

## افزودنی‌های بتن

در تولید بتن همواره برای بهبود خواص مکانیکی و کارایی از افزودنی‌های مختلفی استفاده می‌شود. بنابر تعریف مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، افزودنی ماده‌ایست شیمیایی به غیر از سیمان پرتلند، سنگدانه و آب که به صورت پودر یا مایع، برای اصلاح خواص یک یا چند ویژگی بتن تازه یا سخت شده، کمی قبل از اختلاط یا در حین اختلاط به آن افزوده می‌شود. مقدار این افزودنی‌ها کم است و در نسبت‌های طرح اختلاط به حساب نمی‌آید. مقدار مواد افزودنی شیمیایی معمولاً برحسب درصدی از مقدار سیمان به مخلوط اضافه می‌شوند که بنا به آنچه که در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به آن اشاره شده حداکثر این مقدار برابر ۵ درصد وزنی سیمان مصرفی است. مواد افزودنی اگر فقط بر روی یکی از خواص بتن تاثیر بگذارد تک منظوره و در غیر این صورت چند منظوره به حساب می‌آید. در تقسیم بندی بر اساس نوع ماده، مواد افزودنی بتن به دو دسته مواد افزودنی شیمیایی و مواد افزودنی معدنی تقسیم می‌شوند. براساس استاندارد ASTM C-494 افزودنی‌ها به ۸ دسته تقسیم بندی شده‌اند، که عبارتند از:

تیپ A: کاهنده آب<sup>۱</sup> (یا روان کننده<sup>۱</sup>)

تیپ B: کندگیر کننده<sup>۲</sup>

تیپ C: تندگیر کننده<sup>۳</sup>

تیپ D: کاهنده آب و کندگیر کننده

تیپ E: کاهنده آب و تندگیر کننده

تیپ F: کاهنده قوی آب<sup>۴</sup> (یا فوق روان کننده<sup>۴</sup>)

تیپ G: کاهنده قوی آب و دیرگیر کننده و

تیپ S: افزودنی‌های با عملکرد خاص.

پرکاربردترین افزودنی‌های شیمیایی شامل مواد افزودنی حباب ساز، کاهنده آب، کندگیرکننده و تندگیر کننده می‌باشند. مواد افزودنی اگرچه

از عناصر اصلی ساخت بتن به حساب نمی‌آیند، اما به اندازه ای موثر و رایج هستند که امروزه تولید بتن بدون افزودنی استثنا به حساب می‌آید.

<sup>1</sup> Water-Reducer

<sup>2</sup> Plasticizer

<sup>3</sup> Retarder

<sup>4</sup> Accelerator

<sup>5</sup> High Range Water Reducer

<sup>6</sup> SuperPlasticizer

## افزودنی‌های معدنی

افزودنی‌های معدنی به شکل ذرات بسیار ریز معدنی موجب بهبود برخی از خواص و یا ایجاد ویژگی‌های خاصی در بتن می‌شود. تغییر رنگ بتن، بهبود کارایی و انسجام بتن تازه و همچنین ارتقای مقاومت و نفوذناپذیری بتن سخت شده از آثار اسفاده از افزودنی‌های معدنی در بتن هستند. افزودنی‌های معدنی به سه دسته کلی افزودنی‌های معدنی خنثی و رنگدانه‌ها، پوزولان‌ها که به عنوان مواد جایگزین یا مکمل سیمان شناخته می‌شوند، و افزودنی‌های شبه سیمانی تقسیم بندی می‌شوند.

