

بررسی روش‌های پایش عملکرد سیمان در بتن

علی اکبر کفاش بازاری

رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه کارخانه سیمان تهران

Email: Eliaskafash@gmail.com

کد مقاله: 63C

چکیده: بطور عمده بررسی عملکرد سیمان در بتن توسط تولیدکنندگان سیمان انجام نمی‌گیرد. لذا با توجه به اینکه تولیدکنندگان سیمان برای تامین کیفیت، مشخصات استاندارد سیمانی (و ملات آن) را کنترل می‌نمایند و در تولیدی‌های بتن انتخاب سیمان مطلوب توسط آزمایشگاه مربوطه و با معیارهای محدودی از جمله کسب توامان کارایی مناسب (خمیری) و مقاومت کافی در بتن، فاصله حمل به لحاظ تامین سریع، قیمت تمام شده و ... انجام می‌گیرد؛ لیکن برخی موارد همچون واکنش با افزودنی‌ها، روند رشد مقاومتی، عملکرد در اسلامپ‌های سفت، روان و خیلی روان و ... کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مطالعه سعی شده تا با ملاک‌های متعدد نگاهی جامع و دقیق‌تر به این موضوع شود. ماحصل این پژوهش گسترده بر روی ۱۰ نمونه سیمان از ۹ کارخانه معروف، علاوه بر تعیین مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌ها، اجرای ۵۰ طرح مخلوط بتنی مختلف در پنج گروه (با روانی‌های ۱-سفت، ۲-خمیری، ۳-روان، ۴-خیلی روان و ۵-روان به کمک افزودنی با دوز ثابت) و آزمایش حدود ۴۰۰ نمونه بوده است که نتایج (بتنی، فیزیکی و شیمیایی) آن سیمان‌ها مورد پایش قرار گرفته‌اند. واکنش متنوع انواع سیمان‌های مورد استفاده در انواع مخلوط بتن‌های آزمایشی علیرغم مشابهت در تیپ آنها از نکات اصلی این پژوهش بوده است. با توجه به نتایج متنوع و گسترده حاصله، بررسی و تحلیل توامان آنالیز نمونه سیمان و مخلوط‌های بتن ساخته شده با آن سیمان‌ها بنا به شرایط مورد استفاده در هر پروژه و کارگاهی توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: اسلامپ، ریزی، سیمان، مقاومت فشاری، نسبت W/C.

آمارهای متعددی نشان می‌دهند که طی سالهای اخیر تولید و مصرف سیمان در کشورمان نامتعادل شده است و با وجود موانع فعلی صادرات آن میزان عرضه از تقاضا بطور جدی پیشی گرفته است. با توجه به ظرفیت تولید سالانه سیمان کشور که حدود ۸۰ میلیون تن است [۱]، عواملی همچون کاهش حدود ۲۰ درصدی سرانه مصرف سیمان بعلت رکود در صنعت ساختمان، افزایش ناچیز قیمت عرضه سیمان علیرغم افزایش قابل توجه بهای تمام شده، کاهش چشمگیر قدرت چانه‌زنی تولیدکنندگان، انتقال سود صادرات به دلال‌ها به علت تحریم‌ها، امکان ضعیف خروج از صنعت بعلت سرمایه‌گذاری بسیار زیاد، عدم امکان تولید موقت کالای جایگزین تا رفع موانع موجود و مسائل متعدد دیگر سبب شده‌اند که مشکل مازاد عرضه نسبت به تقاضای سیمان دارای ابعاد گسترده‌ای باشد. از این‌رو رقابت در میان تولیدکنندگان سیمان نیز دارای مزایا و معایبی می‌باشد. هر چند که در کشورهای پیشرفته با دیدگاه کاهش مصرف سیمان به علت آلاینده‌گی شدید این صنعت حتی به سوی بتن بدون سیمان (با استفاده از بوراکس^۱) گام برداشته‌اند.

بطور کلی رقابت بین تولیدکنندگان در هر صنعتی به خودی خود منجر به رشد و اعتلای آن صنعت می‌شود، اما باید توجه داشت که شرایط یک رقابت است که تعیین کننده سطح کالا یا خدمات قابل ارائه به مشتریان می‌شود. به عنوان مثال در شرایط چیرگی عرضه بر تقاضا و کاهش نقدینگی در سطح بازار احتمال عرضه کالاهای ارزان و البته با کیفیت نازل‌تر بسیار افزایش می‌یابد؛ اما اگر کاهش نقدینگی شدید باشد، ابهام و پیچیدگی در قیمت و کیفیت کالاهای بازار بوجود می‌آید. طی چند سال گذشته با توجه به مشکلات مطرح شده، صنعت سیمان دچار چنین شرایطی شده است که البته علت وقوع و راهکارهای خروج از این بحران در این بحث نمی‌گنجد. عرضه سیمان با کیفیت بالا و قیمت نازل و نیز کاهش هزینه تمام‌شده ساده‌ترین استراتژی‌های ایجاد مزیت رقابتی می‌باشد که امروزه تولیدکنندگان بزرگ سیمان با روش‌های مختلفی آن را دنبال می‌کنند. بطور مثال جهت کنترل هزینه‌های سوخت و انرژی که بخش عمده‌ای از هزینه تولید سیمان می‌باشد، تولید مقطعی کلینکر، ذخیرسازی آن و توقف فعالیت کوره انجام می‌شود که این استراتژی عمومیت دارد و در کیفیت نهایی سیمان نیز موثر می‌باشد. به هر حال برای فعالان در زمینه کیفیت مهم آنست که بتوانند علیرغم وجود مسائل فنی متعدد به کمک قضاوت مهندسی گزینش و پایش مناسبی داشته باشند. در این مقاله ضمن ارائه نتایج آزمایش‌های بسیار زیاد و متنوع انجام گرفته در مرکز تحقیق و توسعه مجتمع صنعتی سیمان تهران (شکل ۱) و آزمایشگاه مجتمع تولیدی-تحقیقاتی پریفاب، مطالب مندرج در مراجع و تجربیات نگارنده سعی شده است تا معیارهای مناسبی جهت انتخاب سیمان برای تولید بتن در کارگاه‌های مختلف معرفی گردد.

شایان ذکر است که قطعا با تداوم شرایط کنونی، لطمات وارده به صنعت سیمان قابل پیش‌بینی نخواهد بود. از طرفی دیگر با توجه به رابطه نزدیک صنعت سیمان و بتن و نیز اشاعه مصرف بتن در کشور به همراه افزایش دانش و فن‌آوری در زمینه تولید آن طی یک دهه اخیر، بستر اعتلای سیمان‌های تولیدی نیز فراهم گردیده است. اما این رشد مستلزم رفع مشکلات مورد اشاره توسط سیاست‌گذاران کشور است تا شرایط رقابت سازنده بطور کامل مهیا شود.



شکل ۱: آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه شرکت سیمان تهران

اصلی‌ترین و رایج‌ترین معیارها برای انتخاب سیمان موردنظر تولیدکنندگان بتن غالبا کسب کارایی مناسب (خمیری-که معمولا با آزمایش اسلامپ [۱۴] تعیین می‌گردد) به همراه ایجاد مقاومت کافی در بتن، فاصله حمل به لحاظ تامین سریع و قیمت تمام شده می‌باشد. البته متأسفانه بطور معمول در اغلب این پایش‌ها بدون در نظر گرفتن نوع سیمان اقدام به طراحی مخلوط بتن می‌شود؛ لیکن در طراحی مخلوط بتن (روش ملی [۲] و روش انگلیسی [۱۵]) طراحی مقاومت بتن بر اساس مقاومت ۲۸ روزه ملات سیمان مورد استفاده انجام می‌گیرد. از طرفی در روش امریکایی [۲۲] مقاومت ۲۸ روزه ملات سیمان در طراحی مقاومت بتن چندان موثر نمی‌باشد. در استانداردهای سیمان (ملی [۳] و امریکایی [۱۶]) با نگاهی تجویزی مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مورد اشاره را تعیین نموده‌اند. اما برای پارامترهای قوام، چسبندگی، رنگ و موارد مشابه حدود و جزئیاتی مشاهده

¹ Sodium tetra borate decahydrate

نمی‌شود. در استاندارد جدید (ملی [۴] و امریکایی [۱۷]) نیز با دیدگاهی عملکردی^۲ و پیشنهادی حدود و مشخصات کلی سیمان ارائه شده‌اند و کماکان برای بررسی پارامترهای مورد اشاره محدودیتی وجود ندارد و البته شاید بتوان برخی مشخصات تعیین شده را موثر در این پارامترها دانست. در منابع و مراجع بتن نیز صرفاً همان مشخصات مورد اشاره دیده می‌شوند و لزومی برای تعیین حدود این موارد دیده نشده است.

تحقیقات متعددی در زمینه تاثیر کیفیت هر یک از مواد اولیه سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی در کیفیت نهایی بتن موجود است. به عنوان مثال میزان سنگدانه‌های مصرفی [۶] و یا حتی شکل [۵] و جنس آنها بر مقاومت فشاری بتن تاثیرگذار هستند. اما با توجه به اینکه سیمان در مخلوط بتن نقش مهمی دارد، اذهان مباحثان بتن کاملاً معطوف به این جزء از بتن است. استدلال علمی این موضوع آنست که خمیر سیمان باید بطور کامل سطوح هر یک از ذرات سنگدانه‌ها را بپوشاند و با پرکردن فضای خالی بین آنها زنجیره‌های مستحکمی تشکیل دهند [۱۹]؛ همچنین رفتار رئولوژیکی بتن وابسته به پارامترهای رئولوژیکی خمیر سیمان همچون شکل‌پذیری و قابلیت ارتجاعی-چسبناکی آن است [۲۰]؛ اما باید پذیرفت که خمیر سیمان حدود ۲۵٪ وزن بتن را تشکیل می‌دهد. برای فراهم نمودن خمیر مناسب سیمان، آب موردنیاز^۳ بسیار تعیین کننده در کارایی می‌باشد. جهت هیدراسیون سیمان منابع و مراجع مختلف حداقل نسبت آب به سیمان (W/C) را ۰/۲ تا ۰/۲۲ معرفی نموده‌اند؛ لیکن در این نسبت کارایی به اندازه‌ای کم است که ساخت و متراکم‌سازی آن خمیر بسیار مشکل است. از این رو میزان آب اولین محدودیت برای کارپذیری^۴ مطلوب در بتن (بدون افزودنی) است [۲۱]. حال آنکه این موضوع به سیمان (غلظت نرمال) و سنگدانه‌ها (دانه‌بندی، درصد شکستگی، شکل و جنس آنها) مربوط می‌شود. فارغ از این موضوع در منابع موجود برخی موارد همچون واکنش سیمان با افزودنی‌ها، روند رشد مقاومتی، عملکرد در اسلامپ‌های سفت، روان و خیلی روان و ... کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند.

