بهبود کارایی نمای بتنی ساختمان با استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب

گردآوری: نغمه ناصح

شرکت رزینفام

مقدمه [۲-۱]

دانش و فناوری ساخت و ساز تاریخچه‌ای به قدمت بشریت دارد و در طی این مدت پیشرفت‌های فراوانی در این زمینه و نوع مصالح به‌کار رفته پدید آمده است. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها، بهبود کیفیت مصالح ساختمانی و به‌خصوص بتن به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح بعد از آب برای ساخت وساز است. میزان این پیشرفت‌ها در دانش و فناوری بتن به‌حدی بوده است که امروزه ساخت بتن‌های توانمند[1]، بتن‌های بسیار پر مقاومت، بتن سبک، بتن پایا در شرایط جوی سخت، بتن خودتراکم[2] و بسیاری دیگر در کارگاه‌های ساختمانی متداول شده است.

بتن یک ماده کامپوزیتی است که از اختلاط سیمان، آب و سنگدانه[3] تولید می‌شود و قدمت آن به بیش از شش هزار سال پیش برمی‌گردد؛ با این‌حال رشد چشمگیر به‌کارگیری آن در مصالح ساختمانی مربوط به تولید سیمان پرتلند[4] توسط جوزف آسپدین[5] در سطح آزمایشگاهی است. کیفیت بتن وابسته به کیفیت اجزای به‌کار رفته، نسبت آن‌ها، محل و شرایط در معرض قرارگیری است. کیفیت مواد خام به‌کار رفته، شرایط کلسینه شدن[6]، دانه‌بندی، اندازه ذرات سیمان، نسبت آب/ سیمان نیز همگی بر رفتار ملات سیمانی موثر هستند. در طول دهه‌های اخیر به‌منظور بهبود خواص آمیزه‌های بتنی علاوه بر مواد فوق از تعدادی افزودنی نیز استفاده می‌شود.

۱- انواع افزودنی‌ها [۱]

تعریف متداول مورد استفاده در استاندارد ASTM C125[7] برای افزودنی عبارتست از " موادی که در بتن یا ملات بلافاصله قبل و یا هنگام اختلاط اضافه می‌شوند و البته این مواد شامل آب، سنگدانه، سیمان و الیاف تقویت کننده نمی‌گردد." همچنین در استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI2930 تعریف افزودنی‌های بتن به این صورت آورده شده است که: " افزودنی‌ها، مواد شیمیایی محلول در آب هستند که به بتن در حین اختلاط به مقدار کم‌تر از ۵٪ وزنی ماده سیمانی به‌منظور اصلاح خواص بتن در حالت تازه و سخت اضافه می‌شوند." به‌طور کلی افزودنی‌های بتن به دو دسته معدنی و شیمیایی تقسیم می‌شوند.

۱-۱- مواد افزودنی معدنی

مواد افزودنی معدنی نظیر پوزولان‌های طبیعی شامل زئولیت، تراس، توف، متاکائولن و یا پوزولان‌های مصنوعی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس و نظایر آن‌ها جایگزین بخشی از سیمان می‌شود و با استفاده از آن می‌توان مقدار سیمان مصرفی را به‌طور معمول بین ۳۰-۵٪ کاهش داد. این جایگزینی می‌تواند از جهات گوناگون برحسب مورد از حیث مقاومت، دوام، کاهش حرارت هیدراتاسیون و نیز از لحاظ اقتصادی قابل توجیه باشد. علاوه بر آن با توجه به تولید قابل توجه گازهای گلخانه-ای ناشی از تولید کلینکر سیمان پرتلند، استفاده از افزودنی‌های معدنی در اکثر کشورها خصوصاً کشورهای صنعتی تولید سیمان آمیخته، سیمان‌هایی که بخشی از کلینکر سیمان با افزودنی‌های معدنی جایگزین می‌شود، بسیار متداول است.

