

۱ - کلیات

افزودنی^۱ ماده‌ای به غیر از سیمان پرتلند، سنگدانه، و آب است که به صورت پودر (گرد) یا مایع (آبکی)، به عنوان یکی از مواد تشکیل‌دهنده بتن و برای اصلاح خواص بتن، کمی قبل از اختلاط، در حین اختلاط و یا قبل از ریختن به آن افزوده می‌شود^[۱]. به عبارت دیگر، افزودنی‌ها اجزایی از بتن به غیر از سیمان هیدرولیکی، آب، سنگدانه‌ها و الیاف هستند که برای اصلاح و بهبود خواص بتن و ملات تازه و سختشده، به بتن افزوده می‌شوند^[۲].

افزودنی‌های بتن به دو گروه مواد افزودنی شیمیایی و معدنی تقسیم می‌شوند.

افزودنی‌های شیمیایی^۲ از فرآوری، ترکیب یا آمیزه‌کاری مواد آلی و معدنی در یک فرآیند شیمیایی به دست می‌آیند و در حالتهای پودر یا مایع و در مقادیر کم معمولاً تا حداقل ۵ درصد وزن مواد سیمانی در زمان ساخت و اختلاط و یا درست پیش از ریختن بتن، به مخلوط اضافه می‌شوند.

افزودنی‌های معدنی^۳ که یا به طور طبیعی یافت می‌شوند و یا از محصولات جانبی صنعتی هستند، به سه دسته مواد خنثی، پوزولان‌ها، و مواد شبه سیمانی تقسیم می‌شوند^[۳] و برای بهبود و اصلاح خواص مخلوط‌های سیمانی در مقادیر مصرف عموماً بیشتر از ۵ درصد وزن سیمان و در زمان اختلاط به بتن افزوده می‌شوند.

گستره این نشریه (نوشتار) دربرگیرنده افزودنی‌های شیمیایی بتن است و بررسی مواد افزودنی معدنی به دیگر نشریه‌های انجمن بتن ایران واگذار شده است.

۱-۱- اندرکنش بتن و افزودنی‌های شیمیایی

افزودنی‌های شیمیایی با مواد سیمانی در حال هیدراته شدن اندرکنش نشان می‌دهند و بر اساس نوع عملکردشان به سه رده مواد افزودنی با عملکرد فیزیکی، شیمیایی، و فیزیکی-شیمیایی تقسیم می‌شوند^[۴].

مواد افزودنی با عملکرد فیزیکی آن رده از افزودنی‌های شیمیایی هستند که در فرآیند واکنش آبگیری^۵ سیمان تاثیر مستقیم ندارند گو اینکه ممکن است بر روند و آهنگ آن تاثیر بگذارند. این افزودنی‌ها عموماً تا پیش از گیرش اولیه بتن، تاثیر و کارکرد خود را نشان می‌دهند و تاثیر آنها پس از گیرش، در بتن سفت‌شده و سختشده ادامه نمی‌یابد^[۵]. از جمله این

^۱ Admixture

^۲ Chemical admixtures

^۳ Mineral admixtures

^۴ Hydration

افزودنی‌ها می‌توان به کاهنده‌های آب، هواز اها، گازسازها، کفزاها، هواردها، ضد آبشستگی‌ها، آسانکننده‌های پمپاژ، رنگبخشها، و پیوندزاها اشاره کرد.

مواد افزودنی با عملکرد شیمیایی یا در فرآیند و روند واکنش آبگیری سیمان پیش از گیرش تاثیر می‌گذارند و یا ریزساختار محصولات آبگیری را پیش و پس از گیرش، دستخوش تغییر می‌کنند. بنابراین واکنش افزودنی‌های شیمیایی علاوه بر زمان پیش از گیرش، ممکن است در مراحل سخت‌شدنگی بتن نیز ادامه یابد^{۷۷}. گندگیرکننده‌ها، زوگیرکننده‌ها، زودسختکننده‌ها، منسطکننده‌ها، کنترلکننده‌های واکنش آبگیری، و ناگیرکننده‌ها در زمرة افزودنی‌های با عملکرد شیمیایی هستند.

مواد افزودنی با عملکرد فیزیکی- شیمیایی اگرچه در فرآیند واکنش شیمیایی آبگیری سیمان دخالتی نمی‌کند ولی با وارد کردن مواد شیمیایی ویژه به درون بتن، برخی از واکنش‌های شیمیایی یا رفتارهای فیزیکی بتن سخت‌شده را در آینده کنترل می‌کنند^{۷۸}. بازدارنده‌های خورده‌گی، کاهنده‌های انبساط واکنش قلیایی سیلیسی، نمبهندها، کاهنده‌های تراوایی، قارچ‌کش‌ها، میکروبکش‌ها، و حشرهکش‌ها در این رده از افزودنی‌ها قرار می‌گیرند.

۱ - دسته‌بندی افزودنی‌های شیمیایی
افزودنی‌های شیمیایی بر اساس نوع تاثیر و کارکرد اصلی که در بتن دارند به هفت دسته کلی تقسیم می‌شوند.

دسته ۱ - کاهنده‌های آب

افزودنی‌های کاهنده برای افزایش روانی بتن در مقدار آب معین، یا کاهش مقدار آب مصرفی با حفظ روانی، یا هر دو به کار می‌روند و شامل روانکننده‌ها، فوق روانکننده‌ها، و فرا روانکننده‌ها می‌شوند.

دسته ۲ - هواز

افزودنی است که در حین اختلاط، ساختاری همگن از ریزحباب‌های ناپیوسته در بتن، ملات، یا خمیر سیمان پدید می‌آورد و باعث بهبود کارایی (کارپذیری) و افزایش پایایی در برابر چرخه‌های یخزدن و آب‌شدن می‌شود.

دسته ۳ - گندگیرکننده‌ها

گندگیرکننده‌ها با گندکردن روند آبگیری سیمان، گیرش بتن را به تاخیر می‌اندازند و شامل دیرگیرکننده‌ها و ناگیرکننده‌ها می‌شوند.

دسته ۴ - شتاب‌دهنده‌ها (تسريعکننده‌ها)

شتا بد هنده‌ها (تسريع‌کننده‌ها) با تقدیر دن روند آبگیری سیمان موجب زودگیری، زودسختشدنگی، یا هر دو می‌شوند. شتاب‌دهنده‌ها شامل زودگیرکننده‌ها، آنی‌گیرها، و زودسختکننده‌ها هستند.