پوزولان‌ها شامل مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی بوده، اما به شکل ذرات بسیار ریز در مجاورت رطوبت طی واکنش شیمیایی با هیدروکسید کلسیم، ترکیب‌های با خاصیت سیمانی ایجاد می‌کنند. پوزولان‌ها می‌توانند در مقادیر مختلف جایگزین سیمان شده و باعث صرفه جویی در مصرف سیمان شوند. کاهش سرعت و میزان حرارت ناشی از آبیگری سیمان، افزایش کارپذیری و مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری از ویژگی‌های استفاده از پوزولان‌ها در بتن می‌باشند. انواع پوزولان‌های متداول شامل پوزولان‌های خام مانند خاکسترهای آتشفشانی و پوزولان‌های صنعتی مانند خاکستر بادی<sup>۷</sup> و دوده سیلیسی<sup>۸</sup> هستند. یکی از پرکاربردترین پوزولان‌ها میکروسیلیس است که می‌تواند خواص مقاومتی، دوام و ... بتن را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. به طور کلی تاثیر مثبت میکروسیلیس در بتن به علت دو مکانیسم است:

- فعالیت پوزولانی بالا و کاهش هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان با آب و افزایش تولید ژل
- نرمی زیاد و کاهش خلل و فرج بین ذرات ژل و سیمان و تاثیر مثبت بر تراکم و نفوذپذیری بتن

میکروسیلیس باعث افزایش چسبندگی بین ذرات سیمان و سنگدانه می‌شود و به این وسیله تراوایی بتن را کاهش می‌دهد. دانه‌های میکروسیلیس که چندین برابر نرم تر از سیمان هستند، با پر کردن منافذ بتن، مقاومت را افزایش و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند.

افزودنی‌های معدنی خنثی نیز بر مقاومت بتن تاثیری نداشته، و بر بهبود کارپذیری و چسبندگی بتن تاثیرگذارند. این مواد معمولاً الزامات سنگدانه‌های بتنی را تامین کرده و به عنوان سنگدانه در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

رنگدانه‌ها از دیگر افزودنی‌های خنثی هستند که به جهت تغییر رنگ بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزودنی‌های رنگی در سه شکل پودری، گرانول و یا بصورت مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل پودری این افزودنی که سابقه بیشتری در استفاده دارد، به صورت ذرات

<sup>7</sup> Fly Ash

<sup>8</sup> Silica fume

میکروسکوپی و به قطر حدود یک دهم قطر دانه‌های سیمان می‌باشند. این دانه‌ها بی اثر بوده و با ذرات سیمان واکنشی ندارند و فقط در طی هیدراسیون سیمان با آب رنگ دانه‌های سیمان را تغییر می‌دهند. ASTM C979 استاندارد مربوط به بتن‌های رنگی یکپارچه است که مقدار مصرف و نوع مواد مصرفی باید مطابق آن باشند. دوز مصرفی معمولاً بین ۱ تا ۷ درصد وزنی سیمان است و نباید از ۱۰ درصد بیشتر شود، چراکه ممکن است بر مقاومت بتن تاثیر داشته باشد. اکسید آهن پرکاربردترین رنگدانه مصرفی در بتن است که در گذر زمان کم‌رنگ نشده و شسته نمی‌شود. رنگ‌های اصلی تولید شده توسط اکسید آهن شامل زرد، قرمز و سیاه می‌شود که توسط ترکیب آن‌ها می‌توان رنگ‌های متنوعی ایجاد کرد. رنگ‌های دیگر نظیر سبز از اکسید کروم و آبی از کبالت بدست می‌آیند که به علت هزینه بالاتر، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بتن‌های رنگی کاربردهای مختلفی دارند، از جمله در سازه‌های نمادار که هزینه نمای بالایی دارند مانند پل‌ها، و یا سنگ فرش و روسازی راه‌ها به منظور تفکیک محل عبور وسایل نقلیه و حتی نمای ساختمان‌ها.

افزودنی‌های شبه سیمانی نیز خاصیت پنهان هیدرولیکی دارند، و اگر به نحو مناسبی فعال شوند خاصیت سیمانی خواهند داشت. این افزودنی‌ها فقط در محیط قلیایی با آب واکنشی مشابه سیمان پرتلند داشته و در مقایسه با پوزولان‌ها بیشتر شبیه سیمان معمولی هستند. رایج‌ترین این نوع افزودنی روبراه آهن گدازی است.

