

## بررسی خصوصیات بتن خودمتراکم پلیمری

علی حدیدی (دانشیار)

فاطمه غفاری\* (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
 دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

Research Note

در این نوشتار به بررسی خصوصیات بتن خودمتراکم پلیمری به همراه رزین سنگ مصنوعی که در دو محیط آب و سولفات منیزیم نگهداری شده‌اند، پرداخته شده است. برای این منظور ۱۵ طرح اختلاط مختلف ساخته و در سولفات منیزیم و آب نگهداری شده است. پلیمر مورد استفاده دارای آلژینات است، که در دندان پزشکی کاربرد دارد. در این مطالعه نمونه‌ها در ۳ فاز ساخته شده‌اند. فاز اول شامل نمونه‌های با ۱٪ رزین، فاز دوم با ۱٫۵٪ رزین و فاز سوم با ۲٪ رزین است. در تمامی فازها از آلژینات با درصدهای ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ استفاده شده است. مقاومت فشاری و خمشی، و جذب آب نمونه‌ها در سنین مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج پژوهش نشان داده است که استفاده از ۰٫۵٪ آلژینات و ۲٪ رزین، مقاومت فشاری بتن را در محیط سولفات حدود ۲۵٪ افزایش داده است. همچنین استفاده از ۲٪ آلژینات و ۲٪ رزین، مقاومت خمشی نمونه‌ی عمل‌آوری شده در محیط سولفات را ۶۷٪ افزایش و جذب آب را کاهش داده است.

واژگان کلیدی: بتن خودمتراکم، پلیمر، آلژینات، سولفات منیزیم، رزین سنگ مصنوعی.

heidari@eng.sku.ac.ir  
 fateme.ghaffari@st.u.sku.ac.ir

### ۱. مقدمه

بتن تازه و یا سخت‌شده در حین ساخت به آن افزوده می‌شوند، نقش به‌سزایی در پرتندگی و کاهش نفوذپذیری آن دارند. [۱-۴]

آلژینات‌ها، [۱] دسته‌ی از مواد پلیمری هستند که از آن‌ها می‌توان برای اصلاح لزجت بتن به منظور اصلاح پایداری و پرتکردن خلل و فرج آن استفاده کرد. اساساً کاهش خلل و فرج در آب‌بندکردن بتن بسیار مؤثر است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آلژینات در خاک رس، مقاومت فشاری را از ۲٫۲۳ به ۳٫۷۷ افزایش می‌دهد. به عبارتی مقاومت رس ۶۹٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزودن فیبر به تنهایی در رس سبب افزایش ۳۷ درصدی مقاومت فشاری می‌شود، و اما افزودن هر دو این مواد در رس، مقاومت را بهتر می‌کند. در بررسی‌های انجام‌شده مشاهده شده است که افزودن آلژینات، بهبودی در مقاومت خمشی خاک رس ندارد، ولی ترکیب آلژینات و ۲۵٪ فیبر پشم سبب افزایش ۳۰ درصدی مقاومت فشاری می‌شود. [۱۱]

در مطالعه‌ی به بررسی استفاده از ژل آلژینات به همراه چسب Nopal و Welan در بتن خودمتراکم پرداخته و از آلژینات و چسب به‌عنوان ماده‌ی اصلی در تعیین لزجت بتن خودمتراکم استفاده شده است. نسبت آب به سیمان ۰٫۵٪ بوده و آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه‌ی جی، و جعبه‌ی ال صورت گرفته است. استفاده از ۰٫۵٪ آلژینات سبب ایجاد یک توده‌ی جمع‌شده می‌شود. بنابراین هر چه مقدار آلژینات افزایش یابد، انسداد بیشتر می‌شود. [۱۲]

در این نوشتار برای اولین بار از ترکیب هم‌زمان رزین سنگ مصنوعی به همراه پلیمر آلژینات استفاده و خصوصیات بتن تازه و سخت‌شده در زمان‌های مختلف

بتن از جمله مواد خلل و فرج‌داری است که منافذ دارد. این منافذ از واکنش شیمیایی بین سیمان و آب ایجاد می‌شوند. حملات شیمیایی از طریق منافذ بتن به داخل آن نفوذ می‌کند و موجب تخریب سازه می‌شود. شرایط آب و هوایی بسیار خورنده، نداشتن آگاهی کافی عوامل اجرایی، ضعف در مراحل ساخت، به‌کارگیری مصالح نامرغوب و بی‌کیفیت و... از عوامل مخرب بتن هستند. [۱] دوام سازه‌های بتنی در محیط اسیدی، در برابر خوردگی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و کانال‌های فاضلاب رو از نگرانی‌های مهم در این زمینه به‌شمار می‌روند.

بتن خودمتراکم نخستین بار در ژاپن تولید شده است. [۲] نتایج حاصل از تولید این نوع بتن از نظر فیزیکی و مکانیکی بسیار مناسب بوده است. این بتن سیالیت فوق‌العاده‌ی داشته و به همین دلیل به آن بتن خودمتراکم گفته شده است. در این نوع بتن بدون نیاز به انرژی خارجی (ارتعاش)، تراکم حاصل می‌شود، به‌طوری که پس از بتن‌ریزی به‌صورت یکپارچه باقی می‌ماند و به‌راحتی در بین آرماتورها حرکت می‌کند. از ویژگی‌های منحصر به‌فرد بتن خودمتراکم، پرداخت بهتر سطوح و قالب‌ریزی مطلوب‌تر است. کاهش نفوذپذیری به دلیل پرتکردن خلل و فرج توسط ذرات پودری و جدانشدگی ذرات از ویژگی‌های مهم بتن خودمتراکم است. [۳-۵] بتن خودمتراکم خواصی از جمله توانایی پرتندگی، توانایی عبور، مقاومت در مقابل جدانشدگی دارد. [۶] یکی از عوامل مؤثر در کیفیت و دوام بتن خودمتراکم افزودنی‌های استفاده‌شده در ساخت آن است. افزودنی‌هایی که به منظور ایجاد و یا بهبود خواص

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۳/۹/۲، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۲۵

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی.