۱-۱-۱- عملکرد افزودنی‌های معدنی

[1] High Performance Concrete, HPC
[2] Self Consolidating (or Compaction) Concrete, SCC
[3] Aggregate
[4] Portland Cement, PC
[5] Joseph Aspdin
[6] Calcination
[7] Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

در فرآیند واکنش آب و سیمان پرتلند دو محصول مهم تولید می‌شود. اولین محصول که حدوداً ۷۵٪ خمیر سیمان سخت شده را تشکیل می‌دهد، سیلیکات کلسیم هیدراته است. این محصول مهم‌ترین عامل تولید مقاومت و ایجاد دوام در بتن محسوب می‌شود. علاوه بر آن، محصول دیگری به نام آهک هیدراته یا پرتلاندیت نیز به میزان حدود ۲۵-۲۰٪ تولید می‌شود. اگرچه این محصول به‌دلیل قلیایی بودن، محیط بتن را خصوصاً برای حفاظت آرماتورها مهیا می‌نماید، ولی این محصول دارای ارزش مقاومتی خاصی نمی‌باشد و در محیط‌های خورنده نظیر سولفات‌ها و اسیدها مقاومت ناچیزی دارد. در اثر واکنش سیلیس آمورف موجود در افزودنی‌های معدنی با آهک هیدراته، نوعی سیلیکات کلسیم هیدراته تشکیل می‌شود. علاوه بر آن در اغلب مواد افزودنی معدنی مقداری آلومین هم وجود دارد که در اثر واکنش‌های پوزولانی به سیلیکات‌های آلومینو کلسیم هیدراته تبدیل می‌شود که به نوبه خود به بهبود خواص بتن خواهد انجامید.

۱-۲- مواد افزودنی شیمیایی

این مواد بر خلاف مواد افزودنی معدنی جایگزین سیمان نمی‌شوند و مقدار مصرف آن‌ها حسب مورد از چند دهم تا حداکثر ۳٪ وزن سیمان است. اصلی‌ترین اهداف به‌کارگیری افزودنی‌های شیمیایی در بتن تازه به‌صورت زیر است:

- تغییر در زمان گیرش
- تغییر در خواص رئولوژی بتن تازه نظیر بهبود کارایی شامل روانی، تراکم پذیری، قابلیت جایگیری در قالب
- کاهش آب انداختگی و جدا شدگی، بهبود پرداخت‌پذیری و افزایش قابلیت پمپ پذیری
- کاهش میزان مصرف آب با حفظ کارپذیری بتن
- تغییر در خواص جمع شدگی خمیری و عمدتاً کاهش آن
- کاهش حرارت هیدراتاسیون

۱-۲-۱- تاریخچه

سابقه استفاده از مواد افزودنی در ساخت و ساز بسیار طولانی است. معروف است که رومیان از چربی‌های حیوانی، شیر و خون برای بهبود مشخصات مصالح ساختمانی خود استفاده می‌کرده‌اند. استفاده از این مواد عمدتاً به بهبود کارایی می‌انجامید، علاوه بر آن خون به‌دلیل دارا بودن هموگلوبین می‌توانست به‌نوعی تولید حباب هوا کرده که دوام مصالح ساختمانی را بهبود می‌بخشید. چینی‌ها از خمیر برنج، روغن تانگ و ملاس برای بهبود خواص مصالح استفاده می‌کردند. در ایران نیز از تخم مرغ، خاکستر کوره حمام، پشم حیوانات و مواد مشابه برای ساخت ساروج و بهبود ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در ساخت و ساز استفاده می‌نمودند.

۱-۲-۲- استانداردهای مورد استفاده **[۳]**

امروزه استاندارد EN BS 934 با عنوان افزودنی‌های بتن، ملات و گروت، به‌عنوان یکی از معتبر ترین استانداردها در مورد افزودنی‌های شیمیایی مورد توجه تولیدکنندگان و مصرف کنندگان می‌باشد. نسخه دوم این استاندارد، EN BS 934-2 تحت عنوان افزودنی‌های بتن، تعاریف و الزامات، به‌عنوان استاندارد ملی ایران در مورد افزودنی‌های شیمیایی بتن پذیرفته شده و با شماره ISIRI2930 منتشر شده است. از سوی دیگر در آمریکا از استاندارد ASTM C494 در کنار استاندارد اروپایی استفاده می‌شود. دسته‌بندی انواع افزودنی‌های بتن بر طبق این دو استاندارد به شرح زیر است:

