

## بررسی اجمالی انواع افزودنی‌های فوق روان کننده

در طرح‌های بتن امروزی اغلب استفاده از مواد افزودنی خواه از نوع شیمیایی و چه معدنی بسیار مرسوم است. به ویژه افزودنی‌های شیمیایی مانند افزودنی‌های کاهنده آب (روان کننده و فوق روان کننده ها) و نیز مواد کنترل کننده گیرش (زودگیرکننده و دیرگیر کننده) جهت تقویت خواص بتن تازه و سخت شده، بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمرکز اصلی این مطالعه بر روی بررسی انواع افزودنی‌های فوق روان کننده بتن یا فوق کاهنده‌ی آب می‌باشد. بدین منظور ابتدا تعاریف، طبقه‌بندی‌ها و ترکیبات شیمیایی افزودنی‌های کاهنده‌ی آب و همچنین مکانیزم عمل آن‌ها در بتن بررسی شده و سپس در مورد روش‌های آزمون جهت ارزیابی اثربخشی آن‌ها بحث شده است.

افزودنی شیمیایی در واقع به هر نوع ترکیب شیمیایی که جهت بهبود خواص بتن تازه یا سخت شده به آن اضافه گردد، اطلاق می‌شود. طبق تعریف آیین‌نامه ACI 116R (ویرایش ۲۰۰۰) مواد افزودنی به موادی گفته می‌شود که علاوه بر آب، سنگدانه، سیمان هیدرولیکی و الیاف، بعنوان یک جزئی از بتن یا ملات، حین یا قبل از اختلاط به آن اضافه گردد.

انواع متنوعی از افزودنی‌های شیمیایی در بتن یا ملات مورد استفاده قرار می‌گیرد که موارد عمومی آن‌ها عبارتند از:

- ۱- موادی که در یک روانی معین منجر به کاهش تقاضای آب مصرفی در بتن می‌شود که از آن‌ها تحت عنوان افزودنی‌های کاهنده‌ی آب (یا روان کننده/فوق روان کننده) یاد می‌شود.
- ۲- موادی که با افزودن مقادیر کنترل شده‌ای از حباب هوا (قطر ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر) در داخل مخلوط منجر به افزایش مقاومت آن در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد می‌شود که به این مواد حباب‌زا گفته می‌شود.
- ۳- موادی که باعث کنترل زمان گیرش و نرخ افزایش مقاومت بتن می‌شود با نام زودگیرکننده‌ها<sup>۳</sup> و دیرگیرکننده‌ها<sup>۴</sup> شناخته می‌شود.

همچنین یکسری از مواد افزودنی شیمیایی نیز وجود دارند که با اهداف ویژه‌ای در مخلوط بتن استفاده می‌شوند. برخی از افزودنی‌ها عبارتند از: عوامل اصلاح کننده ویسکوزیته<sup>۵</sup> افزودنی‌های مهار کننده خوردگی<sup>۶</sup>، افزودنی‌های کاهش دهنده‌ی واکنش‌های قلیایی - سیلیسی<sup>۷</sup> و ... .

---

<sup>۱</sup>Water reducer

<sup>۲</sup>Air entrainer

<sup>۳</sup>Accelerators

<sup>۴</sup>Retarders

<sup>۵</sup>Viscosity modifying agents

<sup>۶</sup>Corrosion inhibiting admixtures

<sup>۷</sup>Alkali-Silica reaction mitigating admixtures

## انواع افزودنی‌های کاهنده‌ی آب

یک افزودنی کاهنده آب، همانطور که از نام آن پیداست، جهت کاهش مقدار آب مخاوط بتن در روانی برابر استفاده می‌شود. این کاهش در مقدار آب، افزایش مقاومت و دوام بتن را در پی خواهد داشت. با این حال، افزودنی‌های کاهنده آب جهت جریان‌پذیر ساختن بتن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مورد، مقدار آب (یا نسبت آب به سیمان) ثابت نگه داشته می‌شود و افزودنی اضافه شده منجر به بهبود جریان روانی بتن می‌گردد و تاثیری بر مقاومت فشاری (که تابعی از نسبت آب به سیمان است) ندارد. مورد دیگر در استفاده از افزودنی کاهنده آب، کاهش مقدار سیمان طرح می‌باشد. در این حالت مقدار آب نیز به نسبت کاهش یافته و تاثیری در مقاومت و روانی بتن ایجاد نمی‌شود.