پارامتر (درصد)	سیمان
SiO <sub>2</sub>	۲۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵٫۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳٫۹۵
CaO	۶۵
F.Cao	≤ ۱٫۳
CL	≤ ۰٫۳
MgO	≤ ۱٫۶۵
SO <sub>3</sub>	≤ ۲
L.O.I	≤ ۱٫۲
Total Alkali	≤ ۲

جدول ۲. ترکیب‌های موجود آلزینات.

ماده	درصد
سدیم آلزینات	۱۲
روغن پارافینی	۲
رنگ موتوآزو	۱
خاک دیاتومه	۶۱
کلسیم سولفات	۱۵
سدیم سولفات	۲
آلومینیم اکسید	۲
منیزیم اکسید	۱
آب	۴

یکی از ترکیبات اصلی آلزینات خاک دیاتومه است. بر طبق استاندارد آمریکا (ASTM C ۶۱۸)، دیاتومه یکی از پوزولان‌های مناسب است.<sup>[۱۴]</sup> علاوه بر دیاتومه، مواد دیگری در ترکیب آلزینات وجود دارند، که در جدول ۲ ارائه شده است.<sup>[۱۹]</sup>

## ۵.۲. سنگ‌دانه

در این مطالعه از سنگ‌دانه‌های آهکی شکسته شده استفاده شده است. مدول نرمی، درصد جذب آب و ارزش ماسه‌یی ماسه‌ی مصرفی ۲٫۲۸۴، ۸۷ و درصد جذب آب و بزرگترین دانه‌ی شن مصرفی ۰٫۵ و ۱۲٫۵ بوده است.

## ۳. ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش ۱۵ طرح اختلاط براساس آیین‌نامه‌ی ACI ساخته شده است، که در جدول ۳، درصد آلزینات و رزین آن‌ها ارائه شده است. در تمام طرح‌ها مقادیر شن، ماسه، سیمان، و آب ثابت و برابر ۶۰۰، ۱۱۰۰، ۴۱۰ و ۱۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰٫۳۶ بوده است.

در این طرح‌ها از ۰٫۵، ۱٫۵، ۱٫۵ و ۲ درصد آلزینات و ۲ و ۱٫۵ درصد رزین نسبت به وزن سیمان استفاده شده است. برای هر طرح، ۲۰ نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری در سنین مختلف ساخته شده است. ۱۰ طرح در محیط آب و ۱۰ طرح دیگر در سولفات منیزیم نگهداری شده است. در مجموع ۳۰۰ نمونه‌ی مکعبی ۱۰ × ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متری برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۵۶، ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه ساخته شده است.

بررسی شده است. نتایج پژوهش به خوبی بیانگر عملکرد مناسب ترکیب دو ماده‌ی مذکور است. نمونه‌های ساخته شده در دو محیط سولفات منیزیم و آب عمل‌آوری و مقاومت فشاری و خمشی، و جذب آب آن‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج پژوهش نشان داده است که استفاده از ۰٫۵ تا ۲ درصد آلزینات باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین بالاتر می‌شود. استفاده از ۰٫۵٪ آلزینات به همراه ۲٪ رزین به‌طور متوسط ۲۵٪ مقاومت فشاری را افزایش داده است. همچنین افزودن ۲٪ آلزینات به بتن حاوی ۲٪ رزین، سبب کاهش جذب آب آن شده است.

## ۲. مصالح و مواد مصرفی

مصالح مصرفی در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی شامل: سیمان، آب، پودر آلزینات، سنگ‌دانه، و رزین سنگ مصنوعی بوده است.

### ۱.۲. رزین سنگ مصنوعی

در این پژوهش از فوق‌روان‌کننده‌ی با نام رزین سنگ مصنوعی استفاده شده است. رزین سنگ مصنوعی براساس استاندارد ۱ part G-BS5۰۷۵ و B.D. ASTM C-۴۹۴ Type برای مصرف در بتن آماده، کارخانه‌های بتن پیش‌ساخته، تولیدکنندگان سنگ مصنوعی، سیستم‌های سمنت پلاست و تولید بتن‌های توانمند، که انتظار کسب مقاومت‌های زیاد و عملکرد خوب می‌رود، طراحی شده است. CLIBUILD D-۱۸ با فوق‌روان‌کننده‌های متداول در عمل تفاوت می‌کند. بدین ترتیب که پایه‌ی این محصول پلی‌کربوکسیلیک‌اتر است و زنجیره‌های جانبی ملکولی نیز دارد. خاصیت عالی پخش‌کنندگی سیمان توسط CLIBUILD D-۱۸، آن را تبدیل به افزودنی بتن یا رزین سمنت پلاست ایده‌آل برای صنایع بتن آماده، تولیدکنندگان سنگ مصنوعی، سیستم سمنت پلاست و بتن پیش‌ساخته کرده است. از جمله ویژگی‌های رزین سنگ مصنوعی عبارت‌اند از: شکل ظاهری آن مایع غلیظ، بی‌رنگ تا زرد کم‌رنگ، با وزن مخصوص ۱٫۰۶ تا ۱٫۱۰ گرم در سانتی‌مترمکعب در ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و عدد قلیایی آن ۶٫۴ است.<sup>[۱۷]</sup>

### ۲.۲. آب

آب مصرفی در این آزمایش آب شرب شهرکرد است، که PH آن ۷٫۶، مجموع سختی کل، سولفات، و کلر آن به ترتیب ۲۹، ۲۰۵ و ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر است.