واقعیت آنست که فرآیند تولید سیمان، کاری بسیار حساس و دشوار است و ابهاماتی برای مصرف‌کنندگان جهت حصول اطمینان از طی فرآیند وجود دارد. بعنوان نمونه می‌دانیم که نحوه خنک‌سازی کلینکر حتی در فاز بلیت تاثیر گذاشته و میزان $\alpha C2S$ زیاد شده (سیمان با گرمای هیدراسیون پائین) و لذا استحکام سیمان را بالا می‌برد، چرا که مقاومت فرم $\alpha C2S$ بالاتر از $\beta C2S$ است [۷]. اما مصرف کننده غالباً برای ارزیابی این موضوع صرفاً ناچار به انجام آزمایش‌های محدود بر روی نمونه سیمان می‌باشد. انتخاب بهینه و تحلیل مناسب از این آزمایش‌های محدود برای انتخاب سیمان مناسب در مخلوط بتن هدف اصلی این پژوهش می‌باشد.

۲. مواد و مصالح تحقیق

در این مطالعه نمونه‌های سیمان از نه کارخانه (و شهرهای مختلف) به شرح جدول ۱ تهیه شده‌اند. به لحاظ سختی تامین نمونه‌های کاملاً یکسان و نیز بررسی تاثیر این موضوع تنوع در تیپ سیمان وجود دارد. شواهد در بازار نشان داده است که وجود یک تیپ مشخص سیمان از کارخانه‌های مختلف در یک برهه زمانی کمتر محتمل می‌باشد.

جدول ۱: انواع سیمان مورد استفاده در طرح مخلوط بتن‌های آزمایشی

| نام کارخانه | شرق مشهد | زاوه تربت | نائین اصفهان | شاهرود | آبیک | تهران | تهران اسپندار قم | ساوه | سبزوار |
|-------------|----------|-----------|--------------|--------|-------|-----------|------------------|-------|--------|
| نوع سیمان | تیپ ۲ | تیپ ۱-۵۲۵ | تیپ ۵ | تیپ ۲ | تیپ ۲ | تیپ ۱-۴۲۵ | تیپ ۲ | تیپ ۲ | ۱-۴۲۵ |

به منظور رعایت مسائل رقابتی و تبلیغاتی در این تحقیق، سیمان‌های مورد اشاره کدگذاری شده‌اند و نتایج آزمایش‌ها بدون ارجاع به نوع سیمان و نام برند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ماسه مورد استفاده برای تهیه مقاومت ملات استاندارد از شرکت نورمن سند آلمان بوده است.

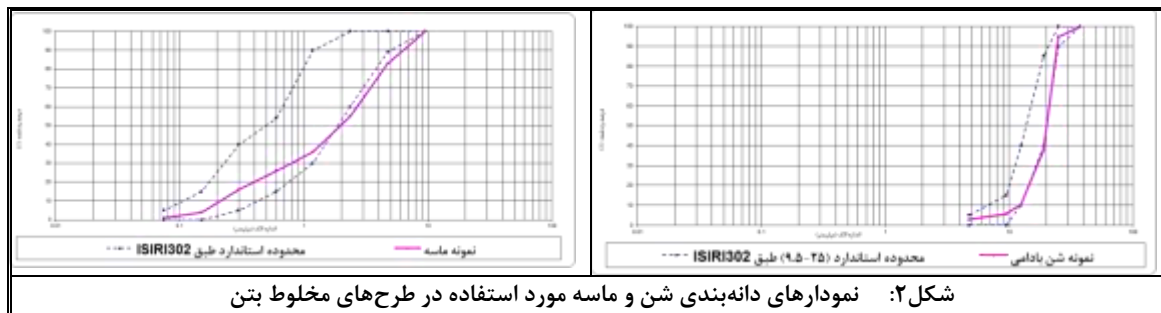
همانطور که می‌دانیم بتن حاوی مصالح سنگی تیز گوشه، مقاومت (خمش) بالاتری نسبت به بتن حاوی مصالح سنگی گرد گوشه دارند و از طرفی دیگر در مخلوط‌های با کارایی یکسان (به عبارتی اسلامپ برابر)، مصالح سنگی گرد گوشه به آب کمتری

^۲ مطابق تحقیقات انجام گرفته حدود مشخصات فنی استانداردهای سیمان کنونی مورد استفاده در دنیا بسیار مشابه هم هستند و البته در نگارش ویرایش‌های جدید تقریباً به جای الزامات، پیشنهادات با توجه به شرایط پروژه‌ای و عملکردی آن ارائه شده است [۱۸].

^۳ Water demand

^۴ Workability

نسبت به مصالح گردگوشه نیاز دارند. همچنین هزینه و دسترسی به سنگدانه‌های طبیعی در شرایط مختلف، متفاوت است. به همین سبب معمولاً سنگدانه‌های نیمه شکسته برای بتن‌ریزی‌ها انتخاب می‌شوند. همچنین استفاده از سنگدانه با حداکثر اندازه (MSA^۵) بزرگتر (تا حدی)، منجر به افزایش مقاومت، کاهش هزینه، افزایش چگالی [۲۲]، کاهش پمپ‌پذیری، کاهش قابلیت بتن‌ریزی در مقاطع نازک یا تراکم آرماتور، افزایش آب‌انداختگی و ... می‌شود. از این رو غالباً ساخت بتن‌های آماده با سنگدانه MSA:25mm انجام می‌گیرد. مبنای انتخاب مصالح سنگی برای تهیه مخلوط بتن‌های آزمایشی در این تحقیق نیز بر همین منوال بوده است. شکل ۲ و جدول ۲ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به عدم استفاده شن ریز (نخودی) در اکثر کارگاه‌ها (که البته مشکلاتی را در بر دارد)، در این مطالعه نیز جهت یکسان‌سازی با شرایط اجرایی از این نوع سنگدانه استفاده نشده است. محل تهیه مصالح سنگی بازافتی^۶ شن‌شوئی جنوب تهران می‌باشد. استفاده بهینه از سنگدانه‌های درشت به لحاظ اینکه باعث کاهش مصرف سیمان [۲۳] می‌شود، نیز مورد توجه بوده است.



شکل ۲: نمودارهای دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتن

جدول ۲: مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

| نوع مصالح | مدول نرمی (FM) | درصد جذب آب | وزن مخصوص (SSD) | درصد شکستگی | درصد گذشته از الک ۲۰۰ |
|------------------------------|----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| شن متوسط نیمه شکسته (بادامی) | ۷/۵ | ۱/۴ | ۲/۵۵ | ۶۲ | ۰/۹ |
| ماسه نیمه شکسته | ۳/۸ | ۲/۴ | ۲/۵۸ | * | ۱/۱ |

نتایج آنالیزهای شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی نمونه سیمان‌ها نیز در جداول ۳ و ۴ گردآوری شده است.

جدول ۳: نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های سیمان مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 21/78 | 20/48 | 20/28 | 21/36 | 20/70 | 20/58 | 22/24 | 20/00 | 20/16 | 20/56 |
| Al ₂ O ₃ | 6/07 | 4/95 | 5/92 | 4/86 | 4/75 | 5/06 | 4/58 | 5/12 | 5/48 | 5/30 |
| Fe ₂ O ₃ | 3/67 | 3/51 | 3/55 | 3/36 | 3/51 | 3/43 | 3/85 | 3/60 | 3/58 | 3/80 |
| CaO | 63/06 | 64/40 | 63/17 | 64/06 | 62/05 | 62/38 | 62/50 | 63/17 | 62/16 | 62/94 |
| MgO | 2/09 | 1/69 | 2/82 | 2/82 | 3/70 | 3/62 | 2/74 | 3/22 | 2/66 | 1/85 |
| So ₃ | 1/55 | 2/13 | 1/81 | 1/85 | 3/21 | 2/76 | 2/17 | 1/92 | 2/89 | 2/43 |
| Na ₂ O | 0/527 | 0/384 | 0/299 | 0/185 | 0/053 | 0/084 | 0/076 | 0/524 | 0/776 | 0/535 |
| K ₂ O | 0/564 | 0/595 | 0/636 | 0/590 | 0/613 | 0/628 | 0/575 | 0/471 | 0/498 | 0/657 |
| LOI | 0/79 | 2/14 | 1/71 | 1/27 | 1/43 | 1/68 | 1/44 | 2/12 | 1/62 | 1/92 |
| C ₃ S | 40/7 | 62/۲ | 53/0 | 55/7 | 49/2 | 50/۸ | 42/9 | 60/1 | 49/۷ | 52/0 |
| C ₂ S | 31/7 | 11/8 | 18/1 | 19/۲ | 22/2 | 20/۷ | 31/۴ | ۱۲/۰ | 20/3 | 19/7 |

⁵ Maximum Size Aggregate

⁶ Recycled

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C ₃ A | 9/۹ | 7/۲ | 9/۷ | 7/۲ | 6/6 | 7/۱ | 5/6 | 7/۵ | 8/۵ | 7/6 |
| C ₄ AF | 11/۲ | 10/۷ | 10/8 | 10/2 | 10/۷ | 10/4 | 11/7 | 10/9 | 10/۹ | 11/۶ |
| ALM ⁷ | 1/65 | 1/41 | 1/67 | 1/45 | 1/35 | 1/48 | 1/19 | 1/42 | 1/53 | 1/39 |
| SIM ⁸ | 2/24 | 2/42 | 2/14 | 2/60 | 2/51 | 2/42 | 2/64 | 2/29 | 2/23 | 2/26 |
| LSF ⁹ | 89/40 | 98/37 | 95/60 | 94/59 | 94/23 | 94/77 | 89/05 | 98/11 | 95/28 | 94/94 |

