایش می‌شوند بدست می‌آید (ASTM C177).

<sup>84</sup> Thermal expansion

<sup>85</sup> Guarded hot-plate



شکل ۵-۱۲-۱- رابطه ضریب هدایت حرارتی میانگین بتن در حالت خشک‌شده در گرمچال با چگالی (Valore, ۱۹۸۰)

زمانی که ضرایب هدایت حرارتی بتن‌های دارای چگالی‌های مختلف مطابق شکل ۵-۱۲-۱، در مقابل چگالی حالت خشک‌شده در گرمچال ترسیم شود، بهترین منحنی‌های برازش شده نشانگر وابستگی کلی  $k$  به چگالی هستند. محققین مختلف، روابط متفاوتی یافته‌اند که در آن‌ها تفاوت در نوع کانی‌شناسی، ریزساختار و همچنین دانه‌بندی سنگدانه‌ها بوده است. تفاوت‌های ناشی از مقدار سیمان، چگالی خمیر و ساختار منافذ نیز منجر به تغییر ضریب هدایت حرارتی می‌شوند. اختلاف در روش‌های آزمایش و اندازه‌های نمونه نیز موثرند.



فصل ۵- خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبکدانه سازه‌ای ..... ۶۱

والور<sup>۸۶</sup> (۱۹۸۰) با استفاده از نتایج بیش از ۴۰۰ آزمایش منتشر شده، مقادیر چگالی  $w$  را بر حسب لگاریتم ضریب هدایت حرارتی  $k$  ترسیم نمود و بر اساس آن رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$k=0.072e^{0.00125Wc} , W/m^{\circ}C \quad (5-12-1)$$

بر اساس آزمایش طبق ASTM C177 و برای یک بتن مشخص، مقدار  $k$  دقیق بدست آمده به مقدار محاسباتی ارجحیت دارد. با این حال، برای اهداف ساخت و ساز متداول، رابطه فوق تخمین خوبی از مقدار  $k$  برای بتن خشک شده در گرمچال ارائه می‌کند و علاوه بر این، می‌توان به راحتی آن را برای بتن‌های خشک شده در هوا تصحیح کرد.

### ۵-۱۲-۱-۱- تاثیر رطوبت بر ضریب هدایت حرارتی بتن

افزایش رطوبت آزاد بتن سخت شده باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود. والور (۱۹۸۰) بیان کرد که به ازای هر ۱ درصد افزایش وزنی رطوبت آزاد یا قابل تبخیر نسبت به چگالی حالت خشک شده در گرمچال، مقدار  $k$  به میزان ۶ درصد افزایش می‌یابد. ضریب هدایت حرارتی اصلاح شده را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$K_{\text{(اصلاح شده)}} = K_{\text{(خشک شده در گرمچال)}} \times \left( 1 + 6 \frac{(W_m - W_0)}{W_0} \right) \quad (5-12-1-1)$$

در این رابطه،  $W_m$  و  $W_0$  به ترتیب چگالی حالت مرطوب و چگالی حالت خشک شده در گرمچال هستند.

### ۵-۱۲-۱-۱-۱- تصحیح پیشنهادی برای ضریب رطوبت در رابطه ضریب هدایت حرارتی

برای انواع بتن‌های سبکدانه و بتن با وزن معمولی به ازای هر ۱ درصد وزنی افزایش رطوبت، به ترتیب افزایش ۶ تا ۹ درصدی مقدار  $k$  توصیه می‌شود. این ضرایب در مواردی قابل اعمال هستند که شرایط محیطی یا سایر عوامل، درصد رطوبتی را موجب شوند که به طور قابل ملاحظه‌ای از رطوبت استاندارد توصیه شده که برای بتن با وزن معمولی برابر ۲ درصد حجمی و برای بتن سبکدانه برابر ۴ درصد حجمی است، فاصله داشته باشد. برای واحدهای بنایی و برای بتنی که در برابر شرایط محیطی محافظت معمولی دارد، می‌توان از یک ضریب ثابت ساده استفاده کرد. هنگام تصحیح برای رطوبت تعادلی در حالت محافظت معمولی در برابر شرایط محیطی، مقادیر  $k$  به میزان ۲۰ درصد نسبت به مقادیر استاندارد بتن خشک شده در گرمچال افزایش داده می‌شوند. این موضوع، همانطور که در شکل ۵-۱۲-۱-۳ نشان داده شده است، به تغییر رابطه Valore (۱۹۸۰) منجر می‌شود.

$$k=0.072e^{0.00125Wc} , W/m^{\circ}C \quad (5-12-1)$$

که در آن  $e = 2.71828$

### ۵-۱۲-۱-۲- رطوبت تعادلی بتن

بتن موجود در سازه، در حالت خشک شده در گرمچال قرار ندارد بلکه با رطوبت نسبی محیط در تعادل است. از آنجایی که مقادیر  $k$  ارائه شده برای بتن خشک شده در گرمچال هستند، لازم است میزان رطوبت تعادلی بتن با محیط معمولی اطراف در حالت بهره‌برداری را دانست و سپس یک ضریب تصحیح رطوبت برای تخمین  $k$  در شرایط بهره‌برداری مورد پیش‌بینی اعمال نمود.

رطوبت نسبی درون واحدهای بنایی در یک دیوار با توجه به نوع کاربری، موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی و فصول مختلف سال متفاوت بوده و معمولاً ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، معمولاً فرض بر این است که سطوح خارجی دیوارهای تک‌جداره توسط رنگ قابل تنفس<sup>۸۷</sup>، اندود<sup>۸۸</sup>، یا اندود سیمانی الیاف‌دار با پیوستگی سطحی<sup>۸۹</sup> محافظت می‌شوند. برای دیوارهای تک‌جداره، چنین حفاظتی برای به حداقل رساندن نفوذ باران ضروری است. برای دیوارهای دوجداره، میانگین رطوبت هر دو جداره، حتی اگر جداره خارجی رنگ نشده باشد، تقریباً برابر با دیوار تک‌جداره محافظت شده خواهد بود.

داده‌های منابع مختلف برای بتن با وزن معمولی، بتن سبکدانه و بتن عایق با چگالی کم توسط Valore (۱۹۵۶، ۱۹۸۰) خلاصه شده است. میانگین رطوبت بلندمدت بتن با داده‌های ارائه شده در اینجا برای واحدهای بنایی بتنی مطابقت خوبی دارد.

تحت شرایط خاص، وقوع میعان<sup>۹۰</sup> درون دیوار می‌تواند باعث ایجاد افزایش درصد رطوبت شود. برای انتخاب ضریب هدایت حرارتی مناسب، این موضوع باید در نظر گرفته شود.

### ۵-۱۲-۱-۳- خمیر سیمان به عنوان مصالح عایق

چگالی خمیر سیمان پرتلند بالغ خشک شده در گرمچال در محدوده  $1600 \text{ kg/m}^3$  برای  $w/cm = 0.4$  تا  $1075 \text{ kg/m}^3$  برای  $w/cm = 0.8$  متغیر است. این محدوده  $w/cm$ ، بتن‌های سازه‌ای را در بر می‌گیرد. سایر داده‌های مربوط به بتن متخلخل<sup>۹۱</sup> با سیمان خالص (خمیر سیمان هوادار) که با آب عمل‌آوری شده است، برقراری روابط بین چگالی و  $k$  را برای خمیرهای خشک شده در گرمچال، خشک شده در هوا و مرطوب امکان‌پذیر می‌کند (Valore، ۱۹۸۰). مطالعه Valor (۱۹۸۰) نشان می‌دهد که بتن متخلخل با سیمان خالص و بتن متخلخل اتوکلاو شده از یک منحنی چگالی -  $k$  مشترک پیروی می‌کنند.

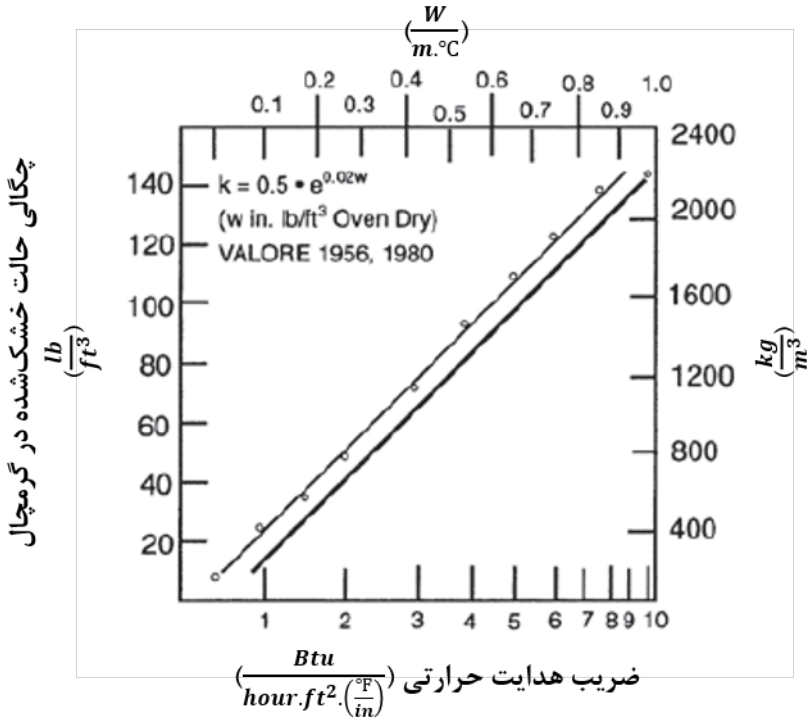
<sup>87</sup> Breathing type paint

<sup>88</sup> Stucco

<sup>89</sup> Surface-bonding fibered-cement plaster

<sup>90</sup> Condensation

<sup>91</sup> Condensation



شکل ۵-۱۲-۳- رابطه مقادیر  $k$  متوسط بتن با چگالی خشک (Valore, ۱۹۸۰)

### ۵-۱۲-۲- ضریب انتقال حرارتی<sup>۹۲</sup>

مقدار  $U$  ( $\Lambda$ ) یا ضریب انتقال حرارتی، نرخ جریان حرارتی عبوری از یک سازه ساختمانی یا مقدار حرارت عبوری از  $1 \text{ m}^2$  عضو در هر ثانیه است زمانی که دمای محیط در یک سمت دیوار یا سقف با سمت دیگر آن به اندازه  $1^\circ K$  تفاوت داشته باشد. این ضریب برحسب واحد زیر بیان می‌شود:

$$U = \frac{W}{m^2.K} \quad (\text{الف-۲-۱۲-۵})$$

مقدار  $U$  دیوار یا سقفی که از صفحاتی همگن و مصالحی با ضخامت یکنواخت تشکیل شده است، از معکوس مجموع مقاومت‌های حرارتی تک تک اجزای سازه محاسبه می‌شود:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} \quad (\text{الف-۲-۱۲-۵})$$

که در آن  $R_1$ ،  $R_2$  و ... مقاومت حرارتی تک تک اجزای تشکیل دهنده و شامل مقادیر  $R$  ثابت استاندارد برای مقاومت حرارتی فضاهاى خالی و سطوح داخلی و خارجی هستند. مقدار برحسب  $W/m^2.K$  بیان می‌شود. مقاومت حرارتی هریک از لایه‌های توپر دیوار، از تقسیم ضخامت هر لایه به ضریب هدایت حرارتی ( $k$ ) آن مصالح بخصوص بدست می‌آید. اگر نواحی مختلف با نرخ‌های جریان حرارتی متفاوت وجود داشته باشد، ضریب انتقال حرارتی میانگین دیوار یا سقف را می‌توان از جمع وزنی هر سطح با ضریب انتقال حرارتی متناظر آن محاسبه کرد.

به دلیل ظرفیت کم سازه‌های سبک برای ذخیره‌سازی حرارت، مقاومت‌های حرارتی موردنیاز بیشتر با استفاده از بتن سبکدانه حاصل می‌شوند.

### ۵-۱۲-۳- ظرفیت گرمایی / گرمای ویژه

زمانی که سبکدانه‌ها از پیش مرطوب شده باشند، ظرفیت گرمایی ( $c$ ) بیشتری نسبت به سنگدانه‌های با وزن معمولی دارند که عمدتاً به دلیل وجود آب در منافذ سبکدانه است. Lopez (۲۰۰۵) تخمین زد که ظرفیت گرمایی سنگ لوح منبسط شده در کوره دوار  $1/37$  برابر ظرفیت گرمایی گرانیته بوده و مقادیر آن در محدوده  $0/8$  تا  $1/1 \text{ kgK/kJ}$  قرار دارد. بتن ساخته شده با این سبکدانه ظرفیت گرمایی بیشتری ( $\text{kgK/}$   $0/86 \text{ kJ}$ ) نسبت به بتن با وزن معمولی ( $0/84 \text{ kgK/kJ}$ ) خواهد داشت (FIP، ۱۹۸۳). محققان بیان می‌کنند که ظرفیت گرمایی بتن با وزن معمولی بلافاصله پس از بتن‌ریزی تقریباً برابر  $1 \text{ kgK/kJ}$  است، در حالی که ظرفیت گرمایی بتن ساخته شده با شیل و رس منبسط شده به دلیل مقدار آب بیشتر سبکدانه‌ها، به ترتیب برابر  $0/3 \text{ kgK/kJ}$  و  $0/32 \text{ kgK/kJ}$  هستند (FIP، ۱۹۸۳).

### ۵-۱۲-۴- ضریب انتشار حرارتی

این ضریب که معمولاً با  $\alpha$  نمایش داده می‌شود، تغییر دمای موضعی و چگونگی انتشار آن در مصالح را نشان می‌دهد. ضریب انتشار حرارتی، به ضریب هدایت حرارتی بتن  $k$  ( $\lambda$ )، وزن مخصوص  $Wc$  و ظرفیت گرمایی بتن  $c$  بستگی دارد.

ضریب انتشار حرارتی بتن سبکدانه به دلیل ظرفیت گرمایی زیادتر، چگالی کمتر و ضریب هدایت حرارتی کمتر آن، از ضریب انتشار حرارتی بتن با وزن معمولی کمتر است. برای نمونه، ضریب انتشار حرارتی بتنی با وزن مخصوص تازه  $2300 \text{ kg/m}^3$  برابر  $10^{-5} \times 0.66 \text{ m}^2/\text{s}$  است در حالی که مقدار آن برای بتن با وزن مخصوص تازه  $1400 \text{ kg/m}^3$  برابر  $10^{-5} \times 0.34 \text{ m}^2/\text{s}$  می‌باشد. بنابراین، تغییر دمای موضعی در بتن سبکدانه کندتر از بتن با وزن معمولی منتشر می‌شود و در نقطه مقابل، در صورت وجود مقدار سیمان زیاد، بتن سبکدانه تمایل به رسیدن به دماهای بیشتری دارد (لوپز، ۲۰۰۵).

### ۵-۱۳- دوام در برابر آتش<sup>۹۳</sup>

بتن سبکدانه به دلیل ضرایب هدایت حرارتی و انبساط حرارتی کمتر و نیز پایداری سبکدانه در برابر آتش، نسبت به بتن با وزن معمولی مقاومت بیشتری در برابر آتش سوزی دارد (Gusta- و Abrams، ACI 216,1؛ ferro، ۱۹۶۸؛ Abrams، ۱۹۷۱؛ Carlson، ۱۹۶۲؛ Selvaggio و Carlson، ۱۹۶۴؛ موسسه شیل، رس و سنگ لوح منبسط شده ۱۹۸۰؛ موسسه بتن پیش ساخته/پیش تنیده<sup>۹۴</sup> ۲۰۰۹).

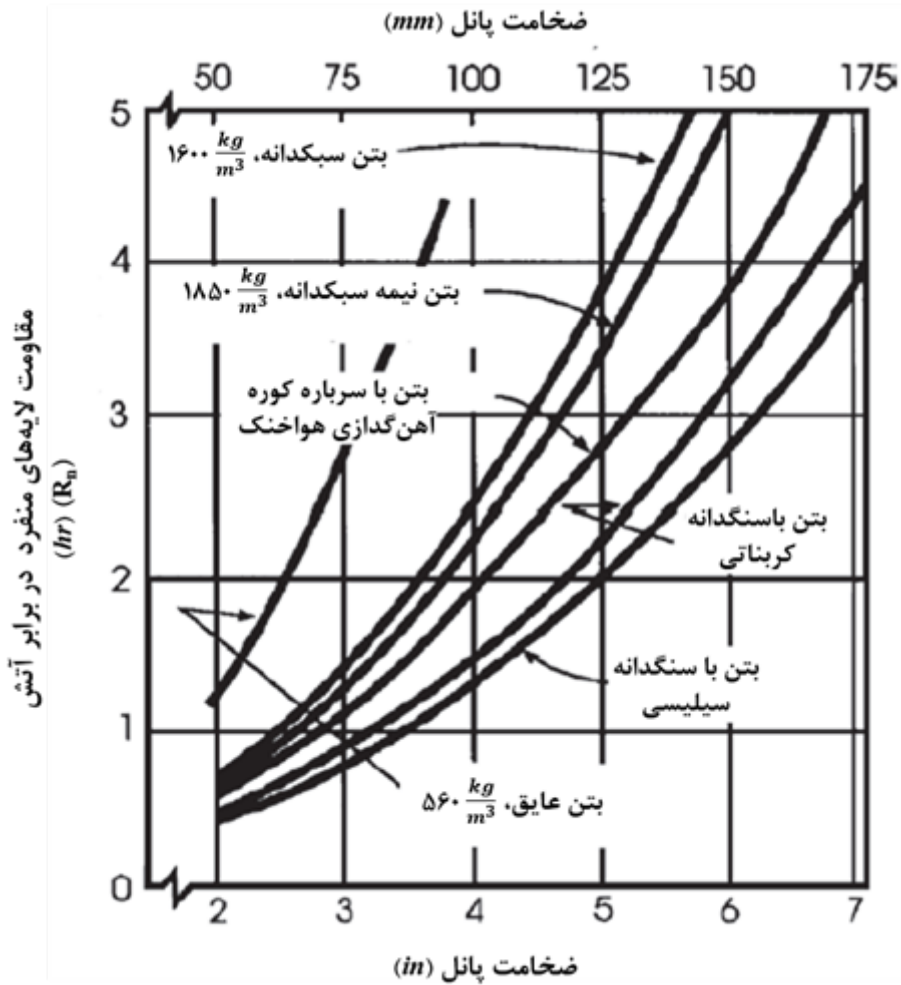
نتایج تحقیق در مورد دوام بتن سبکدانه در برابر آتش در مقایسه با بتن با وزن معمولی در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. ممکن است برای رتبه‌بندی در برابر حریق، پوشش بتنی موردنیاز برای آرماتور فولادی در بتن سبکدانه اندکی کمتر از بتن با وزن معمولی باشد (Carlson و همکاران، ۱۹۶۲). در حالی که بیش از ۵۰ سال تجربه و تعداد زیادی آزمایش آتش بتن‌های سبکدانه با سطوح مقاومت‌های مناسب برای ساخت‌وساز تجاری ۲۱ تا ۳۵ MPa وجود دارد، داده‌های بتن سبکدانه پرمقاومت، تا همین اواخر محدود بوده است.

آزمایش‌های انجام شده توسط Bilodeau و همکاران (۱۹۹۵، ۱۹۹۸) نشان داده است که به دلیل نفوذپذیری بسیار کمی که به بتن‌های پرمقاومت مربوط می‌شود، مقاومت در برابر آسیب ناشی از قله‌کن شدن در این بتن‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به دلیل رطوبت بیشتر بتن سبکدانه با مقدار آب جذب شده زیاد در هنگام پیمانه‌شدن، خطر قله‌کن شدن افزایش می‌یابد. با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت در سکوهای دریایی، که مستعد آتش سوزی‌های شدید هیدروکربنی هستند، نیاز مبرمی به یافتن راه‌حلی برای این مشکل جدی وجود داشت.

---

<sup>93</sup> Fire endurance

<sup>94</sup> Precast/Prestressed Concrete Institute



شکل ۵-۱۳- دوام در برابر آتش (انتقال حرارت) دال‌های بتنی به صورت تابعی از ضخامت برای نمونه‌های عادی خشک شده (ACI 216.1)

چندین مطالعه اثر مثبت افزودن مقادیر کم الیاف پلی‌پروپیلن به بتن پرمقاومت را گزارش کرده‌اند. این کار از طریق آزمایش آتش این بتن‌ها تحت شرایطی که شدیدتر از شرایط محیطی (معیارهای زمان - دما) مشخص شده توسط ASTM E119 بود، انجام گرفت. در این حالت الیاف ذوب می‌شوند و مجرایی برای آزادسازی فشار ایجاد شده در اثر تبدیل رطوبت به بخار فراهم می‌کنند. Jensen و همکاران (۱۹۹۵) نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی حریق نروژ را گزارش کردند. این مطالعات، شامل تعیین خواص مکانیکی در دمای زیاد، بهبود مقاومت در برابر قله‌کن شدن از طریق طراحی مصالح و تایید آتشپدای و مقاومت باقیمانده عناصر سازه‌ای قرار گرفته در معرض حریق بودند. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به

مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ درصد حجم بتن به مخلوط بتن سبکدانه، موجب کاهش قابل توجه قلوه کن شدن بتن شد. در آزمایش آتش تیرها، یافته‌های قبلی که نشان می‌دادند میزان قلوه کن شدن (نمایان شدن آرماتور) در تیرهای بتنی سبکدانه مسلح و پیش تنیده، در مقایسه با تیرهای بتنی با وزن معمولی بیشتر است را تایید کرد. در حالی که در تیرهای بتنی سبکدانه تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن، وقوع قلوه کن شدن کاهش یافت یا کاملاً از بین رفت. همچنین، هیچ اثری از قلوه کن شدن در تیرهای بتنی سبکدانه محافظت شده با پوشش‌های ضدحریق غیرفعال<sup>۹۵</sup> (یک ملات پایه سیمانی ویژه با گلوله‌های پلی استایرن منبسط شده بدون الیاف) مشاهده نشد.

## ۵-۱۴- جذب انرژی و مقاومت در برابر انفجار

بتن سبکدانه توانایی جذب یا مستهلک کردن انرژی منتقل شده توسط پرتابه‌ها و ترکش‌های ناشی از سلاح‌های گرم و انفجارهای مواد منفجره را دارد. با کاهش چگالی بتن، ظرفیت جذب انرژی آن افزایش می‌یابد. این قاعده کلی، با استفاده از بتن تمام سبکدانه در احداث ساختمان‌های پیش ساخته تجهیزات مخبراتی و انبارهای مهمات نشان داده شده است.

یک ضابطه منحصربفرد برای پانل‌های دیواری مورد استفاده در ساختمان‌های تجهیزات مخبراتی، توانایی متوقف کردن شلیک یک خشاب از تفنگ کالیبر ۰۶-۳۰ از فاصله ۹ متری است. گلوله‌ها نباید از پانل عبور کنند یا باعث آسیب دیدگی بیش از حد سطح پانل شوند. آزمایش‌های انجام گرفته (Berg و Speck، ۱۹۹۹) روی بتن سبکدانه با وزن مخصوص  $1150 \text{ kg/m}^3$  تا  $1315 \text{ kg/m}^3$  و مقاومت فشاری ۲۸ روزه  $20 \text{ MPa}$  تا  $30 \text{ MPa}$  عملکرد بی نظیری را نشان داد به صورتی که هیچکدام از گلوله‌ها از پانل عبور نکردند. بتن سبکدانه با سطح سنگدانه نمایان، انرژی ناشی از برخورد گلوله را بدون قلوه کن شدن جذب کرد، و حفره حاصل از برخورد گلوله ظاهری مشابه با سطح سنگدانه نمایان داشت که یافتن محل برخورد گلوله را دشوار می‌کرد. امروزه در سرتاسر جهان، از بتن سبکدانه برای ساخت انبارهای ذخیره سازی مهمات در تاسیسات نیروی دریایی استفاده می‌شود. دلیل استفاده از بتن سبکدانه در این تاسیسات، توانایی جذب ترکش‌های حاصله از انفجار مهمات و کاهش آسیب ناشی از مهمات منفجر نشده در اثر برخورد با دیوارهای انبار است (Speck و Berg، ۱۹۹۹). در نتیجه ساخت یک نمونه اولیه انبار مهمات با استفاده از سبکدانه‌های رسی منبسط شده که به صورت تجاری در دسترس بودند، و انجام آزمایش‌های تایید عملکرد بر روی این سازه، شعاع حفاظتی (ناحیه‌ای در اطراف انبار مهمات که هیچ ساختمان دیگری نباید در آن ساخت) در اطراف هر انبار را می‌توان در مقایسه با الزامات قبلی، ۶۰ تا ۸۰ درصد کاهش داد. این موضوع باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها، به ویژه در پایگاه‌های نظامی واقع در مناطق پرجمعیت می‌شود.





# فصل ۶

دوام بتن سبکدانه سازه‌ای



## ۶-۱- کلیات

آزمایش‌های متعدد تسریع شده یخ‌زدن و آب‌شدن بتن سبکدانه در آمریکای شمالی و اروپا انجام شده است. این آزمایش‌ها تاثیر حجم هوای ایجاد شده، مقدار سیمان، درصد رطوبت سبکدانه‌ها، زمان‌های خشک شدن نمونه و محیط آزمایش را بررسی کردند. نتایج بصورت مشابه نشان دادند که بتن سبکدانه با هوای ایجاد شده در آن که به همراه مواد سیمانی با کیفیت، مخلوط شده باشد، تحت آزمون‌های یخ‌زدن و آب شدن معمول آزمایشگاهی دوام قابل قبولی از خود نشان می‌دهد. مشاهدات مقاومت در برابر ازم‌پاشیدن<sup>۹۶</sup> در حضور نمک‌های یخ‌زدا<sup>۹۷</sup> در بتن پل‌های سالخورده عملکرد مشابهی را برای بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی نشان می‌دهند. بررسی‌های جامع در مورد عملکرد هوازدگی بلندمدت عرشه پل‌ها و سازه‌های دریایی که برای سال‌ها در معرض شرایط محیطی شدید قرار داشته‌اند، یافته‌های بررسی‌های آزمایشگاهی را تایید می‌کنند و نشان می‌دهند که بتن‌های سبکدانه با طرح مخلوط و بتن‌ریزی مناسب، مشابه یا بهتر از بتن با وزن معمولی عمل می‌کنند (Holm, ۱۹۹۴).

نمونه‌های مغزه‌گیری شده از بدنه کشتی‌های بتنی سبکدانه با قدمت ۸۰ سال و همچنین پل‌های بتنی سبکدانه با قدمت ۴۰ تا ۵۰ سال نشان داده‌اند که این بتن‌ها در سطح مشترک سبکدانه و خمیر، ناحیه انتقالی متراکمی دارند و در سرتاسر خمیر ملات ریزترک‌های کمی مشاهده می‌شود. دلیل مقاومت زیاد این بتن‌ها در برابر هوازدگی و خوردگی، سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی متعددی از جمله مقاومت بهتر در برابر ریزترک خوردگی به علت چسبندگی بسیار بیشتر سبکدانه و خمیر و کاهش تنش‌های داخلی ناشی از تطابق خاصیت ارتجاعی فاز درشت‌دانه و فاز خمیر است (Holm و همکاران، ۱۹۸۴). همچنین بتن سبکدانه ظرفیت کرنش نهایی زیادی دارد چرا که نسبت مقاومت به مدول در آن زیاد است. در مقاومت یکسان، کرنشی که در آن انبساط مخرب بتن شروع می‌شود برای بتن سبکدانه بیشتر از بتن با وزن معمولی است. شبکه منافذ با پراکندگی مناسب که از سطح سبکدانه‌های ریز حاصل می‌شود نیز می‌تواند به سامانه هوای ایجاد شده کمک کند و با کاهش سطح غلظت مواد زیان‌آور در فاز خمیر عملکرد جذبی را ایفا کند (Holm, b1۹۸۰).

عمل‌آوری درونی توسط آب ذخیره شده درونی، به افزایش هیدراته‌شدن و کاهش نفوذپذیری ناحیه انتقالی کمک می‌کند. اگرچه روش آزمایش ASTM برای سنجش مقاومت بتن در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن تسریع شده (ASTM C666/C666M) عموماً به عنوان یک روش آزمایش مقایسه‌ای مفید شناخته شده است، اما همبستگی مناسبی بین نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تسریع شده و رفتار مشاهده شده بتن سالخورده در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن طبیعی وجود ندارد. استاندارد ASTM C330/C330M ملزم می‌کند که هنگام انجام آزمایش‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، روش‌های استاندارد ASTM C666/C666M به شرح زیر اصلاح شوند:

به غیر از مواقعی که روش دیگری تعیین شده باشد، نمونه‌های بتن سبکدانه ۱۴ روزه باید از عمل‌آوری مرطوب خارج شوند و به آن‌ها اجازه داده شود تا به مدت ۱۴ روز دیگر در رطوبت نسبی  $50 \pm 5$  درصد و

<sup>96</sup> Deterioration

<sup>97</sup> Deicing salts

دمای  $C(23 \pm 2)$  در هوا خشک شوند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش یخ‌زدن و آب‌شدن، در آب غوطه‌ور گردند.

ویژگی‌های دوام همه بتن‌ها، اعم از سبکدانه و یا با وزن معمولی، در درجه اول توسط ویژگی‌های حفاظتی خمیر سیمان تعیین می‌شوند. بنابراین، ضروری است که خمیر بتن نفوذپذیری کمی داشته باشد تا از خوردگی آرماتورهای فولادی که به طور مشخص حالت غالب خرابی‌های سازه‌ای مشاهده شده در ساخت و سازه‌های فعلی است، جلوگیری شود.

کیفیت محافظتی خمیر بتن غیرسازه‌ای و عایق که طرح مخلوط آن با هدف افزایش مقاومت حرارتی، با درصد هوای زیاد و مقدار سیمان کم تعیین شده است، به شدت کاهش خواهد یافت. بتن غیرسازه‌ای با چگالی بسیار کم، در مقایسه با عملکرد بلندمدت مطلوب بتن سبکدانه با کیفیت، مقاومتی در برابر نفوذ کلریدها و کربنات‌شدن ایجاد نمی‌کند.

## ۶-۲- جذب آب

بتن سبکدانه‌ای که برای شرایط نمایان طراحی شده است، ناگزیر دارای کیفیت خوبی خواهد بود. آزمایش‌های انجام شده توسط Bremner و همکاران (۱۹۹۲) نشان داده‌اند که نمونه‌های بتنی سبکدانه با کیفیت، آب بسیار کمی را جذب می‌کنند و در نتیجه چگالی کم خود را حفظ می‌کنند. علاوه بر این، گزارش شده که نفوذپذیری بتن سبکدانه بسیار کم و به طور کلی برابر یا به طور قابل توجهی کمتر از مقداری است که برای نمونه‌های بتن با وزن معمولی گزارش شده است. نفوذپذیری کم بتن سبکدانه، به تاثیر ناحیه انتقالی یکپارچه در این نوع بتن نسبت داده شده است.

Hoff (۱۹۹۲) با ارزیابی بتن سبکدانه پرمقاومت در قطب شمال، گزارش کرد تمام فضای خالی ناشی از خشک‌شدن نمونه‌هایی که دوره خشک‌شدن و به دنبال آن غوطه‌وری در آب تحت فشار اتمسفر را پشت سر گذاشتند، مجدداً از آب پر نشدند. اعمال فشار باعث افزایش بیشتر چگالی تقریباً به مقدار ۴۰ شد. قبل از وارد کردن نمونه‌ها در آب دریا، جرم همه بتن‌ها در مرحله خشک‌شدن فرآیند عمل‌آوری دچار افت شد، اگرچه بتن با مقاومت فشاری ۶۲ MPa به دلیل خمیر بسیار متراکم خود، افت جرم اندکی داشت.

## ۶-۳- ناحیه یا سطح مشترک انتقالی

### ۶-۳-۱- تاثیر ناحیه انتقالی بر دوام

این ناحیه، لایه انتقالی مصالح است که ذرات درشت‌دانه را به خمیر ملات پیوسته احاطه‌کننده آن‌ها متصل می‌کند. تجزیه و تحلیل این لایه پیوندی نیاز به در نظر گرفتن عاملی فراتر از چسبندگی ایجاد شده در سطح مشترک (ناحیه انتقالی) دارد و باید لایه انتقالی که بین دو فاز تشکیل می‌شود را نیز در برگیرد. فروپاشی یکپارچگی ساختاری کنگلومرا ممکن است به دلیل گسیختگی یکی از دو فاز یا وقوع فشکست در ناحیه انتقالی باشد که باعث جدایی فازهایی که همچنان سالم هستند می‌شود. سازوکارهای مختلفی که در

جهت حفظ یکپارچگی یا ایجاد جداشدگی عمل می‌کنند، به اندازه سامانه شبکه هوا و منافذ مورد نیاز برای محافظت از خمیر مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

سنگدانه‌ها اغلب به اشتباه به عنوان پرکننده‌هایی خنثی، نادیده گرفته می‌شوند و در نتیجه، تا همین اواخر سنگدانه‌ها و ناحیه انتقالی مرتبط با آن‌ها نسبتاً کم مورد توجه قرار گرفته‌اند.

برای عملکرد رضایت‌بخش بتن در شرایط محیطی شدید، لازم است که پیوند مطلوبی بین سنگدانه و خمیر ملات پیوسته احاطه‌کننده آن ایجاد و حفظ شود. ترک خوردگی سطحی زیاد یا از بین رفتن پیوستگی سنگدانه‌ها، در صورتی که این ترک‌ها با آب پر و متعاقباً منجمد شوند، تاثیر مخربی بر دوام خواهد داشت. یک پیامد مخرب جدی دیگر ریزترک خوردگی، ایجاد مسیری برای نفوذ آسان آب شور به درون توده بتن است. به منظور آگاهی از عملکرد انواع مختلف بتن، تعدادی از سازه‌های سالخورده که در برابر شرایط محیطی شدید مقاومت کرده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. ریخت‌شناسی<sup>۹۸</sup> و توزیع عناصر شیمیایی در سطح مشترک به وسیله Bremner و همکاران (۱۹۸۴) و Zhang و Gjorv (۱۹۹۰) مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن گزارش شد.

نشان داده شده که ناحیه انتقالی بتن سبکدانه به طور قابل توجهی بهتر از بتن با وزن معمولی فاقد دوده سیلیسی است (Holm و همکاران ۱۹۸۴؛ Khokrin, ۱۹۷۳). این بهبود قابل توجه در کیفیت، یکپارچگی و ریزساختار، ناشی از برخی ویژگی‌های منحصر به فرد بتن سبکدانه است که برخی از آن‌ها که منحصر به این موارد نمی‌شوند در ادامه ذکر شده‌اند:

الف) سطح غنی از آلومینات و سیلیکات سبکدانه‌های سرامیکی پخته‌شده، که پوزولانی هستند و با  $Ca(OH)_2$  آزاد شده در اثر هیدراته‌شدن سیمان پرتلند، ترکیب می‌شوند.

ب) کاهش ریزترک خوردگی در سطح مشترک خمیر و سبکدانه به دلیل خاصیت ارتجاعی مشابه سبکدانه و خمیر سیمانی اطراف آن.

پ) برخلاف حالت معمول در سنگدانه‌های با وزن معمولی که نسبت  $w/cm$  در عدسی‌های ناشی از آب‌انداختن<sup>۹۹</sup> اطراف درشت‌دانه‌های طبیعی به طور قابل توجهی از توده خمیر بیشتر است، در بتن سبکدانه بین دو ماده متخلخل یعنی سبکدانه و خمیر سیمانی متخلخل تعادل رطوبتی برقرار است. هنگامی که دوده سیلیسی اضافه می‌شود، ریزساختار با کیفیت ناحیه انتقالی بتن سبکدانه نسبتاً تقویت می‌شود. با این حال، زمانی که در بتن حاوی سنگدانه‌های معمولی از دوده سیلیسی استفاده شود، این ناحیه ضعیف بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

اعتقاد بر این است که هیدراته‌شدن اضافی توسط آب ذخیره‌شده درونی باعث کاهش بیشتر نفوذپذیری ناحیه انتقالی در بتن‌های سبکدانه می‌شود (به بخش ۷-۵ مراجعه شود).

<sup>98</sup> Morphology

<sup>99</sup> Bleed water lenses

### ۶-۳-۲- ناحیه انتقالی بتن سالخورده در معرض شرایط محیطی شدید

مقاطع نازک سنگ‌نگاری<sup>۱۰۰</sup> از ناحیه انتقالی نمونه به منظور بررسی در میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱۰۱</sup> مجهز به تحلیلگر پراکندگی انرژی اشعه ایکس<sup>۱۰۲</sup> تهیه شد. نمونه‌ای از این مقاطع در شکل ۶-۳-۲ نشان داده شده است که تصویر میکروسکوپی از محل برخورد آب با کشتی<sup>۱۰۳</sup> بتنی با قدمت بیش از ۶۰ سال که توسط Holm و همکاران (۱۹۸۴) گزارش شده است را نشان می‌دهد. این تصویر میکروسکوپی تایید می‌کند که پیوند محکمی بین سبکدانه و خمیر ملات ایجاد می‌شود. مغزه‌های بتن با وزن معمولی که از پل‌هایی با عرشه‌های ساخته‌شده از بتن سبکدانه گرفته شده بودند نیز مورد بررسی قرار گرفتند و جداسدگی بین سنگدانه‌های با وزن معمولی و خمیر را آشکار ساختند، اما در سطح مشترک سبکدانه جداسدگی مشاهده نشد.