## افزودنی‌های شیمیایی

### مواد هواساز<sup>۹</sup>

وجود حباب هوا در بتن اجتناب ناپذیر بوده و کم و بیش در بتن ایجاد می‌شوند. ویریه کردن بتن بدین منظور انجام می‌شود که این حباب‌های ناخواسته به حداقل برسند اما هیچگاه به صفر نمی‌رسند.

دسته دوم حباب‌ها، حباب‌های عمدی ریز و کروی شکل هستند که با استفاده از افزودنی‌های هوازا (حباب ساز) یا سیمان هوازا و یا ترکیب هردو در مخلوط بتن ایجاد می‌شوند. لازم به ذکر است در کنار این حباب‌ها، حباب‌های هوای درشت ناخواسته با اشکال نامنظم هم ایجاد می‌شوند و از ۴ الی ۸ درصد هوای ایجاد شده در بتن ممکن است ۱ الی ۲ درصد آن حباب‌های هوای غیر مفید و درشت باشند. با ویریه مناسب قسمتی از این حباب‌ها از مخلوط خارج می‌شوند اما در صورت ویریه بیش از حد، حباب‌های ریز عمدی هم خارج خواهند شد.

هوازاها بطور معمول به جهت افزایش مقاومت بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن و افزایش کارایی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دیگر ویژگی‌های هوازاها افزایش قابلیت آب بندی، کاهش امکان تورق، افزایش مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها به علت دارا بودن فضا برای افزایش حجم واکنش‌ها در حضور سولفات‌ها و کاهش امکان جدا شدن دانه‌ها می‌باشد. در مقابل، به ازای افزایش هر ۱ درصد هوای مخلوط، مقاومت ۲۸ روزه ۳ تا ۵ درصد کاهش می‌یابد.

مواد افزودنی هواساز دارای مولکول‌های با سطح فعال هستند، که دارای یک سر آبدوست و یک سر آب‌گریز می‌باشند. این افزودنی، پیوند سطحی بین مولکول‌های آب را کاهش داده و باعث تشکیل حباب‌های کوچک هوا می‌شود. با کاهش کشش سطحی آب، این حباب‌ها تمایلی برای به هم پیوستن نداشته و پایدار می‌شوند.

## مواد کاهنده آب

بر اساس استاندارد ASTM C-494 افزودنی‌هایی که فقط خاصیت کاهندگی آب داشته باشند تیپ A بوده، و اگر همراه با خاصیت دیرگیرکنندگی باشند تیپ D و اگر همراه با خاصیت تندگیرکنندگی باشند تیپ E هستند که البته کاربرد کمتری نسبت به تیپ A دارند. همچنین افزودنی‌هایی که خاصیت کاهندگی قوی آب را دارند در دسته تیپ F قرار می‌گیرند. یکی از مهمترین کاربردهای افزودنی‌های کاهنده آب افزایش میزان روانی مخلوط بتنی به جهت کارپذیری بهتر می‌باشد، ازین رو به مواد کاهنده آب، روان کننده و به مواد کاهنده قوی آب، فوق روان کننده نیز گفته می‌شود.

روان کننده‌ها و فوق روان کننده‌ها، برای سه هدف در مخلوط بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱. برای افزایش کارپذیری بدون ایجاد تغییر در مقدار آب و سیمان، به منظور بتن ریزی راحت‌تر

۲. برای کاهش آب مخلوط و کاهش نسبت آب به سیمان (W/C) به منظور کسب مقاومت بالاتر و دوام بیشتر بتن در کارایی ثابت

۳. برای کاهش مقدار مصرف هردو ماده سیمان و آب در کارایی ثابت به منظور صرفه جویی در مصرف سیمان

روان کننده‌ها و فوق روان کننده‌ها با انواع تیپ‌های سیمان سازگاری دارند، همچنین مطالعات مختلف نشان داده که تاثیر این افزودنی‌ها در حضور پوزولان‌ها بیشتر بوده است. تفاوت بین روان کننده‌ها و فوق روان کننده‌ها در نوع عملکرد، بلکه در شدت عملکرد آن‌هاست. افزودنی فوق روان کننده توانایی کاهش آب به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد در یک اسلالمپ ثابت را دارد، در حالیکه افزودنی روان کننده توانایی کاهش آب به میزان ۵ تا ۱۲ درصد در همان مقدار اسلالمپ را دارد. با بالا بردن مقدار دوز مصرفی روان کننده می‌توان مقدار کاهش آب مصرفی را افزایش داد، اما ممکن است موجب تاثیر منفی بر گیرش، حجم هوای مخلوط و مقاومت بتن شود. بطور معمول مقدار دوز مصرف روان کننده‌ها حدود ۰,۲ تا ۰,۴