جدول ۴: نتایج آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های سیمان مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

| پارامتر | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
|--------------------------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| مقاومت | ۳ روزه | 35 | 44 | 33 | 38 | 37 | 35 | 31 | 35 | 33 | 35 |
| خمشی | ۷ روزه | 42 | 56 | 51 | 49 | 46 | 48 | 44 | 52 | 47 | 44 |
| (Kg/cm ²) | ۲۸ روزه | 62 | 69 | 67 | 68 | 69 | 66 | 58 | 66 | 61 | 63 |
| مقاومت | ۳ روزه | 212 | 270 | 209 | 233 | 230 | 243 | 190 | 215 | 202 | 180 |
| فشاری | ۷ روزه | 341 | 404 | 356 | 374 | 315 | 335 | 275 | 343 | 292 | 285 |
| (Kg/cm ^۲) | ۲۸ روزه | 493 | 506 | 492 | 526 | 435 | 453 | 375 | 465 | 413 | 345 |
| میز جریان (mm) flow | | 19/2 | 19/0 | 19/2 | 19/6 | 18/9 | 18/8 | 18/9 | 18/5 | 18/8 | 19/5 |
| شاخص نرمی-بلین (gr ^۲ /cm) | table/ | 376 | 341 | 284 | 289 | 304 | 294 | 292 | 331 | 320 | 282 |
| وزن مخصوص (gr/cm ³) | | 2 | 8 | 7 | 0 | 0 | 2 | 0 | 5 | 7 | 0 |
| | | 3/12 | 3/05 | 3/08 | 3/05 | 3/09 | 3/13 | 3/05 | 3/11 | 3/07 | 3/06 |

۳. روش و شرح برنامه پژوهش

ساخت مخلوط بتن آزمایشی با نمونه سیمان‌های مختلف و انجام یک سری آزمایش بر روی آنها در برنامه کار تدوین شده است. در کلیه طرح‌های مخلوط بتنی، کیفیت مصالح (اعم از شن و ماسه) و آب (آشامیدنی)، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما^{۱۰}، ابزار مورد استفاده، آزمایشگرها و ... تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان مصرفی باشد (شکل ۳). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده است. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شده است و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود ۰/۳۵:n (مابین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شده است که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۱۰] و البته بعلت فقدان ذرات شن ریز (نخودی) از محدوده کمی منحرف می‌باشد. برای تهیه این مخلوط ۷۳٪ ماسه با ۲۷٪ شن مخلوط شده است (شکل ۴). در عمل (کارگاه‌های بتن‌ساز) برای صرفه‌جویی در هزینه و بهره‌گیری از مقاومت سنگدانه درشت از میزان بیشتری شن در مخلوط استفاده می‌نمایند و احتمال عدم استفاده از مخلوط حاوی ۲۷٪ شن وجود دارد؛ اما باید دقت شود تعیین مقادیر شن و ماسه بر اساس طرح ملی مخلوط بتن صورت می‌گیرد تا بهترین دانه‌بندی و جورشدگی دانه‌ها در بتن با استفاده از سنگدانه‌های موجود صورت پذیرد.

مشابه بخش‌هایی از این مطالعه در تولیدی‌های بزرگ بتنی و یا مراکز تحقیقی تولیدکنندگان سیمان جهت رصد کیفی سیمان‌های بازار صورت می‌گیرد، اما غالباً با دیدگاه تک بعدی و معیارهایی محدود پایش انجام می‌شود. نمودار دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتن

⁷ Alumina Modulus/Alumina iron ratio (AM) = Al₂O₃/Fe₂O₃

⁸ Silica Modulus/Ratio (SM)= SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)

⁹ Lime saturation factor = CaO/(2.8 SiO₂ + 1.1 Al₂O₃ + 0.7 Fe₂O₃)

^{۱۰} به نظر می‌رسد دمای سیمان مستقیماً تأثیری در مقاومت بتن نداشته باشد، لیکن افزایش دمای اولیه بتن تازه باعث تسریع در روند کسب مقاومت را بدنبال داشته باشد.

بتن



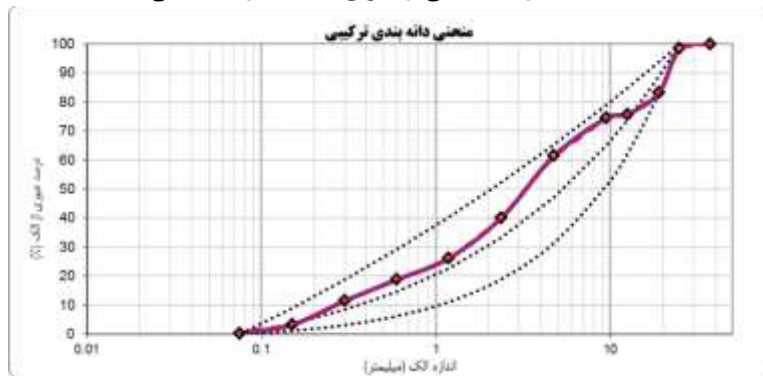
فیزیکی
و
مکانیکی
سیمان



شیمیایی
سیمان



شکل ۳: نمائی از اجرای عملیات آزمایشگاهی



شکل ۴: منحنی دانه بندی ترکیبی مورد استفاده در طرح های مخلوط بتنی آزمایشی

در این پژوهش اساس ساخت مخلوط بتن های آزمایشی بر مبنای جدول ۳ برنامه ریزی شده است. البته ظاهر مخلوط های بتنی بسیار متنوع شدند که بهترین انواع آنها در شکل ۵ دیده می شود. لازم به ذکر است که ظاهر برخی از مخلوط های بتنی بسیار نامناسب (دارای جداسدگی، آب انداختگی و ...) نیز بوده است.



کارائی سفت-
گروه ۳

کارائی خمیری-
گروه ۱

کارائی روان-
گروه ۳

کارائی خیلی روان- گروه ۵

کارائی خیلی روان با افزودنی-
گروه ۲

شکل ۵: مخلوط بتن های آزمایشی با کارائی های مختلف

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، طبقه‌بندی و برنامه‌ریزی ادامه عملیات آزمایشگاهی بر اساس ساخت مخلوط‌های بتنی با مشخصات مختلف و تقریباً پرکاربرد می‌باشد. البته دسته‌بندی گروه‌ها و پایش سیمان می‌تواند به فراخور نحوه مصرف و شرایط تولید بتن تغییر نماید.

واضح است در هر عملیات آزمایشگاهی-پژوهشی امکان حصول نتایجی مغایر با مطالب تئوری و تجربی وجود دارد. لذا اولین اقدام کنترل فرآیند و در صورت نیاز تکرار آزمایش‌ها می‌باشد. در صورت رفع مغایرت موضوع به خطای آزمایشگاهی تعمیم می‌یابد و در غیر اینصورت باید بررسی کامل‌تری انجام پذیرد. این مطالعه نیز از این قاعده مستثنی نبوده و بطور تصادفی سه طرح مخلوط و تعدادی آزمایش جهت حصول اطمینان صحت‌سنجی شده‌اند.

جدول ۵: مبنای ساخت مخلوط بتن‌های آزمایشی

| گروه | نسبت آب به سیمان (W/C) | هدف ^{۱۱} | عملیاتی | افزودنی | هدف و کاربرد |
|------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--|--|
| ۱ | مورد بررسی در مخلوط‌های آزمایشی | خمیری (S1) | 7 ± 0.5 | ندارد | بررسی عملکرد سیمان در بتن معمولی ^{۱۲} با نگاه کارگاهی و صرفاً ساخت سنتی بتن |
| ۲ | ۰/۴ | خیلی روان (S4) | مورد بررسی در مخلوط‌های آزمایشی | ۱٪ (فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی) | بررسی عملکرد سیمان در بتن‌های HSC ^{۱۳} و RCC ^{۱۴} (یا بتن‌های بدون اسلامپ [۲۴]) با نسبت آب به سیمان نسبتاً پایین و افزودنی مطلوب |
| ۳ | ۰/۴ | سفت (S1) | مورد بررسی در مخلوط‌های آزمایشی | ندارد | بررسی عملکرد سیمان در بتن‌های HSC ^{۱۵} با نسبت آب به سیمان نسبتاً پایین (هنگام خطا در ساخت و اجرا) |
| ۴ | ۰/۶۵ | روان (S3) | مورد بررسی در مخلوط‌های آزمایشی | ندارد | بررسی عملکرد سیمان در بتن معمولی با نگاه کارگاهی در صورت افزایش آب به بتن برای مصرف (نظارت ناکافی در بتن‌ریزی-رایج در کارگاه‌های سنتی) |
| ۵ | ۰/۷۶ | خیلی روان (S4) | مورد بررسی در مخلوط‌های آزمایشی | ندارد | بررسی عملکرد سیمان در بتن معمولی با نگاه کارگاهی در صورت افزایش بی‌رویه آب به بتن جهت مصرف (عدم کنترل و نظارت در اجرا) |

جدول ۶: نتایج مخلوط‌های بتنی با سیمان‌های مختلف-گروه اول-بررسی بتن با اسلامپ خمیری

| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| اسلامپ (cm) | ۷/۰ | ۶/۵ | ۷/۰ | ۷/۰ | ۷/۵ | ۷/۰ | ۷/۰ | ۶/۵ | ۷/۰ | ۶/۵ |
| W/C نهایی | ۰/۵۲ | ۰/۵۲ | ۰/۵۲ | ۰/۵۰ | ۰/۵۳ | ۰/۵۱ | ۰/۵۶ | ۰/۵۳ | ۰/۵۲ | ۰/۵۸ |
| چگالی بتن تازه | ۲/۳۲ | ۲/۳۷ | ۲/۴۰ | ۲/۳۱ | ۲/۳۹ | ۲/۳۹ | ۲/۳۱ | ۲/۳۲ | ۲/۳۰ | ۲/۳۷ |
| مقاومت ۳ روزه | ۱۳۲ | ۱۴۳ | ۱۲۱ | ۱۶۷ | ۱۳۰ | ۱۳۲ | ۱۰۷ | ۱۹۳ | ۱۰۵ | ۹۱ |
| فشاری ۷ روزه | ۲۰۴ | ۱۸۶ | ۲۳۶ | ۳۶۱ | ۲۰۹ | ۲۵۴ | ۱۱۳ | ۲۳۴ | ۲۱۵ | ۱۶۲ |
| ۲۸ روزه (۲Kg/cm) | ۳۸۸ | ۳۸۹ | ۳۶۳ | ۴۲۰ | ۳۸۵ | ۳۴۹ | ۲۹۵ | ۳۷۱ | ۲۷۸ | ۲۳۳ |