مطالعات انجام گرفته در روسیه در مورد دوام بتن سبکدانه (Khokrin, ۱۹۷۳) شامل نتایج بدست آمده از بررسی‌های صورت گرفته با میکروسکوپ الکترونی روبشی بود و نشان از هیدراته‌شدن بهتر سیمان و واکنش پوزولانی بهتر در ناحیه انتقالی خمیر و کرامزیت<sup>۱۰۴</sup> (نام رس یا شیل منبسط‌شده در کوره دوار در روسیه) داشت. این تصاویر میکروسکوپی آزمایش‌های قبلی که در آن‌ها پراش اشعه ایکس کرامزیت آسیاب‌شده قبل و بعد از غوطه‌وری در محلول آهک اشباع‌شده، به وجود واکنش شیمیایی گواهی می‌داد را تایید کردند. Khokrin (۱۹۷۳) همچنین نتایج آزمایش‌های سنجش ریزسختی<sup>۱۰۵</sup> ناحیه انتقالی بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی را گزارش کرد که بر اساس آن عرض ناحیه انتقالی تقریباً برابر ۶۰ mm برآورد شد. این نتایج در جدول ۶-۳-۲ نشان داده شده است.

تقریباً همه بتن‌های تجاری تا اندازه‌ای آب‌انداختن و جداسدگی را از خود نشان می‌دهند. این موضوع در وهله اول به دلیل تفاوت چگالی مواد تشکیل‌دهنده مختلف است و با استفاده از طرح مخلوط مناسب می‌توان آن را به حداقل رساند. تاثیر آب‌انداختن بر مقاومت کششی بتن با وزن معمولی توسط Fenwick و Sue (۱۹۸۲) مورد مطالعه قرار گرفت. گزارش آن‌ها تاثیر افزایش آب آزاد شده در اثر آب‌انداختن از میان مخلوط، محبوس شدن حباب هوا در زیر ذرات سنگدانه‌های درشت‌تر و کیفیت ضعیف خمیر در سطح مشترک به دلیل تجمع آب اضافی را تشریح کرد. افت ویژگی‌های مکانیکی در نتیجه معایب سطح مشترک اجتناب‌ناپذیر است، چرا که این معایب اندرکنش بین دو فاز کاملاً متفاوت را محدود می‌کنند.

نفوذپذیری منجر به افزایش نفوذ عوامل مخرب می‌شود که خوردگی آرماتورهای مدفون را سرعت می‌بخشد. نفوذپذیری بتن تابعی از نفوذپذیری خمیر، سنگدانه و کیفیت سطح مشترک بین آن‌ها است. پدیده تجمع و باقی ماندن آب ناشی از آب‌انداختن در زیر سبکدانه‌های درشت، از طریق جذب مقدار کم اما قابل توجه آب از بتن تازه به درون سبکدانه به شدت کاهش یافته یا به طور کامل از بین می‌رود.

<sup>100</sup> Petrographic

<sup>101</sup> Scanning electron microscope

<sup>102</sup> Energy-dispersive x-ray analyzer

<sup>103</sup> Waterline

<sup>104</sup> Keramzite

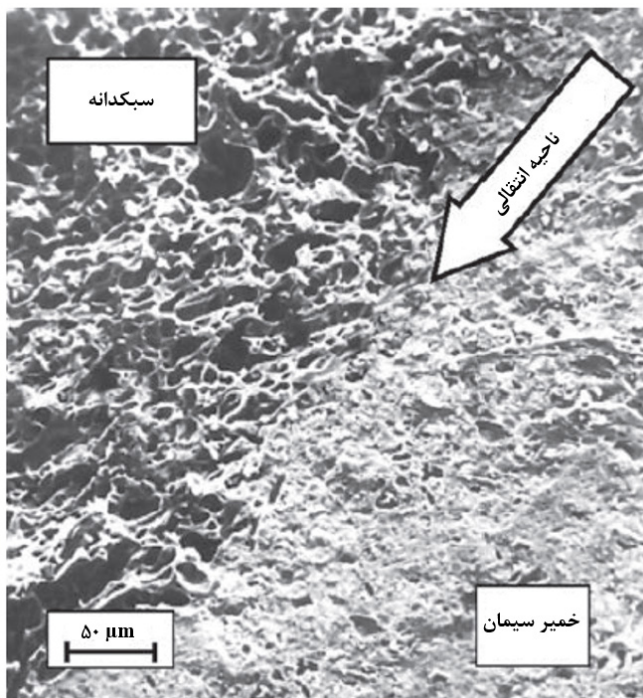
<sup>105</sup> Microhardness

این موضوع در عمل با بررسی ناحیه انتقالی نمونه‌های استوانه‌ای شکافته شده بتن سبکدانه و ارزیابی چشمی سطوح قائم ماسه‌پاشی شده<sup>۱۰۶</sup> ساختمان‌های واقع در آمریکای شمالی تایید شده است. این مشاهدات نباید موجب تعجب شود چرا که در بتن سبکدانه، سطح مشترک سبکدانه و خمیر، مرز بین دو محیط متخلخل است، در حالی که در بتن با وزن معمولی یک انتقال ناگهانی در سطح مشترک بخش متخلخل و فاز جامد وجود دارد (Lamond و Pielert، ۲۰۰۶).

Fagerlund (۱۹۷۲، ۱۹۷۸) نتایج تحلیل ناحیه انتقالی در ملات و بتن را گزارش کرده است. این گزارش‌ها شامل معادلاتی هستند که تاثیر ناحیه انتقالی روی پارامترهای مقاومتی را توصیف می‌کنند. Fagerlund از تحلیل‌های انجام شده با تصاویر میکروسکوپی که به طور مشخص درجات مختلف اندرکنش، از جداشدگی تقریباً کامل فاز برای سنگدانه‌های با وزن معمولی گرفته تا موارد شامل سبکدانه‌های منبسط شده که در آن‌ها مرز بین دو فاز قابل تشخیص نیست را شناسایی نموده‌اند، پشتیبانی کرد. این حقیقت که نواحی انتقالی با کیفیت در بتن سبکدانه یکپارچگی خود را در طول دوره بهره‌برداری سازه حفظ کرده‌اند، موجب اطمینان خاطر از اندرکنش بلندمدت موثر اجزای ماده مرکب بتن می‌شود (Holm، ۱۹۸۳). Lopez (۲۰۰۵) و Lopez و همکاران (۲۰۰۷) کرنش نواحی انتقالی بتن سبکدانه به دلیل تغییر شکل ارتجاعی، خزش و جمع‌شدگی با استفاده از نقشه‌های کرنش<sup>۱۰۷</sup> به دست آمده از تحلیل تصویری را مورد مطالعه قرار دادند. نقشه‌های کرنش مشخص کردند که ناحیه انتقالی بتن سبکدانه، کرنش‌های کمتری نسبت به بتن با وزن معمولی از خود نشان می‌دهد. این کرنش‌های کمتر به تطابق بهتر کرنش سبکدانه و خمیر و همچنین هیدراته شدن اضافی به دلیل آب ذخیره شده درونی نسبت داده شده است.

<sup>106</sup> Sand-blasted

<sup>107</sup> Strain maps



شکل ۶-۳-۲- تصویر میکروسکوپی ناحیه انتقالی

**جدول ۶-۳-۲- ریزسختی در ناحیه انتقالی (c/z) بتن و بیرون آن با نسبت w/cm و سبکدانه‌های درشت متفاوت (Khokrin, ۱۹۷۳)**

نسبت w/cm						نوع سبکدانه درشت
۰/۵		۰/۴		۰/۳		
بیرون C/Z	درون C/Z	بیرون C/Z	درون C/Z	بیرون C/Z	درون C/Z	
۷۶	۱۳۶	۷۸	۱۴۳	۹۲	۱۶۰	سبکدانه نوع B
۶۸	۱۲۵	۷۳	۱۳۸	۹۴	۱۶۷	سبکدانه نوع O
-	-	-	-	۷۹	۸۱	سنگ دیاباز خردشده
-	-	-	-	۸۱	۸۱	سنگ آهک خردشده

**۶-۳-۳- تاثیر ناحیه انتقالی روی سازوکار خرابی**

بتن نمایان باید در برابر اثر همزمان مجموعه سامانه نیروهای دینامیکی از جمله بارهای زنده متغیر، دماهای

متغیر، تغییرات رطوبتی و اتساع ناشی از تغییرات شیمیایی دوام داشته باشد. این عوامل باعث گسیختگی غالباً مربوط به کشش می‌شوند. با این حال، به صورت سنتی مقاومت فشاری تک‌محوری علی‌رغم این واقعیت که بتن تقریباً هیچگاه تحت فشار گسیخته نمی‌شود، به‌عنوان تنها شاخص غالب کیفیت بتن در نظر گرفته می‌شود. احتمالاً سادگی و سهولت آزمایش مقاومت فشاری، تمرکز را از درک عمیق و توسعه روش‌های اندازه‌گیری مناسب که ویژگی‌های مربوط به دوام را کمی‌سازی می‌کنند منحرف کرده است.

به طور کلی، سازوکارهای ضعیف‌ترین پیوند، در آزمایش‌های فشاری تک‌محوری به دلیل ماهیت التیام‌پذیر تقسیم بار در فشار، نامشخص مانده است، برای مثال تسلیم موضعی و بسته شدن ترک‌های مربوط به تنش، تغییر دما و تغییر حجم. در حالی که سازوکارهای ضعیف‌ترین پیوند در نواحی کشش که از بار اعمال‌شده و شرایط محیطی ناشی می‌شوند، حائز اهمیت هستند. در بسیاری از انواع بتن، ناحیه انتقالی ممکن است ضعیف‌ترین حلقه زنجیر باشد که تعیین‌کننده رفتار بلندمدت بتن است.

### ۶-۳-۴- سازگاری در محل سطح مشترک سنگدانه و خمیر

هنوز درک کاملی از سازوکار سازگاری که در آن، نزدیک‌ترین منافذ به سطح مشترک سبکدانه - خمیر یک فضای قابل دسترسی برای تشکیل محصولات واکنش‌های مختلف بدون ایجاد انبساط مخرب فراهم می‌کنند، وجود ندارد. این امر زمانی تایید گردید که اترینگایت<sup>۱۰۸</sup>، ژل قلیایی - سیلیسی، نمک‌های دریایی و محصولات خوردگی در این منافذ نزدیک به سطح بتن‌های توانمند<sup>۱۰۹</sup> یافت شد (Holm و Bremner, ۲۰۰۰).

### ۶-۴- مقاومت در برابر خوردگی

#### ۶-۴-۱- کربناته‌شدن در سازه‌های دریایی سالخورده

#### ۶-۴-۱-۱- کلیات

کربناته‌شدن در بتن، واکنش دی‌اکسید کربن هوا با کلسیم هیدروکسید آزادشده از فرآیند هیدراته‌شدن است. این واکنش عدد PH را کاهش می‌دهد و شرایطی را بوجود می‌آورد که باعث از بین رفتن انفعال<sup>۱۱۰</sup> می‌شود که می‌تواند حفاظت طبیعی آرماتور فولادی توسط بتن را خنثی کند.

مسائل مرتبط با کربناته‌شدن، به کاهش PH بتن تقریباً از ۱۳ به ۹ بستگی دارد که به نوبه خود لایه محافظ روی آرماتور مسلح‌کننده را خنثی و آن را در برابر خوردگی آسیب‌پذیر می‌کند. ترکیبی از دو سازوکار اصلی از فولاد در برابر خوردگی محافظت می‌کند: عمق پوشش کافی و کیفیت مناسب بتن پوششی. کیفیت مواد پوششی معمولاً به نسبت  $w/cm$  یا مقاومت مرتبط است، اما به نفوذپذیری و ظرفیت کرنشی وابستگی بیشتری دارد.

<sup>108</sup> Ettringite

<sup>109</sup> High performance concrete

<sup>110</sup> Passivation

## ۶-۴-۱-۲- کشتی‌های بتنی شهر Cape Charles در ایالت ویرجینیای آمریکا

Holm و همکاران (۱۹۸۸) نتایج اندازه‌گیری کرنه‌شدن مغزه‌های حفاری‌شده از بدنه چندین کشتی بتنی ساخته‌شده در اوایل دهه ۱۹۴۰ را گزارش کردند. این کشتی‌ها در خلیج Chesapeake شهر Cape Charles واقع در ایالت ویرجینیای آمریکا به عنوان موج‌شکن برای اسکله قایق‌های مسافربری مورد استفاده قرار گرفتند. این کشتی‌ها با بتن با کیفیت حاوی سبکدانه‌های ریز و درشت منبسط‌شده تولیدی در کوره دوار و حجم کمی ماسه طبیعی تحت بازرسی دقیق ساخته شده بودند. برای دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه و بیش از ۳۵ MPa با چگالی ۱۷۳۰، از مقدار سیمان زیادی استفاده شده بود (McLaughlin, ۱۹۴۴). با وجود یخ‌زدن و آب‌شدن در شرایط محیطی دریایی، بتن بدون حباب هوای قسمت بدنه<sup>۱۱۱</sup> و سازه فوقانی<sup>۱۱۲</sup> این کشتی‌ها پس از اینکه بیش از پنج دهه در معرض این شرایط محیطی بودند همچنان در وضعیت خوبی قرار داشتند. تنها عملکرد دور از انتظار رضایت‌بخش بودن برخی از مناطق عرشه اصلی بود. پوشش بتنی mm ۲۰ در این نواحی که از چهار لایه آرماتور مسلح‌کننده قطور (به طور معمول با قطر ۲۵ mm) بدون عاج (صاف) با فواصل مرکز به مرکز ۱۰۰ mm محافظت می‌کرد، لایه‌لایه شده بود. بروز این صفحه گسیختگی قابل درک است و با استفاده از روش‌های پیش‌تندگی جدید امکان جلوگیری از آن وجود داشت. ضخامت پوشش بتنی آرماتورها در قسمت بدنه کشتی برابر mm ۲۲ تعیین شده بود و تمام آرماتورهای مسلح‌کننده در قسمت‌های دیگر تنها با mm ۱۳ پوشش بتنی محافظت شده بودند. بدون استثنا، همه آرماتورهایی که توسط مغزه بریده شده بودند، عاری از زنگ‌زدگی بودند. مغزه‌هایی که شامل آرماتور بودند، طبق روش‌های استاندارد ASTM C496/C496M در امتداد محور موازی با صفحه مسلح‌کننده شکافته شدند. بازرسی چشمی پس از خارج‌نمودن آرماتورها، خوردگی ناچیزی را نشان داد. پس از افشاندن فنل‌فالتلین<sup>۱۱۳</sup> روی سطح مشترک، رنگ سطوح به ارغوانی تغییر کرد که نشان‌دهنده عدم کرنه‌شدن سطح مشترک فولاد و بتن بود.

میانگین عمق کرنه‌شده در نمونه‌های گرفته‌شده از عرشه اصلی کشتی mm ۱ و برای بتن بخش در تماس با آب بدنه<sup>۱۱۴</sup>، بین mm ۱ تا mm ۲ متغیر بود و یا تقریباً وجود نداشت. کرنه‌شدن در قسمت بدنه و دیافراگم‌های<sup>۱۱۵</sup> کشتی تقریباً وجود نداشت. کرنه‌شدن، از طریق افشاندن محلول فنل‌فالتلین استاندارد روی سطح تازه شکسته آشکارسازی شد. مغزه‌گیری از خط آب تا ارتفاع ۵ متر بالاتر از سطح آب انجام شد. در هیچ موردی عمق کرنه‌شدن بیشتر از mm ۲ یافت نشد. در برخی موارد، ترک‌های خمشی که شواهدی از عمق کرنه‌شدن تا mm ۸ داشتند، مشاهده شد. پیشروی کرنه‌شدن ظاهراً بیش از mm ۰/۱ عمود بر صفحه ترک نبود.

<sup>111</sup> Hull

<sup>112</sup> Superstructure

<sup>113</sup> Phenolphthalein

<sup>114</sup> Exposed wing walls

<sup>115</sup> Bulkheads



### ۶-۱-۳- پل خلیج Chesapeake واقع در شهر Annapolis ایالت مریلند آمریکا

عمق کربناته شده در مغزه‌های بتنی گرفته شده از پل ۳۵ ساله خلیج Chesapeake، در قسمت بالای عرشه پل، ۲ تا ۸ mm و در سطح زیرین عرشه پل، ۲ تا ۱۳ mm بود. عمق بیشتر کربناته شده در قسمت زیرین عرشه نشان دهنده انتشار گاز بیشتر است که به سطح خشک تر پل مرتبط می‌باشد. به نظر می‌رسد که پوشش لایه آسفالت ۳۶ mm موجب جلوگیری از خشک شدن و در نتیجه کاهش عمق کربناته شده در بالای عرشه پل شده است (Holm، ۱۹۸۳؛ Holm و همکاران، ۱۹۸۴).

### ۶-۱-۴- پل Cocksackie واقع در شهر نیویورک

عمق کربناته شده در مغزه‌های حفاری شده با همکاری اداره بزرگراه‌های ایالت نیویورک<sup>۱۱۶</sup> از سطح نمایان عرشه ۱۵ ساله پل تقاطع Cocksackie، برای سطح بالایی برابر ۵ mm و برای سطح زیرین برابر ۱۰ mm بود. با وجود تقریباً ۱۰۰۰ بار نمک پاشی<sup>۱۱۷</sup>، شواهد خوردگی در هیچ یک از آرماتورهای بریده شده توسط ۶ مغزه گرفته شده مشاهده نشد (Holm و همکاران، ۱۹۸۴).

### ۶-۱-۵- پل‌ها و دره‌گذرهای<sup>۱۱۸</sup> واقع در ژاپن

نتایج اندازه گیری عمق کربناته شده سازه‌های دریایی سالخورده در آمریکای شمالی با داده‌های گزارش شده توسط Ohuchi و همکاران (۱۹۸۴) در ژاپن مشابه است. این محققین نفوذ یون کلرید، عمق کربناته شده و بروز ریزترک خوردگی را در بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی پل‌ها، آب‌گذرها<sup>۱۱۹</sup> و صندوقه‌های<sup>۱۲۰</sup> یکسان پس از ۱۹ سال قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی مطالعه کردند. عملکرد بادوام این سازه‌ها، که از عمق کربناته شدن، ریزترک خوردگی و نیمرخ‌های نفوذ یون کلرید توسط Ohuchi و همکاران (۱۹۸۴) اندازه گیری و گزارش شده، مشابه مطالعات انجام شده روی پل‌های بتنی سبکدانه سالخورده در آمریکای شمالی است (Holm و همکاران، ۱۹۸۴).

### ۶-۲- نفوذپذیری و حفاظت در برابر خوردگی

مطالعات نفوذپذیری بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی که در معرض شرایط آزمایشی مشابه قرار داشتند، گزارش شده است (Keeton، ۱۹۷۳؛ Nishi و همکاران، ۱۹۸۰؛ Keeton، ۱۹۷۰؛ Bamforth، ۱۹۸۷؛ Bremner و همکاران، ۱۹۹۲؛ Zhang و Gjörv، ۱۹۹۱؛ Thomas، ۲۰۰۶).

<sup>116</sup> New York State Thruway Authority

<sup>117</sup> Salting

<sup>118</sup> Viaduct

<sup>119</sup> Aqueduct

<sup>120</sup> Caisson

جالب توجه است که در تمام موارد، علیرغم تغییرات گسترده مقاومت بتن، محیط آزمایش (آب، گاز و روغن)، و روش‌های آزمایش (اندازه آزمون، فشار محیط و تجهیزات)، بتن سبکدانه نسبت به بتن با وزن معمولی مشابه، نفوذپذیری برابر یا کمتری داشت. در ادامه Khokrin (۱۹۷۳) بیان کرد که نفوذپذیری کمتر بتن سبکدانه به سازگاری خاصیت ارتجاعی اجزای تشکیل دهنده و پیوند تقویت شده بین سبکدانه درشت و خمیر مربوط است. در آزمایش‌های شرکت سیمان Onoda (Nishi) و همکاران، (۱۹۸۰)، عمق نفوذ مشاهده شده برای بتن با نسبت  $w/cm = 0.55$ ، که به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری مرطوب قرار گرفته بود، پس از آزمایش شدن تحت فشار آب  $0.88 \text{ MPa}$ ، برای بتن با وزن معمولی برابر  $35 \text{ mm}$  و برای بتن سبکدانه برابر  $24 \text{ mm}$  بود. در حالت آزمایش با آب دریا، عمق نفوذ برای بتن با وزن معمولی و بتن سبکدانه به ترتیب برابر  $15 \text{ mm}$  و  $12 \text{ mm}$  بود. Nishi و همکاران بیان کردند که دلیل این رفتار، لایه‌ای از خمیر سیمان سخت شده متراکم می‌باشد که ذرات سبکدانه درشت مصنوعی را احاطه کرده است. مطالعه انجام شده توسط Keeton (۱۹۷۰) تحت حمایت نیروی دریایی ایالات متحده، کمترین میزان نفوذپذیری را در حالت بتن سبکدانه پرمقاومت نشان داد. Bamforth (۱۹۸۷) بتن سبکدانه را به عنوان یکی از چهار بتن آزمایش شده در آزمایش نفوذپذیری در معرض گاز نیتروژن در فشار  $1 \text{ MPa}$  قرار داد. نمونه‌های بتن با وزن معمولی شامل بتن پرمقاومت  $90 \text{ MPa}$  و بتن با  $25$  درصد جرمی یا حجمی جایگزینی خاکستر بادی بودند. بتن سبکدانه ماسه‌دار (با مقاومت  $50 \text{ MPa}$ )،  $6/4$  درصد هوا و چگالی  $1985$  کمترین نفوذپذیری در برابر آب و هوا را در بین تمام مخلوط‌های آزمایش شده نشان داد.

خمیر سیمان پرتلند کاملاً هیدراته شده با نسبت  $w/cm$  کم می‌تواند خمیری را تشکیل دهد که بتن را در برابر جریان مایعات و گازها غیرقابل نفوذ کند. با این حال در واقعیت، ریزترک‌های بتن در فرآیند سخت شدن و سپس به دلیل تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی، تنش‌های حرارتی و تنش‌های اعمالی ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، آب اضافه شده به بتن به منظور جای‌دهی آسان‌تر، تبخیر می‌شود و منافذ و مجراهایی در بتن از خود باقی می‌گذارد. این اثر به ویژه در عرشه پل‌هایی که بتن نمایان آن محافظت کافی برای آرماتورها فراهم نمی‌کند، برجسته‌تر می‌شود.

Mehta (۱۹۸۶) مشاهده کرد که نفوذپذیری ماده مرکب بتنی به طور قابل توجهی بیشتر از نفوذپذیری مجموعه خمیر پیوسته یا بخش درشت‌دانه معلق در خمیر است. این تفاوت در درجه اول مربوط به ریزترک خوردگی گسترده ناشی از عدم سازگاری اجزای بتن است که در برابر تغییرات دمایی، کرنش‌های بار بهره‌برداری و تغییرات حجم مرتبط با واکنش‌های شیمیایی درون بتن، پاسخ متفاوتی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، کانال‌های ایجاد شده در ناحیه انتقالی پیرامون درشت‌دانه با وزن معمولی باعث حرکات رطوبتی بدون مانع می‌شوند. در حالی که جداسدگی‌های ناشی از تبخیر حاصل از آب‌انداختن در مجاورت سنگدانه‌های با وزن معمولی اغلب با چشم غیرمسلح قابل مشاهده‌اند، چنین عیوبی اساساً در بتن سبکدانه ناشناخته هستند. ناحیه انتقالی در بتن سبکدانه، سطح مشترک بین دو محیط متخلخل است: ذره سبکدانه و چسباننده سیمان در حال هیدراته شدن. بخش خمیر پیوسته و با کیفیتی که سبکدانه را احاطه کرده،

نتیجه چندین فرآیند سودمند است. Khokrin (۱۹۷۳) مطالعات متعددی را گزارش کرد که ریزسختی افزایش یافته ناحیه انتقالی در اثر واکنش پوزولانی در سطح سبکدانه را ثبت کرده‌اند. Bremner و همکاران (۱۹۸۴) با استفاده از روش‌های تحلیلی پراش انرژی اشعه ایکس، میزان انتشار سیلیس به بیرون از ذرات سبکدانه درشت در خمیر سیمان را اندازه‌گیری کردند. این نتایج با مشاهدات Khokrin که ناحیه انتقالی بهبودیافته در بتن سبکدانه، تقریباً ۶۰ mm از طرف ذرات سبکدانه به سمت فاز خمیر پیوسته توسعه پیدا کرده بود، مطابقت دارد. Zhang و Gjörøv (۱۹۹۰) ناحیه انتقالی بتن سبکدانه را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که سبکدانه با لایه بیرونی متخلخل، ناحیه انتقالی متراکم‌تر و همگن‌تری ایجاد می‌کند.

یک مطالعه آزمایشگاهی که نتایج مقایسه بتن با وزن معمولی و بتن سبکدانه را گزارش کرده است نشان داد که در حالت بدون تنش، نفوذپذیری‌ها مشابه بودند. با این حال، در تنش‌های زیادتر، می‌توان بتن سبکدانه را قبل از اینکه ریزترک خوردگی باعث افزایش شدید نفوذپذیری شود، تا درصد بیشتری از مقاومت فشاری نهایی‌اش بارگذاری نمود (Sugiyama و همکاران، ۱۹۹۶). در آزمون‌های آزمایشگاهی، زمانی که بتن در دمای ثابت نگهداری می‌شود، محدودیت جمع‌شدگی قابل توجه و تنش‌های ناشی از محیط وجود ندارند. به دلیل مرطوب‌سازی سبکدانه قبل از اختلاط، این آب جذب‌شده اجازه عمل‌آوری مرطوب بیشتری را می‌دهد. آب تمایل دارد از منافذ سبکدانه درشت خارج و به درون منافذ مویرگی ریزتر خمیر سیمان نفوذ کند و در نتیجه عمل‌آوری مرطوب را افزایش دهد. از آنجا که واکنش پوزولانی احتمالی در سطح طی زمانی طولانی رخ می‌دهد، آزمون‌های آزمایشگاهی عادی که در کمتر از چند ماه تکمیل می‌شوند ممکن است این موضوع را به طور مناسب در نظر نگیرند.

## ۶-۵- واکنش قلیایی سبکدانه

ACI 201.1R هیچ مورد مستندی از ضعف بتن در اثر واکنش‌های قلیایی با سبکدانه حین بهره‌برداری گزارش نکرده است. Mielenz (۱۹۹۴) نشان داده است که اگرچه در برخی از سبکدانه‌های طبیعی استعداد واکنش قلیایی سبکدانه وجود دارد، اما ممکن است این تغییر حجم بدون ایجاد مشکل سازه‌ای تحمل شود. سطح سبکدانه‌های ریز شامل شیل‌ها، رس‌ها و سنگ‌لوح منبسط‌شده، پوزولانی هستند و ممکن است در جهت مهار انبساط مخرب نیز عمل کنند (Boyd و همکاران، ۲۰۰۶؛ Holm و Bremner، ۲۰۰۰). در آزمایش‌های انجام‌گرفته روی سازه‌های دریایی ۷۰ ساله و چندین عرشه پل بتنی سبکدانه با بیش از ۳۰ سال قدمت، اثری از واکنش‌های قلیایی سبکدانه مشاهده نکردند (Holm، ۱۹۹۴).

اگرچه مطالعات آزمایشگاهی و آزمایش‌های میدانی انبساط مخرب ناشی از واکنش بین سیمان و سیلیس در سبکدانه‌ها را نشان نداده‌اند، بخش سنگدانه طبیعی مخلوط بتن سبکدانه ماسه‌دار باید مطابق با استانداردهای ASTM مربوطه ارزیابی شود.

بسیاری از مخلوط‌های بتنی سبکدانه که برای چگالی تعادلی در محدوده  $1760 \text{ kg/m}^3$  و بیشتر طراحی

شده‌اند، با استفاده از ماسه طبیعی یا درشت‌دانه‌های طبیعی تولید می‌شوند. در هر صورت، این سنگدانه‌های طبیعی باید به عنوان منبع بالقوه‌ای برای ایجاد واکنش‌های قلیایی سنگدانه در نظر گرفته شوند تا زمانی که با یک روش آزمایشی مناسب ASTM یا با داشتن سابقه بهره‌برداری ثابت شده، نشان داده شود که تاثیر ناچیزی دارند.

### ۶-۶- مقاومت سایشی

مقاومت سایشی بتن به ویژگی‌های مقاومت، سختی و چقرمگی<sup>۱۲۱</sup> خمیر سیمان و سنگدانه‌ها و پیوند میان این دو فاز بستگی دارد. بیشتر سبکدانه‌های مناسب برای بتن سازه‌ای از مواد شیشه‌ای جامد شده تشکیل شده‌اند که در مقیاس سختی Mohs با کوارتز قابل مقایسه هستند. با این حال، مقاومت خالص سبکدانه‌ها در برابر نیروهای سایشی، ممکن است به دلیل شبکه منافذشان کمتر از ذرات جامد اکثر سنگدانه‌های طبیعی باشد. عرشه پل‌های بتنی سبکدانه که در معرض بیش از ۱۰۰ میلیون عبور وسیله نقلیه، از جمله عبور و مرور کامیون‌ها قرار گرفته‌اند، سایشی مشابه بتن با وزن معمولی از خود نشان دادند (Holm و Bremner، ۲۰۰۰). در مورد کاربردهای تجاری خاص که از وسایل نقلیه صنعتی با چرخ‌های فولادی استفاده می‌شود، اعمال محدودیت‌هایی ضروری است، اما چنین سطوحی اغلب تحت تمهیداتی ویژه برای آماده‌سازی سطح قرار می‌گیرند. Hoff (۱۹۹۲) گزارش داد که فرآیندهای آزمایشی که برای اندازه‌گیری سایش بتن در برابر یخ در شرایط محیطی بسیار سرد توسعه یافته‌اند، عملکرد عمدتاً مشابهی را برای بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی نشان می‌دهند.

# فصل ۷

طراحی بتن سبکدانه سازه‌ای



## ۱-۷- گستره

بیش از ۸ دهه، دسترسی و عملکرد اثبات شده سبکدانه‌ها منجر به بهبود عملکرد و طراحی اقتصادی ساختمان‌ها، پل‌ها و سازه‌های دریایی شده است. زمانی که مهندسان استفاده از بتن سبکدانه را آغاز کردند، طراحی‌ها بر ویژگی‌های معمول بتن مبتنی بودند که توسط مهندسان و با استفاده از اندک راهنمایی روش‌های پیشنهادی ویژه بتن سبکدانه اصلاح می‌شدند. پس از تصویب ویرایش سال ۱۹۶۳ آیین‌نامه ACI 318، بتن سبکدانه به عنوان یک مصالح سازه‌ای قابل قبول، کاملاً به رسمیت شناخته شد. در ویرایش مذکور، دستورالعمل‌های کلی برای مهندسان و دست‌اندرکاران صنعت ساخت‌وساز ارائه شد.

این فصل به تفسیر الزامات ACI 318 برای بتن سبکدانه کمک می‌کند. همچنین بسیاری از جنبه‌های طراحی عملی مربوط به بتن سبکدانه را به صورت فشرده ارائه می‌کند و اطلاعات اضافی برای طراحی را در اختیار مهندسان قرار می‌دهد.

در هر پروژه، مهندس باید اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های بتن ساخته شده با سبکدانه موجود برای پروژه موردنظر را بدست آورد. این سبکدانه‌ها باید با توصیه‌های این راهنما مطابقت داشته باشند و تعیین ویژگی‌ها باید به گونه‌ای بدست آید که فقط سبکدانه‌های مناسب برای استفاده موردنظر بکار روند.

## ۲-۷- ملاحظات کلی

به واسطه آزمایش و عملکرد بتن سبکدانه، نشان داده شده است (فصل ۵) که این نوع بتن رفتار سازه‌ای بسیار مشابهی با بتن با وزن معمولی دارد، اما در عین حال، ویژگی‌های خاصی شامل کاهش وزن قابل توجه، خواص عایق‌بودن بهتر، سختی کاهش یافته (و در نتیجه ترک‌خوردگی کمتر) و ریزساختار بهبود یافته را نیز فراهم می‌کند. در خصوص برخی از ویژگی‌های بتن، تفاوت در عملکرد، جزئی است. عموماً تفاوت ویژگی‌هایی همچون برش، طول مهاری و ضریب ارتجاعی که تابع مقاومت کششی هستند، در بتن سبکدانه با ویژگی‌های بتن با وزن معمولی به میزانی است که نیاز به اصلاح در طراحی دارند.

## ۳-۷- ضریب ارتجاعی

در صورتی که مقدار  $E_c$  تاثیر قابل توجهی بر طراحی داشته باشد، مهندس باید تصمیم بگیرد که آیا مقادیر تعیین شده با استفاده از فرمول‌های بدست آمده از داده‌های تجربی (ACI 318) به اندازه کافی دقیق هستند یا اینکه لازم است از طریق آزمایش آن بتن مشخص، مقدار دقیق‌تری برای  $E_c$  تعیین شود.

مقدار  $E_c$  کمتر بتن سبکدانه بدین معنی است که این بتن انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. در مواردی که سختی کاهش یافته بتن می‌تواند مفید واقع شود، باید استفاده از بتن سبکدانه به جای بتن با وزن معمولی در نظر گرفته شود. در مواردی که پاسخ در برابر ضربه یا واکنش دینامیکی بهتری نیاز باشد، مواردی که احتمال نشست غیریکنواخت پی وجود داشته باشد، مواردی که تنش‌های کششی ناشی از تغییر شکل‌های حرارتی و جمع‌شدگی محدود شده (مانند عرشه پل) ایجاد شوند (Shah و همکاران، ۱۹۹۸)، و همچنین در انواع یا

پیکربندی‌های مشخصی از سقف‌های پوسته‌ای، سختی کمتر بتن سبکدانه می‌تواند مطلوب باشد. با این حال در سایر کاربردها، ممکن است بتن سبکدانه در یک مقاومت یکسان و تحت بارهای زنده مشابه، در مقایسه با بتن با وزن معمولی به تغییر شکل‌های بیشتر و همچنین افزایش خیز منفی تیرهای بتنی پیش‌تنیده منجر شود.

#### ۷-۴- مقاومت کششی

برش، پیچش، مهار، مقاومت پیوستگی، طول مهاری و مقاومت در برابر ایجاد ترک، همگی به مقاومت کششی مربوط هستند که خود به مقاومت کششی فازهای سبکدانه درشت و ملات و کیفیت پیوند بین این فازها بستگی دارد. به طور سنتی، مقاومت کششی به عنوان تابعی از مقاومت فشاری تعریف شده است. اگرچه، بدیهی است که این تنها یک رابطه تقریبی اولیه است که مقاومت و ویژگی‌های سطح ذرات سبکدانه یا مقدار رطوبت و توزیع آن در بتن را منعکس نمی‌کند. مقاومت کششی شکافتی که مطابق روش ارائه شده در ASTM C496/C496M تعیین می‌شود، در سراسر آمریکای شمالی به عنوان یک شاخص ساده، عملی و قابل اطمینان‌تر از ویژگی‌های کششی بدست آمده از آزمایش خمش تیر استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت مقاومت کششی، استاندارد ASTM C330/C330 لازم می‌داند که به منظور استفاده در بتن سازه‌ای، سبکدانه باید قادر باشد تا بتنی با مقاومت کششی شکافتی حداقل ۲ MPa ایجاد کند.

آزمایش‌ها نشان داده‌اند که مقاومت کششی قطری تیرها و دال‌های بتنی، ارتباط نزدیکی با داده‌های نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت کششی شکافتی انجام گرفته توسط تامین‌کنندگان سنگدانه دارد. ممکن است در پروژه‌هایی که ایجاد نیروهای کششی ناشی از حمل و جابجایی در سن کم بتن رخ می‌دهد (مانند قطعات پیش‌ساخته یا قطعات ساخت به روش نصب با چرخش روبه‌بالا<sup>(۱۲)</sup>)، لازم باشد که نتایج آزمایش مقاومت کششی قبل از شروع پروژه بدست آورده شوند.

#### ۷-۵- تنش برشی و قطری

قطعات بتنی سبکدانه، از نقطه نظر برش و کشش قطری اساساً رفتاری مشابه با قطعات بتنی با وزن معمولی دارند. اگرچه که ظرفیت کششی بتن سبکدانه کمتر از بتن با وزن معمولی است اما در عین حال مشارکت بتن کمتری نیز دارند. این موضوع در ACI 318 با ضرب عبارت  $\sqrt{f_c}$  در ضریب اصلاح  $\lambda$  در نظر گرفته می‌شود. آیین‌نامه ACI 318 دو روش برای تعیین ضریب اصلاح  $\lambda$  ارائه می‌دهد. ضریب  $\lambda$  را می‌توان با استفاده از مقاومت کششی شکافتی  $f_{ct}$  برای سنگدانه خاص مورد استفاده، یا با استفاده از یک ضریب کاهش ثابت بر اساس نوع بتن سبکدانه تعیین کرد.

در صورتی که از روش اول استفاده شود، مقدار  $\lambda$  برابر نسبت  $\frac{f_{ct}}{6.7 \sqrt{f_c}}$  در نظر گرفته می‌شود. برای هر مقاومت فشاری مشخص و هر ترکیب مشخص بتن، باید مقدار واقعی  $f_{ct}$  برای طراحی تعیین شود. مقادیر  $f_{ct}$  که طراحی سازه مبتنی بر آنها است، باید در تعیین ویژگی‌های بتن پروژه گنجانده شوند. آزمایش‌های

مقاومت کششی شکافتی آزمون‌های استوانه‌ای در صورت لزوم باید روی مخلوط‌های آزمایشگاهی که از مصالح یکسان با پروژه استفاده می‌کنند انجام گیرند. این آزمایش‌ها باید مطابق با روش‌های استاندارد ASTM C496/C496M انجام شوند. مقاومت کششی شکافتی، یک آزمون برای سنجش آزمایشگاهی است و نباید برای پذیرش در کارگاه انجام شود (به ACI 318-11، بخش ۵-۱-۵-۵ مراجعه شود).

در مواردی که مهندس مقادیر  $f_{ct}$  را تعیین نمی‌کند، می‌توان از روش دوم که عموماً محافظه کارانه است برای محاسبه ضریب اصلاح برش استفاده نمود. دو ضریب اصلاح متداول هستند: ۷۵ درصد مقادیر بتن با وزن معمولی برای بتن حاوی سبکدانه ریز و درشت؛ و ۸۵ درصد مقادیر بتن با وزن معمولی برای ترکیب ریزدانه‌های طبیعی ماسه‌ای و سبکدانه‌های درشت.