دسته ۵ - منبسط‌کننده‌ها

منبسط‌کننده‌ها برای افزایش حجم در بتن (ملات) تازه، جبران جمع‌شدگی بتن (ملات) سختشده، یا ایجاد انبساط کنترل شده در بتن (ملات) سختشده به کار می‌روند. این افزودنی‌ها در برگیرنده شامل جبران‌کننده‌های جمع‌شدگی، گازسازها، و کفزاها هستند.

دسته ۶ - پایاگرها (رومبهخش‌ها)

پایاگرها با کاستن از درون رفت (نفوذ) عوامل زیان‌آور، پایش (محافظت) می‌گردند، یا کنترل واکنش‌های زیانبار، پایایی بتن سختشده را بهبود می‌بخشند. کاهنده‌های تراوایی، نمبندها، بازدارنده‌های خوردگی، و کاهنده‌های انبساط واکنش قلیایی سیلیسی در این دسته از افزودنی‌ها جای می‌گیرند.

دسته ۷ - افزودنی‌های خاص

افزودنی‌های خاص دسته‌ای از افزودنی‌های شیمیایی با کاربرد ویژه و محدود هستند. ضدیخ‌ها، رنگبخش‌ها، هوازداها، آسان‌کننده‌های پمپاژ، ضد آب‌شستگی‌ها، کنترل کننده‌های واکنش آبگیری، پیوندزها (لاتکس)، قومبهخش‌ها نمونه‌هایی از افزودنی‌های خاص هستند.

۱-۳- کارکرد افزودنی‌های شیمیایی

هر ماده افزودنی با کارکرد اصلی آن تعریف و گروه‌بندی می‌شود. کارکرد اصلی یک ماده افزودنی عمده‌ترین اثر مورد انتظاری است که بر بتن دارد و بیانگر عملکرد شاخص آن افزودنی است. کارکرد فرعی، اثر یا اثراتی است که ماده افزودنی در مقیاس کوچکتر از کارکرد اصلی بر بتن می‌گذارد. برخی از افزودنی‌ها ممکن است چند منظوره باشند و بر چند خاصیت بتن تازه یا سختشده تاثیر بگذارند. برای نمونه، کاهنده‌های آب گندگیر علاوه بر کاهش مقدار آب، موجب گندگیری بتن نیز می‌شوند.

نکته ۱-۱ - برخی از افزودنی‌ها ممکن است دارای اثرات جانبی باشند. به طور مثال کارکرد اصلی افزودنی‌های کاهنده آب، کاهش آب بتن است ولی ممکن است اثرات جانبی گندگیری یا هوازایی نیز داشته باشند. اثر جانبی تاثیر ناخواسته و در مواردی حتی نامطلوبی است که افزودنی بر ویژگی‌های بتن دارد و باید به خاطر داشت که با کارکرد فرعی تفاوت دارد.

نکته ۲-۱ - گسترش روز افزرون افزودنی‌ها و کاربردهای موثر آن‌ها ممکن است به پیدایش افزودنی‌های جدیدی بیانجامد که در این دسته‌بندی هفتگانه جای نگیرند. در چنین مواردی

نقش آبین‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی خاص که از طرف تولیدکنندگان و یا مجامع علمی معتبر بین‌المللی صادر می‌شوند جایگاه ویژه‌ای برای ارزیابی و پذیرش این افزودنی‌ها به خود اختصاص می‌دهند و معیاری برای سنجش این نوع مواد به شمار می‌آیند.

۱-۴-۱- دلایل و مزایای استفاده از افزودنی‌های شیمیایی
بتن باید همگن، کارآ، پرداخت‌پذیر، مقاوم، پایا، و کمتر او باشد. در بسیاری از موارد با انتخاب مصالح و نسبت اختلاط مناسب و به کاربستن روش‌ها و استفاده از تجهیزات مناسب و افراد کارآزموده می‌توان به این ویژگی‌ها دست یافت. بهره‌گیری از افزودنی‌های شیمیایی در کنار مزایای بیشماری که دارد، دستیابی به این ویژگی‌ها را امکان‌پذیرتر و آسان‌تر خواهد کرد. در این راستا، مهمترین دلایل و مزایای استفاده از افزودنی‌های شیمیایی را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی کرد.

۱-۴-۱- کاهش هزینه ساخت و ساز
کاربرد افزودنی‌ها می‌تواند موجب صرفه‌جویی‌های گوناگونی گردد و علاوه بر جبران هزینه‌های ناشی از خرید افزودنی، امتیازات اقتصادی نیز به همراه داشته باشد. کاهش هزینه‌های ساخت و ساز به سه دسته صرفه‌جویی مستقیم، غیرمستقیم، و نهان تقسیم می‌شوند. صرفه‌جویی مستقیم آن بخش از کاهش هزینه‌ها است که به آسانی قابل محاسبه و سنجش است. از جمله این صرفه‌جویی‌ها می‌توان به کاهش مقدار سیمان و آب، افزایش بهره‌وری نیروی انسانی، کم‌شدن زمان اجرا، سهولت و افزایش راندمان عملیات بتنی، فراهم کردن امکان استفاده از سنگدانه‌ها و مصالح در دسترس، سهولت انتقال و ریختن بتن، سرعت بخشیدن در بازکردن قالب و سهولت در بسیاری دیگر از موارد اجرایی اشاره کرد.

صرفه‌جویی غیرمستقیم، کاهش هزینه‌های حاصل از بهبود کیفیت بتن، افزایش مقاومت‌های مکانیکی، اطمینان از یکنواختی تولید، کاهش مشکلات و کاستی‌های هنگام اجرا، کاهش یا حذف دوباره کاری‌ها، بهبود شکل ظاهري و کاهش تعمیرات سطوح بتنی، و موارد بیشمار دیگری را در بر می‌گیرد.

صرفه‌جویی نهان در برگیرنده کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. از جمله این موارد می‌توان به کاهش استهلاک تجهیزات و ماشین‌آلات، کاهش احجام و ابعاد اعضاي سازه، امکان طراحی‌های متنوع، استفاده بهینه از زمین با طراحی سازه‌های بلندتر، و امکان حذف نمازای اشاره کرد.