^{۱۱} طبق روش ملی مخلوط بتن [۲]

^{۱۲} Normal Concrete

^{۱۳} High Strength Concrete

^{۱۴} Roller Compacted Concrete

^{۱۵} High Strength Concrete

هشتمین کنفرانس سالیانه بتن ایران-تهران-۱۵مهرماه۱۳۹۵

| | | | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| روزه ۹۰ | ۵۰۸ | ۴۶۱ | ۴۳۶ | ۴۴۳ | ۴۱۵ | ۴۶۱ | ۳۳۷ | ۴۳۱ | ۳۲۹ | ۲۷۹ |
| روزه ۱۸۰ | ۵۳۳ | ۴۶۳ | ۴۷۴ | ۴۵۷ | ۴۶۳ | ۴۷۰ | ۳۹۸ | ۴۴۳ | ۳۸۴ | ۳۰۷ |
| روزه ۳۶۵ | ۵۴۰ | ۴۶۰ | ۴۹۳ | ۴۸۳ | ۵۱۲ | ۴۹۹ | ۴۱۲ | ۴۷۳ | ۴۰۳ | ۳۱۸ |

جدول ۷: نتایج مخلوط‌های بتنی با سیمان‌های مختلف-گروه دوم-بررسی بتن با w/c:0/4 و افزودنی با دوز ثابت

| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| اسلامپ (cm) | * | * | * | ۱۳ | ۱۸ | * | ۱۶ | ۳ | * | * |
| جریان اسلامپ (cm) | ۵۵ | ۳۷ | ۶۰ | * | * | ۳۷ | * | * | ۵۰ | ۴۱ |
| w/c نهایی | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ |
| چگالی بتن تازه | ۲/۳۸ | ۲/۳۸ | ۲/۳۷ | ۲/۴۱ | ۲/۳۳ | ۲/۳۴ | ۲/۳۴ | ۲/۴۰ | ۲/۳۷ | ۲/۴۰ |
| مقاومت فشاری (Kg/cm ²) | | | | | | | | | | |
| روزه ۷ | ۳۳۶ | ۳۱۳ | ۳۰۶ | ۳۰۳ | ۴۳۲ | ۴۴۱ | ۳۵۸ | ۴۲۵ | ۲۵۳ | ۳۹۴ |
| روزه ۲۸ | ۴۸۹ | ۵۱۲ | ۴۲۰ | ۴۸۸ | ۵۰۶ | ۴۶۱ | ۴۸۲ | ۵۱۸ | ۴۵۷ | ۴۵۹ |
| روزه ۹۰ | ۷۱۵ | ۶۰۸ | ۵۸۸ | ۵۴۷ | ۵۲۳ | ۵۹۸ | ۶۱۲ | ۵۲۵ | ۵۱۶ | ۴۷۵ |

جدول ۸: نتایج مخلوط‌های بتنی با سیمان‌های مختلف-گروه سوم-بررسی بتن سفت با w/c:0/4

| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| اسلامپ (cm) | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| w/c نهایی | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ |
| چگالی بتن تازه | ۲/۳۶ | ۲/۳۴ | ۲/۳۶ | ۲/۳۵ | ۲/۳۳ | ۲/۳۸ | ۲/۳۸ | ۲/۳۵ | ۲/۳۳ | ۲/۳۶ |
| مقاومت فشاری (Kg/cm ²) | | | | | | | | | | |
| روزه ۷ | ۲۸۷ | ۲۵۸ | ۲۸۸ | ۲۶۳ | ۲۴۲ | ۲۸۵ | ۲۴۱ | ۲۱۷ | ۱۳۸ | ۲۵۵ |
| روزه ۲۸ | ۳۲۰ | ۳۱۹ | ۳۳۴ | ۳۴۳ | ۳۴۲ | ۳۷۷ | ۲۸۴ | ۲۴۴ | ۱۸۱ | ۳۹۹ |
| روزه ۹۰ | ۳۶۷ | ۳۶۳ | ۳۶۳ | ۳۵۷ | ۳۷۳ | ۳۹۵ | ۳۱۵ | ۲۶۴ | ۲۱۸ | ۴۱۵ |

جدول ۹: نتایج مخلوط‌های بتنی با سیمان‌های مختلف-گروه چهارم-بررسی بتن روان با w/c:0/65

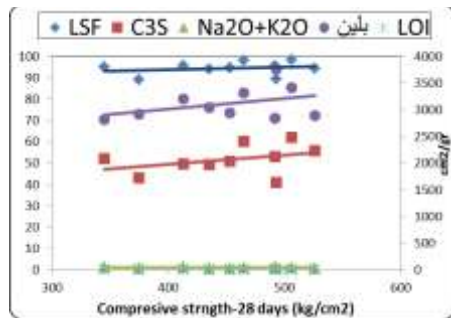
| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| اسلامپ/اسلامپ فلو (cm) | ۳۵ | ۳۸ | ۱۶ | ۲۳ | ۱۵ | ۱۹ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۳۳ |
| w/c نهایی | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ |
| چگالی بتن تازه | ۲/۳۵ | ۲/۲۷ | ۲/۳۰ | ۲/۲۲ | ۲/۲۷ | ۲/۲۳ | ۲/۳۴ | ۲/۲۱ | ۲/۳۷ | ۲/۳۲ |
| مقاومت فشاری (Kg/cm ²) | | | | | | | | | | |
| روزه ۷ | ۱۴۵ | ۱۴۶ | ۱۸۲ | ۱۹۵ | ۱۷۰ | ۱۹۳ | ۱۰۲ | ۲۲۳ | ۱۶۱ | ۱۲۹ |
| روزه ۲۸ | ۲۲۳ | ۲۸۰ | ۲۴۶ | ۲۶۷ | ۲۳۷ | ۲۵۴ | ۲۳۱ | ۳۷۲ | ۲۶۱ | ۱۸۸ |
| روزه ۹۰ | ۲۶۶ | ۳۳۷ | ۲۸۵ | ۲۹۵ | ۲۸۴ | ۲۹۰ | ۲۷۵ | ۳۸۱ | ۳۱۶ | ۲۳۹ |

جدول ۱۰: نتایج مخلوط‌های بتنی با سیمان‌های مختلف-گروه پنجم-بررسی بتن خیلی روان با w/c:0/76

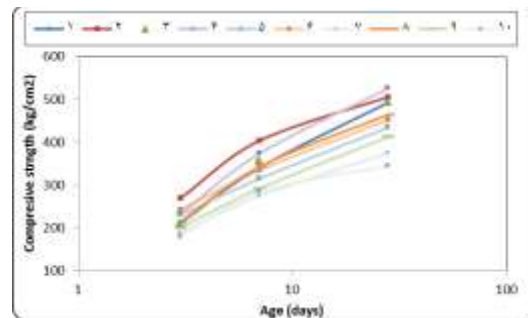
| پارامتر | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| اسلامپ/اسلامپ فلو (cm) | ۴ | ۵ | ۴۰ | ۳۳ | ۴۵ | ۳۵ | ۳۴ | ۵۴ | ۲۷ | ۵۵ |
| w/c نهایی | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ |
| چگالی بتن تازه | ۲/۲۱ | ۲/۲۵ | ۲/۱۸ | ۲/۱۹ | ۲/۱۹ | ۲/۲۳ | ۲/۲۵ | ۲/۲۱ | ۲/۲۲ | ۲/۱۸ |
| مقاومت فشاری (Kg/cm ²) | | | | | | | | | | |
| روزه ۷ | ۱۰۸ | ۱۸۱ | ۱۲۹ | ۱۳۰ | ۱۳۶ | ۱۷۴ | ۱۰۶ | ۱۶۱ | ۱۷۷ | ۱۲۱ |
| روزه ۲۸ | ۱۷۷ | ۲۶۰ | ۱۹۹ | ۱۹۵ | ۱۹۰ | ۲۵۰ | ۱۹۸ | ۲۱۵ | ۲۳۲ | ۲۲۰ |
| روزه ۹۰ | ۲۸۴ | ۳۱۷ | ۲۵۶ | ۲۵۵ | ۲۴۷ | ۲۹۹ | ۲۱۱ | ۲۵۸ | ۲۵۳ | ۲۳۸ |
| روزه ۱۸۰ | ۳۱۵ | ۳۳۳ | ۲۷۱ | ۲۶۸ | ۲۵۰ | ۳۱۹ | ۲۲۰ | ۲۶۳ | ۲۸۵ | ۲۷۷ |
| روزه ۳۶۵ | ۳۴۳ | ۳۴۹ | ۲۸۵ | ۲۷۱ | ۲۶۱ | ۳۵۲ | ۲۳۱ | ۲۶۸ | ۳۰۱ | ۲۸۵ |

۴. بحث و تحلیل

همانطور که انتظار می‌رود با توجه به تنوع در تیپ سیمان‌های مصرفی در آنالیزهای شیمیایی حاصله، فازها و مدول‌های مختلفی دیده می‌شوند. البته باید در نظر داشت که از تعداد ۱۰ نمونه سیمان مورد آزمایش، ۵ نمونه تیپ ۲ بوده است و این ۵ نمونه نیز نتایج متنوعی را نشان داده‌اند. لیکن واضح است که روند کسب مقاومت‌های کوتاه، میان و درازمدت در این نمونه‌ها متفاوت باشد (شکل ۶-الف). با توجه به نتایج محدود به دست آمده، تعمیم دقیق نقش هر پارامتر در مقاومت فشاری ملات این سیمان‌ها کمی مشکل می‌باشد (شکل ۶-ب). اما به وضوح می‌توان تاثیر مثبت افزایش میزان آلیت، LSF و نرمی و نیز تاثیر منفی نقش قلیائی‌ها و LOI در مقاومت ۲۸ روزه سیمان مشاهده نمود.