بیشتر تحقیقات مربوط به مقاومت کششی، مقاومت برشی، و طول مهاری بتن سبکدانه سازه‌ای که پایه و اساس الزامات فعلی ACI 318 را تشکیل داده‌اند، به بتن با مقاومت فشاری کمتر از ۴۰ MPa محدود می‌شوند. در صورتی که که مقاومت بتن بیشتر از ۴۰ MPa تعیین شده باشد، تعیین پارامترهای کششی، برشی و طول مهاری مناسب باید بر اساس یک برنامه آزمایشی جامع که روی مصالح انتخاب شده برای پروژه انجام می‌شوند، صورت پذیرد. در خصوص برخی سبکدانه‌ها، رسیدن به سقف مقاومت کششی ممکن است زودتر از رسیدن به سقف مقاومت فشاری اتفاق بیافتد.

مطالعه‌ای جامع در مورد مقاومت برشی تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده مسلح با مقاومت زیادتر (۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال) توسط Ramirez و همکاران (۱۹۹۹) انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در زمان آزمایش تیرها و مشاهدات رفتار سازه‌ای، ارزیابی روش‌های طراحی برشی و ویرایش سال ۱۹۹۵ آیین‌نامه ACI 318 و آیین‌نامه AASHTO (۱۹۹۴، ۱۹۹۵) را برای تیرهای آزمایش شده امکان‌پذیر کرد.

Ramirez و همکاران (۱۹۹۹) موارد زیر را برای نمونه‌های بتنی مسلح بیان کردند:

الف) علیرغم این واقعیت که تیرهای بتنی سبکدانه دارای ظرفیت برشی بیشتری از مقادیر محاسباتی مبتنی بر روش‌های آیین‌نامه یا ضوابط در نظر گرفته شده در گزارش آن‌ها بودند، با این حال ظرفیت برشی آن‌ها به طور متوسط ۸۲ درصد ظرفیت برشی اندازه‌گیری شده تیرهای بتنی مشابه با وزن معمولی بود. بنابراین ضریب کاهش ۰/۸۵ مورد استفاده در دستورالعمل‌های فعلی، کاهش مقاومت برشی تیرهای بتنی سبکدانه ماسه‌ای را به طور مناسب در نظر نمی‌گیرد. روند مشاهده شده مخصوصاً در تیرهایی با آرماتور برشی کم تا حداقل، که سهم بتن بخش بزرگتری از مقاومت برشی کل را تشکیل می‌دهد، حائز اهمیت است.

ب) در حالی که ظرفیت برشی اندازه‌گیری شده تمام تیرهای بتن مسلح (غیرپیش‌تنیده) از مقادیر محاسباتی بر اساس روش‌های ACI 318-95 و AASHTO (۱۹۹۵) (روش ساده) و AASHTO (۱۹۹۴) (روش کلی) بیشتر بود، درصد محافظه کاری در تیرهای بتنی با وزن معمولی بیشتر از تیرهای بتنی سبکدانه بود.

پ) درصد محافظه کاری ظرفیت‌های برشی محاسباتی در تیرهای بتنی سبکدانه آزمایش شده کاهش می‌یابد.

ت) برای تیرهای آزمایش شده، مقاومت برشی تخمینی از روش‌های ACI 318-95 و AASHTO (۱۹۹۵)

(ساده) ۶ درصد محافظه کارانه‌تر از روش AASHTO (۱۹۹۴) (روش عمومی) بود.



ث) Ramirez و همکاران (۱۹۹۹) دریافتند که ظرفیت‌های برشی اندازه‌گیری شده تیرهای بتنی پیش‌تنیده با بتن سبکدانه با مقاومت معمولی (۴۰ MPa) و بتن سبکدانه پرمقاومت (۷۰ MPa) تقریباً برابر بودند. بنابراین، آرماتور عرضی حداقل موردنیاز بر اساس AASHTO LRFD (۱۹۹۴)، همان مقدار محافظه‌کاری را برای تیرهای بتنی سبکدانه پرمقاومت فراهم نکرد.

ج) برای تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده پرمقاومت آزمایش‌شده، روش کلی AASHTO LRFD (۱۹۹۴) و روش‌های ساده‌شده ACI 318-95 و AASHTO (۱۹۹۵) برآوردهای محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت برشی ارائه می‌دهند.

چ) برای تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده پرمقاومت آزمایش‌شده، درصد محافظه‌کاری روش کلی AASHTO LRFD (۱۹۹۴) تقریباً با روش‌های ساده‌شده ACI 318-95 و AASHTO (۱۹۹۵) برابر بود.

Ramirez و همکاران (۱۹۹۹) بر اساس نتایج این برنامه آزمایشی جامع، انجام تحقیقات بیشتری را در زمینه تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده پرمقاومت، به ویژه در مورد سطح مقطع آرماتور عرضی حداقل موردنیاز توصیه کردند. از آنجایی که کاهش وزن در قطعات بتنی سبکدانه به کاهش قابل توجه کل بار وارده به آن‌ها منجر می‌شود، سهم بتن در ظرفیت برشی که ممکن است نسبت به بتن با وزن معمولی تا ۷۵ درصد کاهش یابد، لزوماً به کاهش بازدهی سازه‌ای نسبی منجر نمی‌شود. جبران هرگونه کاهش ظرفیت برشی بتن معمولاً از طریق طراحی مناسب آرماتور برشی به سهولت امکان‌پذیر است.

## ۶-۷- طول مهاری

### ۶-۷-۱- تسلیح غیرفعال

بتن سبکدانه به دلیل مقاومت کششی و مقاومت سنگدانه کمتر، در مقایسه با بتن با وزن معمولی دارای ظرفیت شکست پیوند کمتر و نیز ظرفیت کرنش فرا ارتجاعی<sup>۱۲۳</sup> کمتری است. آیین‌نامه ACI 318 برای آرماتورهای عاج‌دار در بتن سبکدانه، طول مدفون بلندتری را نسبت به بتن با وزن معمولی لازم می‌داند. به جز حالتی که مقاومت‌های کششی شکافتی مشخص شده‌اند، آیین‌نامه ACI 318 ملزم می‌کند که طول مهاری آرماتورها در بتن سبکدانه به ضریب ۰/۷۵ تقسیم شوند که منجر به افزایش ۳۳ درصدی طول مهاری موردنیاز در بتن سبکدانه نسبت به بتن با وزن معمولی می‌شود.

### ۶-۷-۲- تسلیح فعال

Kahn و Meyer (۲۰۰۴) بیان کردند که:

الف) ارزیابی مقررات آیین‌نامه‌ای بر اساس نتایج ۱۲ آزمایش روی شاه‌تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تنیده پرمقاومت، نشان داد که الزامات AASHTO LRFD (۱۹۹۴) و ACI 318-95 برای طول انتقال و طول مهاری محافظه‌کارانه هستند.

<sup>123</sup> Post-elastic strain capacity

ب) نتایج آزمایش نشان دادند که در صورتی که تراکم خاموت‌ها در ناحیه طول انتقال نسبت به تراکم مشخص شده در AASHTO LRFD (۱۹۹۴) دو برابر شود، ترک خوردگی برشی در ناحیه طول انتقال در امتداد قسمت زیرین تاندون‌ها<sup>۱۲۴</sup> موجب لغزش تاندون نمی‌شود.

Thatcher و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند در حالی که آیین‌نامه‌های AASHTO LRFD و ACI 318-95 (۱۹۹۴) تخمین محافظه کارانه‌ای از طول انتقال بتن با وزن معمولی ارائه می‌دهند، نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که طول انتقال بتن سبکدانه دست‌پایین برآورد شده است. به نظر Thatcher و همکاران (۲۰۰۲)، ضریب ارتجاعی در تعیین طول انتقال در بتن با وزن معمولی و بتن سبکدانه یک عامل بدون تغییر (ثابت) است و اکثر مدل‌ها رفتار بتن سبکدانه را به طور دقیق پیش‌بینی نمی‌کنند. آزمایش‌ها (Thatcher و همکاران، ۲۰۰۲) همچنین نشان می‌دهند که آیین‌نامه‌های ACI 318-95 و AASHTO LRFD (۱۹۹۴) تخمین محافظه کارانه‌ای از طول مهارى در بتن‌های با وزن معمولی و بتن سبکدانه ارائه می‌دهند.

با این حال، نتایج مطالعه Nassar (۲۰۰۲) متفاوت است. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده روی تیرهای بتنی سبکدانه پیش‌تینده توانمند با دهانه بلند:

الف) تا زمانی که اطلاعات بیشتری از طول انتقال تیرهای بتنی سبکدانه پرمقاومت بدست آید، مقدار توصیه شده در دستورالعمل‌ها باید به منظور حفظ عملکرد محافظه کارانه‌تر به مقدار ارائه شده در AASHTO LRFD (1994) یعنی  $d_b \leq 60$  یا  $f_{si} d_b \leq 3$ ، و یا هر دو افزایش داده شود.

ب) نتایج طول مهارى غیرقطعی هستند و ممکن است الزامات ACI 318-95 و AASHTO LRFD (۱۹۹۴) برای بتن سبکدانه پرمقاومت تاحدی قابل قبول باشند. توصیه می‌شود تا زمانی که آزمایش‌های اضافی انجام نگرفته‌اند، معادله طول مهارى با ضریب  $\frac{1}{0.85}$  اصلاح شود که منجر به افزایش ۱۸ درصدی طول مهارى ملزم در آیین‌نامه می‌شود.

در حالت فاصله کمتر و قطر بزرگتر تاندون‌های پیش‌تیندگی که می‌تواند به نیروهای جداکننده<sup>۱۲۵</sup> بیشتری منجر شود، ممکن است افزایش مذکور دیگر محافظه کارانه نباشد. برای سازه‌های ویژه، تاندون‌های قطورتر، عرشه‌های با دهانه کوتاه یا ترکیب قطعات نازک با تسلیح زیاد با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت، کاربرد یک روش طراحی محافظه کارانه یا انجام آزمایش پیش از شروع پروژه توصیه می‌شود. انجام مطالعات بیشتر در مورد در خصوص الزامات طول مهارى و نیاز به آرماتورهای محصورکننده بیشتر برای تاندون‌های پیش‌تیندگی در بتن سبکدانه پرمقاومت و بتن با چگالی مشخصه به وضوح ضرورت دارد.

<sup>124</sup> Strands

<sup>125</sup> Splitting forces

۷-۷- خیز<sup>۱۳۱</sup>

## ۷-۷-۱- خیز اولیه

آیین‌نامه ACI 318 به طور خاص شامل اصلاحاتی برای روابط و الزامات ضخامت حداقل مورد نیاز است که ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و مدول گسیختگی کمتر بتن سبکدانه را در نظر می‌گیرند. آیین‌نامه ACI 318 همچنین ضخامت حداقل تیرها را به جز حالتی که خیزها محاسبه شده‌اند، برای دال‌های یک طرفه ارائه می‌کند و لازم می‌داند که ضخامت قطعات بتنی سبکدانه نسبت به قطعات بتنی با وزن معمولی حداقل ۹ درصد افزایش یابد. بنابراین، انتظار می‌رود با استفاده از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه تحت سربار یکسان، قطعات بتنی سبکدانه سازه‌ای با ضخامت افزایش یافته در مقایسه با قطعات بتنی با وزن معمولی خیز بیشتری نداشته باشند.

## ۷-۷-۲- خیز بلندمدت

مطالعات تحلیلی خیز بلندمدت را می‌توان برای در نظر گرفتن آثار خزش و جمع‌شدگی انجام داد. سپس می‌توان خیز نهایی را با خیز اولیه که فقط به دلیل کرنش‌های ارتجاعی ایجاد می‌شود مقایسه کرد. مقادیر مقایسه‌ای جمع‌شدگی نسبی بتن با تغییر مواد تشکیل دهنده آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. در حالت بتن سبکدانه با مقاومت متوسط، ممکن است جمع‌شدگی و خزش تا حدودی بیشتر از بتن با وزن معمولی با مقاومت یکسان باشد. با افزایش مقاومت بتن، تفاوت در خزش و جمع‌شدگی بین بتن با وزن معمولی و بتن سبکدانه کاهش می‌یابد. طی مجموعه‌ای از آزمایش‌های انجام گرفته روی بتن سبکدانه پر مقاومت، نشان داده شد که آب ذخیره‌شده درونی سبکدانه مقدار و سرعت خزش و جمع‌شدگی را کاهش می‌دهد. تحلیل خیز ناشی از کرنش ارتجاعی، خزش، و جمع‌شدگی به همان ضریب ارائه‌شده در ACI 318 منجر می‌گردد و برای بدست آوردن خیز بلندمدت در هر دو نوع بتن باید از این ضریب استفاده شود. روش‌های دقیق‌تر برای تخمین خیز معمولاً ضرورتی ندارند.

## ۷-۸- ستون‌ها

طراحی ستون‌ها با بتن سبکدانه اساساً مانند بتن با وزن معمولی است. در بخش‌هایی از آیین‌نامه که اثرات لاغری در نظر گرفته شده است، باید از سختی کاهش یافته استفاده شود.

آزمایش‌های گسترده (Pflifer, ۱۹۶۸؛ Fluck و Washa, ۱۹۵۲) برای مقایسه رفتار وابسته به زمان ستون‌های بتنی سبکدانه و بتن‌های با وزن معمولی نتایج زیر را ارائه کردند:

الف) کاهش طول آبی ستون در اثر بارگذاری اولیه را می‌توان با استفاده از نظریه ارتجاعی به طور دقیق پیش‌بینی کرد. این کاهش طول در ستون بتنی سبکدانه به دلیل ضریب ارتجاعی کمتر این نوع بتن، بیشتر از ستون بتنی با وزن معمولی مشابه خواهد بود.

ب) در حالت مقایسه نمونه‌های کوچک غیر مسلح، ممکن است کاهش طول وابسته به زمان ستون بتنی سبکدانه و ستون بتنی با وزن معمولی متفاوت باشد. اما زمانی که ستون‌های بتن مسلح بزرگ آزمایش می‌شوند، این تفاوت‌ها به حداقل می‌رسند، زیرا افزایش اندازه و افزایش آرماتور طولی، کاهش طول وابسته به زمان را کاهش می‌دهد. کاهش طول اندازه‌گیری شده وابسته به زمان با مقادیر پیش‌بینی شده توسط نظریه مقایسه و همبستگی مطلوبی مشاهده شد.

پ) مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط نظریه مقایسه و همبستگی خوبی مشاهده شد. نوع بتن و بارگذاری قبلی هیچ تاثیری بر این همبستگی نداشتند.

## ۹-۷- بتن سبکدانه پیش‌تنیده

### ۱-۹-۷- کاربردها

بیش از ۴۰ سال است که بتن سبکدانه پیش‌تنیده تقریباً در همه کاربری‌هایی که بتن با وزن معمولی پیش‌تنیده برای آن استفاده شده است به طور گسترده در آمریکای شمالی بکار می‌رود. سودمندترین کاربردها مواردی هستند که در آن‌ها از ویژگی‌های منحصر به فرد بتن سبکدانه پیش‌تنیده به طور کامل استفاده می‌شود. بتن سبکدانه پیش‌تنیده به طور گسترده در سقف‌ها، دیوارها و کف ساختمان‌ها بکار می‌رود و در انواع ساخت و ساز با صفحات تخت و تیر نیز کاربرد پیدا کرده است. کاهش بار مرده، کاهش بارهای سازه‌ای، بارهای لرزه‌ای و بارهای وارد بر پی، عایق حرارتی بهتر، مقاومت بسیار بهتر در برابر آتش و هزینه حمل و نقل کمتر معمولاً از عوامل تعیین‌کننده در انتخاب بتن سبکدانه پیش‌تنیده برای این کاربری‌ها بوده است.

### ۲-۹-۷- ویژگی‌ها

زمانی که از بتن سبکدانه پیش‌تنیده استفاده می‌شود، باید دو ویژگی مهم داشته باشد:

۱- سنگدانه‌ها باید با کیفیت باشند.

۲- مخلوط بتن باید مقاومت زیادی داشته باشد.

در ادامه، خلاصه‌ای از ویژگی‌های بتن سبکدانه پیش‌تنیده ارائه شده است.

### ۱-۲-۹-۷- چگالی تعادلی

محدوده چگالی تعادلی معمولاً بین ۱۶۰۰ تا  $1900 \text{ kg/m}^3$  است. در چندین پل، چگالی تعادلی مشخصه‌ای در حدود  $2100 \text{ kg/m}^3$  ثبت شده است (Holm و Ries، ۲۰۰۰).

### ۲-۲-۹-۷- مقاومت فشاری

بتن‌های با مقاومت زیادتر، معمولاً با پیش‌تنیدگی استفاده می‌شوند. به طور کلی، محدوده تجاری مقاومت بین ۳۵ تا  $40 \text{ MPa}$  است، اگرچه از مقاومت فشاری طراحی تا  $70 \text{ MPa}$  نیز استفاده شده است.

### ۳-۲-۹-۷- ضریب ارتجاعی

با استفاده از رابطه ارائه شده در بخش ۵-۵ می‌توان تخمینی از ضریب ارتجاعی بتن سبکدانه پیش‌تنیده پرمقاومت بدست آورد. به طور کلی، رابطه ACI 318 برای  $E_c$  (به بخش ۸-۵-۱ آیین‌نامه ACI 318-08 رجوع شود) در حالت بتن با وزن معمولی پرمقاومت مقادیر دست‌بالایی ارائه می‌دهد و این اختلاف برای بتن سبکدانه پرمقاومت حتی بیشتر نیز می‌شود. هنگامی که مقدار دقیق  $E_c$  مورد نیاز است، پیشنهاد می‌گردد که از آزمون آزمایشگاهی مخلوط بتن مورد نظر برای پروژه استفاده شود.

### ۴-۲-۹-۷- افت کل پیش‌تندگی<sup>۱۲۷</sup>

موسسه بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده (۲۰۰۹)، راهنمایی برای پیش‌بینی افت پیش‌تندگی در اثر کاهش طول ارتجاعی، خزش، جمع‌شدگی و سایر عوامل ارائه می‌دهد. نشان داده شده است که کرنش‌های خزشی تخمینی برای بتن سبکدانه بیشتر از بتن با وزن معمولی است. در خصوص جمع‌شدگی تخمینی پس از عمل‌آوری مرطوب و تسریع‌شده، هیچ تمایزی بین بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی وجود ندارد. موسسه بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده (۲۰۰۹) بیان می‌کند که مجموع افت پیش‌تندگی در قطعات بتنی رایج با وزن معمولی تقریباً در محدوده ۱۷۰ تا ۳۴۰ MPa و برای قطعات بتنی حاوی سبکدانه درشت و ماسه طبیعی تقریباً در محدوده ۲۱۰ تا ۳۸۰ MPa متغیر است.

آزمایش‌های انجام‌شده توسط Kahn و Lopez (۲۰۰۵) نشان دادند که مجموع افت پیش‌تندگی تیرهای بتنی سبکدانه طراحی شده بر اساس AASHTO LRFD (۱۹۹۴) با مقاومت فشاری ۵۵ MPa و ۶۹ کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های PCI (۲۰۰۹) و AASHTO LRFD (۱۹۹۴) و ACI 318-95 بود. به عبارت دیگر آیین‌نامه‌ها (PCI ۲۰۰۹؛ AASHTO LRFD ۱۹۹۴؛ ACI 318-95) در برآورد مجموع افت پیش‌تندگی محافظه‌کارانه عمل کردند.

### ۵-۲-۹-۷- عایق حرارتی

عایق حرارتی بتن سبکدانه به دلیل موارد زیر، تاثیر قابل توجهی بر کاربردهای پیش‌تندگی دارد: الف) اختلاف دمای بیشتر در زمان بهره‌برداری بین وجه در معرض نور آفتاب و وجه داخلی ممکن است باعث ایجاد خیز منفی بیشتر شود. عضو بالایی یک انباشته از محصولات بتنی پیش‌ساخته باید در مرحله خشک‌شدن اولیه پوشانده شود.

ب) پاسخ بهتر به عمل‌آوری با بخار.

پ) مناسب‌تر برای بتن‌ریزی در فصل زمستان.

ت) مقاومت بهتر در برابر آتش.

### ۶-۹-۲-۷- مقاومت دینامیکی، مقاومت در برابر ضربه و ارتعاش و مقاومت لرزه‌ای

در خصوص این موارد، بتن سبکدانه پیش‌تنیده دست‌کم به خوبی بتن با وزن معمولی به نظر می‌رسد و ممکن است به دلیل ضریب ارتجاعی کمتر حتی بهتر از بتن با وزن معمولی نیز عمل کند.

### ۷-۹-۲-۷- الزامات پوشش بتن

در مواردی که الزامات آتش‌سوزی استفاده از پوشش را ضروری می‌کنند، اثرات عایق ایجادشده در نتیجه چگالی کمتر و همچنین پایداری در برابر آتش سبکدانه‌هایی که از قبل تا دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شده‌اند، ممکن است مفید واقع شوند.

### ۱۰-۷- ملاحظات طراحی گرمایی

در قطعات بتنی که در معرض شرایط محیطی قرار دارند، انتخاب بتن سبکدانه مزیت‌های آشکاری نسبت به بتن با وزن معمولی ایجاد می‌کند (Kahn و Fintel، ۱۹۶۵، ۱۹۶۶، ۱۹۶۸). ویژگی‌های فیزیکی که در فصل ۵ به تفصیل مورد بررسی قرار گرفتند به شرح زیر هستند:

الف) ضریب انتشار حرارتی کمتر، موجب ایجاد اینرسی حرارتی می‌شود که زمان رسیدن قطعات بتنی نمایان به هرگونه دمای حالت پایدار<sup>۱۲۸</sup> را بیشتر می‌کند.

ب) به دلیل این مقاومت، تغییر دمای درونی موثر تحت حالت دمایی گذرا کمتر خواهد بود. این تاخیر زمانی، اثرات انباشتگی انرژی گرمایی خورشید و خنک‌شدن شبانه را تعدیل خواهد کرد.

پ) ضریب انبساط حرارتی خطی کمتر بتن سبکدانه که به دلیل ضریب انبساط حرارتی کمتر سبکدانه‌ها ایجاد می‌شود، خود یک ملاحظه طراحی اساسی در اعضای نمایان است.

ت) ضریب ارتجاعی کمتر، تغییرات کمتری در تنش قطعات بتنی در معرض کرنش‌های حرارتی ایجاد می‌کند.

یک مطالعه مقایسه‌ای با بررسی کاهش طول ایجاد شده توسط میانگین دمای یک ستون نمایان مهارشده بوسیله قاب داخلی<sup>۱۲۹</sup>، این حقیقت را آشکار کرد که کاهش طول محوری بتن سبکدانه تقریباً ۳۰ درصد کمتر است و تنش‌های ناشی از اعوجاج<sup>۱۳۰</sup> مهارشده برای بتن سبکدانه حدوداً ۳۵ درصد کمتر از بتن با وزن معمولی است (Kahn و Fintel، ۱۹۶۵، ۱۹۶۶، ۱۹۶۸).

برای تحلیل سازه‌ای دقیق، باید از داده‌های مربوط به سبکدانه‌های محلی که از مطالعات قبلی بدست آمده‌اند استفاده شود.

<sup>128</sup> Steady-state temperature

<sup>129</sup> Interior frame

<sup>130</sup> Bowing

## ۱۱-۲- طراحی لرزه‌ای

بتن سبکدانه به دلیل کاهش قابل توجه نیروهای اینرسی، به طور ویژه با طراحی و ساخت و ساز لرزه‌ای سازگار است. تعداد زیادی از ساختمان‌های چند طبقه و پل‌ها به طور موثری از بتن سبکدانه در مناطق در معرض خطر زلزله استفاده کرده‌اند.

نیروهای جانبی یا افقی وارد بر سازه حین حرکات زلزله نسبت مستقیمی با اینرسی یا جرم آن سازه دارند. این نیروهای جانبی را می‌توان با استفاده از روابط شناخته‌شده محاسبه و به همراه سایر بارها به سازه اعمال نمود.

### ۱-۱۱-۲- شکل‌پذیری

شکل‌پذیری قاب‌های سازه‌ای بتنی باید به‌عنوان یک سیستم ترکیبی<sup>۱۳۱</sup> یا به عبارت دیگر به عنوان بتن مسلح تحلیل شود. مطالعات Ahmad و Batts (۱۹۹۱) و Ahmad و Barker (۱۹۹۱) نشان می‌دهند که در مصالح آزمایش شده، بلوک تنش مستطیلی آیین‌نامه ACI 318 برای پیش‌بینی مقاومت تیرهای بتنی سبکدانه پرمقاومت مناسب و مقدار پیشنهادی  $0/003$  به عنوان حداکثر کرنش قابل استفاده بتن، حد پایین قابل قبولی برای قطعات بتنی سبکدانه مسلح با مقاومت بیشتر از ۴۲ MPa است. Moreno (۱۹۸۶) دریافت که با وجود اینکه شیب بخش نزولی منحنی تنش کرنش بتن سبکدانه زیاد است، با استفاده از قطعات بتن سبکدانه مسلحی که مقدار کافی آرماتور محصورکننده به مقدار اندکی بیشتر از بتن با وزن معمولی در آن‌ها تعبیه شده باشد، می‌توان در منحنی تنش کرنش، بخش نزولی صافی بدست آورد. استفاده از فولاد محصورکننده بیشتر برای جبران رفتار کرنش فرا ارتجاعی کمتر بتن سبکدانه توصیه می‌شود. این مطالعه همچنین شامل نتایجی است که نشان می‌دهند دستیابی به شکل‌پذیری مطلوب از طریق افزایش میزان فولاد محصورکننده از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.

Rabbat و همکاران (۱۹۸۶) هنگام تحلیل رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتنی سبکدانه و با وزن معمولی به نتایج مشابهی دست یافتند. گزارش آن‌ها بر این موضوع تمرکز داشت که مجموعه‌های تیرستون بتنی مسلحی که به طور مناسب طراحی و آرماتورگذاری شده‌اند، تحت تغییر شکل‌های غیرارتجاعی ناشی از تغییر جهت‌های لنگر خمشی<sup>۱۳۲</sup> می‌توانند شکل‌پذیری خوبی ایجاد و مقاومت خود را حفظ کنند. این بررسی‌ها به این نتیجه ختم گردید که ستون‌های بتنی سبکدانه‌ای که به شکل مناسب طراحی و آرماتورگذاری شده‌اند، تحت تغییر جهت‌های لنگر خمشی به خوبی ستون‌های بتنی با وزن معمولی عمل می‌کنند. آیین‌نامه ACI 318 برای قطعات بتنی، محدودیت مقاومتی معادل ۳۵ MPa وضع کرده است مگر حالتی که نتایج آزمایش، استفاده از مقاومت‌های بیشتر را بلا مانع نشان دهند.

<sup>131</sup> Composite

<sup>132</sup> Moment reversal

## ۱۲-۷- خستگی<sup>۱۳۳</sup>

اولین مقایسه میان رفتار خستگی بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی در آمریکای شمالی توسط Gray و همکاران (۱۹۶۱) ثبت شده است. این محققین به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های خستگی بتن سبکدانه، تفاوت قابل توجهی با ویژگی‌های خستگی بتن با وزن معمولی ندارند.

این مطالعه با پژوهش Ramakrishnan و همکاران (۱۹۹۲) که دریافتند حد تحمل خستگی بتن سبکدانه و بتن با وزن معمولی در حالت مرطوب یکسان است، ادامه پیدا کرد.

به دلیل اهمیت تنش‌های نوسانی<sup>۱۳۴</sup> که توسط امواج در سازه‌های دریایی ایجاد می‌شوند و همچنین به دلیل ضرورت استفاده از بتن سبکدانه در این سازه‌ها به جهت ملاحظات شناوری، مطالعات متعددی برای تعیین مقاومت بتن سبکدانه پرمقاومت در برابر خستگی و مقایسه آن با ویژگی‌های بتن با وزن معمولی انجام گرفته است. Hoff (۱۹۹۴) بسیاری از داده‌های مرتبط با آمریکای شمالی و اروپا را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که با وجود نبود درک کاملی از سازوکارهای خرابی، بتن سبکدانه پرمقاومت تحت بارگذاری خستگی به خوبی بتن با وزن معمولی پرمقاومت عمل و در بسیاری موارد، عمر خستگی طولانی‌تری نیز فراهم می‌کند. با این حال، به جای گمانه‌زنی از نتیجه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از تحقیقات آزمایشگاهی، این عملکرد بهره‌برداری بلندمدت سازه‌های واقعی است که موجب حصول اطمینان کامل از رفتار مصالح می‌شود.

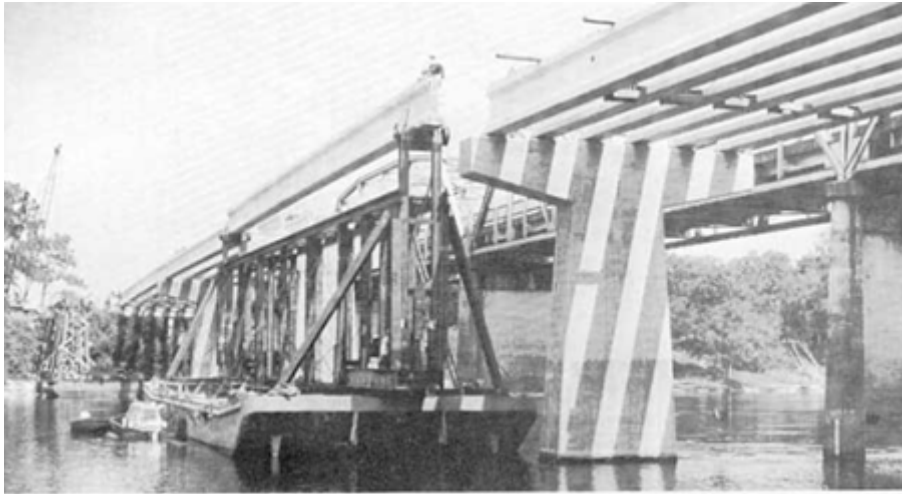
عملکرد میدانی بلندمدت قطعات پل بتنی سبکدانه که در سال ۱۹۶۴ در ایالت فلوریدای آمریکا احداث شده است (شکل‌های ۱۲-۷-الف و ۱۲-۷-ب)، طی مطالعه‌ای مفصل در سال ۱۹۹۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. کرنش‌ها و خیزهایی که در سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۹۲ تحت بار بهره‌برداری اندازه‌گیری شده بودند، با پاسخ‌های نظری پیش‌بینی‌شده توسط یک مدل اجزای محدود که بخشی از سیستم رتبه‌بندی پل‌های اداره حمل‌ونقل فلوریدا<sup>۱۳۵</sup> (FDOT) است، مقایسه شدند (Brown و Davis، ۱۹۹۳). بارگذاری‌ها و اندازه‌گیری‌های اولیه پل در سال ۱۹۶۸، در سال ۱۹۹۲ نیز تکرار و مطابق شکل ۱۲-۷-پ با خیزهای محاسباتی مقایسه شدند (Brown و همکاران، ۱۹۹۵). خیز حداکثر یک تیر مشخص، در اثر بارگذاری در وسط دهانه که در فاصله  $m/4/18$  از انتهای مهارنشده دهانه اندازه‌گیری شد، برابر  $mm/1/7$  بود. این مقدار با خیز اندازه‌گیری‌شده اولیه که در فاصله  $m/4/15$ ، برابر  $mm/6/6$  ثبت شده بود، به خوبی قابل مقایسه است. خیزهای ناشی از بار متحرک که در سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۹۲ اندازه‌گیری شده بودند نیز با یکدیگر مطابقت داشتند، اما مقدارشان کمتر از خیزهای ناشی از بارهای استاتیکی بود.

<sup>133</sup> Fatigue

<sup>134</sup> Oscillating stresses

<sup>135</sup> Florida Department of Transportation

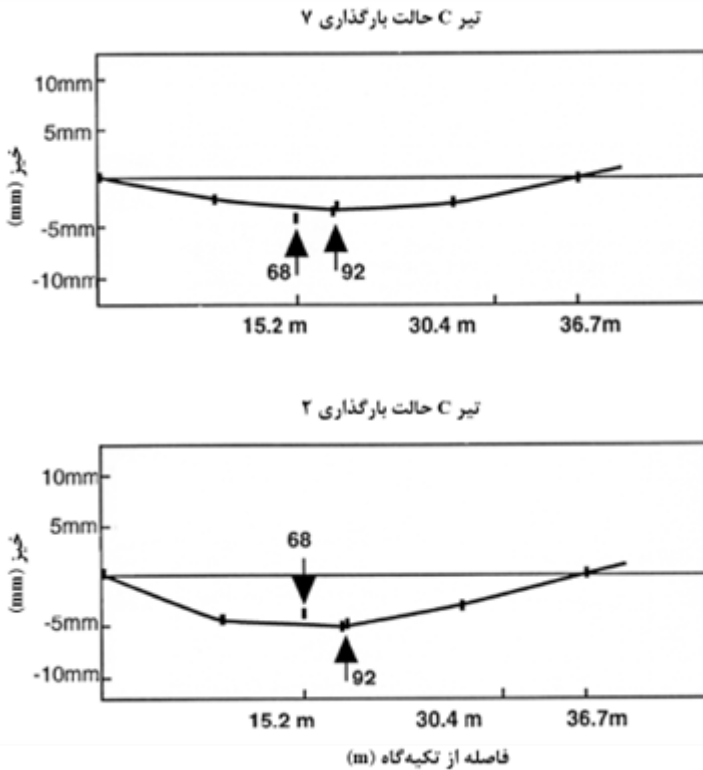




شکل ۷-۱۲-الف- تیرهای قرارداده شده روی قاب سوارشده روی دویه<sup>۱۳۶</sup>. پل خریایی قدیمی در سمت راست مشاهده می‌شود. هردو، بار ترافیک عبوری از بزرگراه میان‌ایالتی U.S. 19 را تحمل می‌کنند (Brown و همکاران، ۱۹۹۵).



شکل ۷-۱۲-ب- بتن با وزن کمتر از  $1920 \text{ kg/m}^3$ ، استفاده از دهانه‌های  $37 \text{ m}$  در پل فلوریدا را امکان‌پذیر کرد (Brown و همکاران، ۱۹۹۵).



شکل ۷-۱۲-پ- اداره حمل و نقل فلوریدا، خیزهای پیش‌بینی شده را با مقادیر اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۹۲ مقایسه کرد (Brown و همکاران، ۱۹۹۵).

اندازه‌گیری کرنش‌ها در امتداد نیمرخ عرضی پل نیز تکرار شد و برای اکثر نقاط در نواحی دارای کرنش قابل توجه به دقت مقایسه شد. مقایسه داده‌های سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۹۲ نشان می‌دهد که رفتار پل اساساً مشابه بود و نیمرخ‌های عرضی تا حد زیادی مطابقت داشتند.

به نظر می‌رسد که آزمایش دینامیکی ویژگی‌های خمشی پل بتنی سبکدانه دهانه بلند با قدمت ۳۱ سال، نتایج مطالعات خستگی نمونه‌های کوچک مقیاسی که تحت شرایط کنترل شده در چندین آزمایشگاه آزمایش شده بودند را تایید می‌کند (Hoff، ۱۹۹۴؛ Gjerde، ۱۹۸۲؛ Gray و همکاران، ۱۹۶۱). در این بررسی‌ها، به طور کلی مشاهده شد که بتن سبکدانه به همان خوبی و در اکثر موارد تا حدودی بهتر از نمونه‌های کنترلی بتن با وزن معمولی عمل می‌کند. چندین محقق بیان کرده‌اند که این عملکرد بهبودیافته به دلیل سازگاری خاصیت ارتجاعی ذرات سبکدانه با خمیر سیمانی پیرامون آن است. در بتن سبکدانه، ضریب ارتجاعی فازهای تشکیل دهنده (فاز سبکدانه درشت و فاز ملات احاطه‌کننده آن) نسبتاً مشابه است، در حالی که در بتن با وزن معمولی، ضریب ارتجاعی اکثر سنگدانه‌های با وزن معمولی می‌تواند ۳ تا ۵ برابر خمیر اطراف آن باشد (Holm و Bremner، ۱۹۸۶). نزدیکی خاصیت ارتجاعی دو فاز یک مجموعه مرکب در بتن سبکدانه،

به کاهش قابل توجه تمرکز تنش و یکنواخت شدن میانگین تنش در سطح مقطع عضو بارگذاری شده منجر می‌شود. اختلاف چشم‌گیر خاصیت ارتجاعی در بتن با وزن معمولی، به طور اجتناب‌ناپذیر باعث ایجاد تمرکز تنش‌هایی می‌شود که می‌تواند به ریزترک خوردگی گسترده در ماده ترکیبی بتن منتج شود. این موضوع در ادامه مطالعات، از طریق اندازه‌گیری کرنش‌ها در ناحیه انتقالی نشان داده شده است (Lopez و همکاران، ۲۰۰۷؛ Lopez، ۲۰۰۵).

علاوه بر این، به دلیل واکنش‌پذیری پوزولانی سطح حفره‌دار سبکدانه‌هایی که تادماهای بیش از  $1100^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شده‌اند (Khokrin، ۱۹۷۳)، کیفیت و یکپارچگی ناحیه انتقالی بتن سبکدانه به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. از آنجا که شروع ریزترک خوردگی، غالباً در سطح مشترک پیوند ضعیف بین سنگدانه متراکم و خمیر احاطه‌کننده آن رخ می‌دهد، بنابراین بتن سبکدانه میزان ریزترک خوردگی کمتری ایجاد می‌کند (Holm و همکاران، ۱۹۸۴).