جدول ۱: استانداردهای مورد استفاده

ISIRI2930	ASTM C494
افزودنی‌های کاهنده آب (روان کننده)	تیپ A افزودنی‌های کاهنده آب
کاهنده آب قوی (فوق روان‌کننده)	تیپ B افزودنی‌های کندگیرکننده
نگهدارنده‌های آب[1]	تیپ C افزودنی‌های تسریع کننده گیرش
حباب‌سازها	تیپ D افزودنی‌های کاهنده آب کندگیر کننده
تسریع کننده گیرش	تیپ E افزودنی‌های کاهنده آب تسریع کننده
کندگیر کننده گیرش	تیپ F افزودنی‌های کاهنده آب قوی (فوق روان‌کننده)
ضدآب کننده‌ها	تیپ G افزودنی‌های کاهنده آب قوی کندگیر کننده
کاهنده آب کندگیر کننده گیرش	تیپ S افزودنی‌های با عملکرد خاص
فوق روان‌کننده کندگیر کننده گیرش	
کاهنده آب تسریع کننده گیرش	

۲- افزودنی‌های کاهنده آب و فوق روان‌کننده‌ها

۲-۱-افزودنی‌های کاهنده آب

هدف از به‌کارگیری افزودنی‌های کاهنده آب کاهش مقدار آب اختلاط در اسلامپ ثابت به‌منظور افزایش مقاومت، کاهش عیار سیمان در مقاومت ثابت و یا افزایش روانی و اسلامپ بتن در نسبت آب/ سیمان ثابت می‌باشد. استفاده از این افزودنی‌ها مشخصات بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های با دانه‌بندی نامناسب را بهبود بخشیده و برای بتن‌ریزی در شرایطی که قراردهی بتن با دشواری‌هایی همراه است مفید می‌باشد. مقدار استفاده از این افزودنی‌ها بر اساس درصد وزنی سیمان بیان شده و مقادیر معمول استفاده از این ترکیبات در حدود ۱.۵-۰.۵ ٪ وزن مواد سیمانی در صورت استفاده از افزودنی محلول در آب می‌باشد. ترکیبات سازنده این افزودنی‌ها عمدتاً ترکیباتی آلی بوده که می‌توانند باعث ایجاد تاخیر در زمان گیرش بتن شوند. برای جبران چنین مشکلی در برخی از این افزودنی‌ها از مقادیر کمی ترکیبات تسریع کننده استفاده می‌شود. بر این مبنا افزودنی-های کاهنده آب بر مبنای تاثیری که بر روند هیدراتاسیون سیمان می‌گذارند به سه دسته افزودنی‌های کاهنده آب معمولی، کاهنده آب کندگیر کننده و کاهنده آب تسریع کننده تقسیم می‌شوند.

۲-۲- افزودنی‌های فوق روان‌کننده

مهم‌ترین تفاوت این افزودنی‌ها با افزودنی‌های کاهنده آب، مقدار کاهش آبی است که استفاده از این افزودنی‌ها ممکن می-سازد. این گروه قادرند تا مقدار آب اختلاط را بیش از ۱۲٪ و برخی از انواع آن حتی تا بیش از ۳۰٪ کاهش دهند مهم‌ترین کاربرد این افزودنی‌ها در تولید بتن‌هایی با کارایی معمولی و نسبت آب/ سیمان کم (حتی کم‌تر از ۳۰٪)، تولید بتن‌های روان و خودتراکم و توانایی همزمان در افزایش کارایی و کاهش نسبت آب/ سیمان است. از مهم‌ترین موارد مصرف این افزودنی‌ها در ساخت قطعات پیش ساخته بوده و در بتن‌ریزی قطعات با عمق زیاد بسیار سودمند هستند. از مشکلات اصلی این افزودنی‌ها در گذشته افت اسلامپ زیاد بتن‌های حاوی این ترکیبات بوده که امروزه با معرفی ترکیبات بر پایه پلی-کربوکسیلات این مشکل برطرف شده است. با وجود اینکه استفاده از این افزودنی‌ها موجب افزایش ضریب فاصله[2] در سیستم توزیع حفرات بتن می‌شود، مقاومت در برابر چرخه ذوب/ انجماد را افزایش می‌دهد. در صورت مشاهده افت اسلامپ و از دست رفتن کارایی بتن، می‌توان با استفاده از این افزودنی‌ها کارایی را بازیابی کرده و بدون اضافه کردن آب اضافه، روانی بتن را مجدداً تامین نمود.