(ب)



(الف)

شکل ۶: نمودار^{۱۶} روند مقاومت فشاری طی زمان در ده نمونه سیمان برای ملات استاندارد (الف) نمودار بررسی عوامل کلی در مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد در ده نمونه سیمان مورد مطالعه (ب)

اختلاف در مشخصات فیزیکی و مکانیکی (مقاومت، نرمی، درصد مانده روی الک، زمان گیرش، سلامت و غلظت نرمال) و ترکیبات شیمیایی (LOI، کلر، سولفات، منیزیم و میزان فازهای آلیت، بلیت، آلومینات و فریت) در برندهای کلیدی سیمان بسیار قابل توجه است [۲۵]. در برخی منابع رابطه پیش‌بینی و تخمین مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان را بصورت زیر پیشنهاد داده‌اند:

رابطه ۱:

$$T (Strength/28days) = 64 - (0.4 * 45\mu/residue) + (0.2 * C3S) - (13 * Na2Oe) - (2 * LOI)$$

$T (Strength/28days)$: مقاومت ۲۸ روزه ملات سیمان (بر حسب مگاپاسکال)؛

$45\mu/residue$: درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون؛

C_3S : میزان فاز آلیت؛

Na_2O_e : میزان اکسید سدیم (قلیائی)؛

LOI^{17} : کسر وزنی سیمان ناشی از سوختن.

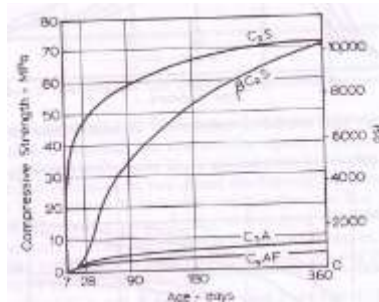
همانگونه که در این رابطه کلی و تخمینی مشاهده می‌شود، نقش و میزان اهمیت پارامترهای اصلی سیمان محرز است. باید توجه شود که در این رابطه به جای پارامتر بلین، درصد مانده روی الک ۴۵ میکرون به عنوان شاخصی از نرمی و دانه‌بندی بهینه سیمان پیشنهاد شده است. با توجه به تنوع نتایج به دست آمده در انواع نمونه‌های سیمان در این پژوهش، انتظار تنوع مقاومت طبق این رابطه منطقی است. برای مخلوط بتن آماده دانه‌بندی و نرمی سیمان تاثیر مهمی بر آب مورد نیاز، انسجام، آب‌داختگی،

^{۱۶} با توجه به نتایج متعدد در این مطالعه قابلیت پردازش و رسم نمودارهای مختلف وجود داشته است؛ اما تلاش بر آن بود تا بهترین و مختصرترین نمودارها گزارش شوند و به موضوع اصلی مقاله بیشتر پرداخته شود.

^{۱۷} Loss on ignition

پرداخت نهائی و روند کسب مقاومت بتن دارد [۲۶]. این موضوع در فرآیند ساخت مخلوط‌های بتنی پنج گروه بطور کلی نیز مشاهده شده است. از سوئی دیگر اثرات بلین بعلت تاثیر در غلظت نرمال سیمان و تغییر مصرف آب در بتن [۹] منجر به تغییر در نسبت W/C و در نهایت تغییر در مقاومت فشاری می‌گردد.

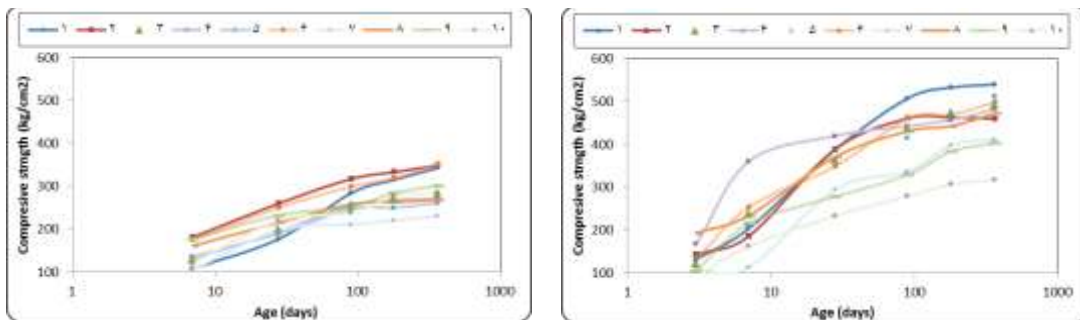
بهبود مقاومت کوتاه و میان مدت در اثر فاز آلایت بطور علمی و تجربی برای کارشناسان مسجل می‌باشد. آنچنان که برای سیمان‌های با مقاومت اولیه زیاد، حداقل فاز آلایت ۵۵٪ برای کلینکر پیشنهاد شده است [۲۷]. اما باید دقت شود همانگونه که در نمودار (شکل ۷) نیز دیده می‌شود عمده تاثیر و رشد مقاومتی در مقاومت کوتاه مدت دیده می‌شود؛ آنچنانکه طی ۷ روز اول حدود ۴۰٪ مقاومت یک ساله کسب می‌گردد. اگر چه سیمان‌های پرمقاومت (عمدتا به علت کاهش هزینه و گاه مورد نیاز برای شرایط خاص) مطلوب و مورد نظر در اغلب پروژه‌ها و سازه‌ها می‌باشد؛ اما باید دقت شود هرچه سیمان‌ها دارای مقاومت اولیه بالاتر باشد، انباشت سخت تر و خطر هیدراسیون سریع تری دارند. از طرفی دیگر در بهترین شرایط نگهداری تقریباً ماهانه ۵٪ افت کیفیت خواهیم داشت [۲۹].



شکل ۷: تاثیر فازهای اصلی سیمان در مقاومت‌های کوتاه، میان و بلند مدت [۲۸]

افزایش قلیائی‌ها در سیمان باعث تسریع در زمان گیرش و افزایش روند افت اسلامپ خواهد شد؛ و البته بالا بودن مقادیر دمای محیط و عیار سیمان مزید بر علت خواهد شد. در سیمان‌های شماره ۹ و ۱۰ که دارای بالاترین مقادیر قلیائی‌ها هستند، افزایش روند اسلامپ بصورت شهودی بررسی گردید؛ که موید موضوع اشاره شده بود. از سوئی دیگر اگر در پروژه‌ای با مصالح سیلیسی بی‌شکل^{۱۸} روبرو هستیم، برای جلوگیری از پدیده واکنش پذیری از سیمانی با خاصیت قلیائی کم (درصد Na_2O درصد $\text{K}_2\text{O} \approx 0.16\%$ باید استفاده کنیم [۱۱]).

نمودار روند مقاومت فشاری طی زمان در دو گروه بهترین و بدترین مخلوط‌های بتنی بدون افزودنی در شکل ۷ مشاهده می‌شوند. همانگونه که در بخش دوم اشاره گردید برخی اوقات پس از ساخت یک بتن معمولی بدون افزودنی و با کارائی مناسب (گروه اول) متاسفانه با افزایش بی‌رویه آب در محل مصرف، بتن با کارائی خیلی روان (گروه پنجم) با کیفیتی بسیار نامطلوب ایجاد می‌گردد. در مقایسه نتایج این دو گروه دیده می‌شود که در اثر این افزایش بی‌رویه آب در مخلوط بتنی مناسب با کارائی خمیری افت مقاومت در سنین کم چندان مشهود نیست، اما در درازمدت این تغییر منجر به افت مقاومت جدی می‌گردد.

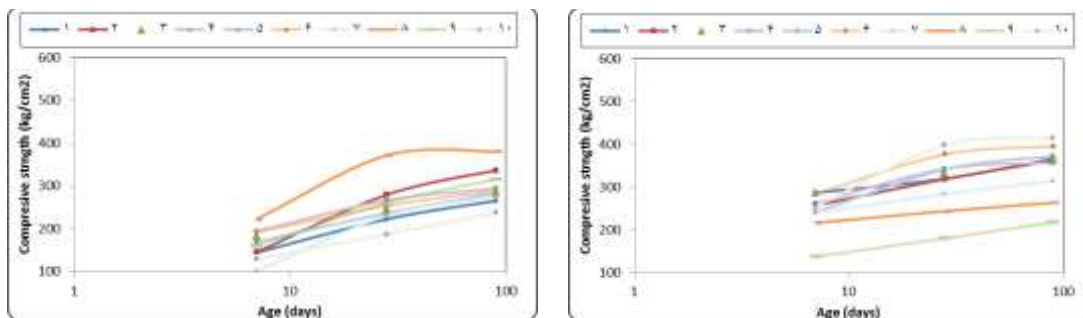


شکل ۸: نمودار روند مقاومت فشاری طی زمان در دو گروه بهترین (سمت راست) - گروه اول - بررسی بتن با اسلامپ خمیری و بدترین (سمت چپ) - گروه پنجم - بررسی بتن خیلی روان با $w/c:0/76$ مخلوط‌های بتنی

مقایسه اولیه مابین ملات و بتن نشان می‌دهد که شاید برخی پارامترها در ملات تاثیر بسزائی داشته باشد، اما در بتن این عوامل به وضوح مشاهده نمی‌شوند. به همین ترتیب برخی موارد که اثراتی در مقاومت بتن داشته‌اند، تاثیر چندانی در مقاومت

¹⁸ Amorph

ملاط نشان نداده‌اند. همچنین این نمودارها نشان می‌دهند که در سیمان‌های مختلف روند کسب مقاومت متفاوت است و شاید بتوان گفت معمولا بتنی که دارای مقاومت اولیه نسبتا بالا می‌باشد در میان و بلندمدت رشد چشمگیری نخواهد داشت و در عوض بتن با مقاومت اولیه پائین تر به مقاومت نهائی بیشتری می‌رسد.