### ۳.۲. سیمان

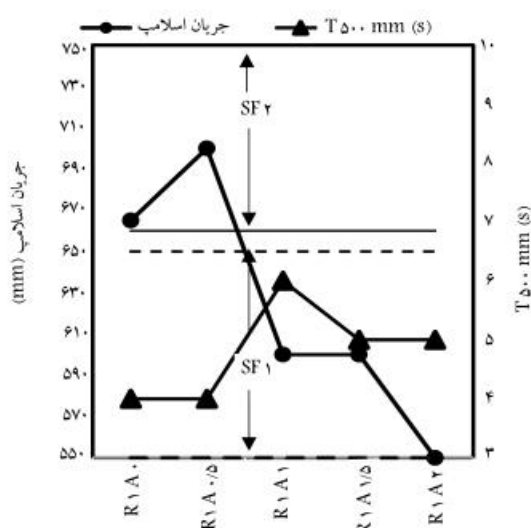
سیمان مصرفی در این آزمایش سیمان تیپ ۴۲۵-۱ شهرکرد است. خواص شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۴.۲. پلیمر

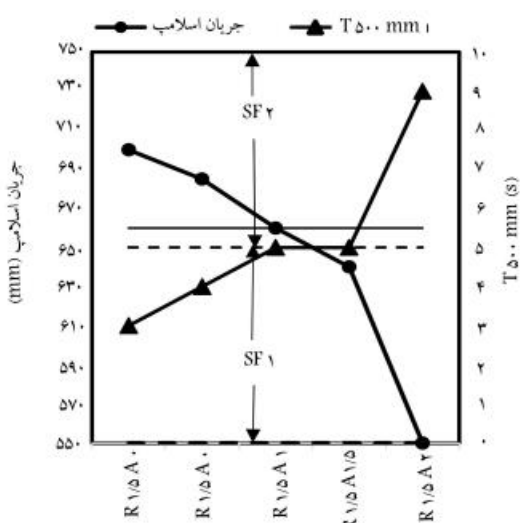
پلیمر مصرفی در این مطالعه، آلزینات است. برای نخستین بار شیمیدان اسکاتلندی در سال ۱۸۸۱، متوجه ماده‌ی لزجی شد که از یک نوع جلبک قهوه‌یی دریایی صنعتی فراوری شده بود.<sup>[۱۶]</sup> از آلزینات در دندان‌پزشکی، لاستیک‌سازی، رنگ‌سازی و تهیه‌ی قطعات و لوازم پلاستیکی مقاوم در برابر حرارت استفاده می‌شود. لزجت محلول آلزینات با افزایش درجه‌ی حرارت کاهش می‌یابد. آلزینات‌ها خواص ضخامت‌دهندگی، کشسانی، استحکام، پایداری و افزایش گران‌روی در برابر آب دارند.<sup>[۱۷]</sup>

لازم باشد، لزجت آن کم است. معمولاً از زمان‌های ۳ تا ۷ ثانیه برای کاربردهای مهندسی، و زمان‌های ۲ تا ۵ ثانیه برای نمونه‌سازی استفاده می‌شود. سه رده برای تعیین میزان روانی بتن خودمترکم وجود دارد، که در مرجعی در سال ۲۰۰۵ [۱۰] بیان شده‌اند. رده‌ی SF۱ که در آن پخش‌شدگی با قطر ۵۵<sup>o</sup> تا ۶۵<sup>o</sup> میلی‌متر است و برای بتن‌ریزی از طریق تزریق یا آرماتوربندی سبک کاربرد دارد. رده‌ی SF۲ که در آن قطر پخش‌شدگی بتن ۶۶<sup>o</sup> تا ۷۵<sup>o</sup> میلی‌متر است و برای کارهای معمولی کاربرد دارد. رده‌ی SF۳ نیز که در آن قطر پخش‌شدگی ۷۶<sup>o</sup> تا ۸۵<sup>o</sup> میلی‌متر است و برای بتن‌ریزی با آرماتوربندی مترکم کاربرد دارد. اگر مقدار میانگین دو قطر کمتر از ۵۵<sup>o</sup> میلی‌متر باشد، نشان‌دهنده‌ی تنش تسلیم زیاد و کارپذیری کم بتن و اگر از ۸۵<sup>o</sup> میلی‌متر بیشتر باشد، تنش تسلیم کم است و احتمال جداشدگی وجود دارد. در شکل‌های ۱ تا ۳، نتایج آزمایش جریان اسلامپ نشان داده شده است. محور قائم سمت چپ بیان‌گر قطر پخش‌شدگی و محور سمت راست زمان لازم برای رسیدن به قطر ۵۰<sup>o</sup> میلی‌متر را نشان می‌دهد.

در شکل ۱، نتایج جریان اسلامپ نمونه‌های فاز اول نشان داده شده است. در



شکل ۱. آزمایش جریان اسلامپ در فاز اول.



شکل ۲. آزمایش جریان اسلامپ در فاز دوم.

جدول ۳. طرح اختلاط بتن خودمترکم.

فاز	نام طرح	اژینات	
		رزین	درصد نسبت به سیمان
فاز اول	R1A0	۰	۱
	R1A0.5	۰.۵	۱
	R1A1	۱	۱
	R1A1.5	۱.۵	۱
	R1A2	۲	۱
فاز دوم	R1.5A0	۰	۱.۵
	R1.5A0.5	۰.۵	۱.۵
	R1.5A1	۱	۱.۵
	R1.5A1.5	۱.۵	۱.۵
	R1.5A2	۲	۱.۵
فاز سوم	R2A0	۰	۲
	R2A0.5	۰.۵	۲
	R2A1	۱	۲
	R2A1.5	۱.۵	۲
	R2A2	۲	۲

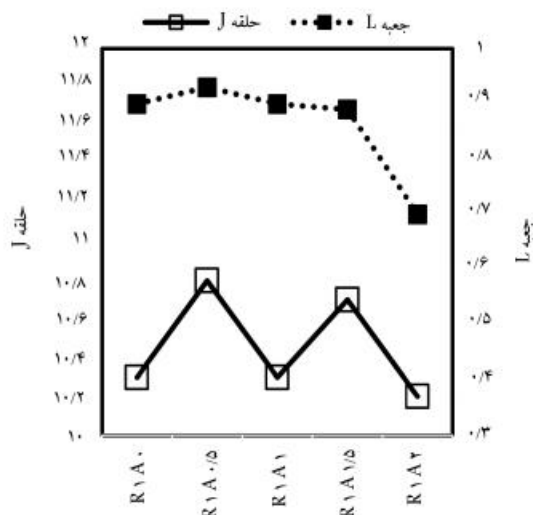
برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز از نمونه‌های منشوری  $16 \times 16 \times 4$  استفاده شده است، که در سن ۲۸ روزه، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در هر طرح از ۶ نمونه منشوری استفاده شده است، که در هر دو محیط نگهداری شده‌اند. در مجموع ۹۰ نمونه‌ی منشوری برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی ساخته شده است. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا شن و ماسه مخلوط و کلیه‌ی سنگ‌دانه‌ها به همراه مقداری از آب در میکسر مخلوط شده‌اند. سپس سیمان با اژینات مخلوط و به مخلوط اضافه شده‌است. در نهایت آب باقیمانده با رزین مخلوط و به مخلوط اضافه شده است. مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه در میکسر ۱۲۰ لیتری مخلوط شده است. پس از ساختن بتن آزمایش‌های روانی بتن، حلقه‌ی J، و جعبه‌ی I اندازه‌گیری و سپس ۲۰ نمونه‌ی مکعبی و ۶ نمونه‌ی منشوری ساخته شده است. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در محلول سولفات منیزیم و آب نگهداری شده‌اند. پس از رسیدن زمان آزمایش، نمونه‌ها از آب و سولفات خارج و آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی و نیز جذب آب بر روی آن‌ها انجام شده است.