هر یک از افزودنی‌ها ممکن است تنها یک یا چند مزیت اقتصادی را به ارungan آورند که باستی در هنگام محاسبه هزینه‌های صرفه‌جویی شده مورد ارزیابی قرار گیرند.

۲-۴-۱ - تنظیم و بهبود ویژگی‌های بتن

اگرچه با انتخاب مصالح و نسبت اختلاط مناسب می‌توان به بسیاری از خواص مورد نظر بتن دست یافت ولی تنظیم و دستیابی به برخی از خواص بتن تازه و سختشده با استفاده از افزودنی‌ها، کارآمدتر، اقتصادی‌تر، و موثرتر از هر روش دیگری است. با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی می‌توان خواص بتن تازه را متناسب با شرایط اجرایی و محیطی تنظیم و ویژگی‌های بتن سختشده را مطابق با ضوابط فنی و شرایط بهره‌برداری اصلاح کرد. خواصی از بتن تازه را که می‌توان با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی تنظیم کرد عبارتند از: افزایش کارآیی بدون مصرف آب اضافی، کاهش آب مصرفی بدون کاهش در کارآیی، تسریع و یا کندکردن گیرش اولیه و نهایی، ایجاد انبساط جهت جبران جمع‌شدگی، کاهش آب انداختن، حفظ قوام، کاهش جداسدگی دانه‌ها، بهبود پمپ‌شوندگی، اصلاح روند افت اسلامپ، و کنترل روند گرمایشی در سنین اولیه.

آن دسته از ویژگی‌های بتن سخت شده را که می‌توان با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی اصلاح کرد یا بهبود بخشید عبارتند از: تسریع و یا تأخیر در روند کسب مقاومت، افزایش مقاومت‌های مکانیکی، بهبود پایایی، کاهش نفوذپذیری، کنترل انبساط و آسیب‌های ناشی از واکنش قلیایی، افزایش چسبندگی به فولاد، بهبود چسبندگی بتن جدید به بتن موجود، تولید بتن یا ملات رنگی، و کنترل خوردنگی میلگرد.

۳-۴-۱ - امکان اجرا در شرایط سخت و دشوار

برخی از افزودنی‌های شیمیایی امکان اجرا و ادامه عملیات بتن‌ریزی را، با حفظ کیفیت خواسته‌شده، در شرایط آب و هوایی نامساعد فراهم می‌آورند. برای مثال با استفاده از روان‌کننده‌های کندگیر می‌توان بتن را در مسافت‌های طولانی حمل یا تا فواصل زیاد پمپ کرد؛ قوام‌بخش‌ها و ضد آب‌شستگی‌ها، عملیات بتن‌ریزی در زیر آب را آسان‌تر می‌کنند؛ زودسخت‌کننده‌ها امکان بتن‌ریزی در هوای سرد را فراهم می‌کنند؛ و با استفاده از فراروان‌کننده‌ها می‌توان بتن را در نقاط با دسترسي کم، مانند زیر لوله‌های آبرسان به توربین در نیروگاه‌های برق‌آبی، بدون نیاز به لرزاندن (بتن خودتراکم) اجرا کرد.

۱-۴-۴ - غلبه بر پیشامدهای ناگهانی

در حین عملیات بتن‌ریزی، احتمال رخداد پیشامدهای ناگهانی و پیش‌بینی نشده‌ای مانند گرفتگی لوله‌های پمپ، در رفت قلب، افت ناگهانی دما و ... وجود دارد. با کمک افزودنی‌های شیمیایی می‌توان بر برخی از این پیشامدها غلبه کرد. نمونه‌ای از این دست، استفاده از مواد کنترل‌کننده‌های آبگیری برای جلوگیری از گیرش و استفاده دوباره بتن ساخته شده در مواردی است که وقتهای در اجرا پیش می‌آید.

۱-۴-۵ - دستیابی به خواص ویژه

برخی از خواص و ویژگی‌های بتن، هر چقدر هم که در انتخاب مصالح و نسبت اجزای بتن دقت شود، جز با استفاده از افزودنی‌ها قابل دستیابی نیستند. از جمله این ویژگی‌ها و خواص منحصر به فرد که تنها با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی به دست می‌آیند می‌توان به هوازایی، کفزاوی، خودتراکمی، زودگیری، زودسختشدنی، گندگیری، و انبساط‌زایی اشاره کرد.

۱-۴-۶ - هماهنگی با مسائل زیست محیطی و بهداشت کار

کاهش آلودگی‌های صوتی، افزایش اینمنی و بهره‌وری نیروهای کار (نیروی انسانی)، کاهش گرمای حاصل از اصطکاک تجهیزات و ماشین‌آلات، دور نریختن و استفاده از بتن با قیمانده در ماشین‌آلات برای نوبت کاری بعدی (افزودنی کنترل‌کننده آبگیری)، عدم نیاز به شستشوی تجهیزات بتن‌سازی در پایان هر نوبت کاری و عدم تخیله آب شستشو در محیط (افزودنی ناگیرکننده)، از جمله موارد دوستی با محیط زیست است که با کمک افزودنی‌های شیمیایی قابل دستیابی هستند.

۱-۴-۷ - کمک به توسعه پایدار

کاهش مصرف سیمان از یک سو با صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی (مواد خام اولیه) و از سوی دیگر با کاهش گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید سیمان، در راستای کمک به حفظ محیط زیست و توسعه پایدار است. دستیابی به مقاومت‌هایی زودرس با استفاده از افزودنی‌ها و بینیازی به بخاردهی در روند تولید قطعات پیش‌ساخته که در اصطلاح "بینیاز از انرژی"^۵ نامیده می‌شود، به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌انجامد و به توسعه پایدار کمک می‌کند. بهبود پایایی سازه‌های بتنی در زمان بهره‌برداری که در اثر استفاده از مواد افزودنی به دست می‌آید نیز با افزایش عمر مفید سازه به توسعه پایدار کمک خواهد کرد.

^۵ Zero Energy

نکته ۱-۳- صرفنظر از تمامی موارد گفته شده، باید به خاطر داشت که هیچ افزودنی را از هر نوع و مقداری که باشد، نمی‌توان جانشینی برای طرح مخلوط و اجرای مناسب بتن انگاشت.