# فصل ۸

عملکرد و کاربردهای بتن  
سبکدانه

### ۱-۸- گستره و سیر تحول

در حالی که کاملاً مشخص است که دو واژه «پرمقاومت» و «توانمند» مترادف یکدیگر نیستند، می توان اولین استفاده مدرن از بتن توانمند را زمانی در نظر گرفت که شرکت ناوگان اضطراری ایالات متحده طی سالهای ۱۹۱۷ تا ۱۹۲۰، کشتی های بتنی سبکدانه ای با مقاومت فشاری مشخصه ۳۵ MPa ساخت. مقاومت بتن تجاری با وزن معمولی در آن زمان تقریباً ۱۷ MPa بود (Holm, b1980).

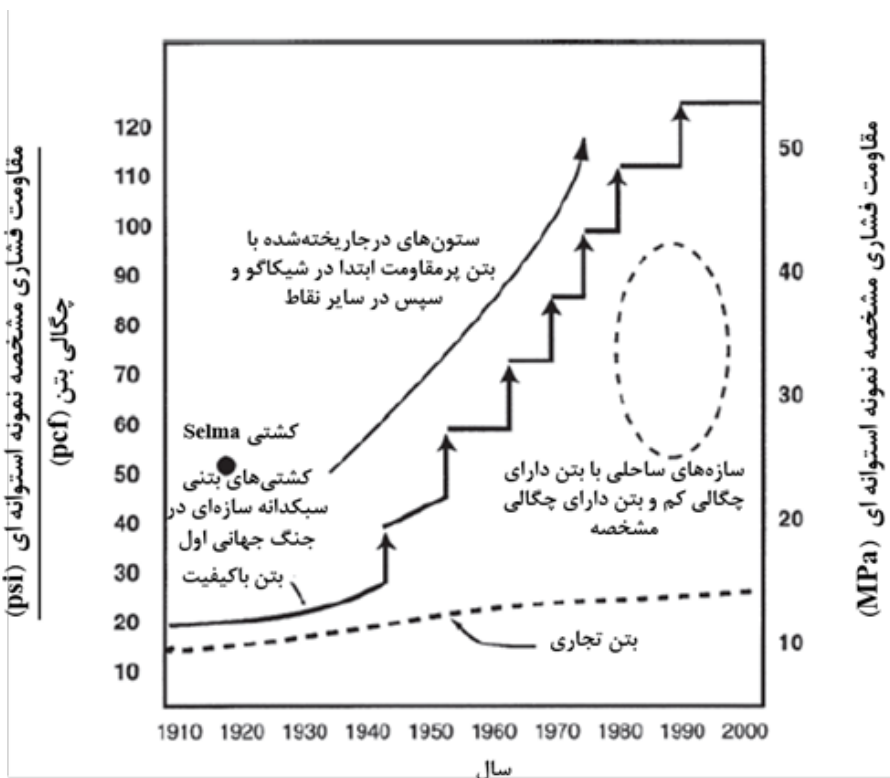
با استفاده از پوزولان های مختلفی همچون خاکستر بادی، دوده سیلیسی، متاکائولین، رس های کلسینه شده و شیل ها، در ترکیب با روان کننده ها، ابر روان کننده ها، یا هر دو، سطوح مقاومت زیادی برای بتن سبکدانه بدست آمده است. به دلیل ملاحظات مرتبط با دوام، در بسیاری از موارد، نسبت  $w/cm$  برای پل ها و سازه های دریایی کمتر از ۰/۴۵ و برای شرایط محیطی شدید حتی به طور قابل توجهی کمتر تعیین شده است. محدود کردن مقدار آب و طراحی بتن برای مقدار هوای ۴ تا ۵ درصد، می تواند به چگالی تعادلی بیشتر از  $kg/m^3$  ۱۹۰۰ منجر شود.

در حالی که سبکدانه های سازه ای قادر به تولید بتنی با مقاومت فشاری بیشتر از ۳۵ MPa هستند، برخی سبکدانه ها در بتن استفاده شده اند که مقاومت فشاری ۴۸ تا بیش از ۶۹ MPa ایجاد کرده اند. به طور کلی، افزایش چگالی هنگام ایجاد مقاومت های فشاری بیشتر ضروری است. بتن سبکدانه پرمقاومت با مقاومت فشاری ۴۱ MPa به طور گسترده به صورت تجاری در دسترس است و برنامه های آزمایش روی بتن سبکدانه با مقاومت فشاری نزدیک به ۶۹ MPa در جریان هستند. در برخی از ایالت های آمریکا، از بتن سبکدانه پرمقاومت با مقاومت فشاری ۶۹ MPa برای شاهتیرهای بتنی پیش تنیده استفاده می شود.

### ۲-۸- بازدهی سازه ای بتن سبکدانه

در برنامه ساخت کشتی که در سال ۱۹۱۷ در شهر Mobile ایالت آلاباما آغاز شد، تمام سازه بدنه کشتی USS Selma و ۱۸ کشتی بتنی دیگر با استفاده از بتن سبکدانه توانمند با مقاومت ۳۵ MPa ساخته شدند (Holm, b1980). بازدهی سازه ای که به صورت نسبت مقاومت به چگالی ( $S/D$ ) بتن مورد استفاده در کشتی USS Selma تعریف شد، برای آن زمان فوق العاده بود. نمودار بهبود بازدهی سازه ای بتن از آن زمان به بعد در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. در دهه ۱۹۵۰ با معرفی بتن پیش تنیده و به دنبال آن تولید بتن پرمقاومت با وزن معمولی برای ستون ساختمان های تجاری اسکلت بتنی درجاریخته شده بسیار مرتفع، یک روند صعودی در نمودار مشاهده می شود. بیشتر افزایش ها، در نتیجه بهبود خمیر سیمانی در نتیجه استفاده از نسل جدید مواد افزودنی مانند فوق روان کننده ها و بکارگیری پوزولان های با کیفیت مانند دوده سیلیسی، متاکائولین و خاکستر بادی حاصل شد. با این حال، تاریخچه نشان می دهد که اولین موفقیت مهم، در نتیجه برنامه ساخت کشتی های بتنی سبکدانه در سال ۱۹۱۷ بدست آمد.





شکل ۸-۲- بازدهی سازه‌ای بتن؛ نسبت مقاومت فشاری مشخصه به چگالی ( $\frac{\text{MPa}}{\text{kg/m}^3}$ ) (Holm و Bremner, ۱۹۹۴)

### ۳-۸- کاربردهای بتن سبکدانه توانمند

#### ۱-۳-۸- سازه‌های پیش‌ساخته

بتن سبکدانه پر مقاومت با مقاومت فشاری بیش از ۳۵ MPa تقریباً برای پنج دهه با موفقیت در آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر، تحقیقاتی در مورد قطعات بتنی سبکدانه پیش‌ساخته با دهانه بلندتر که می‌توانند از نظر حمل، بلند کردن و تجهیزات امکان‌پذیر باشند، در حال انجام است (Holm و Bremner, ۲۰۰۰). پل رودخانه Wabash، که در سال ۱۹۹۴ با ۹۶ شاهیتر بتنی سبکدانه پس‌کشیده پیش‌تینده با مقطع T شکل با بال تحتانی کوچک<sup>۱۳۷</sup> ساخته شد، نمونه خوبی است که در آن کاهش چگالی ۱۷ درصدی محقق شد (موسسه شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط‌شده، ۲۰۰۱). هریک از این ۹۶ شاهیتر سبکدانه دارای طول ۵۳/۴ m متر، ارتفاع ۲/۳ m و وزن ۸۷/۳ ton بودند. مقاومت ۵ روزه بتن از ۴۸ MPa فراتر رفت. در این پروژه از بتن توانمند استفاده شد چرا که باعث صرفه‌جویی ۱/۷ میلیون دلاری یا ۱۸ درصدی در کل هزینه پروژه گردید. قطعات سازه پارکینگ با دهانه‌های ۱۵ تا ۱۸ m، اغلب با مقاطع T شکل دوتایی<sup>۱۳۸</sup> با چگالی تعادلی تقریباً

<sup>137</sup> Bulb-tee girder

برابر با ۱۸۵۰ ساخته شدند. این کاهش جرم عمدتاً به منظور افزایش بازدهی برپاداشتن قطعات و کاهش هزینه‌های حمل آن‌ها است.

### ۲-۳-۸- ساختمان‌ها

از میان هزاران ساختمان که در آمریکای شمالی با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت ساخته شده‌اند، نمونه‌های ذیل به دلیل ویژگی‌های پیشرو و منحصر به فردشان انتخاب شده‌اند.

#### ۱-۲-۳-۸- ساختمان اداره پست ایالتی نیویورک، ۱۹۶۷

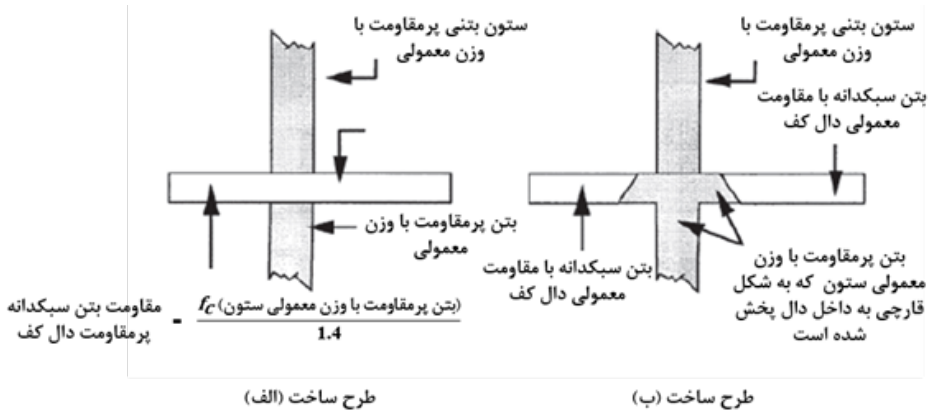
این ساختمان چندمنظوره با ارتفاع ۱۴۰ m که در سال ۱۹۶۷ با پنج طبقه اداره پست و ۲۷ طبقه اداری ساخته شد، اولین کاربرد مهم دال‌های پس کشیده در احداث ساختمان در شهر نیویورک بود. مقاومت فشاری ۲۴ MPa بتن که مقاومت موردنیاز در زمان اعمال تنش بود، در دال‌های ۹ × ۹ m با مقاومت هدف طراحی ۲۸ روزه ۴۱ MPa، در مدت ۳ روز بدست آمد. تقریباً  $23000 \text{ m}^3$  بتن سبکدانه در کف‌ها و پوشش معماری درجاریخته شده اطراف ساختمان که عملکرد سازه‌ای و زیبایی داشت، استفاده شد (Holm و Bremner، ۱۹۹۴).

#### ۲-۲-۳-۸- برج ساختمانی North Pier در شیکاگو، ۱۹۹۱

در این پروژه، به عنوان یک راه‌حل سازه‌ای نوآورانه برای جلوگیری از مشکلات ساخت مرتبط با انتقال بار از ستون‌های بتنی پرمقاومت با وزن معمولی از میان سامانه دال کف، از بتن سبکدانه توانمند در دال کف استفاده شد. آیین‌نامه ACI 318 لازم می‌داند که حداکثر نسبت مقاومت فشاری ستون، که در این پروژه برابر ۶۲ MPa بود به مقاومت فشاری بتن دال میان آن‌ها، کمتر از ۱/۴ باشد. با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت در دال‌هایی با مقاومت بیش از ۴۴ MPa، امکان بتن‌ریزی دال‌های کف با روش‌های معمول فراهم شد، بنابراین از مشکلات زمان‌بندی مربوط به قارچی<sup>۱۳۹</sup> جلوگیری گردید (شکل ۸-۳-۲). در روش قارچی، بتن پرمقاومت ستون، از محل ستون فراتر رفته و با بتن دال کف مخلوط می‌شود. با روش ساده استفاده از بتن پرمقاومت در دال‌های کف پروژه North Pier، از ملاحظات حساس زمان‌بندی که برای جلوگیری از درزهای سرد ضروری بود، اجتناب گردید (Holm و Bremner، ۱۹۹۴).

<sup>138</sup> Double tee

<sup>139</sup> Mushroom technique



شکل ۸-۳-۲- طرح‌های ساخت جایگزین برای انتقال بارهای ستون بتنی پرمقاومت با وزن معمولی از طریق دال‌های کف (Holm و Bremner، ۱۹۹۴)

### ۳-۲-۳-۸- ساختمان بانک آمریکا در شارلوت، ۱۹۹۲

این ساختمان بتنی، بلندترین سازه در جنوب شرقی ایالات متحده است و دارای یک سامانه کف بتنی پرمقاومت متشکل از دال‌هایی با ضخامت ۱۱۷ mm می‌باشد که بر روی تیرهای بتنی پس کشیده با ارتفاع ۴۶۰ mm که در فاصله ۳ m از یکدیگر قرار دارند، گذاشته شده‌اند. سامانه کف بتنی سبکدانه، به منظور به حداقل رساندن بار مرده و دستیابی به مقاومت ۳ ساعته مورد نیاز در برابر آتش انتخاب شد (شکل ۸-۳-۲-۳ و جدول ۸-۳-۲-۳) (Holm و Bremner، ۱۹۹۴).





شکل ۸-۳-۳-۳- ساختمان بانک آمریکا در شارلوت نیویورک (Holm و Bremner، ۱۹۹۴)

جدول ۸-۳-۳- طرح مخلوط و ویژگی‌های فیزیکی بتن پمپی پروژه ساختمان بانک آمریکا در شارلوت نیویورک

شماره طرح مخلوط	۱	۲	۳
طرح مخلوط			
سیمان نوع ۳ (kg/m <sup>3</sup> )	۳۲۶	۳۸۵	۴۴۵
خاکستر بادی (kg/m <sup>3</sup> )	۸۳	۸۳	۸۳
سبکدانه ۲۰ mm تا شماره ۵ (kg/m <sup>3</sup> )	۵۳۴	۵۳۴	۵۳۴
ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	۸۱۳	۷۶۳	۷۱۴
آب (L/m <sup>3</sup> )	۱۷۵	۱۸۰	۱۸۴
روان کننده (L/m <sup>3</sup> )	۰/۷۸	۰/۹۰	۱
فوقروان کننده (L/m <sup>3</sup> )	۰/۵۶	۲/۳۱	۲/۲۷
ویژگی‌های بتن تازه مخلوط شده			
اسلامپ اولیه (mm)	۶۳	۵۱	۵۷
اسلامپ پس از افزودن فوقروان کننده (mm)	۱۳۰	۱۹۱	۱۷۱
درصد هوا	۲/۵	۲/۵	۲/۳
وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	۱۸۸۷	۱۸۹۰	۱۸۹۰
مقاومت فشاری (MPa)			
۴ روزه	۲۹/۶	۳۵/۲	۳۹/۴
۷ روزه	۳۳/۶	۳۹/۹	۴۴/۴
۲۸ روزه (میانگین)	۴۳/۲	۴۷	۵۱/۴
مقاومت کششی شکافتی (MPa)	۳/۵۹	۳/۷۲	۳/۹

\* مخلوط انتخابی و استفاده شده در پروژه

### ۸-۳-۳- پل‌ها

در بیش از ۵۰۰ پل، از بتن سبکدانه در عرشه‌ها، تیرها، شاهتیرها یا پایه‌ها استفاده شده است (Holm و Bremner، ۲۰۰۰). مهندسان حمل‌ونقل عموماً مقاومت‌های زیادتری برای بتن تعیین می‌کنند تا از بخش ملات باکیفیت با مقاومت فشاری زیاد همراه با درصد زیاد هوا که تعمیر و نگهداری پل را به حداقل

می‌رساند، اطمینان حاصل کنند. تعدادی از ادارات حمل و نقل ایالت آتلانتیک میانی<sup>۱۴۱</sup>، بیش از ۲۰ پل را با مقاومت آزمایشگاهی هدف ۳۶ MPa، ۶ تا ۹ درصد هوا و چگالی  $1840 \text{ kg/m}^3$  ساخته‌اند. موارد زیر، مزایای اصلی استفاده از بتن سبکدانه در پل‌ها و بازسازی پل‌های موجود هستند:

- الف) افزایش عرض یا تعداد خطوط عبور و مرور بیشتر
- ب) افزایش ظرفیت باربری
- پ) ساخت به روش طره‌ای متعادل<sup>۱۴۲</sup>
- ت) کاهش نیروهای اینرسی لرزه‌ای
- ث) افزایش پوشش بتنی با وزن یکسان و دال‌های ضخیم‌تر
- ج) بهبود هندسه عرشه با دال‌های ضخیم‌تر
- چ) افزایش طول دهانه و کاهش هزینه پایه‌ها

### ۱-۳-۳-۸- افزایش تعداد خطوط عبور و مرور در زمان بازسازی پل

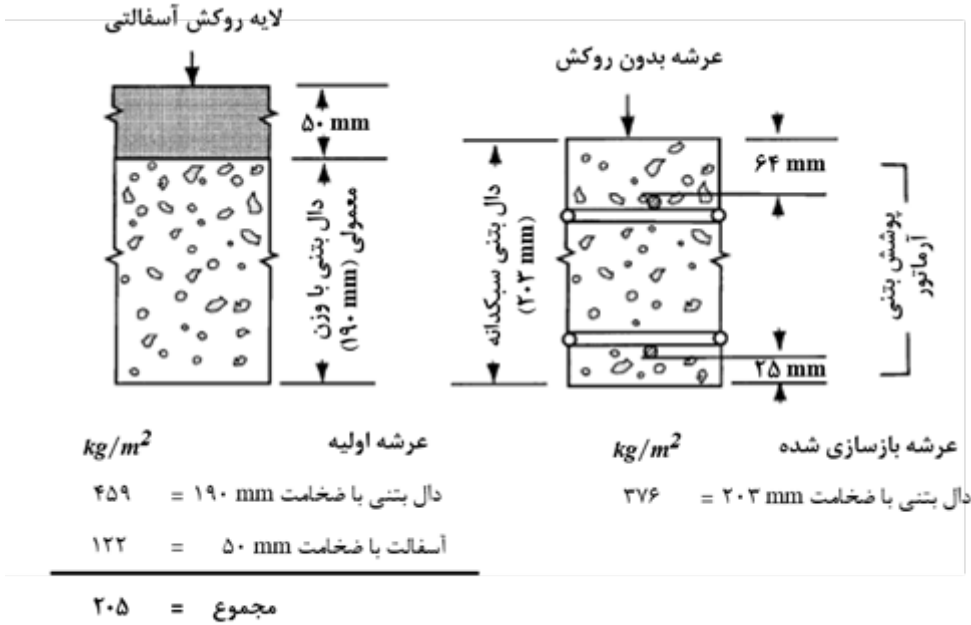
هزاران پل در ایالات متحده به دلیل ظرفیت باربری کم غیرقابل قبول یا تعداد خطوط عبوری ناکافی، از نظر عملکردی از رده خارج شده‌اند (Holm و Stollendorf، ۱۹۹۶). مهندسان در واشنگتن، یک پل چهار خطه را که در ابتدا با استفاده از بتن با وزن معمولی ساخته شده بود، به منظور رفع ظرفیت محدود خطوط، با پنج خط جدید ساخته شده با بتن سبکدانه جایگزین کردند که بدون تعویض سازه، پایه‌ها یا پی‌های موجود باعث افزایش ۵۰ درصدی تردد یک‌طرفه در ساعات اوج عبور و مرور شد. در بزرگراه میان‌ایالتی I-۸۴ در محل عبور از رودخانه Hudson در شهر Newburgh ایالت نیویورک، به طور مشابه دو خط عبوری که با استفاده از بتن با وزن معمولی ساخته شده بودند، با سه خط عبوری ساخته شده از بتن سبکدانه در دهانه‌ای موازی جایگزین شدند، که امکان تردد سه خطه در هر دو مسیر غرب به شرق و شرق به غرب را فراهم کرد.

### ۲-۳-۳-۸- افزایش ظرفیت باربری

در زمان بازسازی ساختار سامانه راه‌های شهر واشنگتن، بخش مرتفع آزادراه Whitehurst با اصلاحات محدودی در قاب فلزی سازه فوقانی، به حالت بارگذاری HS20 ارتقا داده شد. به دلیل کاهش قابل توجه بار مرده از طریق استفاده از بتن سبکدانه به جای بتن با وزن معمولی و لایه روکش آسفالتی که در دال عرشه اولیه استفاده شده بود، ظرفیت باربری افزایش یافت (شکل ۸-۳-۳-۲-الف) (Holm و Stollendorf، ۱۹۹۶). سازه مرتفع اولیه آزادراه، مطابق با آیین‌نامه AASHTO LRFD (۱۹۹۴) برای بار زنده HS20 طراحی شده بود. با جایگزین کردن عرشه بتنی با وزن بسیار کمتر، بخش کمی از قاب فلزی سازه‌ای نیاز به تقویت داشت و برای ارتقای زیربنا به شرایط بارگذاری زنده HS20، به وقفه کوتاهی در تردد خیابان عبوری از زیر آزادراه نیاز بود (شکل ۸-۳-۳-۲-ب) (Holm و Stollendorf، ۱۹۹۶).

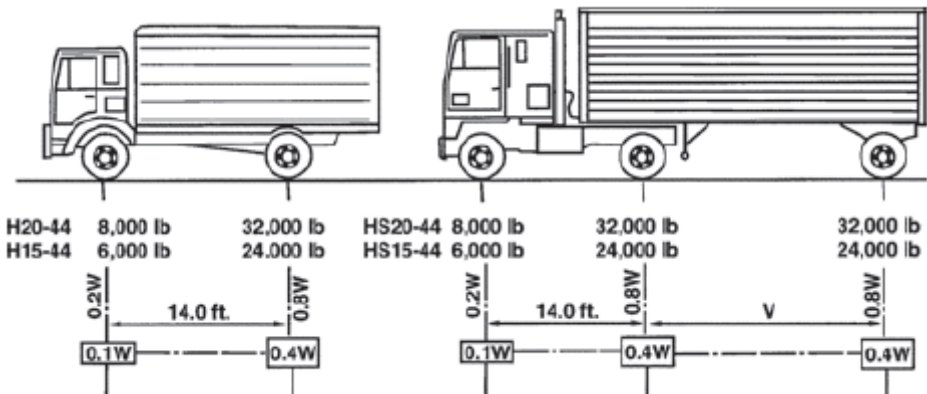
<sup>141</sup> Mid-Atlantic

<sup>142</sup> Balanced cantilever



$$\text{کاهش وزن} = ۵۸۱ - ۳۷۶ = ۲۰۵ \text{ kg/m}^2$$

شکل ۸-۳-۳-۲-الف - عرشه‌های اولیه و بازسازی شده آزادراه Whitehurst (Holm و Stollendorf, ۱۹۹۶)



شکل ۸-۳-۳-ب - بارگذاری‌های H20-44 و HS20-44 در آیین‌نامه AASHTO LRFD (۱۹۹۴)  
(Holm و Stollendorf, ۱۹۹۶)

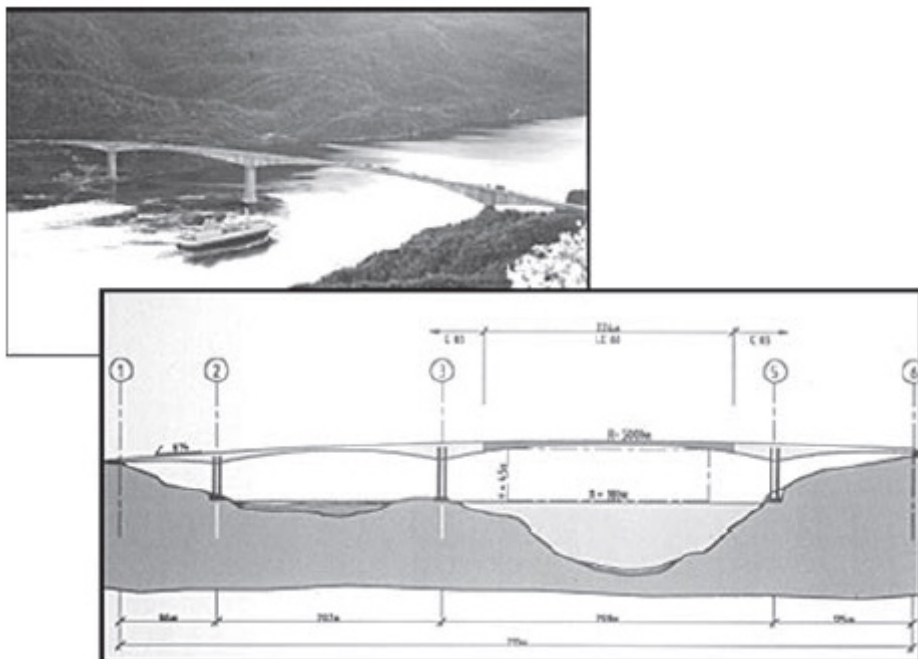
۸-۳-۳-۳ - پل‌هایی که در آن‌ها همزمان از دهانه‌های بتن سبکدانه و معمولی استفاده شده

## فصل ۸- عملکرد و کاربردهای بتن سبکدانه ..... ۱۰۵۰

چندین پل ساخته شده‌اند که در آن‌ها به منظور ساخت به روش طره‌ای متعادل بدون بار، از بتن سبکدانه توانمند استفاده شده است. در پل Sandhornoya، که در سال ۱۹۸۹ در نزدیکی شهر Bodo نروژ در مدار شمالگان تکمیل شد، دهانه‌های کناری ۱۱۰ متری این پل سه دهانه، با بتن سبکدانه پرمقاومتی با مقاومت نمونه مکعبی ۵۵ MPa ساخته شدند که ساخت دهانه میانی با طول ۱۵۴ m با استفاده از بتن معمولی با مقاومت نمونه مکعبی ۴۵ MPa را متعادل کرد (Fergestad، ۱۹۹۶).

پل Raftsundet نروژ، واقع در مدار شمالگان، با دهانه اصلی به طول ۲۹۸ m، در زمان اتصال طره‌ها در ژوئن سال ۱۹۹۸ طولانی‌ترین دهانه بتنی طره‌ای در جهان بود؛ از ۲۲۰ m از دهانه اصلی، با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت با مقاومت نمونه مکعبی ۶۰ MPa ساخته شد. دهانه‌های کناری و پایه‌های ساخته شده از بتن معمولی، دارای مقاومت نمونه مکعبی ۶۵ MPa بودند (شکا، ۸-۳-۳) (موسسه شیل، رس و سنگ‌لوح

منب



شکل ۸-۳-۳-۳- Raftsundet (موسسه شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط شده، ۲۰۰۱)

پل Benicia-Martinez در امتداد خلیج San Pablo در کالیفرنیا، یک پل بتنی سبکدانه قطعه‌ای به طول ۲ km است. این پل با استفاده از مخلوط بتن سبکدانه ساخته شد که مقاومت فشاری بین ۶۹ تا ۷۶ MPa ایجاد کرد (Muruges، ۲۰۰۸). استفاده از بتن سبکدانه باعث کاهش ۲۰ درصدی جرم روبنا و افزایش شکل پذیری پل شد که هر دو مورد برای به حداقل رساندن تحریک لرزه‌ای سازه کمک کردند. صرفه‌جویی

مرتبط با استفاده از بتن سبکدانه تا ۴۲ میلیون دلار برآورد شد (Murillo و همکاران، ۱۹۹۴).

#### ۴-۳-۸- سازه‌های دریایی

از آنجا که ممکن است سازه‌های بتنی دریایی در کارخانه‌های کشتی‌سازی یا حوضچه‌های تعمیرات واقع در فواصل قابل توجهی از محل احتمالی قرارگیری سازه ساخته، سپس شناور و به محل پروژه حمل شوند، نیاز مبرمی به کاهش جرم و بهبود بازدهی سازه‌ای آن‌ها وجود دارد، به ویژه در مواردی که عمق کم آب، استفاده از سازه‌های دارای عمق شناوری کمتر<sup>۱۴</sup> را تحمیل می‌کند. همان‌طور که در ادامه نشان داده شده، زمانی که بتن سبکدانه غوطه‌ور می‌شود، بازدهی سازه‌ای حتی قابل توجه‌تر است.

نسبت چگالی بتن با وزن معمولی با تسلیح زیاد به چگالی بتن سبکدانه با تسلیح زیاد که در هوا برابر است با:

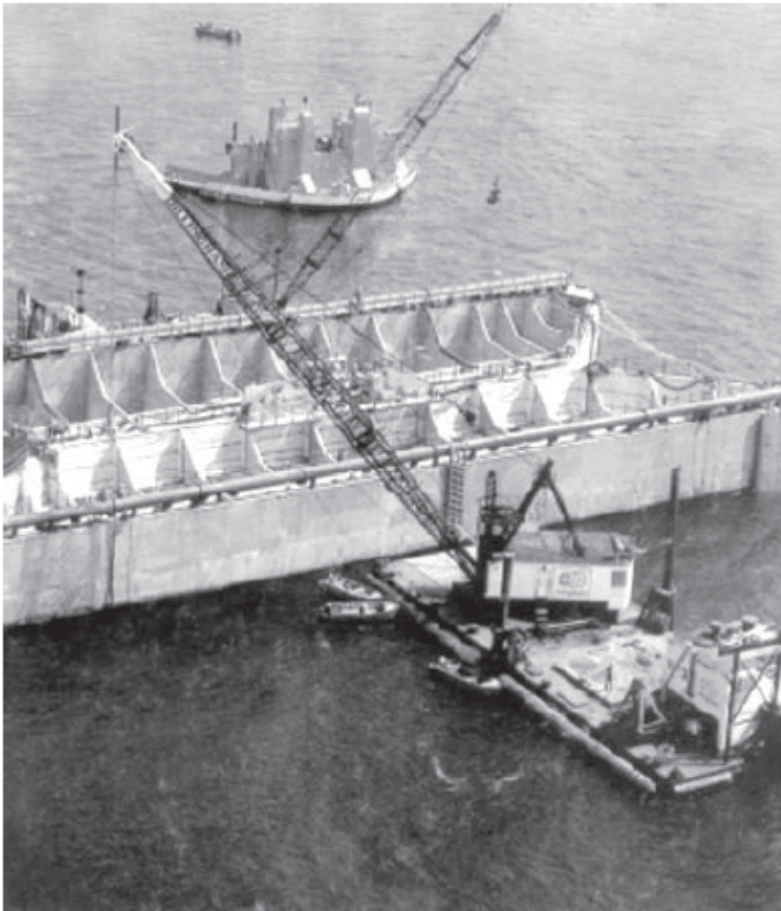
$$\frac{2500 \text{ kg/m}^3}{2500 \text{ kg/m}^3} = 1.25$$

در شرایط غوطه‌ور برابر است با:

$$\frac{(2500-1000) \text{ kg/m}^3}{(2000-1000) \text{ kg/m}^3} = 1.5$$

#### ۱-۴-۳-۸- جزیره Tarsiut محافظت‌شده توسط پی‌های صندوقه‌ای، ۱۹۸۱

اولین سازه ساخته شده در قطب شمال با استفاده از بتن سبکدانه توانمند، جزیره محافظت‌شده Tarsiut با پی‌های صندوقه‌ای بود که در شهر ونکوور British Columbia ساخته و به دریای Beaufort کانادا منتقل شد (شکل ۸-۳-۴-۱). چهار پی صندوقه‌ای پیش‌تنیده عظیم به ابعاد ۱۱ × ۱۵ × ۶۹ m در حوضچه تعمیرات ونکوور ساخته، در اطراف آلاسکا توسط یک دوبه شناور حمل، و روی خاکریز ماسه‌ای لایروبی شده در فاصله ۴۰ km از ساحل قرار داده شد. تراکم بسیار زیاد آرماتورها، به چگالی بتن مسلح  $2240 \text{ kg/m}^3$  منجر شد. استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت برای دستیابی به الزامات شناوری و عمق شناوری موردنظر ضروری بود (مؤسسه شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط‌شده، ۲۰۰۱).



شکل ۸-۳-۱- جزیره Tarsuit محافظت شده با پی‌های صندوقه‌ای  
(مجله Concrete International، ۱۹۸۲)

#### ۲-۴-۳-۸- سکوی شناور Heidrun، ۱۹۹۶

به دلیل عمق زیاد آب (۳۴۵ m) در بالای میدین نفتی Heidrun در دریای نورژ، تصمیمی برای بهبود شناوری و ساخت اولین سکوی شناور با استفاده از بتن سبکدانه توانمند گرفته شد. بدنه سکوی شناور با حجم تقریبی  $۷۰۰۰۰ \text{ m}^3$ ، تماماً با استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت با حداکثر چگالی  $۲۰۰۰ \text{ kg/m}^3$  ساخته شد. سکو در نورژ ساخته و به دریای نورژ حمل شد. چگالی میانگین  $۱۹۴۰ \text{ kg/m}^3$ ، مقاومت فشاری ۲۸ روزه میانگین نمونه مکعبی  $۷۹ \text{ MPa}$  و نسبت ثبت شده مقاومت نمونه استوانه‌ای به نمونه مکعبی  $۰/۹۰$  تا  $۰/۹۳$  گزارش شد (FIP، ۲۰۰۰؛ موسسه شیل، رس و سنگ لوح منبسط شده، ۲۰۰۱).

### ۳-۴-۸- سکوی نفتی Hibernia، ۱۹۹۸

سازه دریایی گرانثی شرکت ExxonMobil در میدان نفتی Hibernia، کاربردی برجسته از بتن با چگالی مشخصه است. به منظور بهبود شناوری بزرگترین سازه شناور ساخته شده در آمریکای شمالی، تقریباً ۵۰ درصد از بخش درشت‌دانه با وزن معمولی در بتن پرمقاومت مورد استفاده، با سبکدانه جایگزین شد (شکل ۳-۴-۸). چگالی بدست آمده برابر  $2160 \text{ kg/m}^3$  بود. سکوی نفتی Hibernia در یک حوضچه خشک در Newfoundland land کانادا ساخته و سپس به ناحیه بندری با آب عمیق که عملیات ساخت در آن ادامه پیدا کرد، منتقل شد. پس از اتمام ساخت، سازه با وزن بیش از ۱ میلیون تن به محل میدان نفتی Hibernia منتقل و در کف اقیانوس

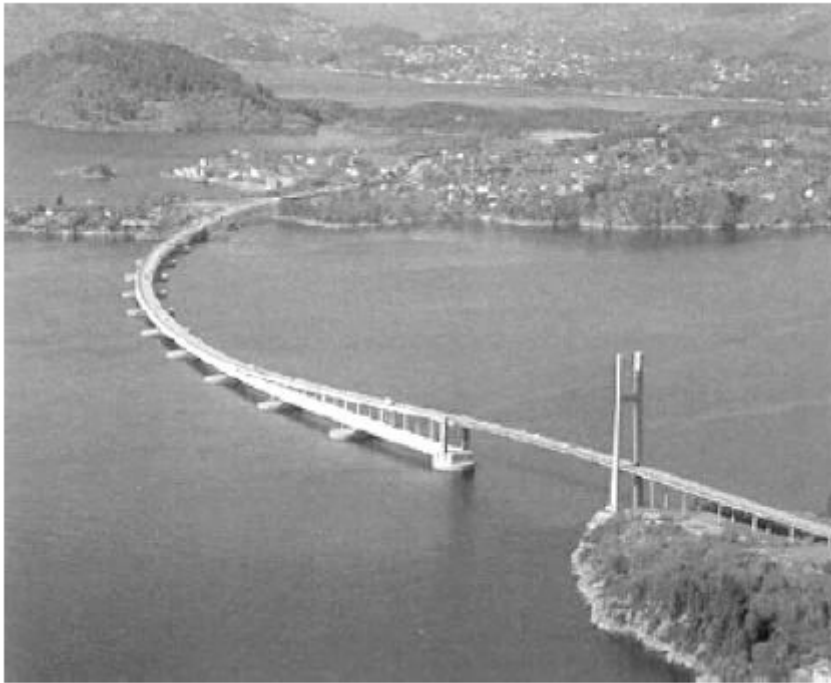


شکل ۳-۴-۸- سکوی نفتی Hibernia (موسسه شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط شده، ۲۰۰۱)

### ۵-۳-۸- پل‌های شناور

بتن سبکدانه توانمند به طور موثر هم در عرشه پل کابلی و هم در پل بتنی شناور مجزا اما مجاوری که شاهتیرهای صندوقه‌ای فولادی تراز پایین روی آن قرار گرفته‌اند، در نزدیکی شهر Bergen نروژ استفاده شد (شکل ۳-۸-۵). پل‌های شناور، ۴۲ m طول و ۲۱ m عرض دارند و در محفظه‌های جداشده با دیافراگم‌های ضد نفوذ آب، بتن ریزی شده بودند. طراحی محفظه‌ها با این ایده انجام شد که پل شناور با وجود از دست





شکل ۸-۳-۵- پل Nordhordland در Bergen نروژ (شرکت تولید میکروسیلیس Elkem، ۲۰۰۰)

#### ۸-۴- بتن سبکدانه خودتراکم<sup>۱۴۴</sup> (SCC)

بتن سبکدانه خودتراکم، بتنی بسیار روان و در عین حال پایدار است که می‌تواند به راحتی در محل پخش شود، قالب را پر کند و آرماتورها را بدون نیاز به هرگونه تراکم مکانیکی و بدون جداسازی مواد تشکیل‌دهنده در بر گیرد (Ouchi و Okamura، ۱۹۹۹). بتن سبکدانه خودتراکم یا SCC سبکدانه، بتن خودتراکمی است که با استفاده از سبکدانه‌های درشت سازه‌ای، سبکدانه‌های ریز، یا ترکیبی از این دو ساخته می‌شود. مانند بتن خودتراکم با وزن معمولی، بتن خودتراکم سبکدانه نیز باید تنها تحت نیروی گرانش و وزن خود جریان یابد و تراکم شود. در سال‌های اخیر، شرکت‌های بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده در ایالات متحده، استفاده از بتن سبکدانه خودتراکم در بسیاری از کاربردها را آغاز کرده‌اند، از جمله سکوهای نشیمن پیش‌ساخته، ساندویچ پانل‌های بتنی پیش‌ساخته، مقاطع T شکل دوتایی و ساختمان‌های رفاهی عمومی پیش‌ساخته، سازه‌های بتن مسلح شناور و سامانه‌های دیواری قالب بتنی عایق ماندگار<sup>۱۴۵</sup> (ICF). بتن سبکدانه خودتراکم از اوایل دهه ۱۹۹۰ در ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است (Shi و همکاران، ۲۰۰۶؛ Sugiyama، ۲۰۰۳). پیمانانه کردن، اختلاط و تحویل بتن سبکدانه خودتراکم، با همان روانی بتن

<sup>144</sup> Self-consolidating concrete

<sup>145</sup> Insulated concrete form

خودتراکم با چگالی معمولی انجام شده است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که در نسبت‌های  $w/cm$  یکسان، مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی بتن سبکدانه خودتراکم مشابه بتن سبکدانه سنتی است (Ger- و Yao و Wick، ۲۰۰۰). از آنجا که جای‌دهی بتن سبکدانه خودتراکم نسبت به بتن سبکدانه سنتی راحت‌تر است، برای جای‌دهی بتن در قطعات پیش‌ساخته به نیروی کار کمتری نیاز است. توانایی بتن سبکدانه خودتراکم برای جریان یافتن در قسمت‌های تنگ و عدم نیاز به لرزاندن، باعث کاهش یا حذف تجهیزات لرزاندن داخلی و خارجی می‌شود. بتن سبکدانه خودتراکم فقط در حالت تازه مخلوط‌شده با بتن سبکدانه سنتی متفاوت است، بنابراین تمام ویژگی‌ها و روش‌های طراحی بتن سبکدانه سنتی برای بتن سبکدانه خودتراکم نیز معتبر هستند. مشابه بتن سبکدانه سنتی، در زمان اختلاط، سبکدانه‌های از پیش مرطوب‌شده به سبکدانه‌های خشک ارجحیت دارند، چرا که تمایل به جذب آب کمتری در زمان اختلاط دارند و بنابراین، احتمال افت جریان اسلامپ در زمان مخلوط شدن، انتقال و جای‌دهی بتن را کاهش می‌دهند. تفاوت چگالی ویژه ملات و سنگدانه درشت، چه با وزن معمولی و چه سبکدانه، نیرویی محرک برای جداسدگی است. در نتیجه، در بتن سبکدانه خودتراکم، چگالی ویژه ملات از ذرات سبکدانه درشت بیشتر است. به دلیل اینکه ملات، سنگین‌تر از ذرات سبکدانه است، جداسدگی بتن سبکدانه خودتراکم بیشتر به دلیل به روی سطح آمدن ذرات سبکدانه درشت است. چگالی ملات با استفاده از مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا سرباره و با تنظیم درصد هوا کاهش می‌یابد و در نتیجه چگالی ملات به چگالی ذرات سبکدانه نزدیک می‌شود (Wall، ۲۰۰۵). از آنجا که چگالی بتن سبکدانه خودتراکم ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از بتن خودتراکم با چگالی معمولی است، برای دستیابی به ویژگی‌های خودتراکمی در بتن سبکدانه خودتراکم، به ملات روان‌تری نیاز است. گرانروی ملات بتن سبکدانه خودتراکم باید برای جلوگیری از به روی سطح آمدن سبکدانه درشت کافی باشد (Wall، ۲۰۰۵؛ Gerwick و Yao، ۲۰۰۰). بر اساس گزارش‌ها، گرانروی بتن سبکدانه خودتراکم باید تقریباً با بتن خودتراکم با وزن معمولی برابر باشد تا مقاومت یکسانی در برابر جداسدگی حاصل شود. اگر گرانروی و روانی مخلوط به درستی کنترل نشود، ممکن است پرداخت بتن سبکدانه خودتراکم دشوار شود. در شرایطی که مقادیر کمی از سبکدانه درشت به روی سطح می‌آیند، پیمانکاران، با زحمت کم سبکدانه‌های درشت آزاد را از طریق ماله‌کشی به درون بتن سبکدانه خودتراکم بازمی‌گردانند و سطح پرداخت‌شده صافی را ایجاد می‌کند. در صورتی که جداسدگی رخ دهد و بیش از سبکدانه‌های درشت نزدیک به سطح، به صورت آزاد باشند، نباید از مخلوط استفاده نمود و لازم است تا گرانروی مخلوط تنظیم شود.