#### ۴. آزمایش‌های بتن تازه

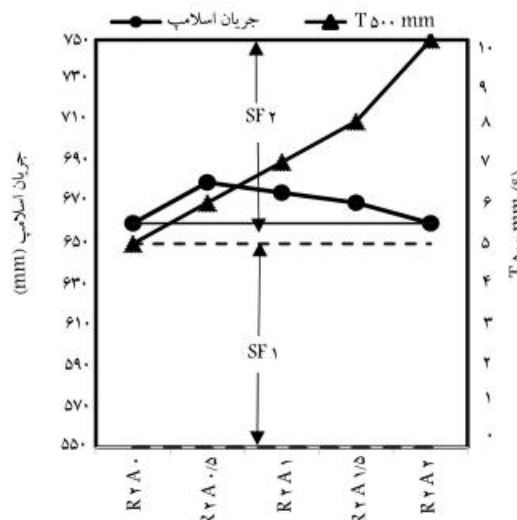
در این پژوهش بر روی بتن خودمترکم تازه، آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه‌ی J، و جعبه‌ی I انجام شده است.

##### ۴.۱. آزمایش جریان اسلامپ

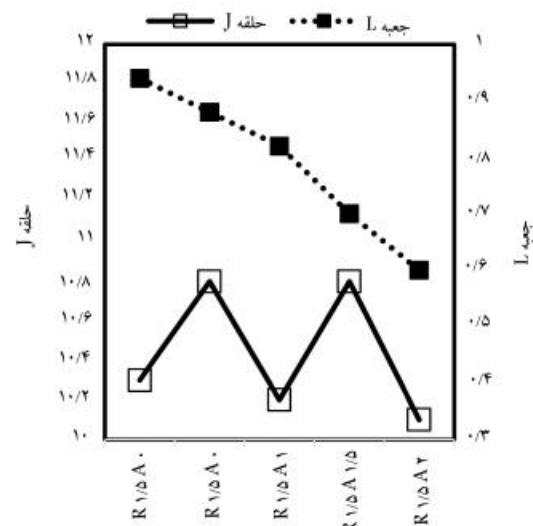
از آزمایش جریان اسلامپ برای سنجش میزان تغییر شکل‌پذیری بتن تحت اثر وزن خود و میزان غلبه بر اصطکاک داخلی استفاده می‌شود. در این آزمایش دو پارامتر زمان رسیدن بتن به شعاع ۵۰ میلی‌متر و همچنین میانگین قطر پخش‌شدگی آن پس از توقف کامل اندازه‌گیری می‌شود. اگر برای رسیدن به قطر ۵۰ میلی‌متر، بیش از ۵ ثانیه زمان لازم باشد، لزجت بتن زیاد است و اگر کمتر از ۱ ثانیه زمان



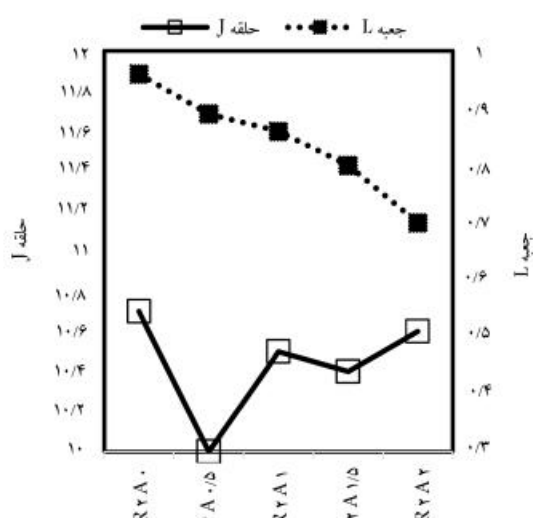
شکل ۴. آزمایش حلقه‌ی J و جعبه‌ی L فاز اول.



شکل ۳. آزمایش جریان اسلامپ در فاز سوم.



شکل ۵. آزمایش حلقه‌ی J و جعبه‌ی L فاز دوم.



شکل ۶. آزمایش حلقه‌ی J و جعبه‌ی L فاز سوم.

این فاز با افزایش آلزینات، کارپذیری و قطر پخش شدگی کمتر شده است. نمونه‌های در شکل ۲، نتایج نمونه‌های فاز دوم نشان داده شده است. نمونه‌ی R1A1/5، R1A1 و R1A2 در رده‌ی SF1 و بقیه در رده‌ی SF2 قرار دارند. در این فاز نسبت به نمونه‌ی R1A0 در فاز اول کارپذیری بیشتری دارد. نمونه‌های در شکل ۳، نتایج فاز سوم نشان داده شده است. همه‌ی نمونه‌های فاز سوم کارپذیری زیاد و در رده‌ی SF2 قرار دارند. در تمامی فازها، نمونه‌های با ۰/۵٪ آلزینات، کارپذیری بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

در شکل‌های ۱ تا ۳، زمان لازم برای پخش شدگی به قطر ۵۰ میلی‌متر نیز نشان داده شده است. افزایش زمان مورد نیاز برای رسیدن به پخش شدگی ۵۰ میلی‌متر نشان‌دهنده‌ی افزایش لزجت و حالت خمیری بتن است.