درصد وزن سیمان خشک و در فوق روان کننده‌ها حدود ۰,۱ تا ۰,۲ درصد وزن سیمان خشک است، البته این مقادیر بسته به نوع افزودنی و مقدار

ماده موثر معمولاً توسط کارخانه تولید کننده تعیین می‌گردد.

از نقطه نظر مواد تشکیل دهنده، روان کننده‌ها کاملاً متفاوت از فوق روان کننده‌ها هستند. مواد تشکیل دهنده اصلی فوق روان کننده‌ها

پلیمرهای مصنوعی محلول در آب هستند، مانند سولفونات ملامین فرمالدهید<sup>۱۰</sup>، سولفونات نفتالن فرمالدهید<sup>۱۱</sup> و یا اکریلیک پلیمرها<sup>۱۲</sup> مانند

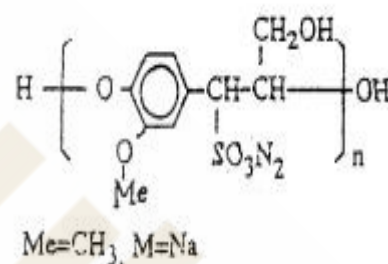
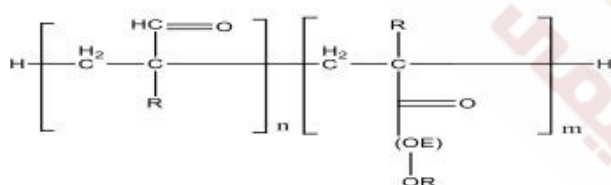
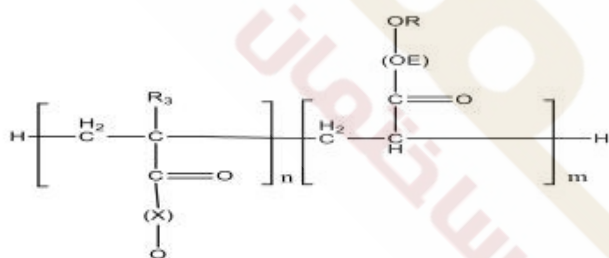
کوپلیمرهای کربوکسیلیک اکریلیک اسید.

مواد اصلی تشکیل دهنده روان کننده‌ها مواد آلی هستند که می‌توان آن‌ها را به چهار دسته تقسیم کرد. اولین گروه شامل نمک‌های

لیگنوسولفونیک اسید<sup>۱۳</sup>، که اصلاح شده آن می‌تواند به عنوان فوق روان کننده هم مورد استفاده قرار گیرد. گروه دوم شامل نمک‌های

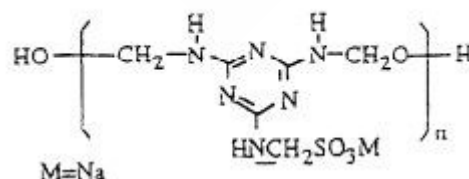
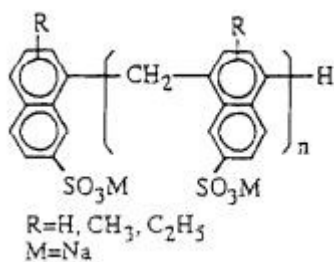
هیدروکربوکسیلیک اسیدها<sup>۱۴</sup> می‌شود. کربوهیدرات‌ها<sup>۱۵</sup> گروه سوم و گروه چهارم شامل ترکیبات متفرقه نظیر گلیسرول، پلی ونیل الکل و غیره