افزودنی‌های کاهنده آب بصورت کلی در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: میان رده (یا نرمال) و رده بالا. افزودنی‌های کاهنده آب میان رده تحت عنوان روان‌کننده و رده بالا تحت عنوان فوق روان‌کننده نیز شناخته می‌شوند. روان‌کننده‌ها قابلیت کاهش مقادیر آب بین ۵ تا ۱۰ درصد را دارند این در حالی است که با استفاده از فوق روان‌کننده‌ها می‌توان بین ۱۵ تا ۴۰ درصد مقدار آب را کاهش داد.

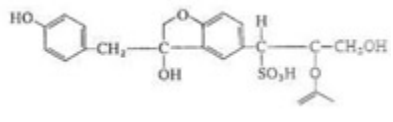
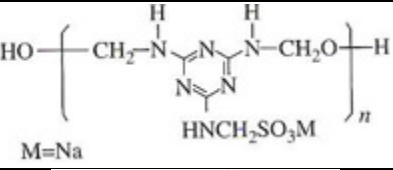
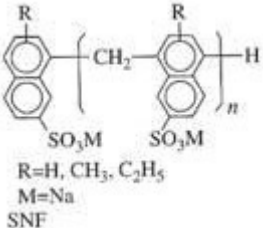
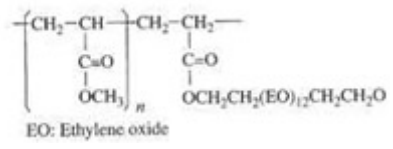
افزودنی‌های شیمیایی کاهنده آب عموماً به شکل مایع و با غلظت بین ۲۰ تا ۴۰ درصد عرضه می‌شود. افزودنی کاهنده آب رده بالا (فوق روان‌کننده‌ها) معمولاً با دز حدود ۰/۳ تا ۰/۵ درصد وزنی سیمان استفاده می‌شود. مقادیر بیشتر استفاده ممکن است منجر به افزایش زمان گیرش، آب انداختگی و هوازایی بالا گردد. در افزودنی‌های روان‌کننده نیز معمولاً دز مصرف حدود ۰/۷ تا ۱ درصد وزنی سیمان است.

نمک‌های سدیم و کلسیم لیگنوسولفونات، اسیدهای کربوکسیلیک (سیتریک و گلوکنیک اسید) و کربوهیدرات‌ها (عصاره ذرت و دکسترین<sup>۱</sup>) نمونه‌هایی از افزودنی‌های کاهنده‌ی آب میان رده (نرمال) محسوب می‌شوند. جدول ۱ انواع فوق روان‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. تمام فوق روان‌کننده‌ها پلیمرهای محلول در آب هستند. رفتار فوق روان‌کننده‌ها در واقع تابعی از ساختار و درجه پلیمریزاسیون آن‌هاست.

---

<sup>۱</sup>Dextrin

جدول ۱. انواع افزودنی‌های فوق روان کننده [Rixom and Maivaganam, 2003]

ماده پایه	منبع	ساختار شیمیایی
لیگنوسولفونات	محصول جانبی حاصل از مایع پسماند تولید خمیر کاغذ در صنایع چوبی که پس از مراحل تخمیر، ته نشینی و خنثی‌سازی حاصل می‌شود	
سولفونات ملامین فرمالدهید	این مواد حاصل فرآیند رزین‌سازی معمولی ملامین فرمالدهید است	
سولفونات نفتالین فرمالدهید	حاصل سولفوناسیون نفتالین با اولئوم یا SO <sub>3</sub> است. واکنش بعدی با فرمالدهید منجر به پلیمریزاسیون شده و سولفونیک اسید نیز با سدیم هیدروکسید یا آهک خنثی می‌گردد.	
پلی کربوکسیلات اتر	مکانیزم رادیکال آزاد با استفاده از آغازگرهای پراکسید جهت فرآیند پلیمریزاسیون این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد	

