مجلهٔ تحقیقات بتن
زمستان۸۹ ، سال سوم، شمارهٔ۲
ص۵۷-۴۹
تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲ ۵
تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۳۰

تأثیر روان‌کننده‌ها بر کاهش عیار سیمان و کیفیت بتن

هانی هنرمند
عضو هیأت مدیره شرکت شیمی ساختمان
موسی کلهری
مدیر فنی بخش افزودنی‌های بتن شرکت شیمی ساختمان
محسن تدین
عضو هیأت علمی دانشگاه بوعلی سینای همدان
tadayonmoh@yahoo.com

چکیده

حفظ محیط زیست و نیاز به مصرف متعادل منابع طبیعی به‌ویژه سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی و گازهای گلخانه‌ای، ایجاب می‌کند که از مصرف سیمان به‌ویژه کلینکر سیمان بکاهیم. بنابراین در ساخت بتن‌ها و ملات‌ها باید کاهش مصرف سیمان را تا حد امکان مدنظر قرار داد بدون این‌که به حجم ساخت‌وسازها در کشور لطمه‌ای وارد گردد.

در این پژوهش، در نسبت آب به سیمان ثابت (w/c) اقدام به کاهش عیار سیمان شده است تا در یک نسبت آب به سیمان ثابت اثرات کاهش عیار سیمان بر روی برخی مشخصات بتن تازه و سخت‌شده مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه با کاهش نسبت آب به سیمان (در چهار نسبت متفاوت) مجدداً عیار سیمان کاهش داده شده تا اثرات این کاهش در نسبت‌های پایین آب به سیمان نیز در بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است با کاهش خمیر سیمان (کاهش عیار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان) کارایی و تراکم پذیری بتن به شدت کاهش یافته که برای جبران این نقیصه از روان‌کننده‌ها و فوق روان‌کننده‌های مختلف استفاده شده‌است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن تازه و سخت شده می‌توان نتیجه گرفت که کاهش عیار سیمان (در محدودهٔ ٤٥٠ تا ٣٤٠ کیلو گرم در متر مکعب) در نسبت آب به سیمان ثابت ، سبب بهبود خواص مقاومتی و دوامی بتن می‌گردد. از طرفی دیگر می‌توان با کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده به منظور ایجاد روانی و کارایی مطلوب، به بتن‌هایی با دوام و مقاومت بسیار بالا دست یافت .

واژه‌های کلیدی: **بتن، عیار سیمان، فوق‌روان‌کننده ، جذب آب ، عمق نفوذ آب.**

۱- مقدمه

تولید سیمان یکی از صنایع آلایندهٔ محیط زیست محسوب می‌شود به نحوی که به ازای تولید هر تن کیلینکر سیمان تقریبا یک تن گاز منواکسید کربن وارد جو می‌شود. به همین علت تولید بتن مقاوم و با دوام با سیمان کمتر و به جای آن استفاده از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در حفظ محیط زیست داشته باشد.

بتن حاوی سنگدانه و خمیر سیمان است و خواص خمیر سیمان به شدت تابع نسبت آب به سیمان می‌باشد که در واقع میزان منافذ و حفرات موجود در خمیر سیمان را کنترل می‌کند. در یک بتن، نفوذپذیری تابع کیفیت خمیر سیمان و تا حدودی کیفیت ناحیه انتقالی می‌باشد. ازآن جا که معمولاً سنگدانه باعث نشت مواد مختلف از درون بتن نمی‌شود، کیفیت خمیر سیمان و حجم آن مستقیماً بر نشت‌پذیری اثر می‌گذارد. حفرات و منافذ مورد نظر، حفرات موئینه هستند و شامل حفرات هوای ناشی از عدم تراکم کافی نمی‌باشد. ضمناً حفرات ژلی به علت نفوذناپذیری مدنظر نیستند.