## ۵-۸- مزایای بتن سبکدانه

استفاده از بتن سبکدانه معمولاً بر مبنای کاهش هزینه پروژه، بهبود عملکرد یا ترکیبی از هر دو استوار است. برآورد کل هزینه یک پروژه هنگام در نظر گرفتن گزینه استفاده از بتن سبکدانه ضروری است، چرا که هزینه یک مترمکعب بتن سبکدانه معمولاً از یک مترمکعب بتن با وزن معمولی بیشتر است. مثال زیر،

مزایایی را از منظر هزینه‌های بتن سبکدانه در مقایسه با بتن با وزن معمولی در پروژه یک پل نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در نظر بگیرید که هزینه یک پل با دهانه کوتاه معمولی می‌تواند بین ۵۴۰ تا ۲۱۵۰ دلار در یک مترمربع متغیر باشد.

اگر ضخامت متوسط عرشه ۲۰۰ mm باشد، یک مترمکعب بتن، سطحی تقریباً برابر با ۵ مترمربع ایجاد می‌کند. به طور معمول هزینه درجاریختن بتن سبکدانه تقریباً ۱ درصد بیشتر از بتن با وزن معمولی رایج است. این افزایش هزینه، با بهبود قابل توجه عملکرد پل، ساختمان یا سازه دریایی و یا با هریک از عوامل اقتصادی زیر به راحتی جبران می‌شود:

الف) کاهش بارهای مرده وارد بر پی ساختمان می‌تواند به پی‌های کوچک‌تر، شمع‌های کمتر، کلاهک‌های کوچک‌تر شمع‌ها و آرماتور کمتر منجر شود.

ب) کاهش بار مرده می‌تواند به قطعات تکیه‌گاهی کوچک‌تر (عرشه‌ها، تیرها، شاهتیرها و پایه‌ها) منجر شود که به کاهش عمده در هزینه‌ها منتج می‌شود.

پ) کاهش بار مرده به معنای کاهش نیروهای اینرسی لرزه‌ای خواهد بود.

ت) هنگام بازسازی پل، عرشه سبک جدید می‌تواند عریض‌تر باشد یا بدون تغییر سازه‌ای یا اصلاح پی، یک خط عبوری اضافی به پل بیافزاید.

ث) هنگام تعویض عرشه‌ها یا لایه‌های روکش پل، عرشه سبک جدید می‌تواند ضخیم‌تر از عرشه یا لایه روکش بتنی با وزن معمولی اولیه باشد تا اجازه دهد پوشش بیشتری برای آرماتور ایجاد شود یا زهکشی بهتری را بدون افزودن بار مرده اضافی به سازه فراهم کند.

ج) با استفاده از بتن پیش‌ساخته پیش‌تنیده، می‌توان قطعات بلندتر یا بزرگتری را بدون افزایش جرم کل ساخت. این موضوع می‌تواند به استفاده از ستون‌ها یا پایه‌های کمتر در سامانه‌ای که بلند کردن یا برپا کردنش آسان‌تر است، و در زمان حمل، به اتصالات کمتر یا امکان حمل تعداد قطعات بیشتر در هر محموله منجر شود. در برخی از کارخانه‌های تولید قطعات پیش‌ساخته به منظور تعیین چگالی بهینه بتن، هزینه حمل هر قطعه توسط رایانه ارزیابی می‌شود.

چ) بتن سبکدانه دوام بیشتری از خود نشان می‌دهد (به فصل ۶ مراجعه شود) که می‌تواند به چرخه بهره‌برداری طولانی‌تر یا کاهش تعمیر و نگهداری منجر شود.

ح) در کاربردهای دریایی (مانند پل‌ها، اسکله‌ها و سکوها نفتی)، افزایش بار مجاز عرشه و کاهش نیروی کشش<sup>۱۴۴</sup> در نتیجه استفاده از بتن سبکدانه می‌تواند امکان خارج نمودن آسان‌تر از اسکله‌های خشک و انتقال از میان گذرگاه‌های آبی کم‌عمق را فراهم کند.

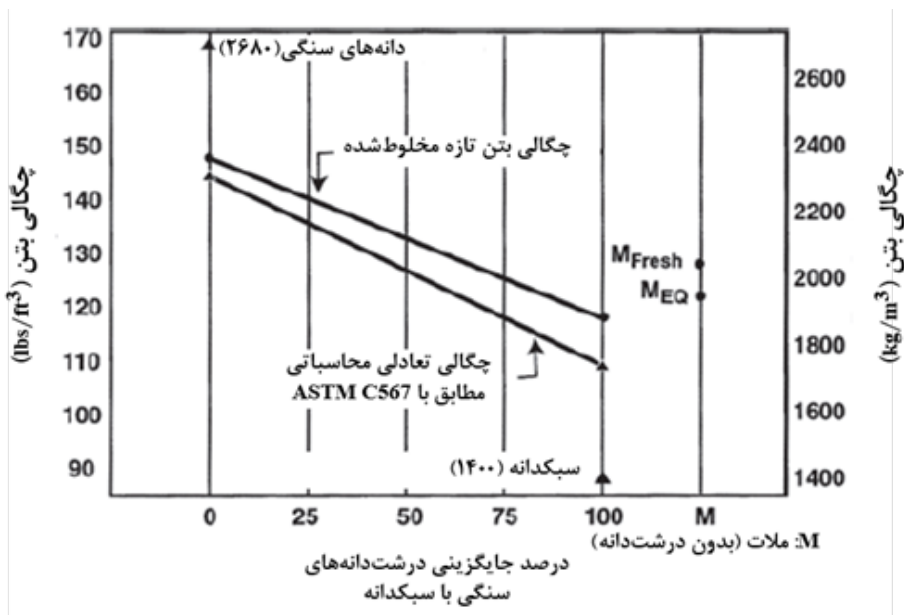
خ) در صورتی که ضخامت دال توسط مقاومت در برابر آتش کنترل شود، به دلیل مقاومت بیشتر بتن‌های سبکدانه در برابر آتش مطابق با ACI 216.1، می‌توان ضخامت دال‌ها را کاهش داد و در نتیجه حجم بتن مصرفی را به میزان قابل توجهی کم کرد.

محصولات ساخته شده با بتن سبکدانه اغلب برای بهبود ظاهر سازه استفاده می‌شوند. در احداث ساختمان، این موضوع معمولاً در مورد کف‌های طره‌ای، طراحی معنادار سقف<sup>۱۴۷</sup>، ساختمان‌های بلندتر یا طبقات اضافه شده به سازه‌های موجود صدق می‌کند. بهبود قابلیت ساخت می‌تواند به ساخت پل طره‌ای منجر شود که در آن، در یک طرف پایه از بتن سبکدانه و در سمت دیگر از بتن معمولی برای ایجاد تعادل وزنی استفاده می‌شود و در عین حال امکان استفاده از دهانه طولانی‌تر در سمت بتن سبک پایه را می‌دهد. همچنین در مواردی که کیفیت عایق بهتر در کاربردهای حساس به حرارت مانند آب داغ، ذخیره‌سازی نفت، یا عایق ساختمان مورد نیاز است، می‌توان گزینه استفاده از بتن سبکدانه را در نظر گرفت (۵-۱۳).

### ۱-۵-۸- مزایای مرتبط با حمل و نقل

در پروژه‌هایی که مسائل مربوط به حمل و نقل مطرح است، با استفاده از بتن سبکدانه می‌توان صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های حمل و نقل ایجاد کرد. مطالعات نشان دادند که صرفه‌جویی در هزینه حمل و نقل بتن سبکدانه، هفت برابر بیشتر از هزینه‌های اضافی آن است. میزان صرفه‌جویی با توجه به اندازه و جرم هر محصول متفاوت و برای محصولات مربوط به مصرف‌کننده‌های خرد از همه برجسته‌تر است. تردد کمتر کامیون در شهرهای شلوغ نه تنها با محیط‌زیست سازگار است، بلکه باعث کاهش شکایات عمومی نیز می‌شود. احتمال هزینه‌های کمتر در زمان استفاده از حمل و نقل ریلی یا حمل و نقل با استفاده از قایق‌های باربر وجود دارد، اما اغلب در حمل و نقل با کامیون که محموله‌ها از طریق بزرگراه‌ها ارسال می‌شوند، حاصل می‌شود. Kahn و Meyer (۲۰۰۲) مزایای اقتصادی مهم استفاده از بتن سبکدانه پرمقاومت در شایه‌های پل به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل و نقل را ذکر کردند.

تولیدکنندگان محصولات بتنی پیش‌ساخته برای بیش از ۲۰ سال، موازنه اقتصادی<sup>۱۴۸</sup> میان ویژگی‌های فیزیکی و هزینه‌های حمل و نقل را ارزیابی کرده‌اند. در مطالعه‌ای، بتن شاهد حاوی سنگ‌آهک متداول با مخلوط‌های دیگری که در آن‌ها ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های درشت از سنگ آهک با حجم مطلق برابری از سبکدانه جایگزین شدند، مقایسه گردید. نتایج اندازه‌گیری و مقایسه مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی در مقابل داده‌های مربوط به چگالی، توسط Holm و Ries (۲۰۰۰) طی یک برنامه آزمایش، گزارش و در شکل ۸-۵-۱ نشان داده شده است. با تنظیم چگالی بتن، تولیدکنندگان محصولات بتنی پیش‌ساخته می‌توانند بدون عبور از محدودیت بار بزرگراه، تعداد دفعات ارسال کامیون‌ها را به حداقل برسانند و صرفه‌جویی‌های زیادی در هزینه‌ها ایجاد کنند.



شکل ۸-۵-۱- چگالی بتن تازه مخلوط شده و چگالی تعادلی محاسباتی مطابق با C567M/ASTM C567 در مقابل درصد جایگزینی درشت‌دانه سنگ‌آهکی با سبکدانه سازه‌ای (Holm و Ries, ۲۰۰۰)

### ۸-۶- توسعه پایدار<sup>۱۴۹</sup> بتن سبکدانه

زمانی که عبارت توسعه پایدار در صنعت بتن بکار می‌رود به طور کلی به موارد زیر اشاره دارد:

الف) صرفه‌جویی در مصالح مورد استفاده در پروژه

ب) افزایش طول عمر از طریق افزایش دوام در محیطی که برای آن طراحی شده است

ج) اثرات زیست محیطی کلی تولید، حمل و نقل و جای‌دهی محصول بتنی در سازه نهایی

صرفه‌جویی در مصالح ساخت و ساز، صرفه‌جویی در هزینه حمل و نقل (بخش ۸-۵) و صرفه‌جویی انرژی در گرمایش و سرمایش، مثال‌هایی از کاهش اثرات زیست محیطی است که می‌توان با استفاده از بتن سبکدانه در یک پروژه معین ایجاد کرد. هزینه‌های کلی چرخه طول عمر باید مورد به مورد تعیین شوند؛ با این حال، در بسیاری از موارد، انرژی و هزینه اضافی مورد نیاز برای تولید سبکدانه، اغلب به صرفه‌جویی کلی در انرژی، عمر مفید و پایداری سازه‌های بتنی کمک می‌کند.

افزایش استفاده از سبکدانه‌های فرآوری شده، گواهی بر برنامه‌ریزی صحیح زیست محیطی است. محصولات ساخته شده با سبکدانه به هزینه‌های حمل و نقل کمتری نیاز دارند و از موادی استفاده می‌کنند که در حالت طبیعی خود کاربردهای سازه‌ای محدودی دارند، در نتیجه تقاضای صنعت ساخت و ساز برای منابع محدود ماسه‌ها، سنگ‌ها و شن‌های طبیعی را به حداقل می‌رساند.



# فصل ۹

بهبود عملکرد به دلیل آب ذخیره شده درونی  
(عمل آوری درونی)

از بتن حاوی سبکدانه به طور روزافزون برای بهره‌گیری از عمل آوری درونی استفاده می‌شود (Jensen، 1993). در این بخش مفهوم عمل آوری درونی بیان می‌شود، روش‌های تعیین طرح مخلوط، بررسی و تاثیر سبکدانه بر ویژگی‌های بتن تشریح می‌گردد.

### ۹-۱- مفهوم عمل آوری درونی

یکی از مزایای استفاده از سبکدانه از پیش مرطوب شده در بتن، اولین بار توسط Klieger (۱۹۵۷) مورد توجه قرار گرفت. وی بر اساس مشاهدات صورت گرفته در صنعت ساخت‌وساز که دال بر بهبود عملکرد بتن ساخته شده با سبکدانه بود، بیان کرد: «سبکدانه‌ها آب قابل توجهی را در زمان اختلاط جذب می‌کنند که ظاهراً می‌تواند در طول هیدراته‌شدن به خمیر منتقل شود». Tobin و Campbell (۱۹۶۷) طی مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی که در آن مقاومت مغزه‌های گرفته‌شده از بتن معمولی و سبکدانه از دال‌های در معرض عمل آوری در کارگاه با نتایج به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی که کاملاً مطابق با روش‌های ASTM عمل آوری شده بودند، مقایسه گردید. نتایج آزمایش‌های آن‌ها تایید کرد که در دسترس بودن رطوبت جذب شده در سبکدانه منبسط شده، بتن مناسب‌تری را تولید می‌کند که نسبت به شرایط عمل آوری ناکافی در کارگاه حساسیت کمتری دارد. Phileo (۱۹۹۱) بیان کرد که عمل آوری درونی برای بتن توانمند، فایده بیشتری دارد تا خودخشکیدن<sup>۱۵۰</sup> آن را جبران کند. در حالی که این موارد، اثرات مفید آزادسازی تدریجی وابسته به زمان آب از سبکدانه از پیش مرطوب شده در زمانی که مورد نیاز است را نشان می‌دهند، ولی این راهکار تنها در همین اواخر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است و از آن معمولاً با عنوان عمل آوری درونی نام برده می‌شود. شکل ۹-۱ نشان می‌دهد که هنگام استفاده از عمل آوری بیرونی، آب از سطح تامین می‌شود؛ اما زمانی که از عمل آوری درونی استفاده می‌گردد، آب می‌تواند به طور یکنواخت در سراسر سطح مقطع پخش شود.

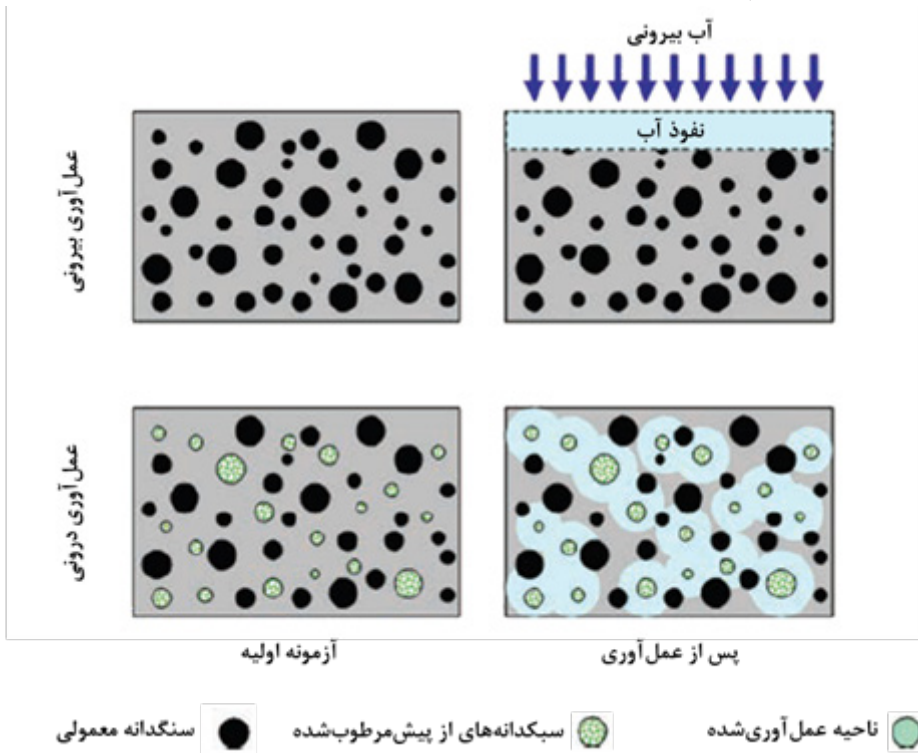
عمل آوری درونی به عنوان راه‌کاری که اخیراً مطرح شده است، نوید تولید بتنی با مقاومت بیشتر در برابر ترک خوردگی در سن کم و دوام بهتر را می‌دهد (NISTIR 776-2011).<sup>۱۵۱</sup> در حالی که این نوشته، مروری اجمالی از عمل آوری درونی و فواید آن برای عملکرد بتن را ارائه می‌دهد، باید توجه نمود که در دهه گذشته چندین گزارش تهیه شده‌اند که اطلاعات اضافی به عنوان مرجع را فراهم می‌کنند که می‌تواند جزئیات بیشتری را در مورد عمل آوری درونی در اختیار خوانندگان قرار دهد (Hoff، 2002؛ RILEM، 2002؛ ACI 231R-10، 2008؛ Mohr و Bentz، 2007). این بخش عمدتاً بر گزارش ارائه شده توسط NISTIR 776-2011 مبتنی است.

نیاز به عمل آوری درونی، مستقیماً از ماهیت بنیادی واکنش‌های هیدراته‌شدن سیمان ناشی می‌شود. با واکنش سیمان و آب، محصولات حاصل از هیدراته‌شدن، عموماً فضای کمتری را نسبت به اجزای تشکیل‌دهنده اصلی اشغال می‌کنند (یعنی حجم خمیر کاهش می‌یابد و منجر به تغییر حجم بیرونی موسوم

<sup>150</sup> Self-desiccation

<sup>151</sup> National Institute of Standards and Technology

به جمع‌شدگی خودزا و ایجاد منافذ پر شده با بخار در خمیر می‌شود. در نتیجه، هیدراته‌شدن و واکنش پوزولانی، یک تغییر حجم خالص ایجاد می‌کنند که جمع‌شدگی شیمیایی نام دارد. برای مثال، Bentz (۱۹۹۷) نشان داد که هیدراته‌شدن سه کلسیم سیلیکات ( $C_3S$ ) شامل کاهش حجم خالصی به اندازه ۹/۶ درصد یا تقریباً  $0.07 \frac{ml}{g}$  از  $C_3S$  است. هنگامی که از پوزولان‌هایی مانند دوده سیلیسی، خاکستر بادی و متاکائولین در مخلوط استفاده شوند، مزایای عمل‌آوری درونی بیش از پیش اهمیت می‌یابند. مزیت عمل‌آوری درونی به طور خاص به این دلیل مهم است که مواد پوزولانی می‌توانند به اندازه دو تا سه برابر بیشتر از سیمان، جمع‌شدگی شیمیایی داشته باشند (NISTIR 776-2011). مزیت دیگر این است که واکنش پوزولانی، خود شدیداً به حضور مداوم رطوبت وابسته است.



شکل ۹-۱- نمایش تفاوت بین عمل‌آوری درونی و بیرونی. سبکدانه‌های از پیش مرطوب‌شده باید به صورت یکنواخت و با فاصله کم از یکدیگر پخش شوند تا کل سامانه خمیر را پوشش دهند (Castro و همکاران، ۲۰۱۰a)

## ۹-۲- طرح مخلوط برای عمل‌آوری درونی

تعیین طرح مخلوط برای بتن با عمل‌آوری درونی، بر نیاز به تامین آب اضافی برای پر کردن فضای متخلخل پر شده از بخار بوجود آمده در اثر جمع‌شدگی شیمیایی متمرکز است. تامین آب اضافی، این امکان را به بتن می‌دهد تا درجه اشباع بیشتری را حفظ و سیمان بیشتری را هیدراته نماید و در عین حال، جمع‌شدگی خودزا و ترک‌خوردگی در سن کم را به حداقل برساند.



سه ملاحظه کلیدی برای تعیین طرح مخلوط بتن با عمل آوری درونی حائز اهمیت هستند (Bentz و همکاران، ۲۰۰۵؛ Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۸):

الف) چه مقدار آب عمل آوری درونی لازم است؟

ب) آب موردنیاز تا چه فاصله‌ای می‌تواند به راحتی در درون خمیر سیمان اطراف حرکت کند؟

پ) توزیع فضایی منابع سبکدانه در داخل بتن چگونه است؟

اولین ملاحظه، مطابق با معادله (۹-۲)، آب موردنیاز مخلوط در حال هیدراته‌شدن (سمت راست معادله (۹-۲)) را با مقدار آبی که از سبکدانه در دسترس است (سمت چپ معادله (۹-۲)) برابر می‌داند.

$$M_{LWA} \times S^* \Phi_{LWA} = C_f \times CS \times a_{max} \quad (9-2)$$

جزئیات بیشتر در مورد رابطه (۹-۲) و کاربرد آن در ادبیات فنی ارائه شده است (Bentz و همکاران، ۲۰۰۵؛ Castro، ۲۰۱۱). Lopez و Espinoza-Hijazin نشان دادند که عمل آوری درونی می‌تواند هیدراته‌شدن و عملکرد بتن را در مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۴۲ که تحت عمل آوری بیرونی ضعیف بوده‌اند را بهبود دهد. در حالت خشک‌شدن، آب از دست رفته به محیط می‌تواند با آب عمل آوری درونی جایگزین شود و در نتیجه خشک‌شدن واقعی خمیر و پیامدهای منفی مربوط به آن را به حداقل رساند.

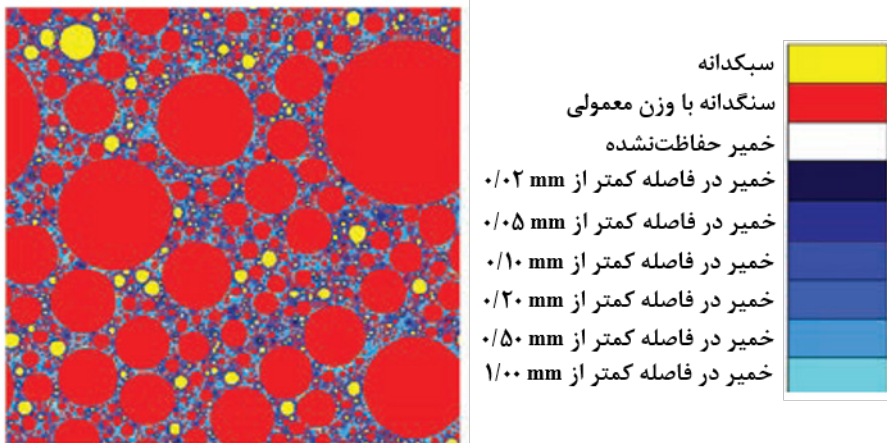
ملاحظه دوم، حرکت آب است. این موضوع با استفاده از پرتونگاری<sup>۱۵۲</sup> یا لایه‌نگاری<sup>۱۵۳</sup> اشعه ایکس یا نوترونی توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفته است (Bentz و همکاران، ۲۰۰۶a، ۲۰۰۶b، ۲۰۰۷).

Lura و همکاران (۲۰۰۳) و Henkensiefken و همکاران (۲۰۱۱) از پرتونگاری اشعه ایکس برای سنجش حرکت آب استفاده و مشاهده کردند که بعد از ۲۴ ساعت، مسافت طی شده حداقل برابر ۲ mm بود. Bentz و همکاران (۲۰۰۵) از ریزلایه‌نگاری اشعه ایکس استفاده و رابطه بین عرضه و تقاضا آب را که پیش‌تر ذکر شد، تایید کردند. Trtik و همکاران (۲۰۱۱) از پرتونگاری نوترونی استفاده و مشاهده کردند که آب، در طول ۲۰ ساعت اول عمل آوری می‌تواند بدون شیب رطوبتی، حداقل ۳ mm از سطح سبکدانه حرکت کند.

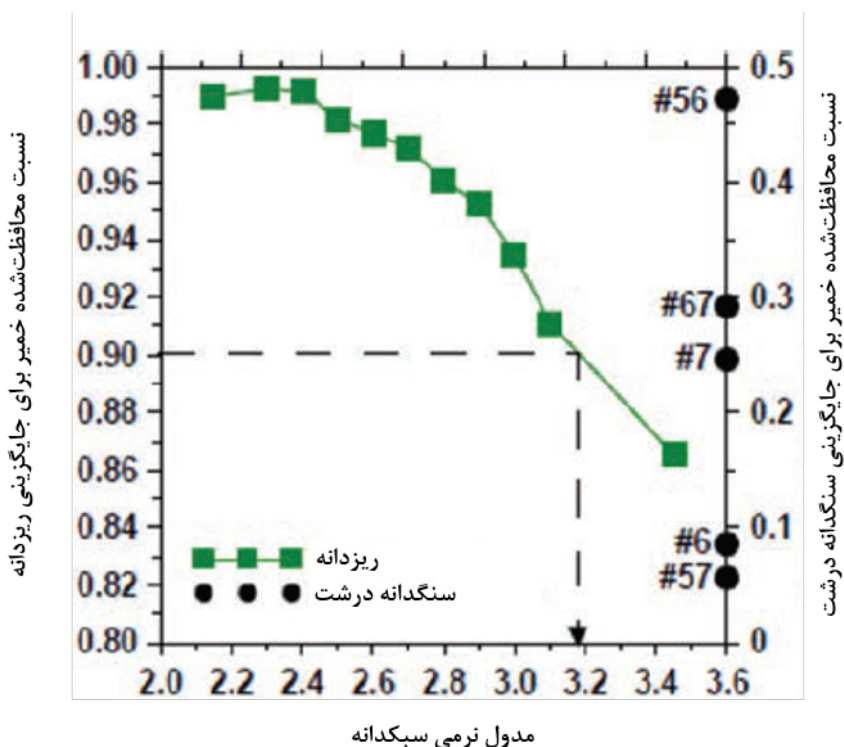
سومین ملاحظه، فاصله بین سبکدانه‌ها است. Snyder و Bentz (۱۹۹۹) مدلی رایانه‌ای توسعه دادند که با استفاده از مفهومی مشابه مفهوم حجم محافظت‌شده خمیر<sup>۱۵۴</sup> (NISTIR ۶۲۶۵)، امکان تعیین مقدار حجم خمیر در فاصله معینی از سبکدانه را می‌دهد. کاربر، دانه‌بندی سنگدانه‌ها، درصد حجمی جایگزینی سبکدانه به جای سنگدانه‌های با وزن معمولی برای هر اندازه الک، و درصد حجمی کل برای تمامی سنگدانه‌های مخلوط را برای بدست آوردن جدولی از حجم محافظت‌شده خمیر (۰ تا ۱) به صورت تابعی از فاصله از سطح سبکدانه‌ها ارائه می‌دهد. شکل ۹-۲-الف نمونه‌ای از تصویر دوبعدی رنگ‌بندی شده را نشان می‌دهد که توسط برنامه به کاربر ارائه می‌شود. در این مثال (شکل ۹-۲-الف)، از سبکدانه‌ای با دانه‌بندی خوب استفاده شده است که توزیع مناسبی از سبکدانه را در سراسر خمیر ایجاد می‌کند. از آنجا که تمام خمیر سیمان در فاصله‌ای کمتر از ۱ mm از سطح سبکدانه قرار دارد، آب می‌تواند به خمیر منتقل شود. اگر فاصله سبکدانه بیشتر باشد (به دلیل حجم کمتر سبکدانه یا سبکدانه درشت‌تر)، تغییری در ظاهر خمیر ایجاد

نمی‌شود که نشان می‌دهد خمیر از عمل‌آوری درونی بهره نبرده است.

با استفاده از مدل هسته‌ی سخت و پوسته‌ی نرم که پیش از این توضیح داده شد، Henkensiefken و همکاران (۲۰۰۹)، ۱۶ مخلوط با سنگدانه‌های در اندازه‌های مختلف و ماسه‌های دارای مقادیر متفاوت مدول نرمی را مدل‌سازی کردند. شکل ۹-۲-ب، حجم محافظت شده خمیر بتنی را نشان می‌دهد که ۳۰ درصد حجمی سنگدانه (درشت‌دانه یا ریزدانه) در آن با سبکدانه از پیش مرطوب‌شده جایگزین شده و فرض می‌شود که حرکت آب در آن به ۲ mm محدود است. در صورتی که ۳۰ درصد درشت‌دانه با سبکدانه جایگزین شود، صرف نظر از اندازه انتخابی، هیچ یک از سبکدانه‌های درشت آزمایش شده بیش از ۵۰ درصد حجم خمیر را محافظت نمی‌کنند. بر عکس، اگر سبکدانه مورد استفاده برای عمل‌آوری درونی مدول نرمی کمتری (ماسه ریزتر) داشته باشد، تقریباً تمام خمیر در فاصله ۲ mm از ذره سبکدانه خواهد بود. هنگامی که از سبکدانه درشت‌تر (مدول نرمی بیشتر) استفاده شود، حجم کمتری از خمیر محافظت می‌شود. هر سبکدانه‌ای با مدول نرمی بیش از ۳/۲، کمتر از ۹۰ درصد حجم خمیر را محافظت می‌کند. اگر از چنین سبکدانه‌ای استفاده می‌شود، ممکن بود به ناچار حجم سبکدانه ریز افزایش یابد تا اطمینان حاصل گردد که بخش کافی از خمیر محافظت می‌شود. ارائه این اطلاعات تنها برای نشان دادن این مطلب بود که دانه‌بندی ذرات (مدول نرمی) معیاری مهم است، نه اینکه سبکدانه‌های با مدول نرمی بیشتر از ۳/۲ نباید استفاده شوند یا اثر بخش نخواهند بود.



۹-۲-الف- مثالی از تصویر دوبعدی ۳۰×۳۰ mm از شبیه‌سازی عمل‌آوری درونی (Bentz و همکاران، ۲۰۰۵)



شکل ۹-۲-ب- حجم محافظت شده خمیر در بتنی که ۳۰ درصد حجمی سنگدانه در آن، مطابق با دستورالعمل‌های ASTM C33/C33M، با سنگدانه‌های درشت مختلف یا ماسه با مدول نرمی‌های متفاوت جایگزین شده است (Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۹)

همکاران، ۲۰۰۹ (c)

### ۹-۳- ویژگی‌های سنگدانه برای عمل آوری درونی

در حالی که ASTM C128، برای تعیین رطوبت کل از روش مخروط<sup>۱۵۵</sup> استفاده می‌کند، آزمایش‌های جایگزین با استفاده از کلرید کبالت<sup>۱۵۶</sup> یا روش دستمال حوله‌ای<sup>۱۵۷</sup> (اداره حمل‌ونقل نیویورک<sup>۱۵۸</sup>، ۲۰۰۸) می‌توانند همان اطلاعات را بدون پیچیدگی‌های مربوط به ماهیت تیز گوشه بودن ذرات ارائه دهند (Castro، ۲۰۱۱). مقادیر معمول جذب آب ۲۴ ساعته برای انواع سبکدانه‌های آمریکای شمالی بین ۶ تا ۳۱ درصد است. در حالی که جذب آب ۲۴ ساعته یک مقدار واحدی را ارائه می‌دهد، باید توجه کرد که جذب آب بسیاری از سبکدانه‌ها در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های جذب آب باید با یک توصیف‌گر زمانی مانند گزارش ظرفیت جذب آب ۲۴ ساعته یک سبکدانه خاص (شکل ۹-۳-الف) شفاف‌سازی شوند. Castro و همکاران (۲۰۱۱)، در طیف گسترده‌ای از سبکدانه‌ها، زمانی که داده‌های مربوط به آن‌ها با استفاده

<sup>155</sup> Cone method

<sup>156</sup> Cobalt chloride

<sup>157</sup> Paper towel method

<sup>158</sup> New York Department of Transportation

از جذب آب ۲۴ ساعته آن‌ها، بدون بُعد (نرمال)<sup>۱۵۹</sup> شد، نرخ جذب آب مشابهی را برای ۴۸ ساعت اول مشاهده کردند.

برای اینکه سبکدانه به عنوان منبع ذخیره آب برای عمل‌آوری درونی عملکرد مطلوبی داشته باشد، منافذ دارای آب باید بزرگتر از منافذی باشند که در خمیر سیمان مجاور سبکدانه وجود دارد به طوری که آب ترجیحاً از طرف سبکدانه به سمت سیمان در حال هیدراته‌شدن حرکت کند. این قابلیت سبکدانه برای آزادسازی آب در رطوبت نسبی زیاد را می‌توان با سنجش ویژگی‌های جذب و پس دادن آب<sup>۱۶۰</sup> ذرات سبکدانه، همانطور که در جدول ۹-۳ نشان داده شده است، اندازه‌گیری کرد. داده‌های جدول ۳-۲-۳، درصد ظرفیت جذب آب اندازه‌گیری شده ۲۴ ساعته بدون بُعد (نرمال‌شده) را نشان می‌دهد که در هنگام به تعادل رسیدن با رطوبت نسبی، در سنگدانه باقی می‌ماند.