1 Water retainer

2 Spacing factor

۲-۲- نحوه انتخاب افزودنی‌ها برای هر پروژه

برای انتخاب افزودنی مناسب در یک پروژه ابتدا باید بر اساس عملکرد مورد نیاز، نوع ماده افزودنی انتخاب شود. از افزودنی-های روان‌کننده برای تولید بتن با مقاومت یا روانی بیشتر و افزودنی‌های فوق روان‌کننده برای تولید بتن‌های روان، خود تراکم و پرمقاومت در سازه‌های پر آرماتور استفاده می‌شوند.

۲-۳- ترتیب اختلاط مواد افزودنی

نحوه اضافه کردن مواد افزودنی شیمیایی به نوع ماده افزودنی بستگی دارد. افزودنی‌ها باید به‌گونه‌ای به طرح اختلاط بتن افزوده شوند که به‌سرعت و به‌صورت یکنواخت در مخلوط بتنی پخش شوند. معمولاً این کار از طریق اضافه کردن افزودنی به آب توزین شده که پس از آن به سیمان و سنگدانه‌های خشک مخلوط شده اضافه می‌شود، امکان‌پذیر است. با این‌حال این روش بیشترین تاثیر را در مورد تمام افزودنی‌ها به دنبال نخواهد داشت. در برخی موارد بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که اضافه کردن افزودنی درست در پایان زمان اختلاط سنگدانه‌ها، سیمان و آب انجام گیرد.

در مورد بسیاری از افزودنی‌های متداول مانند افزودنی‌های کاهنده آب و فوق روان‌کننده، برای دستیابی به شرایطی که هم از نظر مشخصات بتن و هم از نظر استفاده از افزودنی در شرایط اجرایی مطلوب باشد، می‌توان از روش اختلاط زیر استفاده نمود:

پس از اختلاط اولیه سنگدانه، سیمان و بخشی از آب (تقریباً ۵۰٪)، افزودنی با تقریباً نیمی از آب باقی‌مانده مخلوط شده و به مخلوط بتنی اضافه می‌گردد و در نهایت آب باقی‌مانده تا رسیدن به کارایی مورد نظر به مخلوط اضافه می‌شود.

۲-٤- انواع ساختارهای فوق روان‌کننده **[۵-٤-۱]**

این ترکیبات ابتدا در اواخر دهه ٦۰ میلادی در آلمان و ژاپن عرضه شدند و برپایه ترکیبات نفتالین و ملامین سولفونات تغلیظ شده بودند. در آغاز دهه ۸۰ میلادی اقداماتی در جهت ساختن این افزودنی‌ها بر پایه ترکیبات پلی‌اکریلات انجام شد (شکل ۱). همچنین به دلیل قیمت مناسب ترکیبات برپایه لیگنوسولفونات، تلاش‌های بسیاری در زمینه تولید فوق روان-کننده‌ها برپایه این ترکیبات شیمیایی انجام شده است. در حال حاضر در عمل این ترکیبات در کنار سایر ترکیبات با پایه پلی-کربوکسیلات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همان‌طور که در مقاله دیگری نیز به آن اشاره کرده‌ایم، به‌طور کلی ساختارهای مرسوم فوق روان‌کننده‌ها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

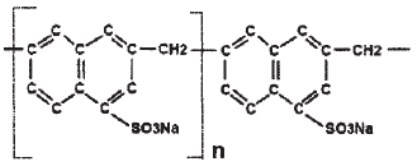
۱. برپایه بسپارهای سولفونه
- لیگنو سولفونات‌های اصلاح شده (MLS)
- ملامین فرمالدهید سولفونات‌های تغلیظ شده (SMF)
- نفتالین فرمالدهید سولفونات‌های تغلیظ شده (SNF)

۲. برپایه بسپارهای اکریلیک
- مشتقات پلی‌کربوکسیلات برای مثال اتر پلی‌کربوکسیلات‌ها (PC)