۱-۵- مشخصات افزودنی‌های شیمیایی افزودنی‌های مصرفی بایستی پاسخگوی نیازها و ضوابط آینه‌نامه بتن و استانداردهای ملی ایران و استانداردهای بین‌المللی معتبر مانند AASHTO, ASTM, BS, DIN, EN باشند. این منابع مشخصات فنی، حداقل انتظارات از مصرف، و نحوه تاثیرگذاری هر افزودنی را به تفصیل بیان می‌نمایند و راهنمای بسیار مناسبی برای استفاده افزودنی‌ها هستند. در کنار این استانداردها، تولیدکنندگان این افزودنی‌ها همواره مشخصات فنی دقیقی از محصولات خود و دامنه مصرف و تاثیر آنها در بتن را ارایه می‌نمایند که در مواردی می‌توانند راهگشا باشند. اگرچه مشخصات فنی ارایه شده توسط تولیدکنندگان در بردارنده‌ی دامنه مصرف پیشنهادی هستند ولی مقدار مصرف افزودنی باید بر اساس نتایج به دست آمده با مصالح مصرفی در کارگاه موردنظر تعیین شود. برخی از استانداردهای افزودنی‌های شیمیایی در جدول شماره ۱- آورده شده است.

۱-۶- نمونه‌برداری برای آزمودن، ارزیابی و بازرگانی افزودنی‌ها بایستی نمونه‌هایی مطابق با دستورالعمل و مشخصات فنی از پیش تعیین شده برای هر افزودنی، برداشته شوند. چنین نمونه‌هایی باید به روش نمونه‌گیری اتفاقی از واحد تولید، بسته‌بندی‌ها یا ظروف بازنده، یا از محموله‌های فلهای که تازه وارد کارگاه شده‌اند برداشته شوند.

- ۱-۷- آزمودن مواد افزودنی با اهداف زیر آزموده می‌شوند:
- الف- تعیین مطابقت با مشخصات فنی.
 - ب- ارزیابی تاثیر افزودنی روی خواص بتن ساخته شده با مصالح کارگاهی تحت شرایط محیطی و روش‌های اجرایی مورد انتظار (پیش‌بینی شده).
 - پ- کنترل کیفیت و اطمینان از یکنواختی محموله‌های متعدد وارد به کارگاه.
 - ت- آشکارشدن هر گونه ناسازگاری افزودنی با اجزای تشکیل دهنده بتن، به ویژه سیمان، و پدیدار شدن هر گونه اثر نامطلوب افزودنی بر روی بتن.

تولیدکننده مواد افزودنی ملزم است گواهی نماید که هر محموله‌ی جداگانه با استانداردهای ملی ایران یا با مشخصات فنی دیگر آبین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی پذیرفته شده در پروژه مطابقت دارد. مشخصات فنی اراده شده از سوی تولیدکننده بايستی بیان‌کننده توانایی‌ها و محدودیت‌های کاربرد هر افزودنی باشد.

شیوه‌ها و دستورالعمل‌های کنترل کیفیت که توسط تولیدکنندگان مواد افزودنی به کار می‌روند باید تضمین‌کننده یکنواختی محصول تولیدی و مطابقت آن با ضوابط و دیگر شرایط استانداردهای ملی ایران یا با مشخصات فنی دیگر آبین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی باشند. از آنجا که روش‌های آزمایش و شیوه‌های کنترل کیفیت مورد استفاده تولیدکنندگان ممکن است بر اساس خواص یک محصول ویژه پایه‌گذاری شوند، نمی‌توانند برای کاربرد عمومی یا استفاده توسط مصرفکنندگان به کار روند.

گواینکه استانداردهای ملی ایران یا دیگر آبین‌نامه‌های معتبر و بین‌المللی دستورالعمل گام به گام با ارزشی برای ارزیابی و انتخاب مواد افزودنی فراهم می‌کند، باید پیش از تولید بتن و استفاده مداوم از افزودنی‌ها در تولید بتن، آزمایش‌هایی که نشان دهنده عملکرد افزودنی در شرایط کارکرد واحد بتن‌ساز همراه با مصالح مورد استفاده در ساخت بتن باشند انجام گیرد. یکنواختی و ناپراکندگی نتایج مربوط به هر ویژگی مورد نظر افزودنی یا بتن، به همان اندازه‌ی میانگین این نتایج دارای اهمیت است.

نکته ۴-۱- نتایج حاصله از مصرف یک افزودنی در یک کارگاه به معنای ویژگی مطلق آن افزودنی نمی‌باشد و نمی‌توان این نتایج را به سایر کارگاه‌ها تعمیم داد و حتی تغییرات در نوع سیمان، سنگدانه‌ها، یا روش‌های بتن‌ریزی نیازمند تکرار آزمایش‌ها می‌باشد.

نکته ۵-۱- پس از اطمینان از عملکرد یک افزودنی در مراحل آزمایش‌گاهی، لازم است عملکرد آن در احجام واقعی ساخت بتن و در دستگاه بتن‌ساز نیز آزمایش و ارزیابی شود و در هنگام بتن‌ریزی با انجام نمونه‌گیری‌های منظم از یکنواختی بتن‌های تولید شده اطمینان حاصل گردد.

۱-۸- ارزیابی افزودنی‌ها

از آنجا که ترکیبات و ویژگی‌های مواد سیمانی، آب و سنگدانه و نیز نسبت اختلاط آنها تاثیر به سزاوی بر کارکرد افزودنی‌ها دارند، ارزیابی هر افزودنی باید بر اساس نتایج بدست آمده با مصالح مصرفی کارگاه انجام گیرد.

در ارزیابی یک ماده افزودنی، تاثیر آن روی حجم مخلوط باید در نظر گرفته شود. اگر اضافه کردن ماده افزودنی بازده حجمی^{*} مخلوط را تغییر دهد، همانگونه که اغلب پیش می‌آید، تغییر در خواص بتن تنها به دلیل تاثیرات مستقیم افزودنی نخواهد بود و می‌تواند ناشی از تغییر در نسبت اجزای تشکیل‌دهنده بتن نیز باشد. در چنین مواردی ماده افزودنی باید مانند مواد سیمانی، سنگدانه و آب به عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده بتن در طرح اختلاط به شمار آید.