لیگنوسولفونات‌ها بعنوان نسل اول فوق‌روان‌کننده‌ها به شمار می‌روند. این در حالی است که نفتالین فرمالدهیدها نسل دوم و پلی‌کربوکسیلات‌ها و پلی‌اکریلات‌ها نیز نسل سوم و جدیدترین نسل افزودنی‌های فوق‌کاهنده آب را تشکیل می‌دهند. امروزه فوق‌روان‌کننده‌های سولفونات فرمالدهید و پلی‌کربوکسیلات استفاده‌ی گسترده‌تری دارند.

از نظر هزینه، افزودنی‌های پلی‌کربوکسیلیک اتر و سولفونات ملامین فرمالدهید تقریباً یکسان هستند (با یک ماده جامد موثر معادل) ولی سولفونات نفتالین فرمالدهید هزینه‌ای معادل نصف دارد. هزینه لیگنوسولفونات‌ها نیز در قیاس با پلی‌کربوکسیلیک‌اتر حدوداً معادل یک به چهار بوده و ارزان‌ترین نوع فوق‌روان‌کننده می‌باشد. به لحاظ اثرگذاری جهت حصول یک روانی معین برای بتن، مقدار مصرف پلی‌کربوکسیلات‌ها بسیار کمتر از سولفونات نفتالین فرمالدهید و لیگنوسولفونات می‌باشد. پس بنابراین از جنبه هزینه، انتخاب هر یک از این فوق‌روان‌کننده‌ها نیازمند بررسی هر دو فاکتور قیمت و میزان مصرف است (البته در مورد سولفونات ملامین فرمالدهید ذکر این نکته قابل توجه است که برای یک روانی معین معمولاً گران‌تر تمام می‌شوند).

### خصوصیات افزودنی‌های شیمیایی مختلف

لیگنوسولفونات‌ها با دز مصرف بالا قادر به کاهش قابل توجه در مقدار آب مخلوط هستند. بعبارت دیگر لیگنوسولفونات‌ها را وقتی می‌توان در دسته‌ی فوق‌روان‌کننده‌ها (کاهش مقدار آب بیش از ۱۵ درصد) قرار داد که دز مصرف بالایی را استفاده نمود. اما

مشکلی اساسی که در استفاده از لیگنوسولفونات‌ها به عنوان فوق روان‌کننده به وجود می‌آید، دیرگیری و حباب‌زایی بالا در بتن است. با این حال استفاده از لیگنوسولفونات‌های اصلاح شده، بعنوان فوق روان‌کننده، منجر به نتایج با ثبات‌تری می‌شود.

استفاده از سولفونات ملامین فرمالدهید، جهت حصول روانی اولیه بالا بسیار مناسب است. با این وجود، به دلیل ضعف بالا در خاصیت حفظ اسلامپ، استفاده از این نوع فوق روان‌کننده برای مواردی که زمان حمل بالاست قابل توصیه نیست (به ویژه در کارخانجات تولید بتن آماده). عبارت دیگر استفاده از این نوع افزودنی برای سایت‌های تولیدی پیش ساخته بسیار مناسب‌تر است چرا که فاصله حمل بسیار کوتاه است. همچنین این نوع افزودنی‌ها برای استفاده در شرایط آب و هوایی سرد نیز مناسب هستند.

افزودنی‌های سولفونات نفتالین فرمالدهید، تمام ویژگی‌های ضروری یک افزودنی مناسب برای آب و هوای گرم را دارا می‌باشند. بطور کلی، این نوع افزودنی‌ها به دلیل خاصیت حفظ اسلامپ مناسبی که دارند برای کارخانجات تولید بتن آماده (به ویژه در فواصل حمل طولانی) قابل توصیه هستند. خاصیت حفظ اسلامپ را می‌توان با ترکیب افزودنی‌های سولفونات نفتالین فرمالدهید و لیگنوسولفونات بهبود بخشید ولی این امر برای افزودنی‌های سولفونات ملامین فرمالدهید امکان‌پذیر نیست. با توجه به قیمت پایین سولفونات نفتالین فرمالدهید، استفاده از آن همچنان بالاست. با این حال، مسائل و مشکلات عدم سازگاری با سیمان در این نوع افزودنی بسیار بالاتر است.