مقاومت بتن، مدول ارتجاعی، جذب آب، مقاومت الکتریکی و سایر ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و دوام بتن به شدت تابع مقدار این منافذ و توزیع اندازه آنها هستند.به عنوان مثال در سه بتن در نسبت آب به سیمان ثابت و سه عیار مختلف ،کیفیت خمیر سیمان (در صد تخلخل در خمیر سیمان) یکسان است، زیرا نسبت آب به سیمان ثابت است. اگر حجم حفرات موینه در خمیر سیمان را ۲۰ در صد فرض کنیم، میزان این حفرات در بتنی که دارای عیار سیمان بالاتری است، بیشتر خواهد بود. از طرفی با کم شدن شدید خمیر سیمان ممکن است تداخل ناحیه انتقالی پیش آید و هم چنین در صورت عدم تداخل این ناحیه‌ها، سهم این ناحیه در فضای بین سنگدانه‌ها زیاد می‌شود و کیفیت بتن دچار افت محسوس می‌گردد.

۲- مطالعهٔ سوابق تحقیقات انجام شده بر روی تأثیر عیار سیمان بر کیفیت بتن

Singh و همکاران در سال ۱۹۵۸ نشان داد در نسبت‌های آب به سیمان مختلف با افزایش نسبت سنگدانه به سیمان مقاومت فشاری بتن بهبود می‌یابد[۱].

Kolias و همکاران در سال ۲۰۰۵ تأثیر حجم خمیر سیمان و مقدار آب را بر مقاومت فشاری بتن در چهار نسبت آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ و ۰/۶ و مقادیر آب ۱۴۰ و ۱۸۰ و ۲۲۰ و ۲۶۰ لیتر بر متر مکعب نشان داده‌اند که البته برای ایجاد روانی مناسب در برخی مخلوط‌ها از فوق‌روان‌کنندهٔ نفتالینی و یا پلی کربوکسیلاتی استفاده کرده‌اند[۲].

Yigiter و همکاران در سال ۲۰۰۶ با دو نوع سیمان و سه نسبت آب به سیمان (۰/۴۳ و ۰/۵۳ و ۰/۶۳) و سه عیار سیمان (۲۵۰ و ۳۵۰ و ۴۵۰) بتن‌هایی ساختند و مقاومت فشاری و کششی را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که کاهش عیار سیمان از ۳۵۰ به ۲۵۰ باعث کاهش مقاومت شده است. هم چنین افزایش از ۳۵۰ به ۴۵۰ نیز کاهش مقاومت مشاهده می‌شود[۳].

Desh Pand و همکاران در سال ۲۰۰۷ تأثیر عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و نوع سیمان را بر جمع‌شدگی آزاد مورد بررسی قرار دادند. سه نسبت آب به سیمان و مقادیر سنگدانه ۶۰ و ۷۰ و ۸۰ درصد با دو نوع سیمان I و II مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد افزایش عیار سیمان به افزایش جمع‌شدگی منجر شده است[۴].

در کتاب خواص بتن نویل ترجمه دکتر فامیلی گفته شده است که خزش عمدتاً ناشی از خمیر سیمان هیدراته است و با افزایش خمیر سیمان به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این موضوع در بتن‌های پیش تنیده و قطعات بتن مسلح اهمیت دارد[۵].

سلیمانی راد در سال ۱۳۸۷ تأثیر عیار سیمان بر مقاومت فشاری را در مورد بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ و ۰/۵ در عیارهای ۳۰۰ و ۳۵۰ و ۴۰۰ و ۴۵۰ در سه سن مختلف نشان داده است[۶].

قهرمانی در سال ۱۳۸۵ تأثیر عیار سیمان بر مقاومت فشاری و کششی بتن خودتراکم را با عیارهای ۴۵۰ و ۵۰۰ و ۵۵۰ و با یک نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بررسی کرده است[۷].

برای کسب اطلاعات بیشتر از نتایج آزمایش‌ها و پژوهش‌های مذکور به مراجع مربوط مراجعه شود.

۳- مصالح مصرفی و برنامه آزمایشگاهی

جهت بررسی تأثیر کاهش عیار سیمان برکیفیت بتن، ابتدا میبایستی یک طرح اختلاط به عنوان شاهد در نظر گرفته شود سپس با کاهش عیار سیمان نسبت به آن و جایگزین نمودن افزودنی مناسب، بتن‌های ساخته شده مورد سنجش و مقایسه قرار گرفته شود. این بخش شامل توضیح تفضیلی مراحل انتخاب مصالح مصرفی، طراحی و ساخت بتن‌های آزمایشی شاهد می‌باشد.