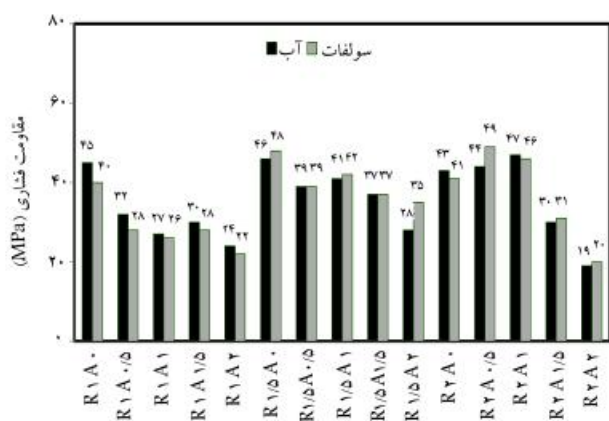
#### ۲.۴. آزمایش حلقه‌ی J

آزمایش دوم که بر روی بتن تازه انجام شده است، آزمایش حلقه‌ی J است. آزمایش حلقه‌ی J، نشان‌دهنده‌ی امکان عبور بتن از بین موانع، به خصوص آرماتورهای متراکم موجود در قالب است. در این آزمایش اختلاف ارتفاع بتن داخل و خارج حلقه‌ی J در ۴ نقطه اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به دست آمده است. هر چه اختلاف ارتفاع بتن موجود در داخل و خارج از آرماتورها بیشتر باشد، توانایی عبور بتن از موانع کمتر است. بیشینه‌ی اختلاف ارتفاع مجاز برای بتن خودتراکم در این آزمایش ۱۰ میلی‌متر است. [۱۰] اگر مقادیر به دست آمده بیشتر از ۱۰ میلی‌متر باشد، احتمال بروز پدیده‌ی انسداد افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۴ تا ۶ نتایج آزمایش حلقه‌ی J و جعبه‌ی L نشان داده شده است. اعداد روی محور قائم سمت چپ بیان‌گر نتایج حلقه‌ی J و سمت راست نشان‌دهنده‌ی نتایج جعبه‌ی L است.

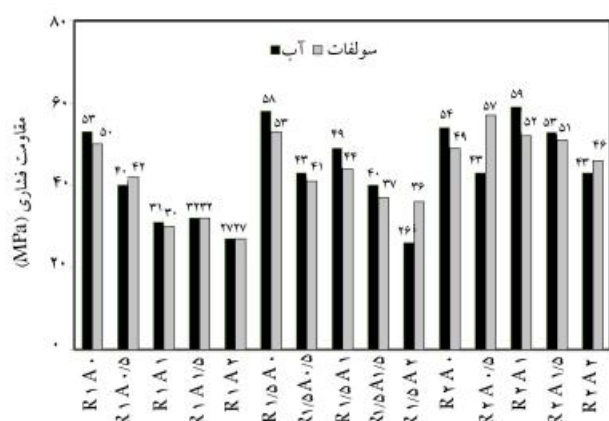
همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، در فاز اول دو نمونه‌ی R1A1/5، R1A0 و R1A2 دارای انسداد زیاد هستند.

دو نمونه‌ی R1/5A1/5، R1/5A1/5 و R1/5A1/5 فاز دوم که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند، دارای انسداد زیاد هستند.

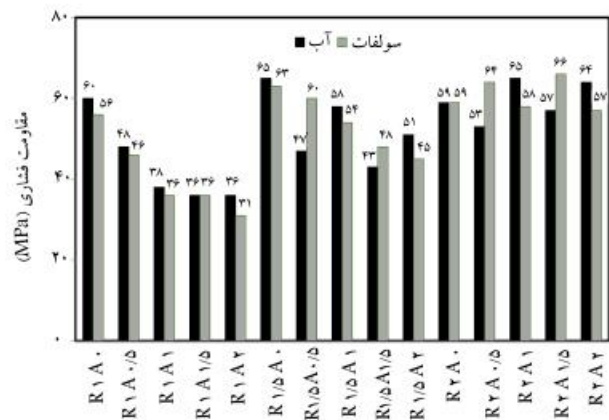
شکل ۶ مربوط به فاز سوم است. نمونه‌ی R2A0/5 که دارای ۲٪ رزین است، نسبت به نمونه‌هایی که دارای ۱ و ۱/۵ درصد رزین هستند، نتایج بهتری را داده‌اند.



شکل ۷. نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روزه.



شکل ۸. نتایج مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه.



شکل ۹. نتایج مقاومت فشاری در سن ۵۶ روزه.

عمل‌آوری‌شده در محیط آب ۶۸٪ افزایش مقاومت نشان داده است. همچنین نمونه‌ی R۱/۵A۲ که در سن ۷ روزه بیشترین مقاومت را داشته است، در سن ۲۸ روزه، ۸٪ افزایش مقاومت نسبت به سن ۷ روزه داشته است. در شکل ۹، مقاومت نمونه‌ها در سن ۵۶ روزه نشان داده شده است. نمونه‌ی R۱A۱/۵ در فاز اول، دو نمونه‌ی R۱/۵A۰/۵ و R۱/۵A۱/۵ در فاز دوم و نمونه‌های R۲A۰/۵ و R۲A۱/۵ در فاز سوم افزایش مقاومت و بقیه‌ی نمونه‌ها کاهش مقاومت داشته‌اند. همچنین نمونه‌ی R۲A۱ در محیط آب و نمونه‌ی R۲A۱/۵ در محیط سولفات بیشترین مقاومت را داشته‌اند. نمونه‌ی

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای نمونه با ۰/۵٪ آلژینات که در فاز اول و دوم دارای انسداد هستند، با افزایش رزین به ۲٪ این مشکل برطرف شده است. این در حالی است که در سایر نمونه‌های فاز اول و دوم که در آن‌ها انسداد وجود نداشته است، با افزایش رزین در فاز سوم انسداد رخ داده است.

### ۳.۴. آزمایش جعبه‌ی L

آزمایش سومی که در این پژوهش از آن استفاده شده است، آزمایش جعبه‌ی L است.<sup>[۱۰]</sup> این آزمایش قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم را نشان می‌دهد. (h۲/h۱) نشان‌دهنده‌ی اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای مسیر و نیز بیان‌گر میزان عبور بتن است. هر چه نسبت (h۲/h۱) به ۱ نزدیک‌تر باشد، قابلیت پرکنندگی بتن بهتر و تنشی تسلیم آن کمتر است. نتایج آزمایش جعبه‌ی L در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش آلژینات، انسداد بیشتر شده است. انسداد در طرح‌های R۱A۲، R۱/۵A۱/۵، R۱/۵A۲، R۱/۵A۱/۵ و R۲A۱/۵ به دلیل افزایش آلژینات بیشتر شده است.