کوپلمیرهای پلی‌کربوکسیلات و آکرلیک، موثرترین نوع افزودنی‌های فوق روان‌کننده‌اند. با استفاده از این نوع افزودنی‌ها می‌توان مقدار آب مخلوط را تا ۴۰ درصد کاهش داد. بنابراین جهت ساختن بتن‌های با مقاومت بالا و خیلی بالا (که مقدار آب به سیمان در حدود ۰/۲ است) استفاده از آن‌ها بسیار ارجح‌تر است. معمولاً این افزودنی‌ها حفظ اسلامپ بسیار خوبی را نشان می‌شوند و تاخیری در روند رشد مقاومت بتن ایجاد نمی‌کنند. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، قیمت این افزودنی‌ها بالاست ولی به واسطه دز مصرف پایین (در بتنی با کارایی برابر)، در هزینه کلی بتن نسبت به استفاده از سایر افزودنی‌ها، تاثیر چندانی نمی‌گذارد. فقط در مورد بتن‌های خاص، مانند بتن‌های خودتراکم، استفاده از پلی‌کربوکسیلات‌ها هزینه را بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. اما ذکر این نکته ضروری است که ساختن یک بتن خودتراکم با کیفیت بالا بدون استفاده از نسل‌های جدید فوق روان‌کننده تقریباً امکان‌پذیر نیست. تجربیات استفاده از این نوع افزودنی‌های شیمیایی نشان می‌دهد که این مواد در نسبت‌های آب به سیمان پایین عملکرد بهتری داشته و مشکلات مربوط به عدم سازگاری با سیمان نیز در این افزودنی‌ها نسبت به سولفونات نفتالین فرمالدهیدها به مراتب کم‌تر است.

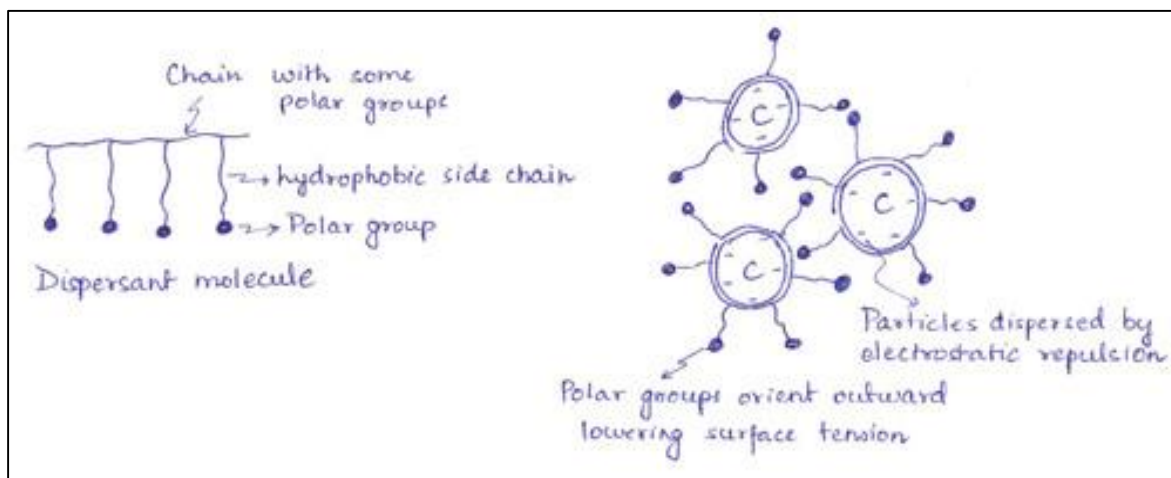
## مکانیزم عمل افزودنی‌های کاهنده آب

افزودنی‌های شیمیایی کاهنده آب در واقع بصورت یک گروه‌های شیمیایی تحت عنوان پراکنده‌ساز (dispersant) عمل می‌کنند که مانع کلوخه‌ای شدن ذرات سیمان می‌شوند. دیسپرسنت‌ها اساساً موادی با سطح فعال<sup>۱۰</sup> بوده و شامل مولکول‌های ارگانیک با