شکل ۹: نمودار روند مقاومت فشاری طی زمان در دو گروه مخلوط‌های بتنی مختلف (سمت راست- گروه سوم-بررسی بتن سفت با w/c:0/4 سمت چپ-گروه چهارم-بررسی بتن روان با w/c:0/65)

مکررا پیش آمده است که در هنگام بتن‌ریزی کارائی (و اسلامپ) بتن مطلوب نباشد و برای پیمانکاران صنعت بتن افزایش آب زمان تخلیه و بتن‌ریزی غیرمعمول نیست. واقعیت آنست که وقتی بتن با کارائی نامناسب (سفت یا شل) به محل مصرف برسد، اصلاح این بتن در محل چندان میسر نیست و متاسفانه برخی اوقات با استفاده از آب یا سیمان اقدام به تصحیح آن می‌شود. این عمل قطعا غیرعلمی است و اتفاقات ناخوشایندی برای بتن به دنبال خواهد داشت. در این مواقع اقدام قابل کنترل و منطقی اصلاح بتن در محل بچینگ و در هنگام ساخت بتن است. لذا زمانی که علیرغم رعایت طرح اختلاط با اعمال تصحیح رطوبتی به کارائی و روانی موردنظر دست نیافتیم، اقدام به تصحیح می‌نمائیم. علت انتخاب گروه‌های چهارم و پنجم احتمال وقوع این موضوعات است. برخی اوقات در یک کارگاه تولید بتن، ممکن است به هر علتی تغییر در تولیدکننده سیمان مصرفی صورت پذیرد. لذا در صورت عدم کنترل سیمان جدید در طرح مخلوط آزمایشی وجود تغییرات غیر قابل پیش‌بینی در مخلوط بتن اجرائی محتمل می‌باشد. کنترل میزان این تاثیر را می‌توان به نتایج حاصله از گروه اول تعمیم داد. در یک طرح مشخص طبق قانون شصت برای افزایش اسلامپ به میزان یک اینچ (۲/۵ سانتی‌متر) به اندازه یک گالن (حدود ۴ لیتر) آب نیاز است [۳۰].

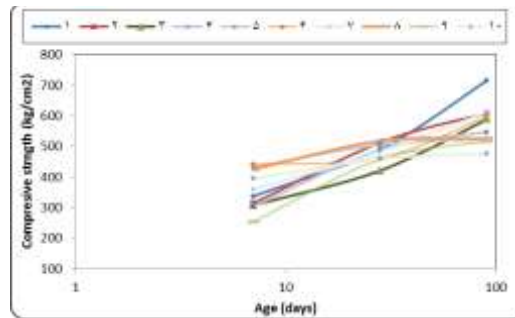
علت دیگر افت نسبی مقاومت نمونه‌های بتن ۲۸ روزه در گروه سوم نسبت به گروه اول (که حدود ۱۵٪ می‌باشد)، را می‌توان به هیدراسیون ناقص سیمان نیز مربوط دانست. متخصصان سیمان معتقدند اگر درجه اشباع‌شدگی سیمان کم شود (تقریبا کمتر از ۸۰٪)، بعلت ساختار خمیر سیمان هیدراته و فضاهای بسیار موئینه آب چندان قابلیت عبور نداشته و در نتیجه هیدراسیون ناقص انجام می‌شود و یا با سرعتی بسیار کند و غیر مطلوب انجام می‌شود. این درجه اشباع‌شدگی در انواع سیمان‌ها نیز مختلف می‌باشد و علت عملکرد و مشاهده مقاومت‌های متنوع در سیمان‌های مختلف فارغ از ملاحظات تکنولوژی بتن (تغییرات دانه‌بندی، تراکم، عمل‌آوری و ...) نیز با این موضوع مرتبط است. لذا به عبارتی ساده‌تر می‌توان گفت "آب برای هیدراسیون کامل و مناسب باید توانایی عبور از فضاها را داشته باشد".

مقایسه نتایج گروه سوم و اول نقش و اهمیت تراکم مورد نیاز بتن تازه برای کسب مقاومت در بتن سخت‌شده را نشان می‌دهد؛ شاید بتوان گفت علت تفاوت اندک (حدود ۱۵٪) نتایج ۲۸ روزه این دو گروه آنست که در آزمایشگاه عملیات تراکم ساختن آزمونه‌ها به روش دستی و با استفاده از کوبه^{۱۹} است و لذا کمی بهتر از شرایط اجرا انجام می‌گیرد. از سوئی دیگر افزایش نسبت آب به سیمان برای دستیابی به روانی موردنظر (اسلامپ: ۷) در برخی سیمان‌ها بقدری زیاد است که منجر به خنثی ساختن اثر بهبود تراکم و در نتیجه افت مقاومت می‌گردد. در بتن فشرده غلتکی [۳۱] ضمن کاهش زیاد نسبت w/c، با استفاده از غلتک عملیات تراکم بصورت مناسبی انجام می‌شود و قاندا نتایج مقاومتی بسیار مناسب‌تری را به دنبال خواهد داشت.

در گروه دوم بررسی بتن با w/c:0/4 و افزودنی پلی‌کربوکسیلاتی-روان‌ساز با دوز ثابت ۱٪ نتایج پیچیده‌تری از گروه‌های قبلی نشان دادند (شکل ۱۰)؛ زیرا که برخی سیمان‌ها در واکنش به این مقدار افزودنی واکنش نامناسب (و حتی اوردوز) داشتند. این مسئله از نظر متخصصان مواد افزودنی در بتن کاملا منطقی است، زیرا که تولیدکنندگان افزودنی بطور معمول محدوده میزان مصرف مواد را پیشنهاد می‌دهند و عمدتا با توجه به طرح مخلوط بتن، نوع سیمان، شرایط اجرا و ... مقدار دقیق آن تعیین می‌شود. همچنین وقتی دمای بتن از حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر می‌رود، معمولا افزودنی عملکردی متفاوت و واکنش‌هایی

^{۱۹} Rammer

دور از انتظار با برخی از سیمان‌ها را دارند. در برخی پروژه‌ها تلاش می‌شود تا با استفاده از کندگیر کننده و کنترل زمان گیرش دمای غیرمجاز بتن را کنترل کرد و با توجه به توضیحات ارائه شده این اقدام مردود است.

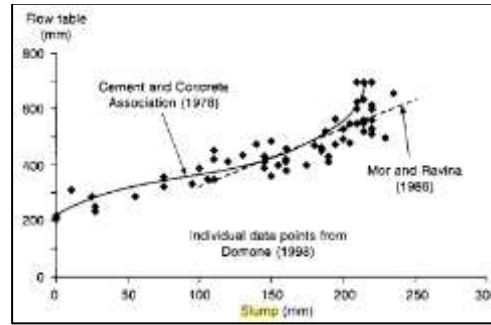


شکل ۱۰: نمودار روند مقاومت فشاری طی زمان در گروه دوم-بررسی بتن با $w/c:0/4$ و افزودنی با دوز ثابت

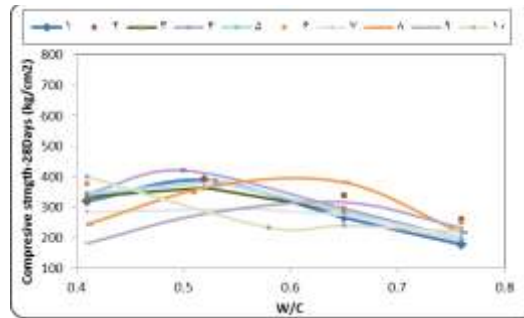
از تحلیل کلیه نتایج و بررسی مقایسه رندها نتایج بسیار جالبی مشاهده می‌شود. نمودارهای متعددی ترسیم شدند تا مقایسات کاملی انجام شود، لذا برخی فرضیات یا تئوری‌های غیر بومی در این نتایج نیز دیده شدند. بطور مثال اگر در گروه پنجم (بررسی بتن خیلی روان با $w/c:0/76$) مجموع نسبت $\frac{\text{مقاومت 7 روزه}}{\text{مقاومت 28 روزه}}$ و نسبت $\frac{\text{مقاومت 365 روزه}}{\text{مقاومت 28 روزه}}$ را بررسی نمائیم، حدود 20.5% بدست خواهد آمد و یا اگر در گروه اول (بررسی بتن با اسلامپ خمیری) مجموع این نسبت‌ها را بررسی نمائیم، حدود 19.5% مشاهده می‌شود. توجیه و تفسیر علمی این موضوع آنست که اگر بتنی در کوتاه‌مدت مقاومت بالائی نشان دهد در بلندمدت مقاومت بالائی نشان نخواهد داد و بالعکس (اگر بتنی در کوتاه‌مدت مقاومت کمی نشان دهد، احتمالاً در بلند مدت مقاومت‌های بهتری کسب می‌گردد). از طرفی دیگر این موضوع صرفاً به موضوع میزان و نرخ رشد مقاومت بر می‌گردد. این بدان معناست که شاید در یک نمونه روند کسب مقاومت مطلوب و بیش از حدود پیشنهادی در منابع [۱۳] باشد، که البته آن حدود نیز اقتباس از تحقیقات غیربومی می‌باشد.

تصور آن است که آزمایش اسلامپ برای کنترل غیرمستقیم نسبت آب به سیمان در بتن‌های معمولی می‌باشد، اما نتایج گروه اول نشان می‌دهد که نباید چندان تکیه‌ای بر این موضوع داشت. به عبارتی دیگر شاید بتن ساخته شده با نوعی سیمان، روانی (اسلامپ) مناسبی را نشان دهد، اما ممکن است نسبت w/c به گونه‌ای باشد که مقاومتی دور از انتظار به ما نشان دهد. از سوئی دیگر انتظار آن است که نتایج آزمایش میز جریان در ملات استاندارد با مقادیر نسبت آب به سیمان در بتن گروه اول (بررسی بتن با اسلامپ خمیری) هم‌خوانی داشته باشند. علت آنست که با توجه به مصرف سنگدانه‌های یکسان در کلیه نمونه‌های سیمان، در هر دو (ملات و بتن) کسب کارائی (نتیجه آزمایش میز جریان و اسلامپ) ناشی از خواص خمیر سیمان باشد. اما در عمل با توجه به نتایج بسیار نزدیک به هم آزمایش میز جریان نمی‌توان این ارتباط را چندان برقرار نمود (البته تحقیقات نشان داده‌اند که ارتباط دقیق و خطی چندانی نیز وجود ندارد-شکل ۱۱). شکل ۱۲ نیز نحوه و میزان تاثیر مقدار نسبت w/c در نتایج مقاومتی ۲۸روزه به دست آمده را نشان می‌دهد که موید رفتار متنوع در سیمان‌های مختلف است.