### ۵. آزمایش بتن سخت

در این پژوهش بر روی بتن سخت‌شده، آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی، وزن مخصوص، و جذب آب انجام شده است.

### ۱.۵. آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌های بتنی در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه توسط جک استاندارد ۲۰۰۰ KN مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه مقاومت نمونه‌ها در محیط سولفات و آب متفاوت بوده است، درصد اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌ها در دو محیط مذکور با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

$$(1) \quad \text{درصد تغییر مقاومت} = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

که در آن، A میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ی عمل‌آوری‌شده در آب، و B میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ی عمل‌آوری‌شده در سولفات منیزیم است. نمونه‌ی R۱A۰ در فاز اول به طور میانگین در تمامی سنین تقریباً ۶٪، نمونه‌ی R۱/۵A۰ در فاز دوم ۷/۵٪ و نمونه‌ی R۲A۰ در فاز سوم تقریباً ۷/۵٪ در محیط سولفات نسبت به آب کاهش مقاومت داشته است. از بین نمونه‌های حاوی رزین، نمونه‌ی R۱/۵A۰ کمترین مقدار کاهش مقاومت را داشته است.

در شکل ۷، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روزه نشان داده شده است. بیشترین درصد افزایش مقاومت ۷ روزه مربوط به نمونه‌ی R۱/۵A۲ با ۲۵٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی عمل‌آوری‌شده در محیط آب است. نمونه‌ی R۲A۱ در محیط آب و نمونه‌ی R۲A۰/۵ در محیط سولفات، بیشترین مقاومت فشاری نسبت به سایر نمونه‌ها را دارند.

در شکل ۸، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نشان داده شده است. به جزء نمونه‌های R۱A۰/۵، R۱A۱/۵ و R۱A۲ در فاز اول، نمونه‌ی R۱/۵A۲ در فاز دوم، و نمونه‌های R۲A۰/۵ و R۲A۲ در فاز سوم، در بقیه‌ی نمونه‌ها کاهش مقاومت در محیط سولفات مشاهده شده است. در محیط آب، نمونه‌ی R۲A۱ و در محیط سولفات نمونه‌ی R۲A۰/۵، مقاومت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. نمونه‌ی R۲A۰/۵ که در محیط سولفات عمل‌آوری شده است، نسبت به نمونه‌ی

R۱/۵A۰ در فاز دوم، ۲۸٪ افزایش مقاومت در محیط سولفات نسبت به آب داشته است.

در شکل ۱۰، مقاومت نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه نشان داده شده است. در این سن، نمونه‌های R۱A۰/۵ در فاز اول، نمونه‌های R۱/۵A۲ و R۱/۵A۰ در فاز دوم، و نمونه‌های R۲A۰/۵ و R۲A۱/۵ در فاز سوم در محیط سولفات افزایش مقاومت نشان داده‌اند. در این سن، نمونه‌های R۲A۱ در محیط آب و نمونه‌های R۲A۱/۵ در محیط سولفات بیشترین مقاومت را نشان داده است. نمونه‌های R۱/۵A۲ در فاز دوم ۱۹٪ افزایش مقاومت در محیط سولفات نسبت به محیط آب را کسب کرده است.

در کل می‌توان گفت که نمونه‌های R۲A۰/۵ در تمامی سنین افزایش مقاومت داشته است، به طوری که میانگین درصد افزایش مقاومت آن در تمام سنین ۲۵٪ بوده است. در فاز سوم با ترکیب ۵/۵٪ آلژینات و ۲٪ رزین، کاهش مقاومت نمونه‌ی که فقط شامل ۲٪ رزین بوده، جبران شده است. این موضوع بیانگر عملکرد مناسب ترکیب این دو ماده در بتن خودمترکم است.

### ۲.۵. آزمایش جذب آب

جهت انجام آزمایش جذب آب از استاندارد ASTM C ۶۴۲ استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری و سپس در هوای خشک سرد و دوباره وزن شده‌اند. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۲ ساعت در آب قرار داده شده و سپس از آب خارج و به صورت اشباع با سطح خشک وزن شده‌اند. درصد جذب نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است:

$$(2) \quad 100 \times [(C - D) / D] = \text{درصد جذب آب}$$

که در آن، C وزن اشباع با سطح خشک، و D وزن خشک نمونه‌هاست. میزان جذب آب می‌تواند پارامتری برای اندازه‌گیری دوام بتن باشد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های فاز سوم با افزایش مقدار آلژینات، مقدار جذب آب کاهش یافته

است، به طوری که نمونه‌ی R۲A۲ دارای جذب آب ۱/۹٪ بوده و کمترین مقدار جذب آب را در بین نمونه‌ها داشته است. همچنین نمونه‌ی R۲A۰/۵ بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌ها داشته است. جذب آب کمتری نسبت به نمونه‌ی بدون آلژینات (یعنی R۲A۰) داشته است.

### ۳.۵. آزمایش مقاومت خمشی

جهت انجام آزمایش مقاومت خمشی، از بارگذاری در وسط تیر، مطابق استاندارد ASTM C ۲۹۳ استفاده شده است.

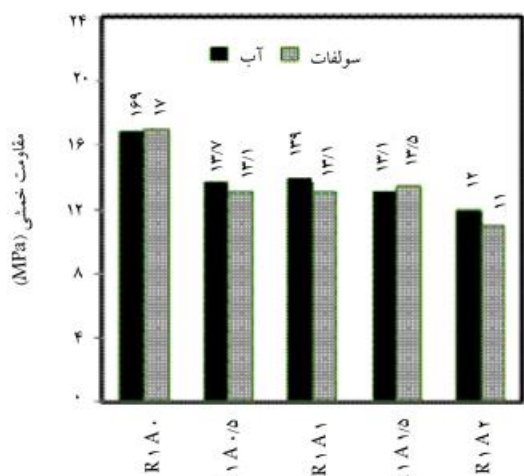
شکل ۱۱، مقاومت خمشی نمونه‌های فاز اول در سن ۲۸ روزه در دو محیط آب و سولفات را نشان می‌دهد. نمونه‌های R۱A۰/۵ و R۱A۰ در محیط سولفات به ترتیب ۳ و ۸ درصد افزایش مقاومت و نمونه‌های R۱A۱، R۱A۲، و R۱A۰/۵ به ترتیب ۳، ۷ و ۸ درصد نسبت به محیط آب کاهش مقاومت را نشان داده‌اند.