می‌شود. شکل‌های ۱ تا ۴، ساختار شیمیایی بعضی از روان کننده‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. ساختار شیمیایی نوعی پلیمر بر پایه پلی کربوکسیلات

شکل ۱. ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات



- <sup>10</sup> Sulfonated Melamyne Formaldehyde  
<sup>11</sup> Sulfonated Naphtalene Formaldehyde  
<sup>12</sup> Acrylic Polymer  
<sup>13</sup> Lignosulfonic Acid  
<sup>14</sup> Hydrocarboxylic Acid  
<sup>15</sup> Carbohydrate

برخی از تولید کننده‌های روان کننده‌ها، بسته به مواد اولیه استفاده شده در افزودنی و قدرت روان کنندگی، فوق روان کننده‌ها را به دو دسته فوق روان کننده و ابر روان کننده تقسیم بندی می‌کنند. از منظر آیین‌نامه‌ای، ابر روان کننده معنی نداشته و هر دو ماده به عنوان فوق روان کننده شناخته می‌شوند. نکته دیگر اینکه مقادیر استفاده از فوق روان کننده‌ها متفاوت بوده و در ارزیابی اقتصادی علاوه بر قیمت، میزان مصرف نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

## مکانیسم اثر مولکول‌های مواد عوامل فعال سطحی در افزایش کارایی بتن

مولکول‌های این مواد دارای ساختار پیچیده خطی هستند که یک سر آن‌ها آبگریز و سر دیگر آن‌ها آبدوست هستند. این مولکول‌ها وقتی در محیط آبدار قرار بگیرند به سمت سطح آب رانده شده و به گونه‌ای توزیع می‌شوند که انتهای آبگریز آن‌ها دورترین فاصله را با ذرات آب داشته باشد. حال اگر انتهای آبگریز این مولکول‌ها به ذرات هوا برخورد کنند آن‌ها را احاطه کرده و به صورت ذرات کروی شکل در می‌آورند که اگر به ذرات سیمان بخورند، در امتداد عمود بر سطح دانه‌های سیمان، کشش سطحی دانه‌های مزبور را تقلیل داده و جدا شدن آن‌ها را از هم تسریع می‌کنند، در نتیجه حرکت دانه‌ها نسبت به هم تسهیل شده و کارپذیری بتن افزایش می‌یابد.

مکانیسم اثر روان کننده‌ها در بتن نیز به این صورت است که ترکیبات اصلی و فعال روان کننده‌ها، مواد فعال کننده سطحی هستند که در فصل مشترک دو فاز غیرقابل اختلاط جمع شده و نیروهای فیزیکی-شیمیایی را در این سطح تماس داخلی تغییر می‌دهند.

این فعال کننده‌ی سطحی روی دانه‌های سیمان جذب شده و به آن‌ها بار منفی می‌دهد که سبب دور شدن این ذرات از هم و تثبیت حالت پخش شدگی آن‌ها می‌شود، حباب‌های هوا نیز دفع شده و نمی‌توانند به ذرات سیمان بچسبند. این پخش شدگی یکنواخت ذرات سیمان باعث می‌شود سطح بیشتری از سیمان برای واکنش‌های هیدراسیون در تماس با آب بوده و باعث افزایش مقاومت اولیه می‌شود. همچنین پراکندگی یکنواخت ذرات سیمان در مخلوط باعث می‌شود مقاومت بتن سخت شده به شدت افزایش یابد.

بعلاوه بار منفی سبب بوجود آمدن پوسته‌ای منظم از مولکول‌های آب اطراف هر ذره شده و در نتیجه موجب جداشدگی ذرات از هم می‌شود. چون آزادی بیشتری برای حرکت ذرات وجود دارد و آبی که در اثر سیستم فولکوله شدن تحت قید است، آزاد می‌شود و برای روانسازی مخلوط در دسترس قرار گرفته و در نتیجه کارایی افزایش می‌یابد.