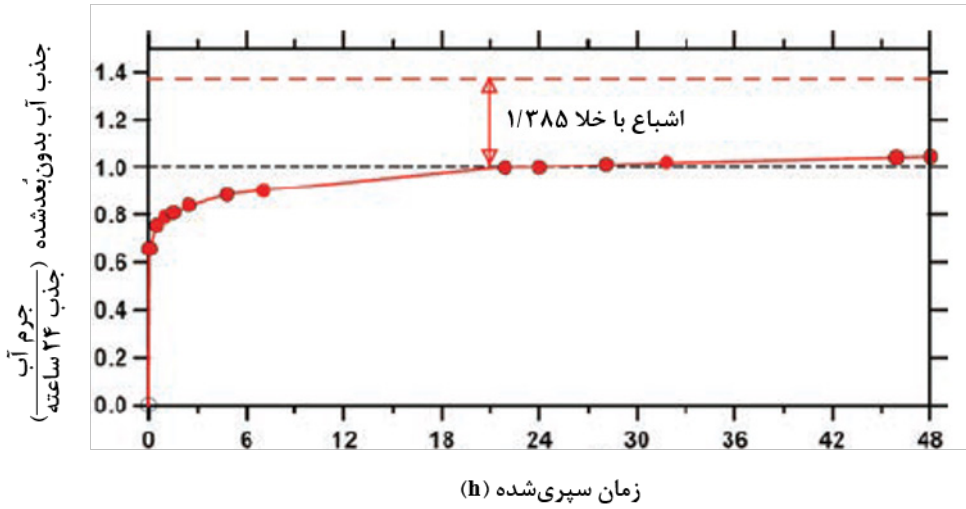
در چندین مطالعه، از محلول‌های نمک اشباع‌شده برای کنترل رطوبت نسبی سبکدانه‌های از پیش مرطوب شده استفاده شده است تا افت جرمی یا پس دادن آب آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد (Bentz و همکاران، ۲۰۰۵؛ Radlinska و همکاران، ۲۰۰۸). Castro و همکاران (۲۰۱۱)، از پس دادن دینامیکی بخار آب<sup>۱۶۱</sup> استفاده کردند که طی آن، نمونه در ترازوی با دقت زیاد در جریان هوا و محیطی که رطوبت نسبی آن به دقت کنترل شده بود، قرار داده شد تا نحوه از دست دادن آب در حرارت ثابت اندازه‌گیری شود. این اندازه‌گیری‌ها نشان داد که در رطوبت نسبی زیاد (بیش از ۹۳ درصد)، حدوداً ۹۰ درصد از آب جذب‌شده در ۲۴ ساعت، به آسانی تقریباً از تمامی سبکدانه‌های رس، شیل و سنگ‌لوح منبسط‌شده مورد ارزیابی که در حال حاضر در ایالات متحده تولید می‌شوند، آزاد می‌گردد (Castro و همکاران، ۲۰۱۰). اگرچه همانطور که در شکل ۹-۳-ب نشان داده شده است، این موضوع برای همه مصالح متخلخل صادق نیست. در حالی که سبکدانه ایده‌آل تقریباً ۹۰ درصد از آب خود را در فرآیند خشک‌شدن از دست می‌دهد، بدین معنی که درصد باقی مانده جذب آب ۲۴ ساعته بدون بُعد (نرمال‌شده) آن‌ها تقریباً برابر ۱۰ درصد است، اما سنگدانه‌های کمتر از حد ایده‌آل، تنها ۶۰ تا ۷۰ درصد آب را از دست می‌دهند. در نتیجه، برای عملکرد عمل‌آوری درونی یکسان، نیاز به افزایش تقریباً ۲۵ درصدی حجم سنگدانه‌های کمتر از حد ایده‌آل است. در حالی که روش پس دادن دینامیکی بخار آب، داده‌های مربوط به رطوبت نسبی کمتر از ۹۸ درصد را فراهم می‌کند، روش‌های جایگزین می‌توانند در رطوبت‌های نسبی بیشتر نیز استفاده شوند. Pour-Ghaz و همکاران (۲۰۱۱)، برای بررسی پس دادن آب سنگدانه‌ها در رطوبت‌های نسبی بیشتر، از روش صفحه فشاری<sup>۱۶۲</sup> پیشنهادی توسط Johansson (۲۰۰۵) استفاده کردند. این روش، مزیت امکان آزمایش نمونه‌های بزرگ‌تر و طیفی از سبکدانه با اندازه‌های مختلف را نیز دارد. با این حال، این روش آزمایش برای هر رطوبت نسبی انتخابی، به زمان طولانی‌تری در حدود ۱ هفته نیاز دارد.

<sup>159</sup> Normalized

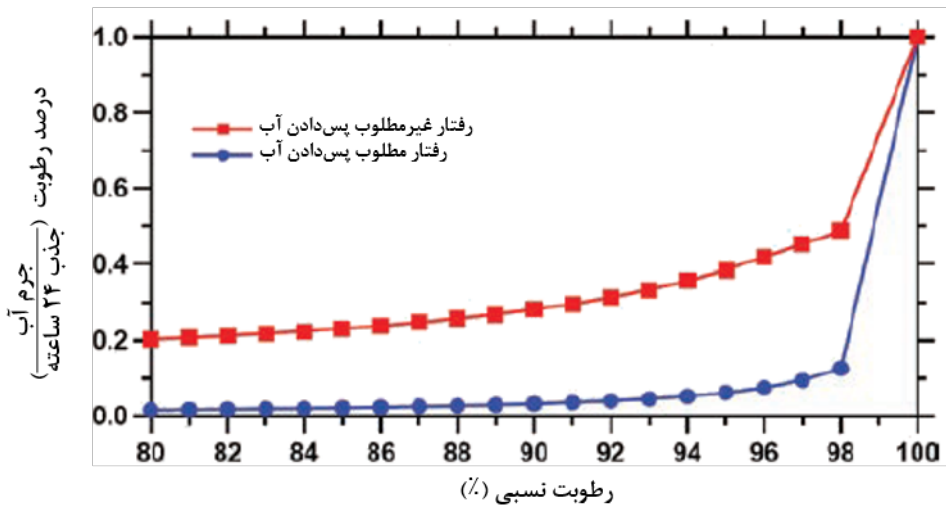
<sup>160</sup> Desorption

<sup>161</sup> Dynamic vapor desorption

<sup>162</sup> Pressure plate



شکل ۹-۳- الف- جذب آب وابسته به زمان معمول سبکدانه (Castro و همکاران، ۲۰۱۱)



شکل ۹-۳- ب- نمایش رفتار مطلوب یا نامطلوب پس دادن آب سبکدانه (Castro و همکاران، ۲۰۱۱)

جدول ۹-۳- رفتار پس دادن آب سبکدانه‌های رس، شیل و سنگ‌لوح منبسط شده در آمریکای شمالی (Castro و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pour-Ghaz و همکاران، ۲۰۱۱)

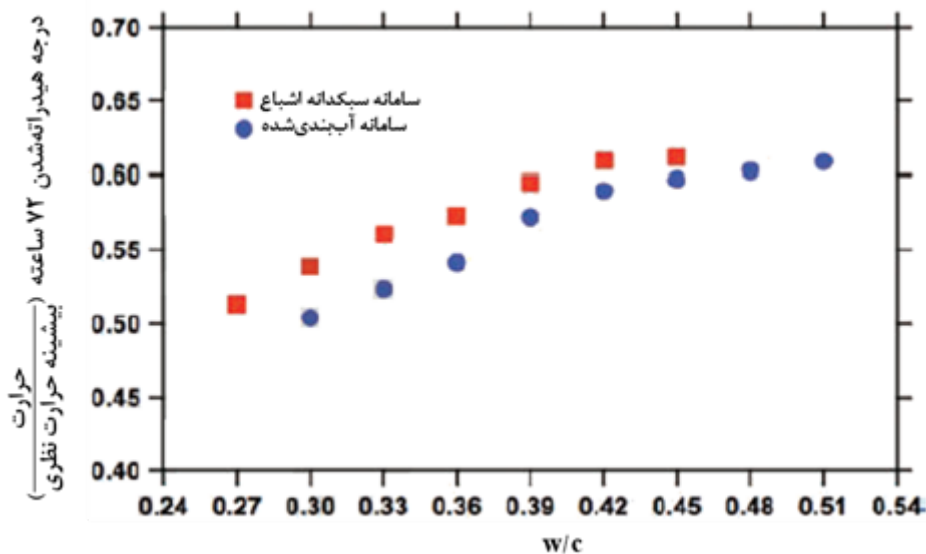
شماره سبکدانه	جذب آب ۲۴ ساعته (%) ۹۹/۹(۱)	رطوبت نسبی (%)				
		۹۹/۶(۱)	۹۸/۹(۱)	۹۸(۲)	۹۶(۲)	۹۴(۲)
رس	۱	۱۵/۳	-	-	-	۰/۱۱
	۲	۳۰/۵	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۰۶
	۳	۱۷/۷	۰/۸۷	۰/۷۰	۰/۵۲	۰/۱۲
	۴	۱۷/۵	۰/۹۱	۰/۶۱	۰/۴۵	۰/۰۹
شیل	۵	۱۴/۱	۰/۶۱	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۰۳
	۶	۱۰	-	-	-	۰/۰۴
	۷	۱۵/۶	۰/۷۸	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۰۵
	۸	۱۵	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۰۶
	۹	۱۵/۷	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۰۴
	۱۰	۱۹/۵	۰/۸۷	۰/۶۸	۰/۴۸	۰/۱۵
	۱۱	۱۸/۱	۰/۹۳	۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۱۷
	۱۲	۱۸/۵	۰/۹۴	۰/۷۷	۰/۵۴	۰/۱۴
	۱۳	۱۲/۲	۰/۹۱	۰/۵۰	۰/۳۶	۰/۰۵
	۱۴	۶	۰/۹۳	۰/۵۲	۰/۳۸	۰/۰۴
سنگ‌لوح						

(۱) تعیین شده از روش صفحه فشاری (Pour Ghaz و همکاران، ۲۰۱۱)

(۲) تعیین شده از روش پس دادن دینامیکی بخار آب (Castro و همکاران، ۲۰۱۱)

#### ۹-۴- تاثیر عمل آوری درونی بر ویژگی‌ها و رفتار بتن

عمل آوری درونی می‌تواند به طرق مختلف بر عملکرد یا ویژگی‌های بتن تاثیر بگذارد. این بخش، ویژگی‌های بتن‌های با عمل آوری معمولی را در مقایسه با بتن رایج تشریح می‌کند. بهبود تدریجی کیفیت بتن سبکدانه، معمولاً بیش از آن چیزی است که در بتن حاوی سنگدانه‌های معمولی در حالت آب‌بندی شده یا در حال خشک شدن مشاهده می‌شود. به این دلیل که عمل آوری درونی، از طریق رطوبت قابل دسترس سبکدانه، باعث هیدراته شدن اضافی بخش سیمانی می‌شود. این موضوع را می‌توان در شکل ۹-۴، که در آن گرمای هیدراته شدن پس از ۳ روز برای مخلوط‌هایی با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵، بیشتر است، مشاهده کرد. نتایج مشابهی توسط Bentz و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از گرماسنجی<sup>۱۶۳</sup> و Lura و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از جمع‌شدگی شیمیایی همزمان با گرماسنجی مشاهده شده است.



شکل ۹-۴- تاثیر نسبت آب به سیمان و عمل آوری درونی بر درجه هیدراته شدن (Castro و همکاران، ۲۰۱۱)

#### ۹-۴-۱- تاثیر عمل آوری درونی بر جمع شدگی خمیری<sup>۱۶۴</sup>

در صورت زیاد بودن نرخ تبخیر در زمان بتن ریزی، بتن می تواند مستعد ترک خوردگی باشد (Villareal و Crocker، ۲۰۰۷). در حالی که این ترک ها معمولا از منظر مقدار باری که سازه می تواند تحمل کند نگران کننده نیستند، اما اغلب از نظر ظاهری ناخوشایند هستند و می توانند منجر به نفوذ عوامل تهاجمی شوند که خوردگی آرماتور را تسریع می کنند (Lura، ۲۰۰۷). مطالعاتی برای مقایسه میزان تمایل بتن به جمع شدگی خمیری و ترک خوردگی، با یا بدون عمل آوری درونی انجام گرفته است (Henkensiefken، ۲۰۱۰). ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، با عمل آوری درونی کاهش می یابد زیرا آب درون سبکدانه، آب از دست رفته در اثر تبخیر را جبران می کند (Henkensiefken، ۲۰۱۰). با این حال، باید توجه شود که وقتی از آب عمل آوری درونی برای جبران تبخیر استفاده می شود، این آب برای عمل آوری درونی در سنین بیشتر بتن در دسترس نیست.

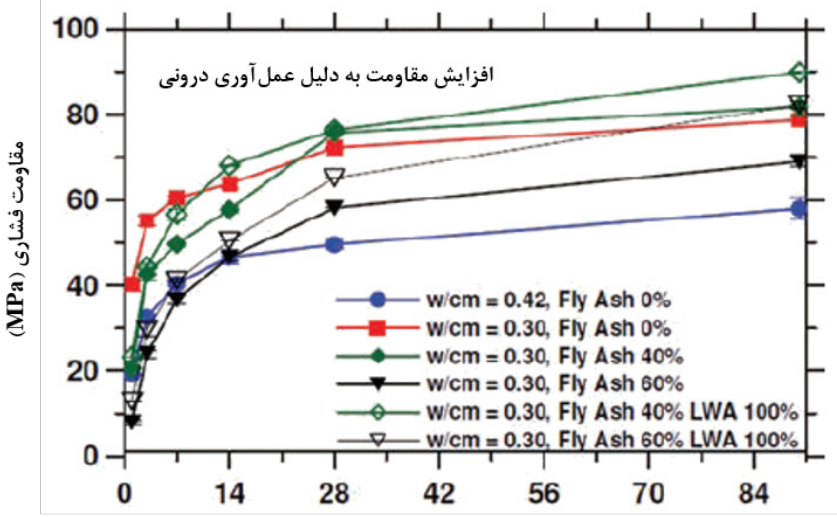
#### ۹-۴-۲- تاثیر عمل آوری درونی بر مقاومت بتن

تاثیر عمل آوری درونی بر مقاومت فشاری بتن، به طرح مخلوط، شرایط عمل آوری، و سن بتن در هنگام آزمایش بستگی دارد. در حالی که مخلوط های با عمل آوری درونی، می توانند به دلیل افزایش میزان هیدراته شدن چسباننده سیمانی، باعث افزایش مقاومت شوند، اما ممکن است کاهش مقاومت نیز مشاهده

شود زیرا عوامل عمل‌آوری درونی احتمالاً از نظر مکانیکی، از سنگدانه‌های با وزن معمولی که جایگزینشان می‌شوند، ضعیف‌تر هستند. در عمل، به دلیل این اثرات متناقض، هم افزایش و هم کاهش مقاومت مشاهده شده است (Hoff، ۲۰۰۳). به طور کلی، کاهش مقاومت در سنین کمتر در هنگام آزمایش (کمتر از ۷ روز) مشاهده می‌شود در حالی که افزایش مقاومت در سنین بیشتر در هنگام آزمایش حاصل می‌گردد. در ادامه، مروری بر مطالعات تجربی ارائه شده است. همچنین توجه شود که شرایط عمل‌آوری به همان اندازه مهم هستند.

Reinhardt و Weber (۱۹۹۹) تاثیر عمل‌آوری درونی را در مخلوطی با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳ بررسی کردند که در آن، ۱۰ درصد جرمی سیمان با دوده سیلیسی جایگزین شد. به منظور اعمال عمل‌آوری درونی، ۲۵ درصد ریزدانه با سبکدانه از پیش مرطوب شده جایگزین شد. پس از ۱ سال، اختلاف مقاومت آزمونه‌های آب‌بندی‌شده و آزمونه‌های دارای عمل‌آوری بیرونی مداوم، تنها ۳ درصد بود که نشان می‌دهد افزایش مقاومت ناشی از عمل‌آوری بیرونی در مقایسه با بتن‌هایی که عمل‌آوری درونی کافی در آن‌ها انجام ارائه شده، ناچیز است.

Lopez و همکاران (۲۰۰۸a)، با استفاده از سبکدانه از پیش مرطوب شده یا سبکدانه خشک‌شده در هوا در بخش درشت‌دانه، دو مخلوط بتن توانمند با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۲۳ و جایگزینی سیمان با ۱۵ درصد خاکستر بادی نوع F و ۱۰ درصد دوده سیلیسی را مقایسه کردند. پس از ۲۴ ساعت، هر دو مخلوط دارای مقاومت فشاری ۷۳ MPa بودند. با این حال، پس از ۱ سال، مخلوط دارای سبکدانه از پیش مرطوب شده دارای مقاومت فشاری ۸۸ MPa بود در حالی که بتن حاوی سبکدانه خشک‌شده در هوا، مقاومتی کمتر و معادل ۷۸ MPa ایجاد کرد. این موضوع نشان داد که عمل‌آوری درونی ایجاد شده توسط سبکدانه از پیش مرطوب شده، از طریق هیدراته‌شدن اضافی امکان ایجاد مقاومت فشاری بیشتر را درازمدت فراهم می‌کند.

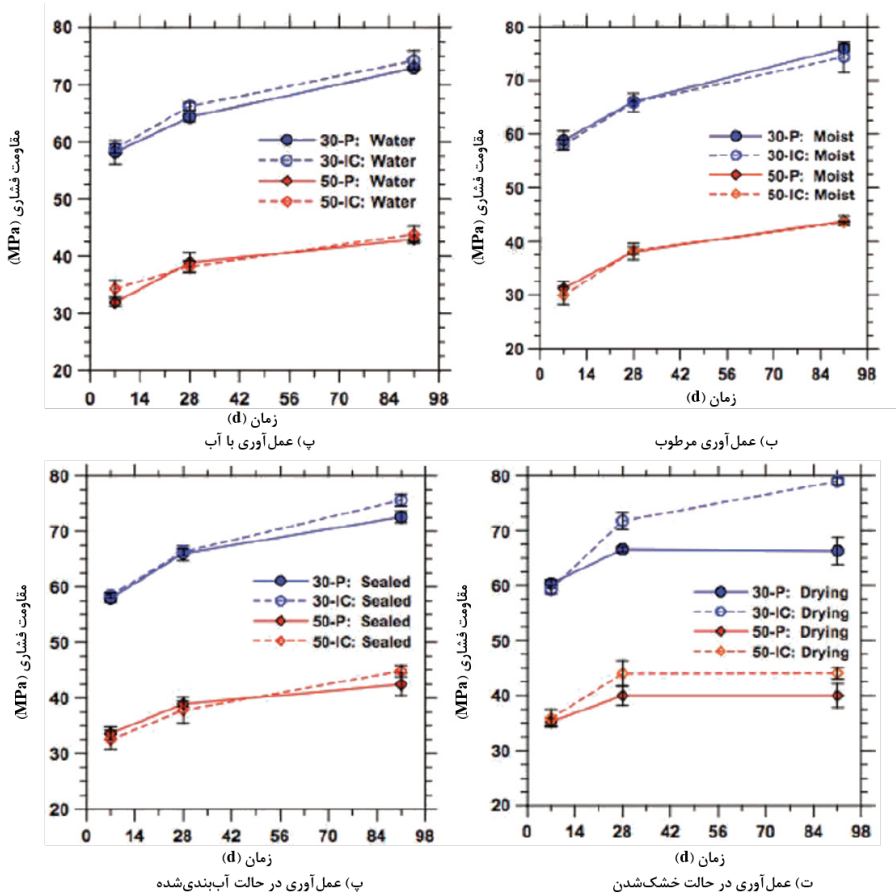


(d) زمان

شکل ۹-۲-الف - تاثیر عمل‌آوری درونی بر مقاومت افزایش‌یافته مخلوط‌های حاوی مواد سیمانی مکمل (De la Varga و همکاران، ۲۰۱۱)

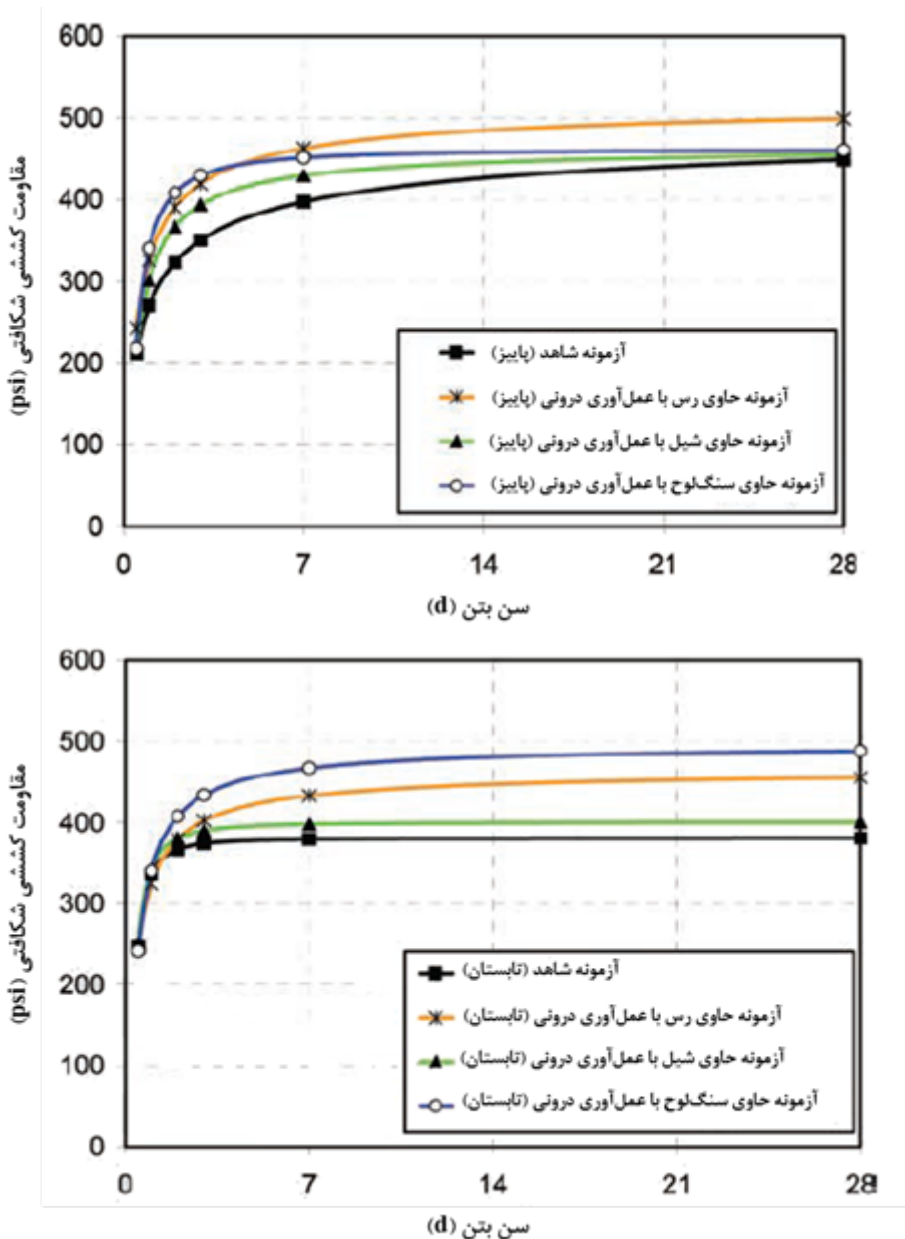


در بتن‌هایی با مواد سیمانی مکمل، عمل آوری درونی اغلب مقاومت را در سنین زیادتر افزایش می‌دهد، زیرا آب اضافی تامین شده توسط منابع عمل آوری درونی، برای واکنش‌های پوزولانی و هیدرولیکی طولانی مدت در دسترس است (Bentz, ۲۰۰۷). شکل ۹-۴-۲-الف، نمونه‌ای از افزایش مقاومت ملات‌های با حجم زیاد خاکستر بادی نوع C با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با  $0/30$  و طرح مخلوط مبتنی بر معادله (۹-۲) را نشان می‌دهد. در مخلوط‌های با حجم زیاد خاکستر بادی (با  $40$  یا  $60$  درصد جایگزینی حجمی سیمان با خاکستر بادی)، افزایش مقاومت مشاهده شد. علاوه بر این، مزایای عمل آوری درونی در سنین زیادتر به وضوح در شکل ۹-۴-۲-الف مشهود است، زیرا به دلیل تامین آب اضافی توسط سبکدانه برای افزایش هیدراته‌شدن خمیر، افزایش مقاومت در مخلوط‌های با عمل آوری درونی، بیشتر از مخلوط‌های ساده است. Golias (۲۰۱۰)، مزایای عمل آوری درونی را در چهار مخلوط ملات با نسبت آب به سیمان برابر با  $0/30$  یا  $0/50$  (با یا بدون عمل آوری داخلی) با چهار شرایط محیطی مختلف (خشک‌شدن در رطوبت نسبی  $50$  درصد، آب‌بندی‌شده، اتاق مرطوب یا غرقاب) مورد بررسی قرار داد. نتایج در شکل ۹-۴-۲-ب نشان داده شده است. در آزمون‌های عمل آوری شده با آب یا رطوبت، تفاوت کمی بین ملات با عمل آوری درونی و ملات ساده بدون عمل آوری درونی وجود دارد. این مورد قابل پیش‌بینی بود زیرا هر دو ملات، آب بیرونی کافی برای کمک به هیدراته‌شدن داشتند. با وجود اینکه در سنین اولیه، عملکرد آزمون‌های آب‌بندی شده مشابه آزمون‌های عمل آوری شده با رطوبت بود، ولی تاثیر آب اضافی عمل آوری در سنین بیشتر، به عنوان مثال در ۹۱ روز آشکار می‌شود. تاثیر عمل آوری درونی برای آزمون‌های نگهداری شده در محیط خشک‌کننده (رطوبت نسبی  $50$  درصد) بسیار چشمگیر است، به طوری که ملات ساده در مقایسه با مخلوط‌هایی که عمل آوری درونی داشتند، مقاومت بسیار کمتری نشان دادند.



شکل ۹-۴-۲-ب- تاثیر شرایط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری (Golias, ۲۰۱۰)

Schindler و Byard (۲۰۱۰) رفتار کششی شکافتی مخلوط‌های حاوی سبکدانه‌های ریز از جنس شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط‌شده که عمل‌آوری درونی شده بودند را در مقایسه با بتن معمولی بکار رفته در عرشه پل ارزیابی کردند. تنها تفاوت این مخلوط‌ها این بود که به جای ریزدانه با وزن معمولی از مقداری سبکدانه ریز استفاده شده بود. مخلوط‌های بتن تحت شرایطی ساخته و عمل‌آوری شدند که شرایط بتنی در فصل‌های تابستان و پاییز را شبیه‌سازی کنند. نتایج حاصل از این مطالعه در شکل ۹-۴-۲-پ خلاصه شده است. مقاومت کششی کلیه بتن‌های با عمل‌آوری درونی، در مقایسه با بتن شاهد با وزن معمولی، افزایش نشان دادند. افزایش مقاومت کششی تحت شرایط تابستانی بیشتر از شرایط پاییزی بود، که به اثرات عمل‌آوری درونی ربط داده شد. علاوه بر این، افزایش مقاومت کششی در اثر عمل‌آوری درونی در بتن‌های حاوی رس و شیل منبسط‌شده بیشتر از بتن حاوی سنگ‌لوح منبسط‌شده بود. این امر به این دلیل رخ داد که در این مخلوط‌های خاص، آب عمل‌آوری درونی بیشتری فراهم می‌شد که باعث افزایش هیدراته‌شدن اضافی سیمان گردید.

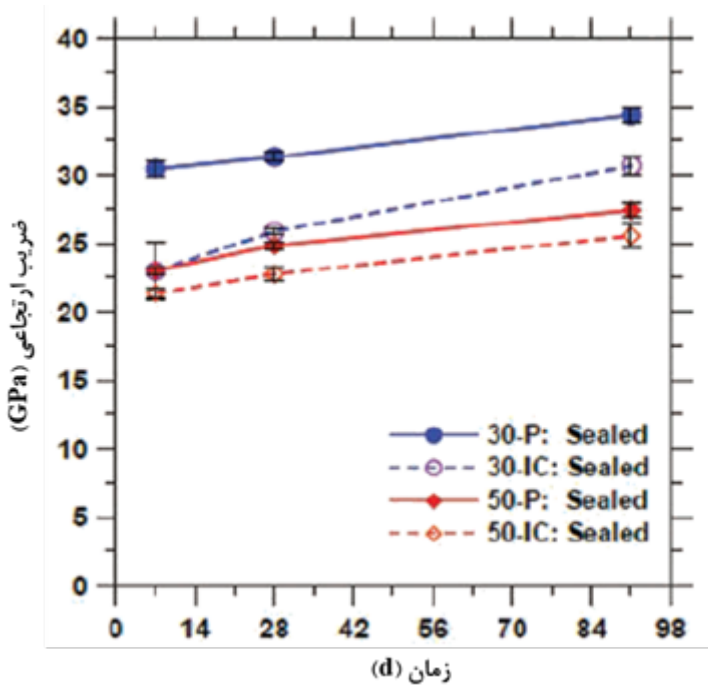


شکل ۹-۴-۲ پ- تاثیر عمل آوری درونی بر مقاومت کششی شکافی برای آزمون‌های عمل آوری شده در شرایط پاییزی و تابستانی (Schindler و Byard، ۲۰۱۰)

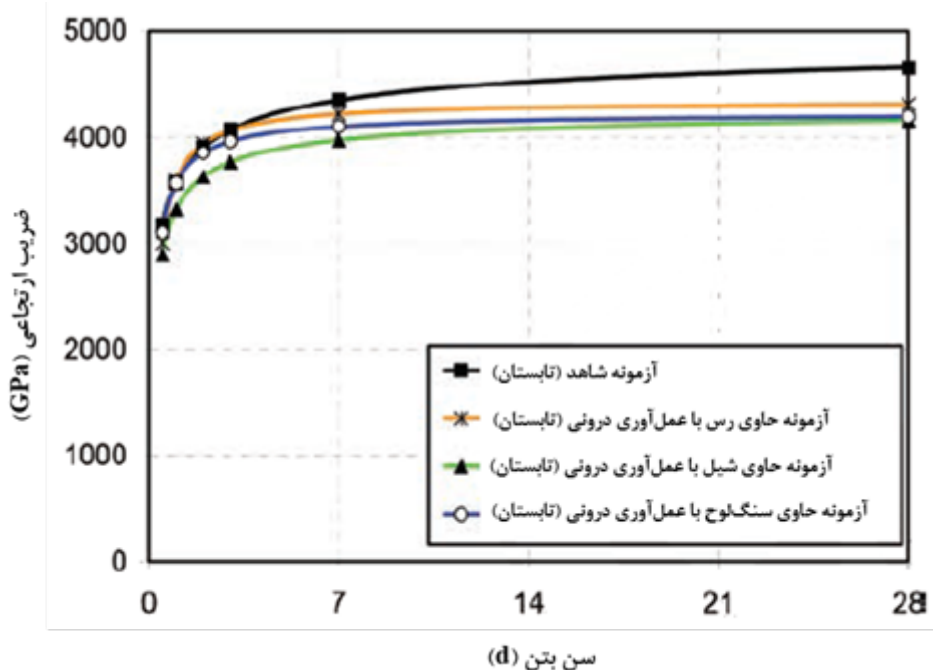
Lopez و Paul (۲۰۱۱)، اثرات سودمند عمل آوری درونی را از نقطه نظر هیدراته شدن، با ظرفیت سازه‌ای برخی از سبکدانه‌ها مرتبط کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ترکیب ظرفیت پس‌دادن آب و مقاومت ذاتی سبکدانه، اثر عمل آوری درونی بر مقاومت فشاری بتن را به حداکثر می‌رساند.

### ۳-۴-۹- تاثیر عمل‌آوری درونی بر ضریب ارتجاعی

تاثیر عمل‌آوری درونی بر ضریب ارتجاعی در شکل ۹-۴-۳-الف نشان داده شده است. به طور کلی، ضریب ارتجاعی سامانه‌های حاوی سبکدانه کمتر است. تاثیر سبکدانه در سامانه دارای نسبت آب به سیمان کمتر، قابل توجه‌تر است زیرا ضریب ارتجاعی خمیر بیشتر است. ضریب ارتجاعی کمتر همچنین می‌تواند با کاهش تنش پسماند و کاهش استعداد ترک خوردگی مرتبط باشد (Weiss و همکاران، ۱۹۹۹؛ Shah و Weiss، ۲۰۰۰؛ Shin و همکاران، ۲۰۱۱). Raoufi و همکاران (۲۰۱۱)، برای درک بهتر تاثیر کاهش سختی بتن بر استعداد ترک خوردگی در سنین کم، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها را انجام دادند. مشخص شد که معمولاً به دلیل کاهش ضریب ارتجاعی ناشی از وجود سبکدانه در سامانه‌های با عمل‌آوری درونی، تنش‌های ایجاد شده تقریباً ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابند.



شکل ۹-۴-۳-الف- تاثیر عمل‌آوری درونی بر ضریب ارتجاعی بتن آب‌بندی‌شده (Golias، ۲۰۱۰)



شکل ۹-۳-۴-ب- تاثیر عمل آوری درونی بر ضریب ارتجاعی آزمون‌های عمل آوری شده در شرایط تابستانی (Byard و Schindler، ۲۰۱۰)

Byard و Schindler (۲۰۱۰) نیز رفتار ضریب ارتجاعی مخلوط‌های حاوی سبکدانه‌های ریز از جنس شیل، رس و سنگ‌لوح منبسط شده با عمل آوری درونی را در مقایسه با بتن با وزن معمولی بکار رفته در عرشه پل ارزیابی کردند. نتایج حاصل از این مطالعه در شکل ۹-۳-۴-ب خلاصه شده است. استفاده از سبکدانه در بتن، وزن مخصوص و در نتیجه ضریب ارتجاعی بتن را کاهش داد. تاثیر استفاده از سبکدانه بر ضریب ارتجاعی، با دقت قابل قبولی با استفاده از معادله (۹-۳-۴) در نظر گرفته شد (ACI318).

$$E_c = 33w_c^{1.5} \sqrt{f_c} \quad (۹-۳-۴)$$

#### ۹-۴-۴- تاثیر عمل آوری درونی بر خزش

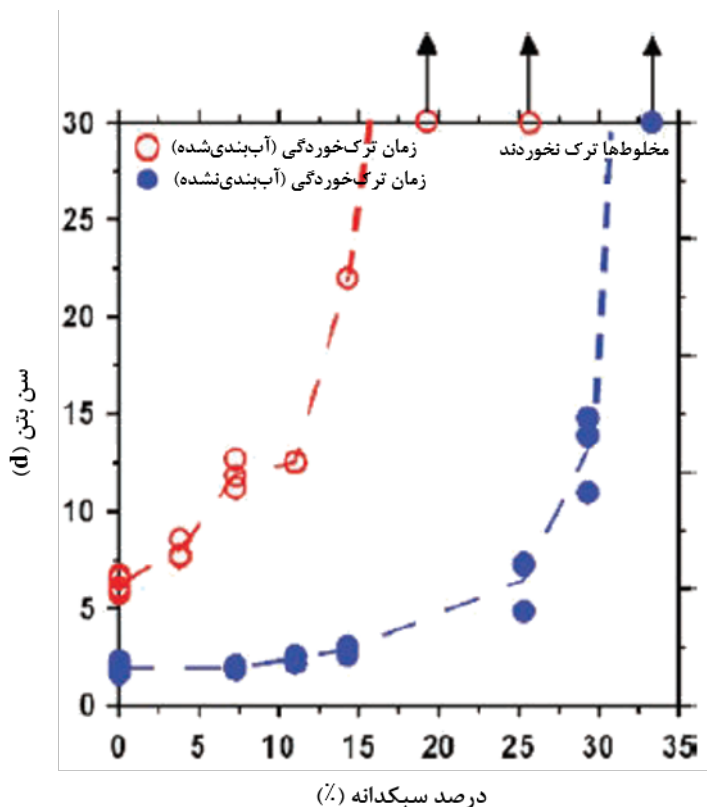
مطالعات کمی در مورد خزش سامانه‌های با عمل آوری درونی انجام شده است. Lopez (۲۰۰۵) و Lopez و همکاران (۲۰۰۸a، ۲۰۰۸b) نشان دادند که آب ذخیره شده درونی، خزش پایه و خزش ناشی از خشک شدن مخلوط‌های بتنی سبکدانه توانمندی که در سن ۱ و ۲۸ روز بارگذاری و به مدت ۵۰۰ روز تحت بار نگه داشته شده بودند را کاهش داد. کاهش خزش در اثر هیدراته شدن اضافی، انبساط ناشی از عمل آوری درونی و جلوگیری از تراوش آب بود. بر عکس، Cusson و Hoogetveen (۲۰۰۵) افزایش نسبتا کمی را در ضریب خزش کششی مخلوط‌های بتن با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳۴ و عمل آوری درونی شده به مدت ۷ روز را در مقابل یک مخلوط شاهد اندازه گیری کردند.

### ۵-۴-۹- تاثیر عمل‌آوری درونی بر تغییر حجم و ترک‌خوردگی

یکی از مهم‌ترین مزایای داشتن آب ذخیره‌شده درونی، کاهش یا حذف خودخشکیدن و جمع‌شدگی مرتبط با آن است. چندین محقق استفاده از عمل‌آوری درونی برای کاهش جمع‌شدگی خودزا را بررسی کرده‌اند (Kohno و همکاران، ۱۹۹۹؛ Bentz و Snyder، ۱۹۹۹؛ Bentur و همکاران، ۱۹۹۹؛ Hansen و Jensen، ۲۰۰۲؛ Zhutovsky و همکاران، ۲۰۰۲؛ a، ۲۰۰۲؛ b، ۲۰۰۲؛ Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۸). همه محققین به این نتیجه رسیدند که مخلوط‌های حاوی سبکدانه نسبت به مخلوط‌های بدون عمل‌آوری درونی جمع‌شدگی خودزای بسیار کمتری داشتند. برخی از مخلوط‌های استفاده شده در این مطالعات منبسط نیز شدند.