چنانچه در بتن بیش از یک افزودنی استفاده شود، ممکن است بر کارکرد یکدیگر تاثیر بگذارند. برای نمونه، در بتن دارای افزودنی هوازا، استفاده از روان‌کننده می‌تواند راندمان هوازا را افزایش دهد در حالی که برخی از فراروان‌کننده‌ها باعث کاهش راندمان آن می‌شوند. در ارزیابی افزودنی‌ها باید تاثیر متقابل آنها بر کارکرد یکدیگر، بررسی و در نظر گرفته شود.

عوامل محیطی مانند دما و رطوبت تاثیر چشمگیری بر رفتار بتن و بر کارکرد افزودنی‌ها دارند. مواد افزودنی که کارکرد آنها در دماهای معمول شناخته شده است ممکن است در دماهای خیلی زیاد یا خیلی کم، کارکرد بسیار متفاوتی داشته باشند. کارکرد هر ماده افزودنی را بایستی در شرایط محیطی مورد انتظار در زمان اجرا ارزیابی کرد و به نتایج آزمایشگاهی که در دماهای استاندارد انجام می‌شوند، بسته نگردد.

در ارزیابی کارکرد مواد افزودنی باید شرایط اجرایی مانند چگونگی و زمان اختلاط، نحوه و زمان حمل، دمای بتن تازه، چگونگی ریختن و پخش کردن بتن، نحوه متراکم کردن و پرداخت کردن بتن، و روش عمل‌آوری در نظر گرفته شوند زیرا هر یک از این موارد می‌تواند بر کارکرد افزودنی تاثیر بگذارد. برای نمونه، اختلاط بیش از اندازه باعث کاهش راندمان هوازاها می‌شود.

زمان و نحوه افزودن مواد افزودنی به مخلوط بتن نیز بر کارکرد آنها اثر می‌گذارد که بایستی در ارزیابی آنها مورد توجه قرار گیرد. برای نمونه، چنانچه افزودنی‌های کاهنده آب را به مخلوط خشک سیمان و سنگدانه افزود راندمان آنها به شدت کاهش می‌یابد در حالی که اگر آنها را بعد از افزودن بخشی از آب اختلاط و تشکیل خمیر سیمان به بتن اضافه کرد، کارکرد بهتری خواهد داشت.

^{*} Yield

در ارزیابی اقتصادی هر افزودنی بایستی افزایش هزینه ناشی از تهیه، حمل، نگهداری و افروden آن را در کنار صرفه‌جویی‌های اقتصادی که افزودنی در اجرای عملیات بتنی به همراه دارد مورد بررسی و توجه قرار داد.

اگرچه کارکرد و تاثیر اصلی یک ماده افزودنی بر روی خواص بتن تازه و سخت شده معمولاً ملاک اصلی ارزیابی و انتخاب افزودنی است ولی مزیت‌های جنبی هر محصول نیز قابل توجه تولیدکنندگان بتن آماده، پیمانکاران، مجریان و کارفرمایان می‌باشد و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به خواصی چون کارآبی (کارپذیری)، سهولت پمپاژ و قالب‌پذیری، پرداخت سطح، کسب مقاومت‌های زودرس، استفاده سریع‌تر از قالب‌ها، شکل ظاهری سطوح بتنی و حذف و یا کاهش زمان لرزاندن اشاره نمود.

برای کنترل کیفیت افزودنی‌ها، علاوه بر یکنواختی مشخصات ظاهری، یکنواختی عملکرد آن‌ها بر بتن نیز بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۹-۱- ملاحظاتی در مصرف مواد افزودنی

مواد افزودنی باید با استانداردهای ملی ایران یا دیگر آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی مطابقت داشته باشند. علاوه بر این باید دستورالعمل‌ها و توصیه‌های ارایه شده از طرف تولیدکننده مواد افزودنی مورد توجه دقیق قرار گیرند. اثرات یک ماده افزودنی باید تا آنجا که ممکن است با استفاده از مصالح مصرفی مورد نظر و در شرایط کارگاهی ارزیابی شود. این موضوع وقتی اهمیت ویژه پیدا می‌کند که:

- ماده افزودنی پیش از این با مصالح مورد نظر یا ترکیب آنها استفاده نشده باشد؛
- استفاده از انواع ویژه مواد سیمانی مورد نظر باشد؛
- بیش از یک نوع افزودنی مصرف شود؛ یا
- اختلاط و بتن‌ریزی در دماهای خارج از محدوده‌ای که معمولاً برای بتن‌ریزی توصیه می‌شود، انجام گیرد.

افزون بر این، استفاده از افزودنی‌ها ممکن است نیازمند اصلاحاتی در طرح اختلاط بتن باشد که از آن جمله می‌توان به تغییر در نوع یا مقدار سیمان، تغییر در نوع یا دانه‌بندی سنگدانه، یا اصلاح نسبت اختلاط اشاره کرد. با تنظیم مقدار آب و مواد سیمانی مخلوط و اصلاح نوع و طول زمان اختلاط، اثرات برخی از مواد افزودنی بهطور چشمگیری بهبود می‌یابند. بسیاری از افزودنی‌ها بیش از یک خاصیت بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهند و حتی ممکن است روی خواص مطلوب تاثیر نامطلوبی بگذارند. افزودنی‌هایی که خواص بتن تازه را

اصلاح می‌کند ممکن است موجب سفت شدن زودهنگام یا کندگیری بیش از اندازه بتن شوند و مشکلاتی پدید آورند. با بررسی چگونگی تاثیر افزودنی‌ها روی مواد سیمانی مورد مصرف، می‌توان به دلایل رفتارهای گیرشی ناهنجار پی برد. سفت شدن زود هنگام اغلب به دلیل تغییر در روند واکنش بین تریکلسیم‌الومینات و یون سولفات موجود رخ می‌دهد. کندگیری بیش از اندازه می‌تواند ناشی از به تأخیر افتادن آبگیری سیلیکات کلسیم به دلیل استفاده بیش از اندازه افزودنی یا کاهش دمای محیط اطراف باشد.