<sup>۱۰</sup>Flocculation

<sup>۱۰</sup> عوامل با سطح فعال در واقع ترکیباتی هستند که تنش بین سطحی را (بین مایعات یا بین گاز و مایع یا بین جامد و مایع) کاهش می‌دهند. از این عنوان تحت عنوان Surfactant نیز یاد می‌شود.

شاخه‌های اصلی بلند هستند که دارای یک گروه آب دوست قطبی (مانند  $-\text{COO}^-$ ،  $-\text{SO}_3^-$ ،  $-\text{NH}_4^+$ ) بوده و بوسیله گروه‌های قطبی ( $-\text{OH}$ ) به شاخه‌های ارگانیک آب‌گریز غیر قطبی متصل هستند (شکل ۱).

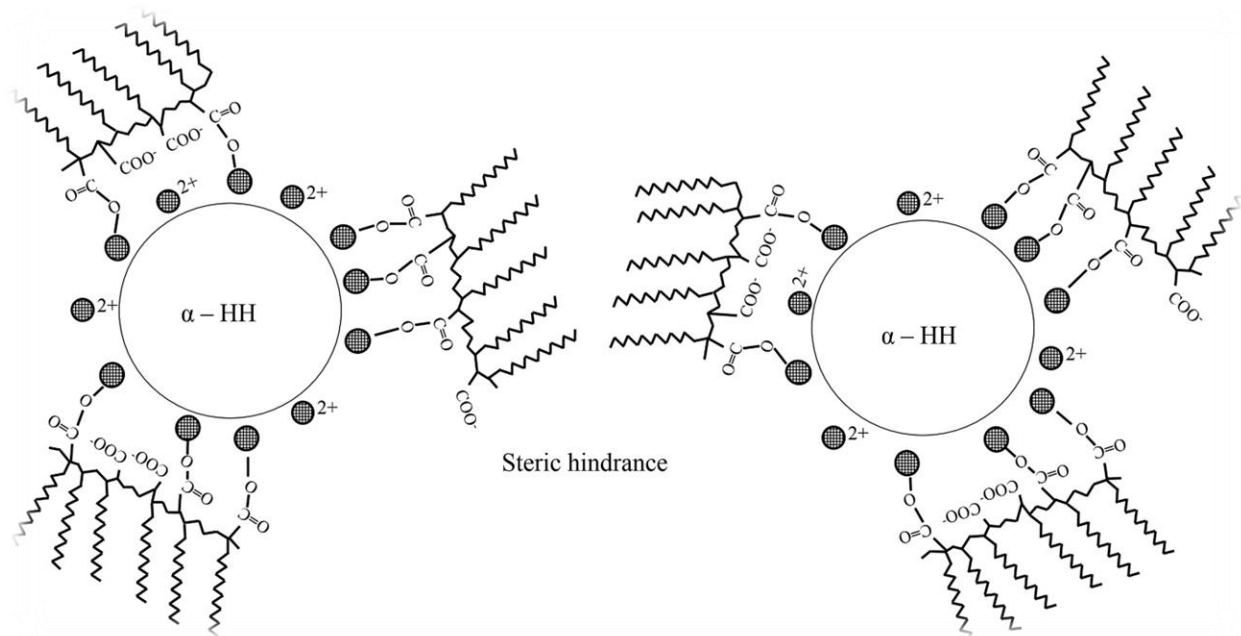


شکل ۱. ساختار مولکول دیسپرسنت

گروه‌های قطبی جذب سطوح ذرات سیمان شده و انتهای آب‌گریز به سمت خارج از ذرات قرار می‌گیرد. سر آب دوست پلیمر، تنش سطحی آب را کاهش داده و پلیمر جذب شده، ذرات سیمان را بواسطه دافعه الکترواستاتیکی از هم دور می‌کند. جذب افزودنی باعث افزایش پتانسیل زتا<sup>۱</sup> (Zeta) شده و نهایتاً باعث ایجاد بار منفی بر روی ذرات سیمان می‌گردد. با رشد واکنش هیدراسیون سیمان، بار الکترواستاتیکی کاهش یافته و کلوخه‌ای شدن مواد هیدراته شده آغاز می‌گردد.