Radlinska و همکاران (۲۰۰۸)، تفاوت‌های بین جمع‌شدگی بتن آب‌بندی‌شده (جمع‌شدگی خودزا) و جمع‌شدگی بتن بدون آب‌بندی (جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن) را برای مخلوط‌های با عمل‌آوری درونی نشان دادند. مزیت کاهش جمع‌شدگی خودزا یا به تاخیر انداختن جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن (Bentz، ۲۰۰۵؛ Cusson و Hoogeveen، ۲۰۰۸؛ Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۹؛ a)، قابلیت به تاخیر انداختن ترک‌خوردگی یا حذف آن است. شکل ۹-۴-۵-الف، سن ترک‌خوردگی این مخلوط‌ها را به صورت تابعی از مقدار عمل‌آوری درونی، به عنوان مثال حجم سبکدانه استفاده شده، نشان می‌دهد. توجه شود که درصد سبکدانه‌ای که مطابق با درصد پیش‌بینی‌شده توسط معادله (۹-۲) تخمین زده می‌شود، معادل ۲۳/۷ درصد حجمی است. مخلوط‌هایی که علاوه بر جمع‌شدگی خودزا، در معرض خشک‌شدن نیز قرار می‌گیرند، نسبت به مخلوط‌هایی که فقط جمع‌شدگی خودزا را تجربه می‌کنند، احتمال ترک‌خوردگی بیشتری دارند. با افزایش حجم سبکدانه، سن ترک‌خوردگی تا زمانی که منحنی به یک خط مجانب می‌رسد، به تاخیر می‌افتد.

شکل ۹-۴-۵-ب، علاوه بر کاهش استعداد ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خودزا، نمونه‌هایی از ایجاد تنش کششی باقیمانده در یک مخلوط ساده و مخلوطی با عمل‌آوری درونی را نشان می‌دهد (Schlit-ter، ۲۰۱۰). با کاهش تنش که به دلیل جمع‌شدگی خودزا ایجاد می‌شود، ظرفیت ذخیره بیشتری در ملات عمل‌آوری درونی شده برای مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از بارگذاری حرارتی، بارگذاری اعمالی یا هر دو وجود دارد. در یک سازه بتنی معمولی، دما در چند روز اول عمل‌آوری به دلیل گرمای آزاد شده از واکنش‌های هیدراته‌شدن افزایش و سپس به سمت دمای محیط کاهش می‌یابد. همان‌طور که سازه از دمای بیشینه خود تا دمای محیط سرد می‌شود، ممکن است ترک‌خوردگی حرارتی رخ دهد. در ۷۲ ساعت اول، هنگامی که دما تا مقدار  $32^{\circ}\text{C}$  کاهش یافت، هیچ ترک‌خوردگی در آزمون‌های با عمل‌آوری درونی رخ نداد. زمانی که دما فقط به میزان  $10^{\circ}\text{C}$  یا  $12^{\circ}\text{C}$  کاهش یافت، آزمون‌های‌های ساخته‌شده با ملات ساده ترک خوردند. این موضوع برای مصالحی که در سنین اولیه با عمل‌آوری درونی ساخته شده‌اند، افزایش قابل توجهی در استحکام بالقوه در مقابل تکانه حرارتی، سردشدن یا تغییرات دمای روزانه را نشان می‌دهد.



۹-۴-۵- الف- تاثیر عمل آوری درونی بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی محدود شده (Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۹a)

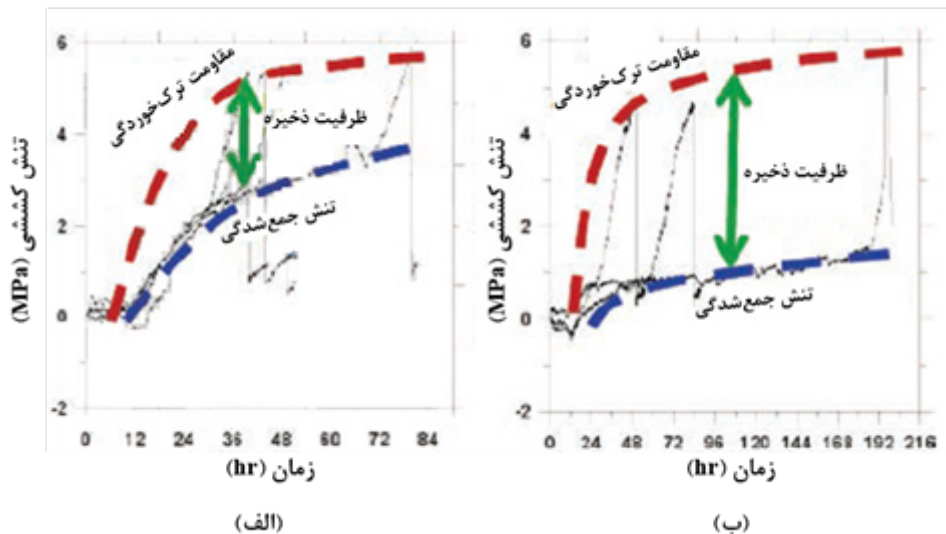
Byard و Schindler (۲۰۱۰)، تاثیر استفاده از سبکدانه برای عمل آوری درونی، بر تمایل ترک خوردگی بتن عرشه پل را با روش آزمایش قاب صلب ترک خوردگی<sup>۱۶۵</sup> (RCF) ارزیابی کردند. قاب صلب ترک خوردگی مورد استفاده (شکل پ - ۹-۴-۵ الف))، از پیکربندی بکار رفته در RILEM Technical Committee 119 (۱۹۹۸) اقتباس شده است. چیدمان مورد استفاده برای آزمایش<sup>۱۶۶</sup>، امکان اندازه گیری ایجاد تنش های ناشی از اثرات جمع شدگی حرارتی و خودزرا را، از شروع آزمایش تا زمان شروع ترک خوردگی فراهم کرد. به منظور شبیه سازی تاریخچه تغییرات دمای بتن برای هر مخلوط خاص، آن گونه که در یک عرشه پل با ضخامت ۲۰۰ mm ایجاد می شود، دمای آزمون ها کنترل شد. نتایج این مطالعه برای حالت بتن ریزی در فصل پاییز، در بخش های جنوب شرقی ایالات متحده، در شکل پ-۹-۴-۵ (ب) ارائه شده است. Byard و Schindler (۲۰۱۰) به این نتیجه رسیدند که با استفاده از سبکدانه برای تولید بتن های با عمل آوری درونی، در مقایسه با بتن شاهد با وزن معمولی، وقوع ترک خوردگی در سنین اولیه بتن عرشه

<sup>165</sup> Rigid Cracking Frame

<sup>166</sup> Test setup



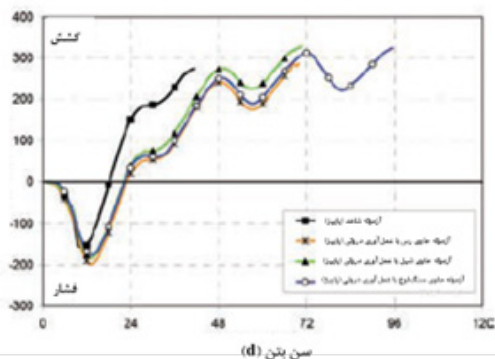
پل به تاخیر می‌افتد. این بهبود رفتار ترک‌خوردگی به افزایش مقاومت کششی و کاهش ضریب ارتجاعی، ضریب انبساط حرارتی و جمع‌شدگی خودزای بتن‌های با عمل‌آوری درونی در مقایسه با بتن شاهد با وزن معمولی ربط داده شده است.



۹-۴-۵-ب- تاثیر عمل‌آوری درونی بر ایجاد تنش باقیمانده و ظرفیت تنش ذخیره. (الف) مخلوط خالص؛ و (ب) مخلوط با عمل‌آوری درونی (Schlitter و همکاران، ۲۰۱۰)



(الف)

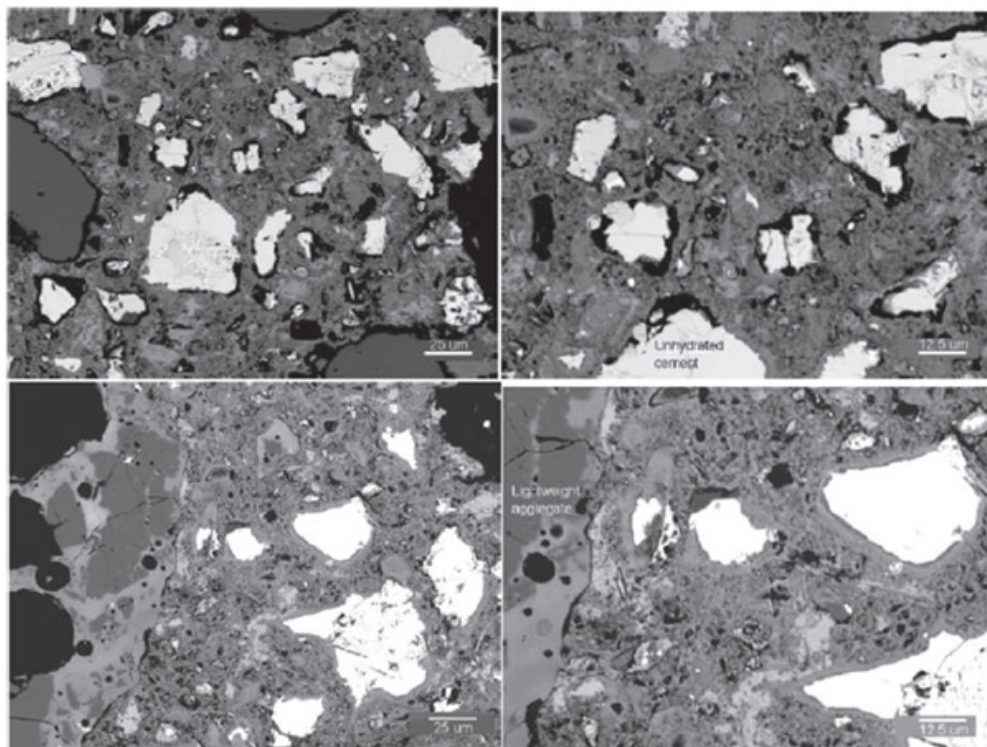


(ب)

شکل ۹-۴-۵-پ- (الف) قاب صلب ترک‌خوردگی مورد استفاده؛ و (ب) تاثیر عمل‌آوری درونی بر ایجاد تنش محدود شده برای آزمون‌های عمل‌آوری شده در شرایط پاییزی (Byard و Schindler، ۲۰۱۰)

### ۶-۴-۹- اثر عمل آوری درونی بر تخلخل

ریزساختار ملات‌های توانمند با سیمان آمیخته، با یا بدون عمل آوری درونی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط Bentz و Stutzman (۲۰۰۸) مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه تصاویر مربوط به سیمان‌های آمیخته با دوده سیلیسی به عنوان نمونه در شکل ۹-۴-۶ ارائه شده، اما سیمان‌های آمیخته با خاکستر بادی و سرباره نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Cusson, ۲۰۰۸). ریزساختار آزمون‌های با عمل آوری درونی، برخلاف آزمون‌های بدون عمل آوری درونی، شامل ذرات سیمان هیدراته نشده کمتر و کوچک‌تر (نشان‌دهنده هیدراته شدن اضافی)، منافذ خالی کمتر و کوچک‌تر (نشان‌دهنده خودخشکیدن کمتر) و ناحیه انتقالی (ITZ) متراکم‌تر و همگن‌تر بین سبکدانه‌ها و خمیر سیمان در حال هیدراته شدن است، که در مطالعات قبلی بتن سبکدانه مشاهده شده است (Holm و همکاران، ۱۹۸۴).



شکل ۹-۴-۶- تصاویر *BSE/SEM* از ریزساختارهای ملات حاوی سیمان آمیخته با دوده سیلیسی بدون عمل آوری درونی (بالا) و با عمل آوری درونی (پایین) در بزرگنمایی کم (چپ) و زیاد (راست) (Stutzman و Bentz, ۲۰۰۸). مقیاس خطی هر عکس در گوشه پایین سمت راست قرار داده شده است.

## ۷-۴-۹- تاثیر عمل‌آوری درونی بر انتقال سیالات

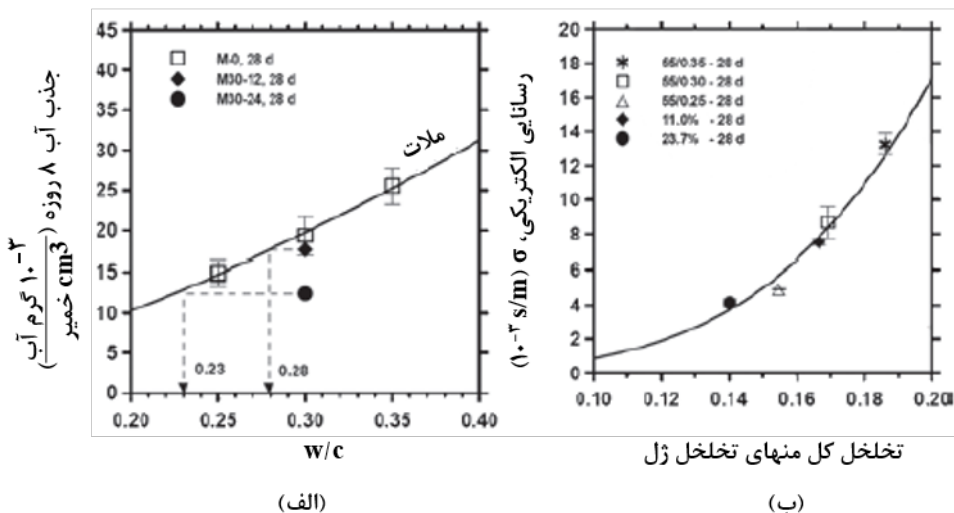
عمل‌آوری درونی، به کاهش نفوذپذیری ناشی از افزایش قابل توجه زمان عمل‌آوری متکی است. Pow-ers و همکاران (۱۹۵۹) نشان دادند که افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش حجم محصولات سیمانی تشکیل شده می‌شود که متعاقباً باعث بندبندشدن و از بین رفتن پیوستگی منافذ مویینه می‌گردند. Weber و Reinhardt (۱۹۹۷)، با وجود عدم استفاده از عمل‌آوری بیرونی برای هیدراته‌شدن بیشتر، کاهش قابل توجهی در اندازه متوسط منافذ بتن حاوی سبکدانه از پیش مرطوب شده در زمان بین ۱۸۰ و ۳۶۵ روز بدست آوردند. Thomas (۲۰۰۶)، کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری در برابر یون کلرید مخلوط بتن حاوی سبکدانه از پیش مرطوب شده در زمان بین ۱ تا ۳ سال یافت. Zhang و Gjorv (۱۹۹۱) مشاهده کردند که نفوذپذیری بتن سبکدانه پرمقاومت، بیش از تخلخل سبکدانه، به ویژگی‌های خمیر سیمان بستگی دارد. Espinoza-Hijazin و Lopez (۲۰۱۱)، نقش عمل‌آوری درونی را به عنوان روشی برای تقابل با عمل‌آوری ضعیف در کارگاه بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که عمل‌آوری درونی می‌تواند آب از دست‌رفته در اثر خشک‌شدن را جبران کند و به طور متوسط، درجه هیدراته‌شدن را ۱۵ درصد افزایش دهد.

Pyc و همکاران (۲۰۰۸) و Castro و همکاران (۲۰۱۱)، اندازه‌گیری‌های گسترده‌ای را انجام دادند که نشان می‌دهد زمانی که منافذ سبکدانه در فرآیند عمل‌آوری درونی، با رساندن آب به سیمان در حال هیدراته‌شدن خالی می‌شوند، دیگر حتی پس از غوطه‌ور شدن کامل آزمون، مجدداً اشباع نمی‌شوند.

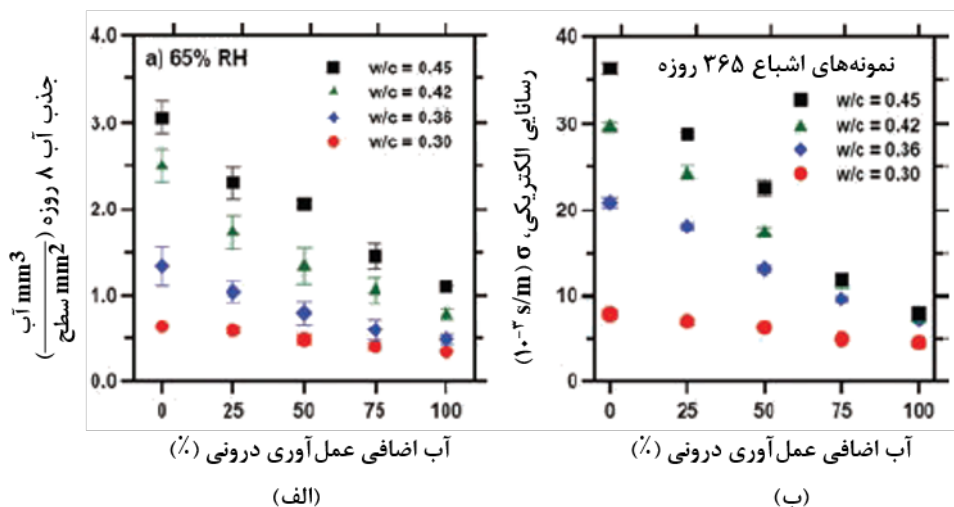
نواحی انتقالی اطراف سنگدانه‌های با وزن معمولی، اغلب متخلخل‌تر از توده خمیر سیمان هیدراته هستند و می‌توانند مسیرهای مناسبی را برای ورود مواد مضر فراهم کنند (Halamicckova و همکاران، ۱۹۹۵). ناحیه انتقالی ایجاد شده بین سبکدانه و خمیر سیمان اطراف آن، متراکم‌تر و همگن‌تر از ناحیه انتقالی ایجاد شده بین سنگدانه با وزن معمولی و خمیر سیمان اطراف آن است (Bentz، ۲۰۰۹؛ Peled و همکاران، ۲۰۱۰). Bentz و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که عمق نفوذ یون کلرید در ملات با عمل‌آوری درونی، ۲۰ تا ۴۰ درصد نسبت به مخلوط مرجع بدون عمل‌آوری درونی کاهش می‌یابد. Henkensiefken و همکاران (۲۰۰۹)، ویژگی‌های جذب مویینه ملات‌های آماده شده با یا بدون عمل‌آوری درونی را همانطور که در شکل ۷-۴-۹-الف (الف) نشان داده شده است، بررسی کردند. مطابق شکل ۷-۴-۹-الف (الف)، مخلوط‌های با عمل‌آوری درونی (۱۱ درصد یا ۲۳/۷ درصد حجمی سبکدانه) رفتار جذب مویینه مشابه با ملات بدون عمل‌آوری درونی با نسبت بسیار کمتر آب به سیمان (در حدود ۰/۲۳) نشان دادند. علاوه بر این، رسانایی الکتریکی آزمون‌های با عمل‌آوری درونی، حتی زمانی که قبل از اندازه‌گیری، در خلاء اشباع شده بودند، کاهش یافت (شکل ۷-۴-۹-الف (ب)).

مطابق شکل ۷-۴-۹-ب، این مزایای عمل‌آوری درونی به مخلوط‌های با نسبت کم آب به سیمان محدود نمی‌شود (Castro، ۲۰۱۱). در حالی که نتایج در سنین اولیه تاثیر عمل‌آوری درونی را ناچیز نشان می‌دهد، مقدار کل آب جذب شده با افزایش مقدار سبکدانه برای همه نسبت‌های آب به سیمان مورد بررسی، کاهش می‌یابد (عمل‌آوری درونی ۱۰۰ درصد، با حجم آب پیش‌بینی شده از معادله (۹-۲) مطابقت دارد).

آزمایش‌های رسانایی الکتریکی که یک سال پس از ساخت، روی نمونه‌های آب‌بندی شده انجام شد نیز، کاهش رسانایی الکتریکی را هنگام استفاده از عمل آوری درونی نشان می‌دهند.



شکل ۹-۴-الف-۷-الف) تاثیر عمل آوری درونی بر جذب آب؛ و (ب) تاثیر عمل آوری درونی بر رسانایی الکتریکی (Henkensiefken و همکاران، ۲۰۰۹)



شکل ۹-۴-ب-۷-الف) تاثیر عمل آوری درونی بر جذب آب و رسانایی الکتریکی نمونه‌های دارای نسبت‌های آب به سیمان متفاوت

## ۵-۹- تجربیات میدانی

عمل‌آوری درونی در طیف وسیعی از مخلوط‌های بتن برای کاربردهای مختلف از جمله عرشه‌های پل، روسازی‌ها، محوطه‌های بین‌راهی<sup>۱۶۷</sup> و مخازن آب استفاده شده است (Mohr و Bentz، ۲۰۰۸). یکی از اولین مطالعات میدانی ثبت شده بتن با عمل‌آوری درونی، یک محوطه عظیم بین‌راهی راه‌آهن در تگزاس بود (Vil-larreal، ۲۰۰۸). در این کاربرد، سبکدانه‌ای با اندازه متوسط، با سنگدانه‌های با وزن معمولی مخلوط شد تا گسستگی<sup>۱۶۸</sup> موجود در دانه‌بندی کلی سنگدانه‌ها پر شود. عمل‌آوری درونی فراهم شده توسط سبکدانه با اندازه متوسط از پیش مرطوب شده، به افزایش بیش از ۱۵ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه، از بین رفتن ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، و کاهش وزن مخصوص بتن که می‌تواند به کاهش سوخت موردنیاز و کاهش استهلاک تجهیزات شود (Crocker و Villarreal، ۲۰۰۷). از سال ۲۰۰۷، چندین بررسی غیررسمی ترک در این محوطه راه‌آهن انجام و تنها دو یا سه ترک یافت شده است. در سال ۲۰۰۶، عمل‌آوری درونی برای روسازی بتنی مسلح پیوسته<sup>۱۶۹</sup> (CRCP) که با استفاده از ماشین روسازی قالب لغزنده<sup>۱۷۰</sup> ریخته شده بود، بکار گرفته شد (Reeves و Friggle، ۲۰۰۸). ۱۰ ماه پس از اجرای موفقیت‌آمیز روسازی، بررسی ترک خوردگی، کاهش چشم‌گیر تعداد ترک‌ها (۲۱ در مقابل ۵۲ در یک مقطع قابل مقایسه بتن معمولی) و کاهش قابل توجه عرض ترک‌های اندازه‌گیری شده را، برای مقطع آزمایشی که با استفاده از مخلوط با عمل‌آوری درونی نسبت به مقطع شاهد اجرا شده با مخلوط استاندارد اداره حمل‌ونقل تگزاس (TxDOT) نشان داد (Reeves و Friggle، ۲۰۰۸)

عمل‌آوری درونی در پل‌های نیویورک، اوهایو و ایندیانا استفاده شده است. در اوهایو، اداره حمل‌ونقل از بتن توانمند اصلاح‌شده‌ای (رده شماره ۴) استفاده کرد که حاوی  $3 \text{ kg/m}^3$  ۳۵۶ مواد سیمانی و دوده سیلیسی به همراه جایگزینی ماسه طبیعی با  $3 \text{ kg/m}^3$  ۱۲۰ سبکدانه بود. مخلوط، بدون هیچ مشکلی به عرشه پمپ شد. مقاومت این مخلوط، مشابه یا بیشتر از مخلوط معمولی بدون عمل‌آوری درونی گزارش شد. اداره حمل‌ونقل نیویورک (NYDOT) با استفاده از طرح مخلوط ویژه‌ای مشابه طرح مخلوط معمول عرشه آن‌ها (حدوداً  $3 \text{ kg/m}^3$  ۳۸۵ مواد سیمانی با دوده سیلیسی)، که در آن  $3 \text{ kg/m}^3$  ۱۲۰ از سبکدانه ریز استفاده شد (Streeter و همکاران، ۲۰۱۱)، در ۹ پل از عمل‌آوری درونی استفاده کرد. در پل خیابان Court، که یک پل سنگی قوسی واقع در Rochester است، در زمانی بین ۷ تا ۲۸ روز پس از استفاده از عمل‌آوری درونی، افزایش ۲ تا ۱۰ درصدی مقاومت مشاهده شد. همچنین در پل جاده Bartell واقع در Onondaga County، ۷ روز پس از استفاده از عمل‌آوری درونی، کاهش ۵ درصدی مقاومت و ۲۸ روز پس از آن، افزایش ۱۵ درصدی مقاومت مشاهده گردید (Streeter و همکاران، ۲۰۱۱). در مباحث اداره حمل‌ونقل نیویورک، گزارش شد (Streeter و همکاران، ۲۰۱۱) که هیچ‌گونه نکته منفی مرتبط با استفاده از عمل‌آوری درونی وجود ندارد؛ با این حال، مزایای بالقوه استفاده از آن همچنان باید از طریق مقایسه با مصالح عرشه پل بتنی معمولی سنجیده

<sup>167</sup> Transit yards

<sup>169</sup> Continuously reinforced concrete pavement

<sup>168</sup> Gap

<sup>170</sup> Slip-form paving machine

شود. اداره حمل و نقل نیویورک، اجازه پمپ کردن این بتن ها را می دهد و هیچ مشکلی در این زمینه گزارش نشده است. درصد هوای بتن معمولاً با استفاده از هواسنج کنترل می شود.

در سپتامبر ۲۰۱۰، دو پل در مجاورت یکدیگر در Monroe County، واقع در ایالت ایندیانا در خارج از شهر Bloomington ساخته شد (DiBella و همکاران، ۲۰۱۲ a، ۲۰۱۲ b). پل ها مجموعه ای از شاهتیرهای صندوقه ای بودند و در یک مورد، یک رویه فوقانی با ضخامت ۱۰۰ mm، با مخلوط معمولی کلاس C اداره حمل و نقل ایندیانا (INDOT) ساخته شد. مخلوط ها مشابه بودند؛ با این تفاوت که تقریباً از  $240 \text{ kg/m}^3$  سبکدانه ریز استفاده شد. سبکدانه مورد استفاده در ایندیانا، نسبت به سبکدانه مورد استفاده در اوهایو یا نیویورک، جذب کمتری داشت (تقریباً ۱۰ درصد جرمی در مقابل ۱۶ درصد جرمی). مزیت ساخت همزمان این عرشه ها با مواد مشابه و با استفاده از روش های مشابه ساخت، این است که عملکرد میدانی به صورت مستقیم مقایسه می شود. تقریباً ۴۰ روز پس از ساخت، پل ها بررسی شدند و هیچ ترک خوردگی در دو عرشه مشاهده نشد. در مخلوط بتن با عمل آوری درونی، مقاومت بیشتر و ویژگی های انتقالی کمتر برای سیال اندازه گیری شده است.

### ۶-۹- گزینه عمل آوری درونی و اثرات احتمالی آن بر توسعه پایدار

مخلوط های با عمل آوری درونی، ویژگی های مکانیکی مشابه یا بهتر، کاهش خطر ترک خوردگی و کاهش نفوذ یون کلرید را نشان می دهند. هزینه های اضافی بتن با عمل آوری درونی، بین ۰ تا ۱۴ درصد هزینه مصالح برآورد شده است. عمل آوری درونی ممکن است به کنترل کیفیت اضافی و مدیریت بیشتر سنگدانه نیاز داشته باشد. با گذشت زمان و افزایش آشنایی با عمل آوری درونی، انتظار می رود فرصت های جدیدی برای استفاده از عمل آوری درونی ایجاد شود.

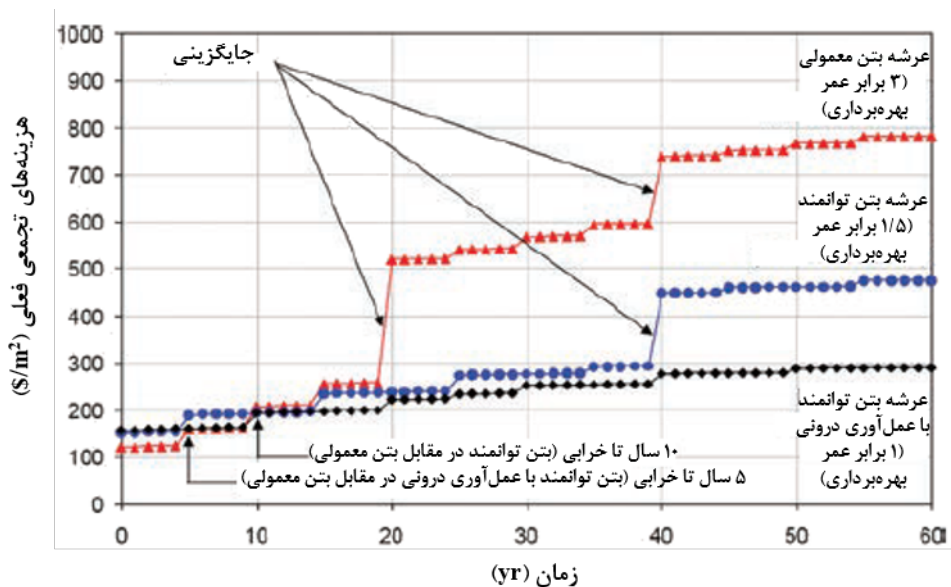
عمل آوری درونی، تنها یکی از ابزارهای متعددی است که می تواند توسعه پایدار قطعات بتنی را افزایش دهد. عمل آوری درونی، استعداد بهبود دوام و کاهش هزینه های طول عمر سازه های بتنی را دارد. Cusson و همکاران (۲۰۱۰)، عمر بهره برداری عرشه های پل بتنی توانمند فرضی را، با یا بدون عمل آوری درونی مقایسه کردند. فرض بر این بود که عرشه بتنی توانمند بدون عمل آوری درونی، در سنین پایین، ترک خوردگی خودزا و حرارتی از خود نشان می دهد. همچنین، فرض بر این بود که بتن توانمند با عمل آوری درونی، در سنین پایین، چنین ترک خوردگی را از خود نشان نمی دهد و ۲۵ درصد کاهش بیشتر در ضریب انتشار مورد انتظار ایجاد کرد. بر اساس فرض های مذکور و سایر مفروضات، عمر بهره برداری تخمینی برای بتن معمولی برابر ۲۲ سال، برای بتن توانمند بدون عمل آوری درونی ۴۰ سال، و برای بتن توانمند با عمل آوری درونی ۶۳ سال بدست آمد (شکل ۹-۶). در این مورد، عمل آوری درونی باید عرشه پلی را تولید کند که عمر بهره برداری آن بیشتر و هزینه طول عمر آن بطور قابل توجهی کمتر باشد.

مطالعه ای جدید، با استفاده از مواد سیمانی مکمل نشان داده است که می توان از کلینکر سیمانی بسیار کمتری در مخلوط استفاده کرد، که منجر به ایجاد کربن<sup>۱۷۱</sup> کمتری می شود (De la Varga و همکاران،

<sup>171</sup> Carbon footprint



۲۰۱۱). این موضوع ممکن است برای مخلوط‌های حاوی پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین سیمان نیز صادق باشد (Bentz و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۹-۶- مقایسه هزینه‌های تجمعی فعلی گزینه‌های مختلف عرشه در سه پل (Cusson و همکاران، ۲۰۱۰)



CHAPTER 10—REFERENCES

Committee documents are listed first by document number and year of publication followed by authored documents listed alphabetically.

*American Concrete Institute*

*ACI 201.1R-08—Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service*

*ACI 201.2R-08—Guide to Durable Concrete*

*ACI 209.1R-05—Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete*

*ACI 209.2R-08—Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*

*ACI 211.1-91—Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)*

*ACI 211.2-98—Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (Reapproved 2004)*

*ACI 216.1-07—Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*

*ACI 231R-10—Report on Early-Age Cracking: Causes, Measurement and Mitigation*

*ACI 232.2R-03—Use of Fly Ash in Concrete*

*ACI 233R-03—Slag Cement in Concrete and Mortar (Reapproved 2011)*

*ACI 234R-06 Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (Reapproved 2012)*

*ACI 302.1R-04—Guide for Concrete Floor and Slab Construction*

*ACI 304R-00—Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete (Reapproved 2009)*

*ACI 304.2R-96—Placing Concrete by Pumping Methods (Reapproved 2008)*

*ACI 308.1-11—Specification for Curing Concrete ACI 309R-05—Guide to Consolidation of Concrete*

*ACI 318-11—Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

*ACI 318-08—Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

*ACI 318-95—Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

*ASTM International*

*ASTM C31/C31M-12—Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*

*ASTM C33/C33M-13—Standard Specification for Concrete Aggregates*

*ASTM C78/C78M-10—Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*

*ASTM C94/C94M-14—Standard Specification for Ready Mixed Concrete*

*ASTM C127-12—Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*

*ASTM C128-12—Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*

*ASTM C138/C138M-13—Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*

*ASTM C143/C143M-12—Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*

*ASTM C150/C150M-12—Standard Specification for Portland Cement*

*ASTM C172/C172M-10—Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete*

*ASTM C173/C173M-12 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method*

*ASTM C177-13—Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus*

*ASTM C188-09—Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*

*ASTM C231/C231M-10—Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*

*ASTM C260/C260M-10—Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*

*ASTM C330/C330M-13—Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*

*ASTM C331/C331M-10—Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units*

*ASTM C332-09—Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete*

*ASTM C469/C469M-10—Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*

*ASTM C494/C494M-13—Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*

*ASTM C496/C496M-11—Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*

*ASTM C512/C512M-10—Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression*

*ASTM C567/C567M-11—Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete*

*ASTM C595/C595M-13—Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*

*ASTM C618-12—Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*

*ASTM C666/C666M-03(2008)—Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*

*ASTM C1017/C1017M-07—Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*

*ASTM C1157/C1157M-11—Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*

*ASTM C1240-12—Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*

*ASTM E119-12—Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*

*National Institute of Standards and Technology*

*NISTIR 6265-1999—A Hard Core/Soft Shell Microstructural Model for Studying Percolation and Transport in Three-Dimensional Composite Media*

*NISTIR 776-2011—Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review*

*Authored documents*

*AASHTO, 1994, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications," American Association*

*of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC.*

AASHTO, 1995, "Standard Specification for Highway Bridges," American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC.

Abrams, M. S., 1971, "Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F," *Temperature and Concrete, SP-25, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 33-58.*

Abrams, M. S., and Gustaferro, A. H., 1968, "Fire Endurance of Concrete Slabs as Influenced by Thickness, Aggregate Type, and Moisture," *Journal of the PCA Research and Development Laboratories, V. 10, No. 2, pp. 9-24.*

ACI Committee 408, 1966, "Bond Stress—The State of the Art," *ACI Journal Proceedings, V. 63, No. 11, Nov., pp. 1161-1190.*

Ahmad, S. H., and Barker, R., 1991, "Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams," *ACI Structural Journal, V. 88, No. 1, Jan.-Feb., pp. 69-77.*

Ahmad, S. H., and Batts, J., 1991, "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete

*Beam with Web Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 88, No. 3, May-June, pp. 351-358.*

American Concrete Pumping Association, 2011, "Certified Operator Study Guide: Guidelines for the Safe Operation of Concrete Pumps," Version 03.11, 40 pp. <http://www.concretetumpers.com/sites/www.concretetumpers.com/files/attachments/studyguide.pdf> (accessed Feb. 28, 2014)

Bamforth, P. B., 1987, "The Relationship between Permeability Coefficients for Concrete Obtained Using Liquid and Gas," *Magazine of Concrete Research, V. 39, No. 13, pp. 3-11.*

Bentur, A.; Igarishi, S.; and Kovler, K., 1999, "Control of Autogenous Stresses and Cracking in High Strength Concretes," *Proceedings of the 5th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway, pp. 1017-1026.*

Bentz, D., 1997, "Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development," *Journal of the American Ceramic Society, V. 80, No. 1, pp. 3-21.*

Bentz, D., 2005, "Capitalizing on Self-Desiccation for Autogenous Distribution of Chemical Admixtures in Concrete," *Proceedings of the 4th International Seminar on Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology, B. Persson; D. Bentz; and L.-O. Nilsson, eds., Lund University, Gaithersburg, MD, pp. 189-196.*

Bentz, D., 2007, "Internal Curing of High Performance Blended Cement Mortars," *ACI Materials Journal, V. 104, No. 4, July-Aug., pp. 408-414.*

Bentz, D., 2009, "Influence of Internal Curing using Lightweight Aggregates on Interfacial Transition Zone Percolation and Chloride Ingress in Mortars," *Cement and Concrete Composites, V. 31, No. 5, Mar., pp. 285-289.*

Bentz, D.; Halleck, P.; Grader, A.; and Roberts, J., 2006a, "Four-Dimensional X-ray Microtomography Study of Water Movement during Internal Curing," *Proceedings of the International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, O. Jensen; P. Lura; and K. Kovler, eds., RILEM Publications S.A.R.L., pp. 11-20.*

Bentz, D.; Halleck, P.; Grader, A.; and Roberts, J., 2006b, "Water Movement during

*Internal Curing: Direct Observation using X-ray Microtomography,” Concrete International, V. 28, No. 10, pp. 39-45.*

Bentz, D.; Koenders, E.; Monnig, S.; Reinhardt, H.-W.; van Breugel, K.; and Ye, G., 2007, “Materials Science-Based Models in Internal Curing of Concrete,” RILEM Publications S.A.R., V. L, pp. 29-43.

Bentz, D.; Lura, P.; and Roberts, J., 2005, “Mixture Proportioning for Internal Curing,” *Concrete International*, V. 27, No. 2, Feb., pp. 35-40.

Bentz, D., and Mohr, B., eds., 2008, “Internal Curing of High Performance Concrete: Laboratory and Field Experiences,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 130 pp.

Bentz, D., and Snyder, K., 1999, “Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing using Satu-

rated Lightweight Fine Aggregate,” *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 11, pp. 1863-1867.

Bentz, D., and Stutzman, P., 2008, “Internal Curing and Microstructure of High Performance Mortars,” *Internal Curing of High Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences*, SP-256, D. Bentz, and B. Mohr, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 81-90.

Bentz, D. P.; Irassar, E. F.; Bucher, B.; and Weiss, W. J., 2009, “Limestone Fillers to Conserve Cement: Part I—An Analysis Based on Powers’ Model,” *Concrete International*, V. 31, No. 11, Dec., pp. 35-39.

Berg, O., 1981, “Reinforced Structures in Lightweight-Aggregate Concrete,” Publication 81.3, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

Bilodeau, A.; Chevrier, R.; Malhotra, V. M.; and Hoff,

G. C., 1995, “Mechanical Properties, Durability and Fire Resistance of High-Strength Lightweight Concrete,” *International Symposium on Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, Sandefjord, Norway, pp. 432-443.