از ملاحظات مهم دیگر در استفاده از مواد افزودنی می‌توان به محدودیت مقدار مجاز یون کلر در بتن اشاره کرد. این محدودیت‌ها در آییننامه بتن ایران داده شده است. معمولاً این محدودیت‌ها به صورت حداکثر درصد یون کلر نسبت به جرم (وزن) سیمان بیان می‌شوند، اگرچه گاهی مقدار یون کلر "حل‌شونده در آب" موجود در بتن نیز ملاک سنجش قرار می‌گیرد. صرف‌نظر از آن‌که این حد چگونه تعیین می‌شود، مصرف کننده باید میزان یون کلر موجود در افزودنی را بداند تا در هنگام تعیین نوع و مقدار مصرف افزودنی، حدود تعیین شده برای مقدار یون کلر را زیرپا نگذارد.

نکته ۶-۱ - استفاده کننده باید آگاه باشد که حتی با فرض نبودن یون کلر در ساختار یک افزودنی شیمیایی، همواره احتمال وارد شدن یون کلر از طریق آب مصرفی برای تولید افزودنی مایع وجود دارد، زیرا افزودنی‌ها اغلب به کمک آب ساخته می‌شوند که حاوی مقادیر کم ولی قابل اندازه‌گیری یون کلر هستند. بنابراین در برخورد با اصطلاحاتی نظیر "بدون کلر"^۷ باید احتیاط کرد.

۱۰-۱- آمده‌سازی افزودنی‌ها
مواد افزودنی رایج در بازار به صورت مایعات یا پودرهای بسته‌بندی‌شده ارایه می‌شوند. برخی از این افزودنی‌ها، مانند کاهنده‌های آب و زودگیرکننده‌های مایع، آمده مصرف هستند و به طور مستقیم در مرکز بتن‌ساز به مخلوط یا در پایی کار به بتن افزوده می‌شوند. برخی دیگر از افزودنی‌ها پیش از افزوده شدن به مخلوط، نیازمند آمده‌سازی هستند. آمده‌سازی افزودنی‌ها پیش از مصرف شامل رقيق‌سازی یا مایع‌سازی (ترکیب با آب) است.

۱۰-۱-۱- رقيق‌سازی
با توجه به ساختار و دقت ابزار و تجهیزات پیمانه و اضافه‌کردن مواد افزودنی مرکز بتن‌ساز، در مواردی لازم است که غلظت برخی از افزودنی‌های مایع کاهش یابد. گاهی برای

^۷ Chloride free

کاهش هزینه‌های بسته‌بندی و حمل ممکن است برخی از افزودنی‌های مایع در غلظت‌های بیشتر از آنچه که برای مصرف نیاز است عرضه شوند، در چنین مواردی نیز بایستی افزودنی به اندازه کافی رقیق شود تا امکان پیمانه و اضافه کردن آن فراهم آید.

زمانی که تمام یا بخشی افزودنی در پایی کار به داخل تراکمیکسر اضافه می‌شود، مانند کاهنده‌های آب، نیز بهتر است که افزودنی با آب رقیق شود تا بهتر و همگن‌تر مخلوط شود. مقدار مصرف برخی از افزودنی‌های مایع، مانند هوازها، بسیار کم است. در این موارد صرف نظر از غلظت افزودنی، برای آن که دقت اندازه‌گیری ابزار و تجهیزات پیمانه کردن مرکز بتن‌ساز جوابگو باشد بهتر است که این افزودنی‌ها را با نسبت مشخص با آب رقیق کرد.

نکته ۷-۱ - در تمامی موارد رقیق‌سازی بایستی آب اضافه‌شده به افزودنی را در طرح اختلاط و ساخت بتن در نظر گرفت و توصیه‌های تولیدکننده افزودنی را به کار بست.

۱-۱۰-۲ - مایع‌سازی (ترکیب کردن با آب)
برخی از افزودنی‌های شیمیایی مانند بعضی از زودسخت‌کننده‌ها و روان‌کننده‌ها، برای کاهش هزینه حمل و انبارداری و افزایش ماندگاری^۸، به صورت پودر‌های "حل‌شونده در آب" عرضه می‌شوند و بایستی در کارگاه با آب ترکیب شوند تا به صورت مایع آماده مصرف درآیند. این کار مستلزم نصب ماشین‌آلات مناسب، به کارگیری نیروی انسانی مجبوب، و رعایت دقیق دستور العمل‌های تولیدکننده جهت تولید افزودنی با غلظت و درصد جامد مناسب می‌باشد.

در تولید انبوه کارگاهی، بی‌توجهی به نسبت‌های دقیق مواد، یا ناهمخوانی دستگاه همزن با غلظت محصول می‌تواند مشکلاتی مانند همزدن ناکافی، حل نشدن کامل مواد موثر، و رسوب اجزای غیر محلول پدید آورد. در صورت بروز هرگونه مشکل در مورد تولیدات کارگاهی رعایت توصیه‌های تولیدکننده لازم است.

ترکیب کردن و همزدن ماده افزودنی پودری با آب باید در مخزنی جدا از مخزن ذخیره ماده افزودنی آماده‌شده که به پیمانه‌ریز^۹ متصل است انجام شود. غلظت ماده افزودنی ذخیره شده باید به طور روزانه یا زمانی که ماده جدید به آن افزوده می‌شود کنترل شود. مخزن ذخیره باید مجهز به یک همزن برای نگهداری ماده افزودنی به حالت معلق باشد چون بسیاری از محلول‌ها حتی با غلظت کم دارای مقدار قابل توجهی ذرات ریز حل ناشدنی و یا اجزای فعالی

^۸ Shelf life

^۹ Dispenser (دستگاه پیمانه کردن و ریختن افزودنی به درون دیگ مخلوط کن در دستگاه بتن‌ساز یا تراکمیکسر)

هستند که ممکن است در اثر سکون مایع رسوب کند. پیش از پیمانه‌کردن و افزودن (پیمانه‌ریزی) مایع آماده شده باید از یکنواختی، پخش‌شدن و معلق بودن ذرات جامد اطمینان حاصل شود.

۱۱-۱- پیمانه‌کردن و افزودن

موفقیت و کارآمد بودن استفاده از افزودنی‌ها تا حدود زیادی به دقت روش پیمانه‌ریزی و زمان افزودن آنها بستگی دارد. هرگونه خطأ و کوتاهی در پیمانه‌ریزی می‌تواند تاثیرات چشمگیری بر خواص، عملکرد و یکنواختی بتن داشته باشد.