۳-۱- مصالح ساخت بتن:

۳-۱-۱- مصالح سنگی:

در آزمایش‌های انجام شده، مصالح سنگی از معادن اطراف تهران تهیه گردید. برای این منظور از چندین معدن نمونه‌گیری انجام گردید و پس از آزمایش دانه‌بندی و تعیین درصد آلودگی مصالح سنگی، دو معدن به عنوان منبع تامین مصالح انتخاب شد.

۳-۱-۱- ۱- شن درشت و شن ریز: این مصالح طبق استاندارد ASTM C 136 دانه‌بندی گردید . میزان چگالی و درصد جذب آب مصالح درشت‌دانه طبق استاندارد ASTM C 127 محاسبه شد.

۳-۱-۱-۲- مخلوط شن درشت و ریز: طبق اطلاعات به‌دست آمده از دانه‌بندی مصالح سنگی درشت‌دانه به‌طور جداگانه (شن ریز و درشت) نهایتاً به منظور قرارگیری منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه در محدودهٔ پیشنهادی استاندارد ، ۸۶ درصد شن درشت با ۱۴ درصد شن ریز مخلوط گردید.

۳-۱-۱-۳- ماسه: این مصالح نیز طبق استاندارد ASTM C 136 دانه‌بندی گردید . میزان چگالی درصد جذب آب مصالح ریزدانه طبق استاندارد ASTM C 128 محاسبه شد.

نتیجه آزمایش‌های مذکور در جدول شمارهٔ ۱ و نمودارهای شمارهٔ ۱و۲ آورده شده است.

۳-۱-۲- سیمان: سیمان مصرفی در کلیهٔ آزمایش‌ها، سیمان تیپ دو آبیک بوده که همگی در یک زمان و از یک محموله نمونه‌گیری و جهت انجام طرح‌های آزمایشی انبار گردید.

۳-۱-۳- آب: آب مصرفی جهت ساخت بتن، آب شرب بوده است .

۳-۱-٤- افزودنی‌ها : در ساخت طرح‌های آزمایشی صرفاً افزودنی‌های روان‌کننده و فوق‌روان‌کننده به صورت نرمال (بدون تأثیر در گیرش سیمان) از شرکت شیمی ساختمان، به کار رفته است .

۳ -۲- طرح اختلاط

مبانی طرح اختلاط بتن در آزمایش‌ها، روش ملی طرح مخلوط بتن، منتشر شده توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن می‌باشد. این روش دارای پنج گام بوده که در نهایت، منتهی به محاسبه طرح اختلاط اولیه میشود [۸] .

به منظور دستیابی به مقاومت مشخصه $300\ kg/cm^2$ و همچنین روانی بالای ۱۵ cm ،طرح شاهد طبق این روش با مقادیر مندرج در جدول شمارهٔ ۳ حاصل گردید.

شایان ذکر است طرح مذکور پس از ۳ مرتبه ساخت آزمایشی و انجام اصلاحات مورد نیاز حاصل گردیده است.

٤- طرح آزمایش

۴-۱-طرح آزمایش کاهش عیار سیمان

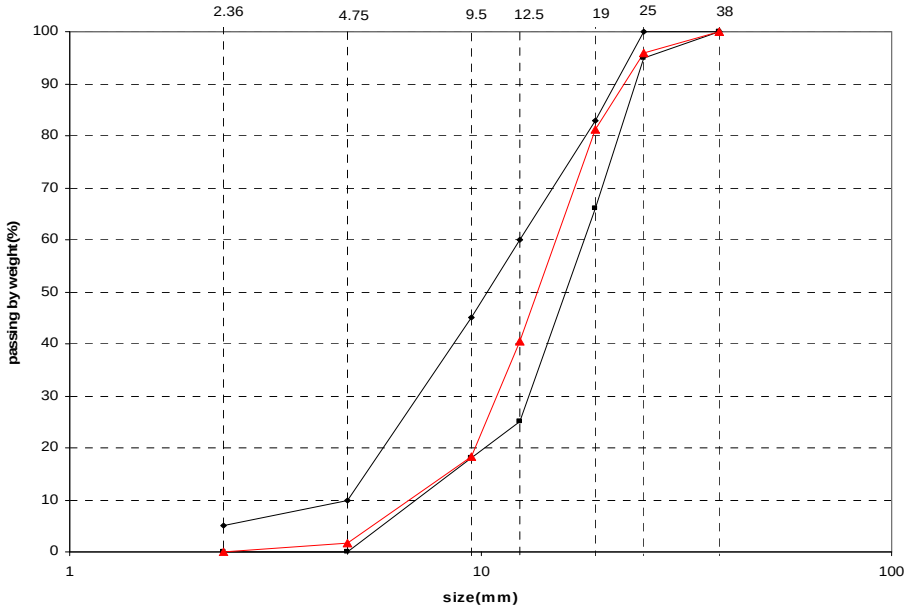
چنانچه در مقدمهٔ مقاله آورده شده با کاهش عیار سیمان در نسبت آب به سیمان ثابت، حجم خمیر سیمان کاهش پیدا کرده و این امر تأثیر جدی بر روی روانی و کارایی بتن خواهد داشت. به منظور جبران این نقیصه می‌بایستی از مواد افزودنی روان‌کننده و یا فوق‌روان‌کنندهٔ مناسب و با نوع بتن به لحاظ بافت، روانی اولیه بدون افزودنی، عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، روانی مورد انتظار و ...استفاده نمود.