۲-٤-۱- بسپارهای سولفونه

لیگنو سولفونات‌های اصلاح شده به‌طور گسترده به‌عنوان افزودنی‌های کاهنده آب استفاده می‌شوند. استفاده از مقادیر معمول این افزودنی‌ها مقدار آب اختلاط را به میزان ۱۰-٦٪ کاهش می‌دهد. استفاده از مقادیر بیشتر سبب تاخیر در زمان گیرش و ایجاد حباب هوای اضافی می‌شود و به همین دلیل نمی‌توان از این گروه به‌عنوان افزودنی‌های فوق روان‌کننده استفاده کرد. به‌دلیل هزینه کم، تمایل به ساخت افزودنی‌های فوق روان‌کننده با پایه این ترکیب شیمیایی همواره وجود داشته است.

نفتالین فرمالدهید سولفونات‌های تغلیظ شده از اولین موادی بودند که به‌عنوان یک کاهنده آب از دهه ۷۰ میلادی تا کنون با عملکرد گسترده در ترکیبات افزودنی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و با عنوان پلی‌نفتالین سولفونات (PNS) نیز شناخته می-شود.



شکل ۲: مشهورترین فوق روان‌کننده سولفوناتی: پلی- بتا - نفتالن سولفونات

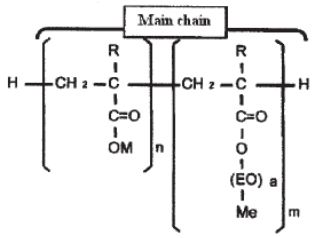
ملامین فرمالدهید سولفونات‌های تغلیظ شده در ابتدا در دهه ۵۰ میلادی به‌عنوان یک عامل پراکنش در صنایع مختلف گسترش پیدا کرد و تا ۱۰ سال بعد هم امکان استفاده از آن در بتن شناخته شده نبود.

از انحلال بسپارهای سولفونه در آب گروه‌های SO_3^- ایجاد می‌شود که برخی جذب سطحی بار مثبت ذرات سیمان و بعضی دیگر سبب تجمع بار منفی حول ذرات می‌شود و به سبب آن جاذبه بین ذره‌ای از طریق دافعه الکترواستاتیک کاهش می‌یابد و منجر به پراکنش یکنواخت‌تری از ذرات سیمان می‌شود. این عمل موجب کاهش میزان آب مورد نیاز برای دستیابی به قوام مناسب یک ملات سیمانی می‌شود.

۲-٤-۲- بسپارهای اکریلیک

این ترکیبات جدیدترین انواع افزودنی‌های فوق‌روان کننده بوده و برعکس ترکیبات نفتالینی و ملامینی که عمدتاً از یک ساختار واحد تشکیل شده‌اند، خانواده‌ای از محصولات با ساختارهای شیمیایی متفاوت هستند. زنجیر اصلی تشکیل دهنده این ترکیبات برپایه بسپارش اکریلیک اسید است که می‌تواند با گروه‌های تکپار دیگر جایگزین شود. گروه‌های کربوکسیلاتی با تشکیل نمک سدیم خنثی شده و با تجزیه یون سدیم در محیط محلول، دارای بار منفی شده که نقطه اتصالی برای جذب افزودنی بر سطح ذرات سیمان می‌گردد.

گروه‌های کربوکسیل نسبت به گروه‌های سولفونیک، اسیدهای ضعیف‌تری هستند و به همین دلیل پلی‌کربوکسیلات‌ها در محیط قلیایی متوسط به‌طور کامل یونیزه شده و بدین جهت عملکرد بهتری به‌عنوان فوق روان کننده خواهند داشت.



شکل ۳: ساختار پایه فوق‌روان کننده پلی‌کربوکسیلاتی

ساختار این فوق روان‌کننده‌ها حاوی یک زنجیر اصلی انعطاف-پذیر است که روی آن گروه‌های کربوکسیلیک با بار منفی و نیز تعداد زیادی زنجیر جانبی قرار گرفته‌اند.