۱۱-۱-۱- پیمانه‌ریزی افزودنی‌های مایع

بیشتر مواد افزودنی رایج در بازار به صورت مایعات آماده مصرف هستند که یا در هنگام اختلاط در مرکز بتن‌ساز به مخلوط اضافه یا در پای کار به بتن افزوده می‌شوند. برای پیمانه کردن و افزودن این مواد به مخلوط از دستگاه پیمانه‌ریز استفاده می‌شود. دستگاه پیمانه‌ریز هم می‌تواند در مرکز بتن‌ساز نصب و هم روی تراک میکسر سوار شود. پیمانه‌ریز از تعدادی پمپ، اندازه‌گیر، زمان‌سنجد، استوانه مدرج و شیر تشکیل شده است. پیمانه‌ریزها ممکن است بر اساس سنجش جرم (وزن) یا اندازه‌گیری حجم افزودنی‌ها کار کنند. مشخصات فنی، رواداری دقت، و کارآمدی دستگاه پیمانه‌ریز باید با استانداردهای ایران یا بین‌المللی معتبر مطابقت داشته باشد.

موقعیت تخلیه افزودنی از مخزن استوانه‌ای مدرج و ریختن آن به داخل دیگ بتن‌ساز بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که تمامی افزودنی به بتن در حال اختلاط افزوده شود و از مالیده شدن به جداره داخلی دیگ و پره‌های همزن بتن‌ساز و هدررفتن افزودنی جلوگیری شود. بهتر است که ورودی افزودنی به دیگ همزن در انتهای مسیر ورودی آب به دیگ نصب شود تا بتوان آن را همراه با آب به مخلوط افزود. علاوه بر این، روند و آهنگ تخلیه افزودنی‌ها از مخزن استوانه‌ای مدرج دستگاه پیمانه‌ریز باید قابل تنظیم و به گونه‌ای باشد که از یکنواختی توزیع افزودنی در مخلوط بتن اطمینان حاصل شود. مخزن استوانه‌ای مدرج باید تا آنجا که ممکن است نزدیک به محل تخلیه به دیگ نصب شود. در صورت طولانی بودن مسیر تخلیه مخزن استوانه‌ای مدرج، احتمال آن که بخشی از افزودنی در مسیر تخلیه باقی بماند و به مخلوط افزوده نشود زیاد خواهد بود. در هر حال بهتر است که راهبر مرکز بتن‌ساز تسلط کاملی بر مخزن استوانه‌ای مدرج داشته باشد و با در اختیار داشتن زمان‌سنجد

برقی در سیستم‌های خودکار، یا شیر تخلیه در سیستم‌های نیمه‌خودکار، بتواند زمان تخلیه را تنظیم کند تا از تخلیه کامل افزودنی پیمانه‌شده اطمینان حاصل کند.

در مواردی که بیش از یک افزودنی به مخلوط افزوده می‌شود باید از درهم آمیختن افزودنی‌ها پیش از مصرف پرهیز کرد مگر در مواردی که تولیدکننده مواد افزودنی، آمیختن آنها را پیش از مصرف مجاز بداند. در هر حال بهتر است که برای افزودن هر افزودنی از سنتگاه پیمانه‌ریز جداگانه‌ای استفاده شود.

چنانچه همه یا بخشی از افزودنی در پایی کار با استفاده از پیمانه‌ریز سوارشده بر تراکمیکسر یا پیمانه دستی به بتن ساخته شده افزوده می‌شود باستی توصیه‌های تولیدکننده افزودنی در نظر گرفته شود.

۱-۱۱-۲ - پیمانه‌ریزی افزودنی‌های پودری

مواد افزودنی پودری مانند رنگدانه‌ها، منبسطکننده‌ها و آسان‌کننده‌های پمپاژ که دارای مقدار مصرف اندک هستند اغلب به صورت دستی و با پیمانه در هنگام ساخت بتن به مخلوط اضافه می‌شوند. زودگیرکننده‌ها، کاهنده‌های تراوایی، و پیونداها نیز از دیگر افزودنی‌هایی هستند که به روش دستی افزوده می‌شوند و اغلب در مقادیر مصرف کافی برای یک واحد جرمی (وزنی) سیمان و یا یک حجم بتن بسته‌بندی می‌شوند. برخی از زودگیرکننده‌های بتن‌پاشی به صورت دستی و در پایی کار به مخلوط افزوده می‌شوند.

۱-۱۲ - انبار کردن

سه عامل در نگهداری مواد افزودنی مهم هستند: سهولت در شناسایی، رطوبت و دمایی که در آن نگهداری می‌شوند، و وجود برچسب بر روی ظروف و بشکه‌ها به گونه‌ای که محتويات آنها را به وضوح نشان دهد. مواد افزودنی خشک (پودری) در مقایسه با سیمان پرتلند حساسیت بیشتری به دی‌اکسیدکربن و رطوبت دارند. لذا این مواد باید در کیسه‌های ضد رطوبت بسته‌بندی شوند و برای جلوگیری از کلوخشدن آنها به دور از رطوبت و دماهای زیاد نگهداری شوند.

مخازن ذخیره مایعات باید دارای دریچه‌های مناسب ورودی و بازشو باشند و این دریچه‌ها باید در هنگامی که مورد استفاده قرار نمی‌گیرند کاملاً بسته شوند.

بیشتر مواد افزودنی به جز بعضی از ضد رطوبت‌ها و مواد شتابدهنده بدون کلر و مواد هووازا به شکل محلول‌هایی هستند که در ۳- درجه سیلیسیوس بیخ می‌زنند. بنا بر این باید در

مقابل یخزدگی حفاظت شوند. در انبار کردن بعضی از مواد مانند امولسیون‌ها نیاز به مراقبت بیشتری است و دستورالعمل‌های سازنده آن باید دقیقاً رعایت شود.