Bilodeau, A.; Malhotra, V. M.; and Hoff, G. C., 1998, “Hydrocarbon Fire Resistance of High Strength Normal-weight and Lightweight Concrete Incorporating Polypropylene Fibers,” *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Sixth CANMET/ACI Conference, Supplementary Volume, V. M. Malhotra, ed., Bangkok, Thailand.

Boyd, S. R.; Holm, T. A.; and Bremner, T. W., 2006, “Performance of Structural Lightweight Concrete Made with a Potentially Reactive Natural Sand,” *Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, SP-234, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 737-746.

Bremner, T. W., and Holm, T. A., 1986, “Elastic Compatibility and the Behavior of Concrete,” *ACI Journal Proceedings*, V. 83, No. 2, Mar.-Apr., pp. 244-250.

Bremner, T. W.; Holm, T. A.; and deSouza, J., 1984, “Aggregate-Matrix Interaction in Concrete Subject to Severe Exposure,” *FIP-CPCI International Symposium on Concrete Sea Structures in Arctic Regions*, Calgary, Canada, 7 pp.

Bremner, T. W.; Holm, T. A.; and McInerney, J. M., 1992, “Influence of Compressive Stress on the Permeability of Concrete,” *Structural Lightweight Concrete Performance*, SP-136, T. A. Holm, and A. M. Vaysburd, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 345-356.

Bremner, T. W.; Holm, T. A.; and Stepanova, V. F., 1994, "Lightweight Concrete—A Proven Material for Two Millennia," *Proceedings of Advances in Cement and Concrete*, S. Sarkar and M. W. Grutzeck, eds., University of New Hampshire, Durham, NH, pp. 37-41.

Brown III, W. R., and Davis, C. R., 1993, "A Load Response Investigation of Long Term Performance of a Prestressed Lightweight Concrete Bridge at Fanning Springs, Florida," Florida Department of Transportation, State Materials Office, Gainesville, FL.

Brown III, W. R.; Larsen, T. J.; and Holm, T. A., 1995, "Long Term Service Performance of Lightweight Concrete

Bridge Structures," *International Symposium on Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, Sandefjord, Norway.

Byard, B. E., and Schindler, A. K., 2010, "Cracking Tendency of Lightweight Concrete," *Final Research Report*, Highway Research Center, Auburn University, AL, 89 pp.

Campbell, R. H., and Tobin, R. E., 1967, "Core and Cylinder Strengths of Natural and Lightweight Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 64, No. 4, Apr., pp. 190-195.

Carlson, C. C., 1962, "Fire Resistance of Prestressed Concrete Beam—Study and Influence of Thickness of Concrete Covering Over Prestressing Steel Strands," *Research Dept. Bulletin*, No. 147, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Carlson, C. C.; Benjamin, I. A.; Sheridan, R. R.; and Troxell, G. E., 1962, *Symposium on Fire Resistance of Concrete*, ACI SP-5, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 88 pp.

Castro, J., 2011, "Moisture Transport in Cement Based Materials: Application to transport tests and Internal Curing," PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, IN. Castro, J.; De la Varga, I.; Goliás, M.; and Weiss, W., 2010a, "Extending Internal Curing Concepts (Using Fine LWA) to Mixtures Containing High Volumes of Fly Ash," *International Bridge Conference*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 16 pp.

Castro, J.; Henkensiefken, R.; Bentz, D.; Nantung, T.; and Weiss, J., 2010b, "LWA Absorption and Desorption: The Influence on Transport Properties of Internally Cured Mortars," *CONSEC 10, Sixth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment, and Loading*, Merida, Yucatan, Mexico, pp. 1543-1550.

Castro, J.; Keiser, L.; Goliás, M.; and Weiss, J., 2011, "Absorption and Desorption Properties of Fine Lightweight Aggregate for Application to Internally Cured Concrete Mixtures," *Cement and Concrete Composites*, V. 33, No. 10, Nov., pp. 1001-1008.

Clarke, J. L., and Birjandi, F. K., 1993, "Bond Strength Tests for Ribbed Bars in Lightweight-Aggregate Concrete," *Magazine of Concrete Research*, V. 45, No. 163, pp. 79-87.

Concrete International, 1982, "Concrete Island Towed to Arctic," V. 4, No. 3, Mar., pp. 57-59.

Cook, J. E., 2007, "Proposed Changes to ACI 318-05 Modulus of Elasticity Formula Based on 25 Years of Research," *2007 Concrete Technology Forum Conference Proceedings*, Dallas, TX, NRMCA Publication 2PCTF07, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD.

Cusson, D., 2008, "Effect of Blended Cements on Effectiveness of Internal Curing of HPC," *Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences*, SP-256, D. Bentz, and B. Mohr, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills,



MI, pp. 105-120

Cusson, D., and Hoogeveen, T., 2005, "Internally-Cured High-Performance Concrete under Restrained Shrinkage and Creep," *CONCREEP 7 Workshop on Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures*, Nantes, France, pp. 579-584.

Cusson, D., and Hoogeveen, T., 2008, "Internal Curing of High-Performance Concrete with Pre-soaked Lightweight Aggregate Sand for Prevention of Autogenous Shrinkage Cracking," *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 6, pp. 757-765.

Cusson, D.; Lounis, Z.; and Daigle, L., 2010, "Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of High-Performance Concrete Bridge Decks-A Case Study," *Cement and Concrete Composites*, V. 32, No. 5, pp. 339-350. De la Varga, I.; Castro, J.; Bentz, D.; and Weiss, J., 2011, "Internal Curing Concepts in Mixtures Containing High Volumes of Fly Ash," *Cement and Concrete Composites*, 2nd Annual Meeting of the American Ceramic Society Cements Division & Center for Advanced Cement-Based Materials, *Advances in Cement-based Materials, Characterization, Processing, Modeling and Sensing*, Vanderbilt University,

Nashville, TN.

Di Bella, C.; Villani, C.; Hausheer, E.; and Weiss, J., 2012, "Chloride Transport Measurements for Plain and Internally Cured Concrete Mixtures," *The Economics, Performance, and Sustainability of Internally Cured Concrete*, SP-290, A.

K. Schlinder; J. G. Grygar; and W. J. Weiss, eds., *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, pp. 1-16.

Di Bella, C.; Villani, C.; Phares, N.; Hausheer, E.; and Weiss, J., 2012a, "Chloride Transport and Service Life in Internally Cured Concrete," *American Society of Civil Engineers Structures Congress*, Chicago, IL.

Elkem Microsilica, 2000, "Nordhordland Bridge," C4-20 Reference Project, <https://www.elkem.com/Global/ESM/support/technical-papers/concrete/reference-projects/C4-20-Nordhordland-Bridge.pdf> (accessed April 14, 2014)

Espinoza-Hijazin, G., and Lopez, M., 2011, "Extending Internal Curing to Concrete Mixtures with w/c Higher than 0.42," *Construction & Building Materials*, V. 25, No. 3, Mar., pp. 1236-1242.

Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1960, "Store of the Selma," Chicago, IL, 11 pp.

Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1971, *Light-weight Concrete—History, Application, Economics*, Salt Lake City, UT, 44 pp.

Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1980, "Fire Resistance of Expanded Shale, Clay and Slate Structural Lightweight Concrete," Salt Lake City, UT, pp. 1-4.

Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1996, "Pumping Structural Lightweight Concrete," Salt Lake City, UT, 4 pp. Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 2001, "Building

Bridges and Marine Structures," Salt Lake City, UT, 16 pp. Fagerlund, G., 1972, "Studier av Fasgranser Ballastkorn-

Cementpasta I Cementbruk Ogh Betong," Report 29, Institutionen for Byognadsteknik Tekniska Hogskolen, Lund, Sweden. (in Swedish)

Fagerlund, G., 1978, "Frost Resistance of Concrete with Porous Aggregate," *Cement Ogh Betong Institute*, Stockholm, Sweden.

Fenwick, R. C., and Sue, C. F., 1982, "The Influence of Water Gain Upon the Tensile Strength of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, V. 34, No. 120, 10 pp.

Fergestad, S., 1996, "Bridges Built with Lightweight Concrete," *Proceedings of the International Symposium on Lightweight Concrete Bridges, Sponsored by the California Department of Transportation (CALTRANS), Sacramento, CA.*

Fintel, M., and Kahn, K. F., 1968, "Design Considerations and Field Observations of Buildings," *ACI Journal Proceedings, V. 65, No. 2, Feb., pp. 99-110.*

Fintel, M., and Khan, F. R., 1965, "Effects of Column Exposure in Tall Structures—Temperature Variations and their Effects," *ACI Journal Proceedings, V. 62, No. 12, Dec., pp. 1533-1536.*

Fintel, M., and Khan, K. F., 1966, "Analysis of Length Changes of Exposed Columns," *ACI Journal Proceedings, V. 63, No. 8, Aug., pp. 843-864.*

FIP, 1983, *FIP Manual of Lightweight Concrete, second edition, John Wiley and Sons, New York.*

FIP, 2000, "Lightweight-Aggregate Concrete," *Bulletin 8, Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland.* Friggle, T., and Reeves, D., 2008, "Internal Curing of Concrete Paving: Laboratory and Field Experience," *Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences, D. Bentz and B. Mohr, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 71-80.*

Gjerde, 1982, "Structural Lightweight-Aggregate

Concrete for Marine and Offshore Applications," *Norwegian Contractors, Oslo, Norway.*

Golias, M., 2010, "The Use of Soy Methyl Ester-Poly-styrene Sealants and Internal Curing to Enhance Concrete Durability," *MS thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.*

Gray, W. H.; McLaughlin, J. F.; and Antrim, J. O., 1961, "Fatigue Properties of Lightweight-Aggregate Concrete," *ACI Journal Proceedings, V. 58, No. 6, Aug., pp. 142-162.*

Halamiczkova, P.; Detwiler, R.; Bentz, D.; and Garboczi, E., 1995, "Water Permeability and Chloride Ion Diffusion in Portland Cement Mortars: Relationship to Sand Content and Critical Pore Diameter," *Cement and Concrete Research, V. 25, pp. 790-802.*

Hanson, J. A., 1961, "Tensile Strength and Diagonal Tension Resistance of Structural Lightweight Concrete," *ACI Journal Proceedings, V. 58, No. 1, Jan., pp. 1-40.*

Hanson, J. A., 1964, "Replacement of Lightweight Aggregate Fines with Natural Sand in Structural Concrete," *ACI Journal Proceedings, V. 61, No. 7, July, pp. 779-793.*

Henkensiefken, R.; Nantung, T.; and Weiss, W., 2011, "Saturated Lightweight Aggregate for Internal Curing in Low w/c Mixtures: Monitoring Water Movement Using X-ray Absorption Strain," *No. 47, No. S1, June, pp. 432-441.*

Henkensiefken, R.; Bentz, D.; Nantung, T.; and Weiss, J., 2009a, "Volume Change and Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Saturated Lightweight Aggregates under Sealed and Unsealed Conditions," *Cement and Concrete Composites, V. 31, No. 7, pp. 426-437.*

Henkensiefken, R.; Briatka, P.; Bentz, D.; Nantung, T.;

and Weiss, J., 2010, "Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-Wetted Lightweight

Aggregate," *Concrete International, V. 32, No. 2, Feb., pp. 49-54.*

Henkensiefken, R.; Castro, J.; Bentz, D.; Nantung, T.; and Weiss, J., 2009b, "Water Absorption in Internally Cured Mortar Made with Water-Filled Lightweight Aggregate,"



*Cement and Concrete Research*, V. 39, No. 10, pp. 883-892. Henkensiefken, R.; Nantung, T.; and Weiss, W., 2008, "Reducing Restrained Shrinkage Cracking in Concrete: Examining the Behavior of Self-curing Concrete Made Using Different Volumes of Saturated Lightweight Aggregate," *National Concrete Bridge Conference*, St. Louis, MO. Henkensiefken, R.; Nantung, T.; and Weiss, W., 2009c, "Internal Curing-From the Laboratory to Implementation," *International Bridge Conference, LWC Bridge Workshop*,

13 pp.

Hoff, G. C., 1992, "High Strength Lightweight-Aggregate Concrete for Arctic Applications," *Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, SP-136*, T. A. Holm and A. M. Vaysburd, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1-245.

Hoff, G. C., 1994, "Observations on the Fatigue Behavior of High Strength Lightweight Concrete," *High-Performance Concrete, Proceedings of the ACI International Conference, SP-149*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 785-822.

Hoff, G. C., 2002, "The Use of Lightweight Fines for the Internal Curing of Concrete," *Northeast Solite Corporation, Richmond, VA*.

Hoff, G. C., 2003, "Internal Curing of Concrete Using Lightweight Aggregate," *Theodore Bremner Symposium on High-Performance Lightweight Concrete*, J. P. Ries and T.

A. Holm, eds., *Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 185-204.

Hoff, G. C.; Wawm, R.; Weng, J. K.; and Nunez, R. E., 1995, "The Use of Structural Lightweight Aggregates in Offshore Concrete Platforms," *International Symposium on Structural Lightweight-Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway*, pp. 349-362.

Hogneštad, E.; Hanson, N. W.; and McHenry, D., 1955, "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," *ACI Journal Proceedings*, V. 52, No. 4, Dec., pp. 455-480.

Holm, T. A., 1980a, "Physical Properties of High Strength Lightweight-Aggregate Concrete," *Second International Congress of Lightweight Concrete, London, UK*, 10 pp.

Holm, T. A., 1980b, "Performance of Structural Lightweight Concrete in a Marine Environment," *Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 589-608.

Holm, T. A., 1983, "Three Decades of Durability," *The Military Engineer*, Sept.-Oct., 4 pp.

Holm, T. A., 1994, "Lightweight Concrete and Aggregates," *Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP 169C*, 522-32, P. Klieger and J. F. Lamond, eds., ASTM International, West Conshohocken, PA.

Holm, T. A., and Bremner, T. W., 1994, "High-Strength Lightweight-Aggregate Concrete," *High-Performance Concrete and Applications*, S. P. Shah and S. H. Ahmad, eds., Edward Arnold, London, pp. 341-374.

Holm, T. A., and Bremner, T. W., 2000, "State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments," *U.S. Army Corps of Engineers, Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS*.

Holm, T. A.; Bremner, T. W.; and Newman, J. B., 1984, "Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering," *Concrete International*, V. 6, No. 6, June, pp. 49-54. Holm, T. A.; Bremner, T. W.; and Vaysburd, A., 1988, "Carbonation of Marine Structural Lightweight

- Concretes," *Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-109, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 667-676.
- Holm, T. A., and Ries, J. P., 2000, "Specified-Density Concrete—A Transition," *Second International Symposium on Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, Kristiansand, Norway.
- Housing and Home Finance Agency, 1949, "Lightweight Aggregate Concrete," Washington, DC, Aug.
- Huffington, J. A., 2000, "Development of High-Performance Lightweight Concrete Mixes for Prestressed Bridge Girders," University of Texas at Austin, TX, May.
- Ivey, D. L., and Bluth, E., 1966, "Splitting Tension Test of Structural Lightweight Concrete," *Journal of Materials*, ASTM International, V. 1, No. 4, pp. 859-871.
- Jensen, J. J.; Hammer, T. A.; Ophelm, E.; and Hansen, P. A., 1995, "Fire Resistance of Lightweight-Aggregate Concrete," *International Symposium on Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, I. Holand, ed., Sandefjord, Norway, pp. 192-204.
- Jensen, O., 1993, "Autogenous Deformation and RH-Change-Self-Desiccation and Self-Desiccation Shrinkage," PhD thesis, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Jensen, O. M., and Hansen, P. F., 2001, "Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 4, pp. 647-654.
- Jensen, O. M., and Hansen, P. F., 2002, "Water-Entrained Cement-Based Materials II. Experimental Observations," *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 6, pp. 973-978.
- Johansson, P., 2005, "Water Absorption in a Two-layer Masonry System-Properties, Profile and Predictions," PhD thesis, Lund University, Sweden.
- Kahn, L. F., and Lopez, M., 2005, "Prestress Losses in High Performance Lightweight Concrete Pretensioned Bridge Girder," *PCI Journal*, V. 50, No. 5, pp. 84-94.
- Keeton, P., 1970, "Permeability Studies of Reinforced Thin-Shell Concrete," Technical Report R692 YF51.001, Naval Engineering Laboratory, Port Hueneme, CA, 52 pp.
- Khokrin, N. K., 1973, "The Durability of Lightweight Concrete Structural Members," Kuibyshev, Russia, 114 pp. (in Russian).
- Klieger, P., 1957, "Early High Strength Concrete for Prestressing," *Proceedings of the World Conference on Prestressed Concrete*, San Francisco, CA, pp. A5-1 to A5-14.
- Kluge, R. M.; Sparks, M. M.; and Tuma, E. C., 1949, "Lightweight Aggregate Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 45, No. 5, May, pp. 625-642.
- Kohno, K.; Okamoto, T.; Isikawa, Y.; Sibata, T.; and Mori, H., 1999, "Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 4, pp. 611-614.
- Lamond, J. F., and Pielert, J. H., 2006, "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials," *ASTM STP-169D*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 655 pp.
- LaRue, H. A., 1946, "Modulus of Elasticity of Aggregates and its Effect on Concrete," *Proceedings* 46, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, pp. 1298-3098.
- Lopez, M., 2005, "Creep and Shrinkage of High Performance Lightweight Concrete a Multi-scale Investigation," PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 531 pp.
- Lopez, M.; Kahn, L. F.; and Kurtis, K. E., 2007, "Characterization of Elastic and Time-

*Dependent Deformations in Normal Strength and High Performance Concrete by Image Analysis,*” *Cement and Concrete Research*, V. 37, No. 8, pp. 1265-1277.

Lopez, M.; Kahn, L. F.; and Kurtis, K. E., 2008a, “Effect of Internally Stored Water on Creep of High Performance Concrete,” *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, May-June, pp. 265-273.

Lopez, M.; Kahn, L. F.; and Kurtis, K. E., 2008b, “The Influence of Internal Curing on Basic Creep and Autogenous Shrinkage,” *Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences*, SP-256,

D. Bentz, and B. Mohr, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 13-34.

Lura, P.; Bentz, D.; Lange, D.; Kovler, K.; Bentur, A.; and van Breugel, K., 2003, “Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste—Advances in Cement and Concrete,” *Copper Mountain, CO*, pp. 89-99.

Lura, P.; Pease, B.; Mazzotta, G.; Rajabipour, F.; and Weiss, J., 2007, “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Development of Plastic Shrinkage Cracks,” *ACI Materials Journal*, V. 104, No. 2, Mar.-Apr., pp. 187-194.

Lura, P.; Winnefeld, F.; and Klemm, S., 2010, “Simultaneous Measurements of Heat of Hydration and Chemical Shrinkage on Hardening Cement Pastes,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, V. 101, No. 3, pp. 925-932.

Lyse, I., 1934, “Lightweight Slag Concrete,” *ACI Journal Proceedings*, V. 31, No. 1, Jan., pp. 1-20.

Martin, H., 1982, “Bond Performance of Ribbed Bars,” *Bond in Concrete—Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete*, Paisley, Applied Science Publishers, London, pp. 289-299.

McLaughlin, T., 1944, “Powered Concrete Ships,” *Engineering News Record*, V. 19, Oct, pp. 94-98.

Mehta, P. K., 1986, *Concrete: Structure Properties and Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 548 pp.

Meyer, K. F., 2002, “Transfer and Development Length of 0.6-inch Diameter Prestressing Strand in High Strength Lightweight Concrete,” *School of Civil and Environmental Engineering*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, pp. 358.

Meyer, K. F.; Buchberg, B. S.; and Kahn, L. F., 2003, “Development of High Strength Lightweight Concrete Mix Designs: A Practical Approach,” *49th Annual PCI Convention & Exhibition, 3rd PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL.

Meyer, K. F., and Kahn, L. F., 2002, “Lightweight Concrete Reduces Weight and Increases Span Length of Pretensioned Concrete Bridge Girders,” *PCI Journal*, V. 47, No. 1, Jan.-Feb., pp. 68-75.

Meyer, K. F., and Kahn, L. F., 2004, “Transfer and Development Length of 0.6-inch Strand in High Strength Lightweight Concrete,” *High Performance Structural Lightweight Concrete*, Phoenix, AZ, SP-218, J. Ries and T. Holm, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Apr., pp. 9-27.

Mielenz, R. C., 1994, “Petrographic Evaluation of Concrete Aggregates,” *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP-C169, J.

F. Lamond and J. H. Pielert, eds., *ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 341-365.

Mor, A., 1992, "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 1, Jan.-Feb., pp. 76-82.

Moreno, J., 1986, "Lightweight Concrete Ductility,"

*Concrete International*, V. 8, No. 11, Nov., pp. 15-18. Morgan, M. H., 1960, *Vitruvius, the Ten Books on Architecture Translation*, Dover Publications, New York.

Muller-Rochholz, J., 1979, "Determination of the Elastic Properties of Lightweight Aggregate by Ultrasonic Pulse Velocity Measurements," *International Journal of Lightweight Concrete*, Lancaster, UK, V. 1, No. 2.

Murillo, J. A.; Thoman, S.; and Smith, D., 1994, "1.2 Mile Long Benicia-Martinez Bridge, San Pablo Bay, California," *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 3 pp.

Muruges, G., 2008 "Lightweight Concrete and the New Benicia-Martinez Bridge," *HPC Bridge News*, No. 49, May-June.

Nassar, A. J., 2002, "Investigation of Transfer Length, Development Length, Flexural Strength and Prestress Loss Trend in Fully Bonded High-Strength Lightweight Prestressed Girders," *Virginia Polytechnic Institute and State University*, May 15, 136 pp.

New York Department of Transportation, 2008, "Moisture Content of Lightweight Fine Aggregate," *Test Method No. NY 703-19*, NYDOT, Materials Bureau, Albany, NY, Aug.

Nishi, S.; Oshio, A.; Sone, T.; and Shirokuni, S., 1980, "Watertightness of Concrete against Sea-Water," *Onoda Cement Co., Ltd., Japan*.

Ohuchi, T.; Hara, M.; Kubota, N.; Kobayoshi, A.; Nishioka, S.; and Yokoyama, M., 1984, "Some Long-Term Observation Results of Artificial Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use in Japan," *International Symposium on Long-Term Observation of Concrete Structures*, Budapest, Hungary, V. II, pp. 274-282.

Okamura, H., and Ouchi, M., 1999, "Self-Compacting Concrete. Development, Present Use and Future," *Proceedings of the 1st RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, A. Skarendahl and O. Petersson, eds., pp. 3-14.

Paul, A., and Lopez, M., 2011, "Assessing Lightweight Aggregate Efficiency for Maximizing Internal Curing Performance," *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 4, July- Aug., pp. 385-393.

Pauw, A., 1960, "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density," *ACI Journal Proceedings*, V. 57, No. 6, June, pp. 679-688.

Peled, A.; Castro, J.; and Weiss, J., 2010, "Atomic Force Microscopy Examinations of Mortar Made by Using Water-Filled Lightweight Aggregates," *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, V. 2141, May, pp. 92-101.

Petersen, P. H., 1948, "Properties of Some Lightweight-Aggregate Concretes with and without an Air-Entraining Admixture," *Building Materials and Structures Report BMS 112*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Aug., 7 pp.

Pfeifer, D. W., 1967, "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 64, No. 7, July, pp. 384-392.

Pfeifer, D. W., 1968, "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete-Creep and Shrinkage Studies," *ACI Journal Proceedings*, V. 65, No. 2, Feb., pp. 131-140.

Phillio, R., 1991, "Concrete Science and Reality," *Materials Science of Concrete II*, J. P.

Skalny and S. Mindess, eds., *American Ceramic Society, Westerville, OH*, 8 pp.

Pour-Ghaz, M.; Castro, J.; Kladivko, E. J.; and Weiss, J., 2011, "Characterizing Lightweight Aggregate Desorption at High Relative Humidities using a Pressure Plate Apparatus," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 24, No. 8, pp. 961-969.

Powers, T. E.; Copeland, L. E.; and Mann, H. M., 1959, "Capillary Continuity of Discontinuity in Cement Pastes," *Journal of the PCS Research and Development Labs*, No. 2, May, pp. 38-48.

Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), 2009, *PCI Design Handbook*, seventh edition, Chicago, IL, 614 pp.

Price, W. H., and Cordon, W. A., 1949, "Tests of Light-weight-Aggregate Concrete Designed for Monolithic Construction," *ACI Journal Proceedings*, V. 45, No. 4, Apr., pp. 581-600.

Pyc, W.; Caldarone, M.; Broton, D.; and Reeves, D., 2008, "Internal Curing Study with Intermediate Light-weight Aggregates," *Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences*, Farmington Hills, MI, pp. 13-34.

Rabbat, B. G.; Daniel, J. I.; Weinman, T. L.; and Hanson, N. W., 1986, "Seismic Behavior of Lightweight and Normal

Weight Concrete Columns," *ACI Journal Proceedings*, V. 83, No. 1, Jan.-Feb., pp. 69-79.

Radlinska, A.; Rajabipour, F.; Bucher, B.; Henskiesfken, R.; Sant, G.; and Weiss, W., 2008, "Shrinkage Mitigation Strategies in Cementitious Systems: A Closer Look at Sealed and Unsealed Behavior," *Transportation Research Record*, No. 2070, pp. 59-67.

Ramakrishnan, V.; Bremner, T. W.; and Malhotra, V. M., 1992, "Fatigue Strength and Endurance Limit of Light-weight Concrete," *Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, SP-136*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 397-420. Ramirez, J.; Olek, J.; Rolle, E.; and Malone, B., 1999, "Performance of Bridge Decks and Girders with Light-weight-Aggregate Concrete," *FHWA/IN/JTRP-98/17*,

Purdue University, West Lafayette, IN, May, 161 pp. Raoufi, K.; Schlitter, J.; Bentz, D.; and Weiss, J., 2011,

"Parametric Assessment of Stress Development and Cracking in Internally-Cured Restrained Mortars Experiencing Autogenous Deformations and Thermal Loading," *Advances in Civil Engineering*, V. 2011, 16 pp.

Reichard, T. W., 1964, "Creep and Drying Shrinkage of Lightweight and Normalweight Concretes," *Monogram No. 74*, National Bureau of Standards, Washington, DC, 30 pp.

RILEM, 2007, *Internal Curing of Concrete*, K. Kovler and O. Jensen, eds., RILEM Publications S.A.R.L., Paris.

RILEM Technical Committee 119-TCE, 1998, "Testing of the Cracking Tendency of Concrete at Early Ages in the Cracking Frame Test," *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, RILEM Report 15, R. Springenschmid, ed., FN Spon, London, pp. 315-339.

Robins, P. J., and Standish, I. G., 1982, "Effect of Lateral Pressure on Bond of Reinforcing Bars in Concrete," *Bond in Concrete—Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete*, Paisley, Applied Science Publishers, London, pp. 262-272.

Schlitter, J.; Senter, A.; Bentz, D.; Nantung, T.; and Weiss, W., 2010, "Development of a



Dual Ring Test for Evaluating Residual Stress Development of Restrained Volume Change," *Journal of ASTM International*, V. 7, No. 9, 13 pp. Selvaggio, S. L., and Carlson, C. C., 1964, "Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams: Study and Influence of Aggregate and Load Intensity," *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, V. 6, No. 1, Portland Cement Association, Skokie, IL, pp. 41-64.

Shah, S., and Weiss, W., 2000, "High Strength Concrete: Strength, Permeability, and Cracking," *Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*, Orlando, FL, pp. 331-340.

Shah, S.; Weiss, W.; and Yang, W., 1998, "Shrinkage Cracking—Can It Be Prevented?" *Concrete International*, V. 20, No. 4, Apr., pp. 51-55.

Shi, C.; Wu, Y.; and Riefler, C., 2006, "Self-Consolidating Lightweight Concrete a Field Demonstration Using Insulating Concrete Forms," *Concrete International*, Feb., pp. 40-43.

Shideler, J. J., 1957, "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use," *ACI Journal Proceedings*, V. 54, No. 10, Oct., pp. 298-328.

Shin, K.; Castro, J.; Schlitter, J.; Golias, M.; Pourghaz, M.; Henkensiefken, R.; Peled, A.; Bucher, B.; and Weiss, W., 2011, "Role of Low Stiffness Aggregate Particles on the Restrained Shrinkage Cracking Behavior of Mortar," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 23, No. 5, pp. 597-605.

Speck, J., and Burg, R. G., 1999, "Low-Density High Performance Concrete," *High Performance Concrete: Research to Practice*, SP-189, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 121-131.

Stollendorf, D. W., and Holm, T. A., 1996, "Bridge Rehabilitation Permits Higher Live Loads," *Materials for the New Millennium*, ASCE Materials Conference, Washington, DC, Nov.

Streeter, D. A.; Wolfe, W. H.; and Vaughn, R. E., 2011, "Field Performance of Internally Cured Concrete Bridge Decks in New York State," *The Economics, Performance, and Sustainability of Internally Cured Concrete*, SP-290, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 69-84.

Sugiyama, T., 2003, "Application of Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete in Japan," *Theodore Bremner Symposium on High-Performance Lightweight Concrete*, Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, J. P. Ries and T. A. Holm, eds., pp. 95-110.

Sugiyama, T.; Bremner, T. W.; and Holm, T. A., 1996, "Effect of Stress on Gas Permeability in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 5, Sept.-Oct., pp. 443-450.

Thatcher, D. B.; Heffington, J. A.; Kolozs, G. S.; Sylva, G. S.; Breen, J. E.; and Burns, N. H., 2002, "Structural Lightweight Concrete Prestressed Girders and Panels," *Center for Transportation Research*, University of Texas at Austin, Austin, TX, Jan.

Thomas, M. D. A., 2006, "Chloride Diffusion in High-Performance Lightweight Aggregate Concrete," *7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, SP-234, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 797-812.

Trtik, P.; Münch, B.; Weiss, J.; Kaestner, A.; Jerjen, I.; Josic, L.; Lehemann, E.; and Lura, P., 2011, "Release of Internal Curing Water from Lightweight Aggregates in Cement Paste Investigated by Neutron and X-ray Tomography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Purdue University, School of Engineering, West Lafayette, IN.

Trumble, R., and Santizo, L., 1992, "The Advantages of Using Lightweight Concrete in a Medium Rise Building and Adjoining Post-Tensioned Parking Garage," *Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance*, SP-136,

T. A. Holm and A. M. Vaysburd, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 247-254.

Underwriters Laboratories Inc, 2014, "Fire-Resistance- Rated Systems and Products," Melbourne, Australia, <http://>

[database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/IFRAME/fireressrch.html](http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/IFRAME/fireressrch.html) (accessed April 30, 2014).

Valore Jr., R. C., 1956, "Insulating Concretes," *ACI Journal Proceedings*, V. 53, No. 5, pp. 509-532.

Valore, R. C., 1980, "Calculation of U-Values of Hollow Concrete Masonry," *Concrete International*, V. 2, No. 2, Feb., pp. 40-63.

Videla, C., and Lopez, M., 2000, "Mixture Proportioning Methodology for Structural Sand-lightweight Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 97, No. 3, May-June, pp. 281-289. Videla, C., and Lopez, M., 2002, "Effect of Lightweight Aggregate Intrinsic Strength on Lightweight Concrete Compressive Strength and Modulus of Elasticity," *Materiales de Construcción/Construction Materials*, V. 52, No.

265, pp. 23-37.

Villarreal, V., 2008, "Internal Curing-Real World Ready Mix Production and Applications: A Practical Approach to Lightweight Modified Concrete," *Internal Curing of High-Performance Concrete: Laboratory and Field Experiences*, SP-256, D. Bentz, and B. Mohr, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 45-56.

Villarreal, V., and Crocker, D., 2007, "Better Pavements through Internal Hydration," *Concrete International*, V. 29, No. 2, Feb., pp. 32-36.

Wall, J., 2005, "Design, Production and Mechanical Properties of Expanded Slate Lightweight Self-Consolidating Concrete" *Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, IL.

Walter P. Moore and Associates, 2012, "Embodied Energy Study Lightweight Concrete in Steel Framed Buildings," *Sustainable Design Community of Practice*, Sept.

Washa, G. W., and Fluck, P. G., 1952, "Effect of Compressive Reinforcement on the Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams," *ACI Journal Proceedings*, V. 49, No. 10, Oct., pp. 89-108.

Weber, S., and Reinhardt, 1995, "A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete," *Proceedings of the International Structural Lightweight Concrete*, Sandefjord, Norway.

Weber, S., and Reinhardt, H. W., 1997, "A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing," *Advanced Cement Based Materials*, V. 6, No.

2, pp. 59-68.

Weber, S., and Reinhardt, H. W., 1999, "Manipulating the Water Content and Microstructure of High Performance Concrete Using Autogenous Curing," *Modern Concrete Materials: Binders, Additions, and Admixtures*, R. Dhir and

T. Dyer, eds., Thomas Telford, London, pp. 567-577. Weiss, W.; Yang, W.; and Shah, S., 1999, "Factors



*Influencing Durability and Early-Age Cracking in High Strength Concrete Structures," High Performance Concrete: Research to Practice, SP-189, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 387-409.*

Yao, S., and Gerwick, B., 2000, "Development of Self- Compacting Lightweight Concrete for RFP Reinforced Floating Concrete Structures," *International Symposium on High Performance Concrete-Workability, Strength and Durability, Hong Kong, China.*

Zhang, M. H., and Gjorv, O. E., 1990, "Microstructure of the Interfacial Zone between Lightweight Aggregate and Cement Paste," *Cement and Concrete Research, V. 20, No. 4, pp. 610-618.*

Zhang, M. H., and Gjorv, O. E., 1991, "Permeability of High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Materials Journal, V. 88, No. 5, Sept.-Oct., pp. 463-469.*

Zhutovsky, S.; Kovler, K.; and Bentur, A., 2002a, "Efficiency of Lightweight Aggregates for Internal Curing of High Strength Concrete to Eliminate Autogenous Shrinkage," *Materials and Structures, V. 35, No. 246, pp. 97-101.*

Zhutovsky, S.; Kovler, K.; and Bentur, A., 2002b, "Influence of Wet Lightweight Aggregate on Mechanical Properties of Concrete at Early Ages," *Materials and Structures, V. 35, pp. 97-101.*



کاربرد بتن و مصالح ساختمانی سبک از گذشته‌های دور مورد توجه بوده است. از اوایل قرن بیستم به کارگیری بتن‌های سبک در ساخت بناها و سازه‌های پروژه‌های مختلف معمول گشت. در دهه ۸۰ میلادی به بتن‌های سبک‌دانه پرمقاومت برای ساخت سازه‌های فراساحلی توجه ویژه‌ای مبدول شد. امروزه سبک‌سازی با حفظ مقاومت مورد علاقه دست‌اندرکاران صنعت ساختمان است. کاهش وزن سازه، نیروی زمین‌لرزه را کاهش داده و هزینه‌های پی‌سازی را کم می‌کند. کاهش بار مرده اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، به کاهش ابعاد اعضاء منجر می‌گردد. در سازه‌های پیش‌ساخته، به کارگیری بتن سبک، هزینه‌های ترابری و برپا کردن سازه‌ها را کاهش می‌دهد. به خاطر مزایای عملی استفاده از بتن سبک‌دانه در سال‌های اخیر این نوع بتن به عنوان یکی از مصالح سازه‌ای مهم شناخته شده و تقاضا برای استفاده از آن در حال افزایش است. با کاهش وزن سازه‌های فوقانی، ابعاد فونداسیون و زمان ساخت آن کاهش پیدا می‌کند و صرفه‌جویی هزینه، در مراحل نصب و جابه‌جایی عناصر ساختمانی را دربر خواهد داشت. بتن سبک را با روش‌های مختلفی تولید می‌کنند برای داشتن بتن سبک سازه‌ای و پرمقاومت، سبک‌دانه‌ها به عنوان جایگزین بخشی یا همه سنگ دانه‌های معمولی می‌شود. از جمله سبک‌دانه‌ها، سبک‌دانه‌های مصنوعی، رس منبسط‌شده است که اغلب **لیکا** نامیده می‌شود. کشورهای مختلف با لیکا، بتن‌های تمام سبک‌دانه یا نیمه‌سبک‌دانه سازه‌ای را می‌سازند.

واژه لیکا از عبارت (LECA) Light Expanded Clay Aggregate گرفته شده است. صنعت لیکا در طول جنگ جهانی اول به منظور سبک‌سازی کف کشتی‌های اقیانوس‌پیما ابداع شد و پس از جنگ جهانی دوم در بازسازی تخریب‌های حاصل از جنگ در بخش ساختمان به سرعت توسعه یافت. از شرکت‌های لیکا در دانمارک، نروژ، انگلستان، فنلاند، سوئد و ایتالیا می‌توان به‌عنوان تولیدکننده‌های اروپایی نام برد که در بیش از ۱۲ کشور گسترش پیدا کرده است. در خاورمیانه و آسیا فقط شرکت لیکای ایران حضور دارد. شرکت لیکای ایران فعالیت خود را از سال ۱۳۵۷ تحت امتیاز لیکای بین‌المللی آغاز نموده است. ظرفیت اسمی تولید سبک‌دانه این کارخانه یک میلیون متر مکعب در سال می‌باشد.

سبک‌دانه‌های لیکا در ابعاد ۰-۲۵ میلیمتر قابل تفکیک به انواع دامنه‌های دانه‌بندی و طیف وسیعی از دانسیته

از ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تولید می‌شود که بنا به کاربرد یک یا چند دامنه و نوع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از سبکدانه لیکا در سبک‌سازی مصالح بنایی مانند بلوک سبک لیکا و یا قطعات بزرگ‌تر پیش‌ساخته مانند انواع پانل‌ها، در کف‌سازی و بام استفاده می‌شود. کاربردهای ژئوتکنیک، زه‌کشی، هیدروپونیک و لنداسکیپ نیز از دیگر کاربردهای این محصول می‌باشد.

مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، افت صوتی مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای این سنگدانه‌های مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی محیط‌زیست راه‌سازی و... شده است.

احمد میرمحمدصادقی  
مدیرعامل شرکت لیکا