سازوکار اصلی در عملکرد افزودنی‌های فوق روان‌کننده با پایه پلی‌کربوکسیلات، ممانعت فضایی است. این مولکول‌ها حامل گروهای CO_2^- Na^+ هستند که در آب به CO_2^- و Na^+ تجزیه می‌شوند. CO_2^- متصل به ذرات افزودنی باقی مانده و تا حدودی بار منفی ایجاد می‌کند که باعث اتصال ذرات افزودنی به دانه-های سیمان می‌گردد. گروه‌های پلی‌اتری طویل به سمت خارج دانه‌های سیمان جهت گیری کرده و به صورت فیزیکی مانع از نزدیک شدن ذرات سیمان مجاور به یکدیگر می‌گردد. به این ترتیب دانه‌های سیمان مجزا از یکدیگر باقی می‌مانند. اندازه گیری پتانسیل زتا نشان می‌دهد که برعکس ترکیبات با پایه نفتالین فرمالدهید سولفونات، بار منفی ایجاد شده در دانه‌های سیمان در ترکیبات حاوی افزودنی های فوق روان‌کننده با پایه پلی‌کربوکسیلات چندان قابل توجه نمی‌باشد (میزان ممانعت الکترواستاتیک حاصل توسط فوق‌روان‌کننده‌های CE نصف مقدار حاصل توسط فوق‌روان‌کننده‌های SNF است) اما این به آن معنا نیست که این افزودنی‌ها قدرت کاهندگی آب کم‌تری داشته باشند، بلکه قدرت این افزودنی ها در روان‌کنندگی و کاهندگی آب بسیار بیش از افزودنی‌های نفتالینی، ملامینی و لیگنوسولفوناتی است.

مراجع:

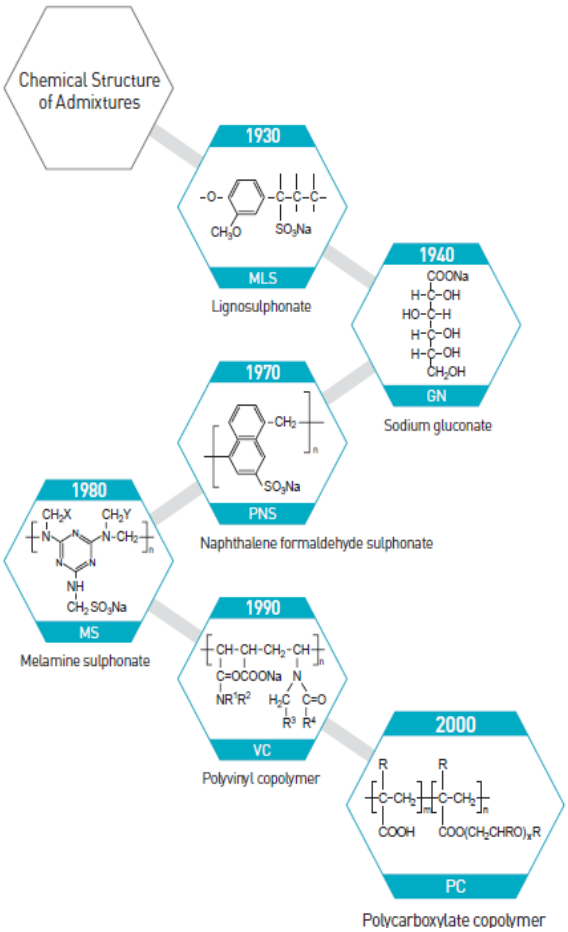
[۱] افزودنی‌های شیمیایی بتن: دانش فناوری و کاربردها، محمد شکرچی‌زاده، نیکلاس علی لیبر، سولماز دهقان مروستی، علی پورضرابی، انتشارات علم و ادب، مهر ۱۳۹۱

[۲] Saksit Plang-ngern, Wanjana Wannaphahoun, The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008

[۳] ASTM C494- Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete

[٤] سوگل برجیان، محمد احمدی، فوق روان کننده‌ها، مجله پوشرنگ شماره۹۳، اردیبهشت ۸۹

[٥] Daniel Fiat, Mirela Lazar, Victoria Baciu, Gheorghe Hubca, Superplasticizer Polymeric Additives Used in Concrete, Material Plastice 49, No. 1, 2012



شکل۱: روند رشد تغییر ساختارهای شیمیایی فوق روان‌کننده‌ها