در مناطقی با زمستان‌های ملائم می‌توان اکثر مواد را در بشکه و در انبار‌های محصور، بدون وسیله گرمایی، بدون نگرانی از یخزدگی انبار کرد. در زمستان‌های سخت امکانات ویژه‌ای برای جلوگیری از یخزدگی افزودنی‌های مایع باید به کاربرد. استفاده از انبار‌های محصور گرم در این شرایط رایج است. لازم است از کلیه تجهیزات شامل مخازن نگهداری، خطوط انتقال و خطوط متصل به بتن‌ساز نیز محافظت شود. در مناطق با آب و هوای معتدل استفاده از مخازن فلزی عایق‌بندی شده یا پلاستیکی نیز امکان‌پذیر است. در شرایط یخ‌بندان و هوای سرد، مخازن ذخیره‌سازی و محتویات آنها یا باید گرم شوند و یا در یک محیط گرم قرار داشته باشند. روش دوم به دلایل زیر ترجیح داده می‌شود.

۱- چنانچه مخزن ذخیره مجهز به لوله‌های مارپیچ آب گرم یا بخار باشد، باید دقت شود که گرم کردن از حد مجاز ارایه شده توسط تولیدکننده تجاوز نکند زیرا دمای زیاد می‌تواند بر برخی از این مواد تاثیر منفی داشته باشد.

۲- بعضی از المنت‌های حرارتی ممکن است به طور موضعی ماده افزودنی را بیش از اندازه گرم کنند و باعث تجزیه حرارتی و ایجاد گاز‌های انفجاری شوند.

۳- ممکن است اتصالات الکتریکی گرم کننده‌ها (نواری، میله‌ای و غیره) قطع شوند و باعث یخزدن ماده افزودنی و یا آسیب دیدن سیستم حرارتی و دستگاه‌های اندازه‌گیری شوند.

۴- معمولاً هزینه به کارگیری المنت‌های میله‌ای و نواری بیشتر از هزینه گرم نگهداشتن یک انبار در بالاتر از دمای انجماد است.

۵- یک انبار گرم نگهداری ماده افزودنی نه تنها مخازن ذخیره، بلکه پمپ‌ها، دستگاه‌های اندازه‌گیری، شیرها و شیلنگ‌های ماده افزودنی را از یخزدگی و از سایر مسائل مانند گرد و خالک، باران و افراد متفرقه حفاظت می‌نماید، به علاوه چون دمای نگهداری در طول سال کمتر در معرض تغییرات شدید قرار می‌گیرد، گرانروی ماده افزودنی ثابت‌تر می‌ماند و دستگاه‌های اندازه‌گیری احتیاج به تنظیم کمتری پیدا می‌کنند.

۶- اگر مخازن نگهداری و شیلنگ‌ها از جنس پلاستیک باشند باید دقت شود از گرم کردن بیش از اندازه آنها پرهیز شود تا این مواد به نقطه نرم‌شدن و پارگی نرسند.

۷- سیستم هواکش مخازن باید به گونه‌ای طراحی شود که از ورود هرگونه مواد خارجی به داخل مخزن جلوگیری شود. به همین صورت برای اجتناب از آلودگی باستی روی مجاری پرکردن و دیگر بازشوها در موقعی که استفاده نمی‌شوند در پوش گذاشته شوند.

جدول ۱-۱ - استانداردهای مواد افزودنی شیمیایی

استاندارد			نام افزودنی	دسته افزودنی
آمریکا	اروپا	ایران		
ASTM C۴۹۴, AASHTO M۱۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	روان‌کننده	کاهنده‌های آب
ASTM C۴۹۴, AASHTO M۱۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	روان‌کننده گندگیر	
			روان‌کننده تندگیر	
ASTM C۴۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	فوق‌روان‌کننده	
ASTM C۴۹۴			فوق‌روان‌کننده گندگیر	
ASTM C۴۹۴ & C۱۰۱۷	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	فراروان‌کننده	
ASTM C۲۶۰, AASHTO M۱۵۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	هوازا	هوازاها
ASTM C۴۹۴, AASHTO M۱۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	دیرگیر‌کننده	گندگیر‌کننده‌ها
AASHTO M۱۹۴			ناگیر‌کننده	
ASTM C۴۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	زودگیر	(تسریع‌کننده‌ها)
ASTM C۴۹۴	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰.	زودسخت‌کننده	
ASTM C۱۱۴۱	EN ۹۳۴-۵		افزودنی بتن‌پاشی	
ASTM C۸۷۸			جبران‌کننده جمع‌شدنی	منبسط‌کننده‌ها

			گازساز	
ASTM C۸۹۹	EN ۹۳۴-۴		کفرزها	
ASTM G۱۰۹, AASHTO T۲۷۷	BS ۱۸۸۱		بازدارنده خوردگی	پایاگرها (دوام‌بخش‌ها)
			کاهنده واکنش فلیایی	
ASTM C۸۳۶	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰	کاهنده تراوایی	
ASTM C۸۳۶	EN ۹۳۴-۲	ISIRI-۲۹۳۰	نمیند / آببند	
			هوازدا	افزودنی‌های خاص
			ضدیخ	
ASTM C۹۷۹	BS ۱۰۱۴		رنگبخش	
			آسان‌کننده پمپاژ	
			ضد آبسستگی	
			کنترل کننده واکنش	
	BS ۵۲۷۰		آبگیری پیوندزا (لاتکس)	
			قوام‌بخش	

۱-۱۳ - مراجع

- ۱- آبین‌نامه بتن ایران (آب)، تجدید نظر اول، نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- ۲- ACI ۲۱۲.۳R – ۰۴, "Chemical Admixtures for Concrete", MCP-ACI ۲۰۰۷.
- ۳- ایراجیان محمود، "کاربرد مواد افزودنی در پروژه‌های سدسازی"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی سدسازی، ایران، تهران، ۱۳۸۰.
- ۴- فامیلی هرمز، "خواص بتن"، مترجم، ۱۳۷۸.
- ۵- Rixom, R. and Mailvaganam, N. "CHEMICAL ADMIXTURES FOR CONCRETE", ۳rd Ed., ۱۹۹۹, E & EN SPON.
- ۶- Ramachandran V.S., Malhotra V.M., Jolicoeur C., and Spiratos N., "SUPERPLASTICIZERS; Properties and applications in concrete", CANMENT, ۱۹۹۸.
- ۷- Hewlett, "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", ۴th Ed., ۱۹۹۸, Arnold.
- ۸- Kosmatka S. H., Kerkhoff B., and Panarese W.C., "Design and Control of Concrete Mixtures", ۱۴th ed., PCA – ۲۰۰۲.