شکل ۱۲، مقاومت خمشی نمونه‌های فاز دوم را نشان می‌دهد. تمامی نمونه‌ها در فاز دوم نسبت به محیط آب افزایش مقاومت داشته‌اند. بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌ی شاهد است، که ۲۲٪ است. همچنین نمونه‌ی R۱/۵A۲ نسبت به نمونه‌ی محیط آب ۶۷٪ افزایش داشته است، که این افزایش بسیار قابل توجه است.

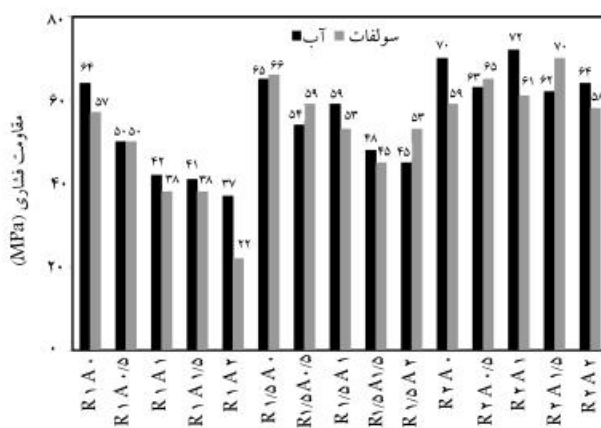
شکل ۱۳، مقاومت خمشی نمونه‌های فاز سوم را نشان می‌دهد. نمونه‌ی R۲A۰ در محیط سولفات ۴٪ افزایش داشته است. با افزودن آلژینات در فاز سوم، کاهش مقاومت خمشی مشاهده شده است.

### ۴.۵. ملاحظات اقتصادی

مزایای زیست‌محیطی استفاده از آلژینات به‌عنوان افزودنی در بتن به این صورت است که با افزودن این ماده، خواص رئولوژیکی بتن بهبود می‌یابد و از طرفی با افزودن یک ماده‌ی طبیعی به بتن در سازه‌های آبی، که اهمیت سلامت آب شرب مهم است، را دچار مخاطره نمی‌سازد. اگرچه تولید این ماده در ایران در حال حاضر



شکل ۱۱. نتایج مقاومت خمشی فاز اول.



شکل ۱۰. نتایج مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه.

جدول ۴. نتایج درصد جذب آب.

نام طرح	R۱A۰	R۱A۰/۵	R۱A۱	R۱A۱/۵	R۱A۲	R۱/۵A۰	R۱/۵A۰/۵	R۱/۵A۱	R۱/۵A۱/۵	R۱/۵A۲	R۲A۰	R۲A۰/۵	R۲A۱	R۲A۱/۵	R۲A۲
جذب آب	۰	۵	۴/۸	۴/۶	۲/۹	۳/۳	۳/۶	۳/۱	۳/۴	۲/۸	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۱/۹

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، در ابتدا خواص رزین سنگ مصنوعی و آلژینات بیان شده و سپس نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف رزین و آلژینات ساخته شده و در دو محیط سولفات و محیط معمولی جهت آزمایش‌های بتن سخت شده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، که نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور به این شرح است:

۱. یکی از ترکیبات اصلی آلژینات، خاک دیاتومه است. دیاتومه یکی از پوزولان‌های مناسب است، که مانند فیبر عمل می‌کند. با افزایش مقدار آلژینات، کارپذیری بتن کاهش یافته است، که به دلیل وجود خاک دیاتومه در آلژینات بوده است. در نمونه‌های حاوی ۲٪ آلژینات، کاهش کارپذیری شده است.

۲. هر چه مقدار آلژینات افزایش می‌یابد، کارپذیری و پخش‌شدگی کمتر می‌شود. کاهش روانی به دلیل وجود خاصیت پُرکنندگی آلژینات است. در درصد‌های بالاتر رزین، این خاصیت کاهش روانی جبران می‌شود و بتن روانی زیادی پیدا می‌کند.

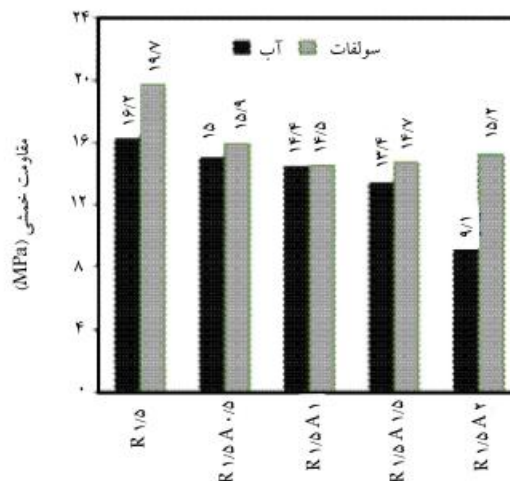
۳. آفت مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با ۱/۵٪ رزین در محیط سولفات نسبت به محیط آب بسیار کمتر است. هر چه مقادیر آلژینات و رزین افزایش می‌یابد، اثرگذاری سولفات کمتر می‌شود و درصد ناچیزی آفت مشاهده می‌شود. مقاومت رزین در مقادیر بالاتر اثرگذارتر است و با ترکیب با آلژینات سبب افزایش و یا کاهش ناچیز مقاومت می‌شود. عملکرد بالای رزین در مقادیر بالاتر است. در آزمایش دوام مقاومت فشاری در محیط سولفات، نمونه‌ها در سنین اولیه افزایش مقاومت دارند، ولی در درازمدت مقاومت‌شان به دلیل تأثیر سولفات کاهش می‌یابد.