فوق روان‌کننده‌های بر پایه لیگنوسولفونات‌ها (نرمال و تصفیه شده)، سولفونات ملامین فرمالدهید و سولفونات نفتالن فرمالدهید، عمدتاً بر اساس مکانیزم کاهش افزایش پتانسیل زتا که منجر به ایجاد دافعه الکترواستاتیکی می‌شود، عمل می‌کنند. این در حالی است که پلیمرهای دارای زنجیره اصلی و فرعی (**backbone and graft chains**)، مانند پلی‌کربوکسیلات‌ها، آکریلیک استرها و... عمدتاً به واسطه ممانعت فضایی منجر به پراکندگی ذرات سیمان می‌شوند. ممانعت فضایی مکانیزم بسیار موثرتری نسبت به دافعه الکترواستاتیکی است. در این پدیده در واقع زنجیره‌های جانبی بزرگ باعث جداسازی مولکول‌ها می‌گردد. شکل ۲ مکانیزم ممانعت فضایی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> اختلاف پتانسیل بین ذرات سیمان و سطح لغزش آن در سیستم



شکل ۲. مکانیزم ممانعت فضایی بین ذرات سیمان

دافعه الکترواستاتیکی به ترکیب فاز محلول و میزان جذب فوق روان کننده بستگی دارد. در واقع جذب بیشتر منجر به دافعه بهتر خواهد شد. پارامترهای تاثیرگذار در دافعه فضایی نیز طول رنجیره اصلی و طول و تعداد زنجیره‌های جانبی است.

جهت حفظ اسلامپ بالاتر در افزودنی‌های پلی کربوکسیلاتی، این پلیمرها باید دارای زنجیره اصلی کوتاه‌تر و زنجیره‌های جانبی بلند با تعداد بیشتر باشند. این نوع افزودنی‌ها بدلیل مکانیزم دافعه فضایی که ایجاد می‌کنند از افزودنی‌های پایه سولفونات تاثیرگذاری بیشتری دارند و بطور کلی در مقادیر آب به سیمان پایین‌تر مشکلات کم‌تری بوجود می‌آید. با در نظر داشت که افزودنی‌های پایه پلی کربوکسیلات نسبت به دز مصرف حساس هستند و در صورت استفاده بیش از حد ممکن است مسائلی همچون ایجاد حباب هوای بیش از حد و دیرگیری ایجاد گردد.

سایر مکانیزم‌هایی که منجر به پراکندگی ذرات سیمان و در نتیجه افزایش روانی مخلوط بتن می‌گردد عبارت است از کاهش تنش سطحی آب مخلوط و ایجاد خواص لوبریکانت به واسطه وزن مولکولی پایین پلیمرها و قرارگیری آن‌ها بین ذرات مخلوط است.

## منابع

- 1- C. P. E. Bedard, and N. P. Mailvaganam, The use of chemical admixtures in concrete: Part II: Admixture-admixture compatibility and practical problems, ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities (2005) 263-266.
- 2- M. Collepardi, Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete, Cem Concr Compose 20 (1998) 103-112.
- 3- V. S. Ramachandran, Concrete admixtures handbook, Standard Publishers, New Delhi (2002) .

- 4- **R. Rixom and N. Mailvaganam, Chemical Admixtures for concrete, E & FN Spon, London (1999).**
- 5- **L. R. Roberts, Dealing with cement admixture interactions, 23rd Annual Convention of the Institute of Concrete Technology, Telford, UK (1995).**
- 6- **T. Sugiyama, T. Sugamata, A. Ohta, The effects of high range water reducing agent on the improvement of rheological properties, Proceedings of the seventh CANMET/ACI International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, ACI SP – 217 (2003) 343-360.**