## تندگیر کننده ها

افزودنی تندگیر کننده باعث سرعت گرفتن کسب مقاومت اولیه در بتن می‌شود. از تندگیر کننده‌ها در بتن ریزی‌های دمای پایین، در کارخانه-های تولید قطعات پیش ساخته به جهت باز کردن سریع تر قالب‌ها و یا در هر بتن ریزی که سرعت گیرش مهم است استفاده می‌شود. بیشترین کاربرد تندگیر کننده‌ها در بتن ریزی‌های دمای پایین، تا ۲ درجه سانتی گراد است و نباید این افزودنی را به عنوان ضدیخ به کار برد. یکی از شناخته شده ترین و رایج ترین افزودنی‌های تسریع کننده کلرید کلسیم است. کلسیم کلرید مانند یک کاتالیست هیدراسیون کلسیم سیلیکات را سرعت بخشیده و به عنوان یک تندگیر کننده موثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود استفاده از کلرید کلسیم به علت خاصیت خوردگی فولاد، فقط در بتن بدون آرماتور مجاز است. مقدار آن نباید بیشتر از حد لازم برای حصول نتیجه مورد نظر باشد و بنابر توصیه آیین نامه بتن ایران مقدار آن نباید از ۲ درصد تجاوز کند. بنابر استاندارد ASTM C-494، با استفاده از افزودنی تندگیر کننده، گیرش اولیه، که توسط آزمون نفوذ طبق ASTM C-403 اندازه گیری می‌شود، نسبت به مخلوط کنترلی نباید از ۱ ساعت کمتر و از ۳,۵ ساعت بیشتر باشد.

## کندگیر کننده ها

از این افزودنی به جهت ایجاد تاخیر در گیرش بتن استفاده می‌شود. در بتن ریزی‌های در هوای گرم، که به علت دمای بالا زمان گیرش بتن کاهش می‌یابد، در بتن ریزی‌های چند مرحله‌ای، بعنوان مثال برای بتن ریزی‌های حجیم، برای جلوگیری از درز های سرد، از افزودنی کندگیر کننده در بتن استفاده می‌شود. شکر، مشتقات کربوهیدرات‌ها، محلول نمک روی، محلول بورات و متانول می‌توانند به عنوان کندگیر کننده استفاده شوند. در استفاده از این افزودنی مراقبت و دقت بالایی نیاز است چرا که در مقادیر زیاد می‌توانند موجب توقف کامل گیرش بتن شوند. براساس استاندارد ASTM C-494 میزان تاخیر ایجاد شده توسط این افزودنی در گیرش بتن حداقل ۱ ساعت و حداکثر ۳,۵ ساعت می‌باشد. علاوه بر این افزودنی‌های تک منظوره، افزودنی‌های شیمیایی دیگری نیز وجود دارند که برای اصلاح چند ویژگی مخلوط بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که به آن‌ها چند منظوره گفته می‌شود. افزودنی‌هایی نظیر کاهنده آب و کندگیر کننده، کاهنده آب و تندگیر کننده و فوق روان کننده و کندگیر کننده و غیره.

۱. آیین نامه بتن ایران، آبا. ۱۳۷۹، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
۲. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران. ۱۳۹۲.
3. ASTM. ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete. 2005. ASTM West Conshohocken, PA, USA.
4. Ramachandran, V.S., Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. 1996: William Andrew.
5. Neville, A.M., Properties of concrete. Vol. 4. 1995: Longman London.
6. Merida, A. and F. Kharchi, Pozzolan concrete durability on sulphate attack. Procedia Engineering, 2015. 114: p. 832-837.
7. Resheidat, M. and B. Al-Kharabsheh. Development of colored concrete in Jordan. in INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION AND BUILDING TECHNOLOGY. ICCBT-A-(13)-PP153-164. 2008.
8. Şahin ,Y., et al., Characterization of air entraining admixtures in concrete using surface tension measurements. Cement and Concrete Composites, 2017. 82: p. 95-104.
۹. مستوفی نژاد، تکنولوژی و طرح اختلاط بتن. ۱۳۸۲.
10. Collepari, M., Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. Cement and concrete composites, 1998. 20(2-3): p. 103-112.