۴. جذب آب نمونه‌ها به دلیل خاصیت پُرکنندگی و همچنین وجود پوزولان دیاتومه سبب کاهش آن می‌شود. در مقادیر بالای رزین، آلژینات وارد عمل می‌شود و روان‌کننده سبب پراکنده شدن ذرات در داخل بتن و نیز به دست آمدن یک جسم توپُر و پُرسدن خلل و فرج می‌شود، که تمامی عوامل مذکور سبب کاهش جذب آب در درصد‌های بالاتر رزین و آلژینات می‌شود.

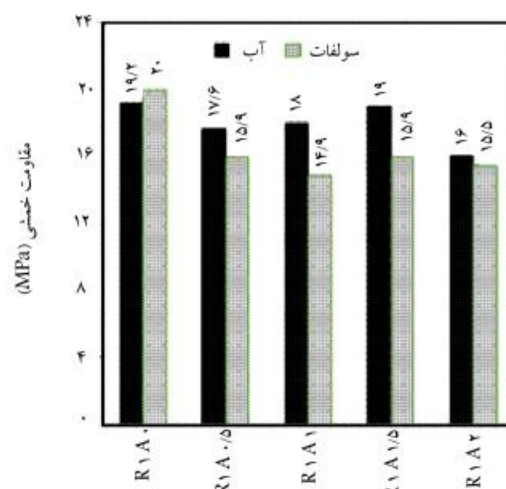
۵. عملکرد آلژینات و رزین در برابر مقاومت خمشی بسیار بالاست، به طوری که نمونه‌ی R۲A۰/۵ به طور متوسط ۲۵/۵٪ افزایش مقاومت در محیط سولفات داشته است. این نمونه در محیط سولفاتی، ۱۸٪ افزایش مقاومت فشاری و ۶۷٪ مقاومت خمشی داشته است. درصد بهینه‌ی رزین در مقاومت خمشی ۱/۵٪ است. تمامی نمونه‌های ساخته شده با ۱/۵٪ رزین، افزایش مقاومت خمشی دارند.

## منابع (References)

1. Rozière, E., Loukili, A., El Hachem, R. and Grondin, F. "Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks", *J. Cem. Con. Res.*, **39**(12), pp. 1188-1198 (2009).
2. Okamura, H. and Ouchi, M. "Self-compacting concrete", *J. Advan. Concr. Tech.*, **1**(1), pp. 5-15 (2003).



شکل ۱۲. نتایج مقاومت خمشی فاز دوم.



شکل ۱۳. نتایج مقاومت خمشی فاز سوم.

فقط برای امور پزشکی است و قیمت نسبتاً بالایی دارد، ولی در صورت استفاده در یک سازه می‌توان برخی از عناصر این ماده را تغییر داد تا یک صرفه‌ی اقتصادی پیدا کند. از طرفی اصلاح خصوصیات همچون لزجت، روانی، و جذب آب پایین سبب می‌شود که در صورت استفاده در یک سازه از هزینه‌های اولیه کاست و با توجه به مقاومت بالا در محیط سولفات از هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه کاسته می‌شود. لذا تولید انبوه این ماده با هزینه‌ی به مراتب کمتر، باعث کاهش هزینه‌ها در پروژه‌های بزرگ‌تر می‌شود.

3. Feys, D., Schutter, G.D., Verhoeven, R. and Khayat, K.H. "Similarities and differences of pumping conventional and self-compacting concrete", *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete RILEM Bookseries*, **1**, pp. 153-162 (2010)
4. Feys, D. "Interactions between rheological properties and pumping of self-compacting concrete", Ph.D. Thesis, Ghent University, Ghent (2009).

5. Beitzel, H. and Beitzel, M. "Pump application for self-compacting concrete under extreme conditions", *Proc. of the 3rd North-American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago (2008).
6. Bartos, P.J.M. and Grauers M. "Self-compacting concrete", *Concr.*, **33**, pp. 9-13 (1999).
7. Wallevik, O.H. "Rheology- a scientific approach to develop self-compacting concrete", *Proc. of the 3rd Int. Symp. On Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, pp. 23-31 (2003).
8. Poppe, A.M. and Schutter, G.D. "Cement hydration in the presence of high filler contents", *Cem. Concr. Res.*, **35**(12), pp. 2290-2299 (2005).
9. Assie, S., Escadeillas, G. and Waller, V. "Estimates of self-compacting concrete potential durability", *J. Cons. Build. Mater.*, **21**(10), pp. 1909-1917 (2007).
10. Xie, Y., Liu, B., Yin, J. and Zhou, SH. "Optimum mix parameters of high-strength self-compacting Concrete with ultrapulverized fly ash", *Cem. Concr. Res.*, **32**(2002), pp. 477-480 (2001).
11. León-Martinez, F.M., de J. Cano-Barrita, P.F., Lagunez-Rivera, L. and Medina-Torres, L. "Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials", *Constr. Build. Mater.*, **53**, pp. 190-202 (2014).
12. Galán, M.C., Rivera, G.C. and Petric, J. "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre", *Construction and building Materials*, **24**(8), pp. 1462-1468 (2010).
13. León-Martinez, F.M., Cano-Barrita, J., Lagunez-Rivera, L. and Medina-Torres, L. "Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials", *Construction and Building Materials*, **53**, pp. 190-202 (2014).
14. Bonyan Kala Chemie CO. Manufacturer of Alkyd Resins, Unsaturated Polyester Resins a Dryers, Website Accessed <http://www.bonyankala.com> (2014).
15. Stanford, E.C.C. "New substance obtained from some of the commoner species of marine algae", *Algin Chem News*, **47**, pp. 257-254 (1983).
16. Haug, A., Larsen, B. and Smidsrod, O. "Alkaline degradation of alginates", *Acta Chem. Scand*, **212**, pp. 2859-2870 (1967).
17. Pathak, T.S., Kim, J.S., Lee, S.J., Baek, D.I. and Paeng, K.L. "Preparation of alginic acid and metal alginate from algae and their comparative study", *Poly. Env.*, **16**(3), pp. 198-204 (2008).
18. ASTM C 618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, Standards & Publications (2014).
19. Steginsky, C.A., Beale, J.M. and Floss, H.G. "Structural determination of alginic acid and the effect of calcium binding as determined by high-field NMR", *Carb. Res.*, **225**(1), pp. 11-20 (1992).