توجه به مقاومت ملات استاندارد برخی اوقات موجب گمراهی طراحان بتن در انتخاب سیمان می‌شوند، زیرا که در عمل به صراحت می‌توان گفت که تبعیت مقاومت بتن از مقاومت ملات سیمان آن همیشگی نیست [۱۱]. در حقیقت ملات نوعی بتن با سنگدانه بسیار کنترل شده (دانه‌بندی محدود، سیلیس بالای 90% و ...) است و نسبت w/c آن کاملاً ثابت ($0/5$) در استاندارد ملی و $0/484$ در استاندارد امریکا (ASTM) می‌باشد؛ اما در بتن‌های مختلف این نسبت کاملاً متغیر است. از این رو صرفاً تکیه بر نتایج مقاومت ملات کفایت طراحی مخلوط بتن ندارد و برای حصول اطمینان نیاز به ساخت مخلوط آزمایشگاهی با مشخصات موردنظر و تعیین مقاومت آن باشد. شاید یکی از دلایل تعریف حدودی مقاومت بتن با توجه به مقاومت ملات در دستورالعمل‌های مختلف طراحی مخلوط بتن این موضوع باشد. حال آنکه حتی در روش معتبر امریکائی تمایزی به لحاظ نوع و مقاومت سیمان در طراحی مخلوط بتن دیده نمی‌شود.



شکل ۱۱: رابطه بین نتایج آزمایش اسلامپ و میز جریان [۳۲]



شکل ۱۲: مقایسه تاثیر تغییرات W/C در مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط‌های بتنی ساخته شده با ده نمونه سیمان

واقعیت آنست که نتیجه آزمایش اسلامپ به اندازه‌ای ساده و قابل فهم برای همگان (اعم از کارشناسان، اپراتورها و حتی کارگران) است که به عنوان رایج‌ترین نوع سنجش کارائی بتن تازه در کشور و حتی در دنیا محسوب می‌شود. البته این آزمایش دقت و خطای چندان مناسبی ندارد، اما با توجه به سهولت انجام و دلایل مطروحه همچنان پر کاربرد است. برخی آزمایش‌های بتن تازه همچون تعیین آب‌انداختگی [۳۳]، تعیین فاکتور تراکم‌پذیری بتن [۳۴]، شاخص پایداری چشمی^{۲۰} (VSI) [۳۵]، K-SLUMP [۳۶]، بال کلی [۳۷]، تعیین جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن [۳۸] و ... (شکل ۱۲) وجود دارند که علیرغم ارائه اطلاعات مفید امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً جمع‌آوری اطلاعات اولیه برای طراحی مخلوط بتن بطور کامل انجام نمی‌گیرد و در نتیجه طراحی نیز همه جانبه نخواهد بود؛ بطور مثال وقتی در طراحی مخلوط شرایط اجرای بتن (مانند تراکم آرماتور، قالببندی با اشکال غیرمعمول، بتن‌ریزی با پاکت^{۲۱} یا پمپاژ بتن به ارتفاع زیاد یا کم) بطور کامل در نظر گرفته نشود، ممکن است هر اقدامی (مثلاً افزایش آب به بتن) توسط مجری توجیه‌پذیر باشد. با توجه به اینکه در اغلب فعالیت‌های عمرانی تعداد آزمایش‌ها محدود می‌باشند؛ تهیه چک لیست کنترل مشاهدات ویژگی‌های مخلوط بتن آزمایشی کمک شایانی در شناخت بهتر سیمان دارد. پیشنهاد می‌شود جهت رسیدن به کلیاتی از مشخصات بتن تازه برای خود لیستی از شاخص‌های کنترل عینی و مشاهدات تهیه و در حین ساخت مخلوط بتن آزمایشی تکمیل نمایند. جدول ۱۱ به عنوان نمونه برای سیمان شماره ۴ تکمیل شده است. در پایان با امتیازدهی به هر مخلوط و سیمان دید مناسبی از انواع آن به دست خواهد آمد.



شکل ۱۳: آزمایش‌های بتن تازه که کمتر مورد استفاده در آزمایشگاه‌ها هستند.

^{۲۰} این آزمایش برای بتن‌های خودتراکم (SCC) تعریف شده است، اما با توجه به اینکه اساس آن بر مشاهده رفتار بتن پس از انجام آزمایش اسلامپ فلو [۳۹] می‌باشد، پیشنهاد می‌شود برای بتن معمولی نیز مشاهدات به کمک الگوهایی یادداشت شود.

^{۲۱} concrete skip bucket

جدول ۱۱: مشخصات مخلوط آزمایشی بتن تازه با سیمان شماره ۴ و گروه شماره ۱

| وضعیت مخلوط بتن آزمایشگاهی | | | | پارامتر |
|----------------------------|-------|-------|-------|---|
| بسیار زیاد | زیاد | متوسط | کم | |
| | | | ✓ | استعداد آب‌نداختگی |
| | | ✓ | | چگالی |
| | | ✓ | | قوام |
| | | ✓ | | کارپذیری ^{۲۲} اولیه و با تاخیر |
| | | ✓ | | اولیه |
| | | | ✓ | با تاخیر |
| | | | ✓ | پمپ پذیری ^{۲۴} |
| | ✓ | | | اولیه |
| | | ✓ | | با تاخیر |
| | | ✓ | | بافت خشن |
| | | | ✓ | استعداد جداشدگی ^{۲۵} |
| | | | ✓ | استعداد جمع‌شدگی |
| | ✓ | | | روند کاهش اسلامپ طی ساعت |
| | | | ✓ | زمان گیرش‌ها |
| ✓ | | | | قابلیت فشردگی با دست |

در مخلوط‌های بتنی گروه‌های ۵ گانه این پژوهش، طراحی تئوری مقاومت کمی بیشتر از مقاومت واقعی بوده است. اختلاف بین مقاومتهای تئوری و واقعی را می‌توان با حضور شکافهای موئی و ترک‌های ریز و طبق نظریه گرفت توجیه کرد. فرضیه گرفت بیان کرد تحت اثر بار، حضور ترکهای موئی و ریز منجر به تمرکز بسیار بالای تنش در نوک آنها می‌شود؛ بطوریکه هنگام تنش متوسط (اسمی) نسبتاً پائین در کل ماده، شکست میکروسکوپی موضعی می‌تواند اتفاق بیفتد. در حقیقت تمرکز تنش در لبه ترک سه بعدی است، اما بزرگترین ضعف زمانی اتفاق می‌افتد که جهت ترک عمود بر بار اعمال شده باشد.

تجربه نشان می‌دهد که قطعاً شرایط آب و هوایی پروژه، رطوبت نسبی محیط، شرایط حمل بتن (زمان گیرش سیمان، میزان قلیائی‌ها، عیار سیمان-روند افت اسلامپ) باید برای انتخاب سیمان در هر پروژه‌ای بصورت جداگانه و فارغ از نتایج نظر گرفته شود. یکی از روشهای آسان اطمینان از تاریخ تولید سیمان کنترل دمای آن در بونکر است. همانگونه که می‌دانیم سیمان تازه طی فرآیند سایش گرم می‌شود و دمای بسیار پائین آن می‌تواند نشانه‌ای از سیمان ذخیره شده قبلی باشد. از طرفی دیگر اگر در هوای گرم برای ساخت بتن از سیمان داغ (حرارت بالای ۷۰ درجه سانتیگراد) بدون تمهیدات خاصی استفاده شود، باعث افزایش دمای بتن به بیش از حد مجاز (۳۲ درجه سانتی‌گراد) مندرج در آئین‌نامه‌ها می‌شود. البته این شرایط منجر به گیرش آنی و احتمالاً

²² Workability

²³ Finishing

²⁴ Pumpability

²⁵ Segregation

مقاومت اولیه بالاتری می‌گردد، لیکن باید توجه شود که تسریع هیدراسیون و مقاومت اولیه به علت افزایش خمیر سیمان سخت شده بوده است؛ اما در این شرایط به علت رشد نامنظم کریستال‌ها، فضاهای خالی افزایش می‌یابد و روند کسب مقاومت در میان مدت و درازمدت کند و نامناسب خواهد بود. البته فارغ از این موضوع، میزان گرمای ویژه انواع سیمان بسیار محدود است و البته در سنگدانه‌ها متنوع‌تر است. این موضوع از این حیث حائز اهمیت است که برای تنظیم دمای بتن (در صورتیکه دمای انواع سیمان ورودی به کارگاه یکسان باشد) باید به تنوع سنگدانه توجه بیشتری داشته باشیم. واقعیت آنست که در نتایج بتن شرایط عمل‌آوری^{۲۶} بسیار مهم است و در مصارف خاص (عمل‌آوری قطعات پیش ساخته با بخار یا بتن‌ریزی در هوای گرم) باید این موضوع با دقت کنترل گردد.

در طراحی باید نکات مختلف در مصرف سیمان در نظر داشت. به طور نمونه با توجه به اینکه سیمان تیپ ۵ مورد استفاده برای محیط‌های سولفاتی است، در درازمدت نسبت به سایر سیمان‌های پرتلند بیشترین مقاومت را کسب می‌کند. اما طبق تحقیقات انجام شده، مصرف سیمان ضد سولفات در بتن مسلح ساخته شده و در معرض آب شور باعث نفوذ بیشتر یون کلر در بتن خواهد شد، لذا باید از سیمانی با فاز آلومینات (C_3A) بیشتر از ۵-۶٪ (تقریباً سیمان تیپ ۲) استفاده نمود [۸].

واقعیت آنست که در طراحی‌ها و مقایسات مهم دغدغه کارشناسان تامین مقاومت فشاری بتن سخت‌شده در سازه‌ها می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که پارامترهای کنترلی متنوع‌تر باشند. تصور می‌شود که همیشه برای کنترل با آزمایش‌های بیشتر به تجهیزات مختلفی نیاز است. اما باید گفت که همیشه این گونه نیست. بطور مثال به جای فراهم کردن قالب‌های استونه‌ای و ابزار نگهدارنده آن جهت تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم (روش برزیلین) می‌توان با استفاده از قالب مکعبی با ابعاد 10×10 سانتی‌متر از روش اروپائی [۴۰] استفاده نمود. قطعاً با انجام چند آزمایش محدود نمی‌توان دید مناسبی داشت و پایش مناسبی (برای سیمان و بتن) انجام داد.

باید پذیرفت زمانیکه مخلوط بتن تهیه شده است، کنترل عیار سیمان و طرح مخلوط کار چندان آسانی نیست؛ اما شاید یکی از ساده‌ترین راه‌های بررسی رعایت طرح اختلاط، کنترل دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها به روش شستشوی بتن تازه [۴۱] باشد. به کمک این روش اطمینان از دانه‌بندی و حتی درصد شکستگی مخلوط سنگدانه‌ها حاصل می‌شود و البته همچنان پایش سیمان (عیار و نوع) در بتن چندان مقدور نمی‌باشد. امروزه این آزمایش از روش‌های استاندارد انگلیس به علت کمبود دقت حذف شده است.

در مجموع باید گفت حدود استاندارد حداقل مشخصات مورد نیاز برای کیفیت (در حقیقت ملاک‌های محصول برای تولیدکننده و مصرف‌کننده) را نشان می‌دهند و در بازار رقابتی دست کم می‌باشند. با توجه به اینکه مصرف کنندگان سیمان کیفیت بالا همراه با یکنواختی زیاد سیمان را مطلوب می‌دانند، باید پذیرفت که مقدار معینی از نوسان (در کیفیت سیمان) اجتناب ناپذیر است، و حتی توسط کارشناسان و تولیدکنندگان بتن آماده مورد تأیید قرار گرفته است [۴۲]. همچنین باید دقت شود در تولیدی‌های سیمان علیرغم استاندارد بودن محصولات، بطور معمول اختلاف بین کیفیت نوع پاکتی (کیسه‌ای) با نوع فله (حمل توسط بونکر) وجود دارد. علت آنست که تولیدکنندگان سیمان محل کاربرد نوع پاکتی را در بنائی می‌دانند. با توجه به عدم تولید سیمان بنائی در کشورمان این موضوع واقعیت یافته است. از سوئی دیگر در تولید مکانیزه بتن (بچینگ) بعلت برخی محدودیت‌ها، سیمان پاکتی مصرف نمی‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود مبنای پایش را نزدیک به واقعیت انتخاب نمود.

۵. نتیجه‌گیری

۱. مقایسه نتایج ملات و بتن نشان دادند که برخی پارامترها در ملات و برخی دیگر در مقاومت بتن تاثیر داشته‌اند، لذا نباید تأکید بر تعبیت مقاومت بتن بر مقاومت ملات داشت.
۲. پایش‌ها و نمودارهای مختلف نشان داده‌اند که عمدتاً اگر بتنی در کوتاه‌مدت مقاومت بالائی نشان دهد، در بلندمدت مقاومت بالائی نشان نخواهد داد؛ و نیز اگر بتنی در کوتاه‌مدت مقاومت کمی نشان دهد، احتمالاً در بلندمدت مقاومت‌های بهتری کسب می‌گردد.
۳. علت افت نسبی مقاومت نمونه‌های بتن ۲۸ روزه در گروه سوم نسبت به گروه اول (که حدود ۱۵٪ می‌باشد)، را می‌توان به هیدراسیون ناقص سیمان و تراکم ناکافی دانست.
۴. در گروه دوم (بررسی بتن با $w/c:0/4$ و افزودنی با دوز ثابت) نیز نتایج پیچیده‌تر از گروه‌های قبلی شدند؛ زیرا که برخی سیمان‌ها در واکنش به این مقدار افزودنی واکنش نامناسب داشتند.
۵. نتایج مقاومتی بتن‌های گروه‌های چهارم و پنجم پائین‌ترین مقاومت‌ها و البته نسبت‌های رشد جالبی را نشان دادند.
۶. نسبت بهینه w/c در سیمان‌های مختلف، متنوع بوده است.

۷. با توجه به اینکه در اغلب فعالیت‌های عمرانی آزمایش‌ها محدود می‌باشند؛ تهیه چک لیست کنترل مشاهدات ویژگی‌های مخلوط بتن آزمایشی کمک شایانی در شناخت بهتر سیمان دارد. با توجه به جدول پیشنهادی ارائه شده برای ثبت مشخصات ظاهری بتن تازه، دسته‌بندی گروه‌ها و پایش سیمان می‌تواند به فراخور نحوه مصرف و شرایط تولید بتن تغییر نماید.
۸. اگر چه پارامترهای آلیت، مانده روی الک ۴۵ میکرون، LOI، قلیائی‌ها، زمان گیرش و غلظت نرمال سیمان اهمیت بسزائی در کیفیت آن دارد، اما کنترل مستقیم مقاومت سیمان در بتن اهمیت ویژه‌ای در پایش را داراست.

۶. تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تشکر و قدردانی ویژه‌ای از معاون سابق تحقیق و توسعه کارخانه سیمان تهران-آقای مهندس ذوالفقاری و نیز مدیریت محترم شرکت پرفاب- آقای مهندس لامعی داشته باشم. همچنین از کارشناسان محترم آزمایشگاه کارخانه سیمان تهران خانم مهندسین نیکفال، میرزازاده و فخرآو، تکنسین‌های آزمایشگاه و سایر پرسنل زحماتش آن کارخانه و نیز کارشناسان محترم شرکت تحقیق و توسعه سیمان سپاسگزارم.

۷. مراجع

- [۱] شیخان، ع. مصاحبه با رادیو اقتصاد (شهریور ۹۵).
- [۲] "طرح ملی مخلوط بتن"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۸۸).
- [۳] "ویژگیهای سیمان پرتلند" ISIRI 389، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران- ص ۱۲.
- [۴] "سیمان-قسمت ۱: ویژگی‌ها" ISIRI 17518-1-موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران-ص ۱۶.
- [۵] تدین، م. مهاجری، پ. شعبانیان، م. (۱۳۹۱) "بررسی تاثیر شکل سنگدانه بر مقاومت فشاری بتن" چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران-تهران-ص ۹.
- [۶] خادمی، م. اکبری، م. خادمی، س. (۱۳۹۴) "بررسی تاثیر جداگانه ی اجزای تشکیل دهنده ی بتن بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی آن". دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز-ص ۹.
- [۷] بکائیان، م. ۱۳۷۶ "هندبوک مهندسی سیمان، مواد نسوز و مصالح ساختمانی" انتشارات مرکز آموزش نیروی انسانی مجتمع صنعتی سیمان آبیگ-ص ۴۸۳.
- [۸] تدین، م. (۶ مرداد ۱۳۹۰) دوره‌های آموزشی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد مقدس.
- [۹] کفایش، ع. سعیدی، م. "بررسی توامان تغییرات نرمی سیمان در ملات و بتن" کنفرانس بین‌المللی سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، تهران، ۲۴ آذر ۹۴، ص ۱۲.
- [۱۰] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.
- [۱۱] معاریان، ح. "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران. ص ۴۴.
- [۱۲] کفایش، ع. رفیعی، م. "بررسی ارتباط مقاومت سیمان تهران در ملات و بتن". هفتمین کنفرانس سالیانه بتن ایران-تهران-۱۵مهر ۹۴، ص ۱۰.
- [۱۳] مقررات ملی ساختمان ایران-مبحث نهم-طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه-ص ۱۰۲.
- [14] ASTM C143-03 "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete".
- [15] BRE (Building Research Establishment) (Second edition-1988), "Design of normal concrete mixes". P13.
- [16] ASTM C150"Standard Specification for Portland Cement"- p3.
- [17] "Standard Performance Specification for Hydraulic Cement"-ASTM C1157-p3.
- [18] Frohnsdorff G and Clifton J. "Cement and Concrete Standards of the Future". NISTIR5933. (1997), p4.
- [19] Jordan,T. "An introduction to cement & concrete" p11.
- [20] Ramachandran V and Beaudoin J. "Handbook of analytical techniques in concrete science and technology"; Institute for Research in Construction National Research Council Canada 2001 .p38.
- [21] Dr. D. N. Ghosh (1992), "concrete and science technology & Cement private limited", p327.
- [22] ACI 211-1-91 (Reapproved 2002) "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" .
- [23] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". Prentice Hall, p20.
- [24] ACI211.3R-02," Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete".
- [25] Priyadarshana, T and Dissanayake, R. "Variation in Cement Properties and Its Effect on Quality of Concrete", p7.
- [26] Dewar D.J, Anderson R (1992) "Manual of Ready-Mixed Concrete". P40.
- [27] Duda, W. (1977) "cement data book" p253.
- [28] Neville, A. (1996). "Properties of Concrete". New York: John Wiley & Sons. P42.
- [29] Hodrban. "cement seminar-material technology". P16/33.
- [30] CEMEX, Technical Bulletin, 9.1 (2013), "The Effects of Water Additions to Concrete: "What's a little water going to hurt?"" p1.
- [31] ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001), "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements".
- [32] Newman, J. Choo, B(2003) "Advance concrete Technology set". ELSILVER, p1/9.
- [33] ASTM C232-(2013)."Standard Test Method for Bleeding of Concrete.
- [34] "Method for determination of compacting factor"-BS 1881:Part103:1983.
- [35] "Method of test for unobstructed slump flow and stability of hydraulic-cement self-consolidating concrete "-State of Nevada Department of Transportation Materials Division. Test Method Nev. T417B September 16, 2013.
- [36] ASTM C 1362 – 97 (Reapproved 2002), " Standard Test Method for Flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete"
- [37] ASTM C360-99, "Test Method for Ball Penetration in Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete"
- [38] ASTM C426-10"Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units".
- [39] K-ASTM C1611, " Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete".
- [40] EN 12390-p6 "Testing Hardened concrete- Part6: Tensile spilling strength of test specimens", p7.
- [41] JIS A 1112 (1989) (English), "Method of test for washing analysis of fresh concrete".
- [42] Harrisson, A. (April 2011). "prediction of cement quality" Cement chemistry, ICR, P66.