چنانچه پیشتر گفته شد، هدف از این آزمایش‌ها، تأثیر کاهش عیار سیمان بر کیفیت بتن می‌باشد . بدین منظور چهار عیار سیمان مختلف (۳۴۰،۳۶۰،۴۰۰،۴۵۰) هرکدام به طور جداگانه در چهار نسبت آب سیمان مختلف، بدون تغییر در نسبت مصالح سنگی (از آنجاکه با کاهش عیار سیمان، حجم کاهش می‌یابد لذا برای ثابت ماندن حجم مطلق می‌بایستی مقادیر مصالح افزایش یابد اما به منظور عدم تغییر بافت دانه‌بندی سهم و درصد مصالح سنگی

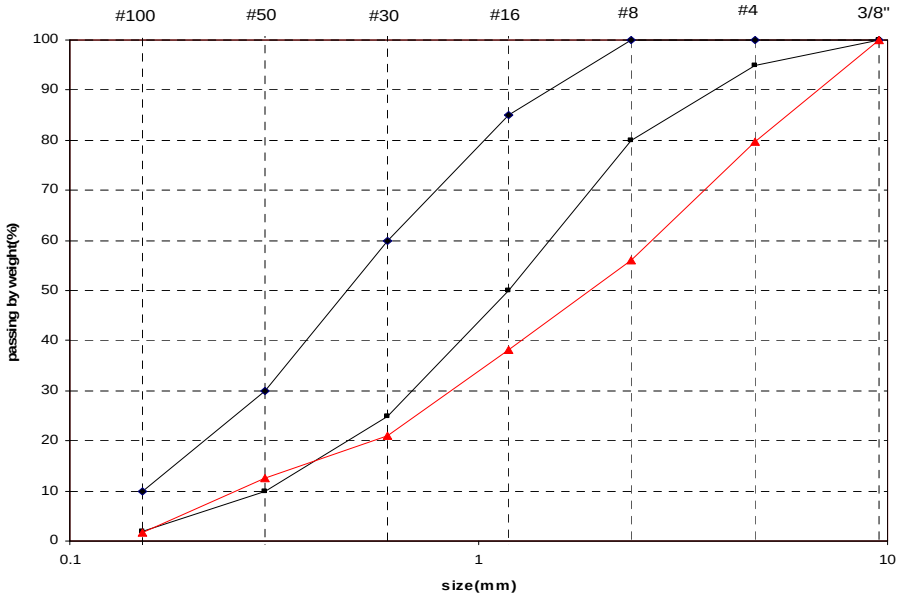
ثابت نگه داشته شد) مورد آزمایش قرار گرفت. اطلاعات مربوط به هر طرح درجدول شمارهٔ ۴ آورده شده است.

جدول شمارهٔ ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

نوع مصالح	درصد جذب آب (%)	چگالی اشباع با سطح خشک (gr/cm3)
شن درشت	1/1	2/59
شن ریز	1/75	2/57
ماسه	1/3	2/6



نمودار شمارهٔ ۱ – منحنی دانه‌بندی مخلوط شن ریز و درشت



نمودار شمارهٔ ۲ – منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول شمارهٔ ۲- مشخصات افزودنی‌ها

ردیف	نام تجاري	نوع (کلاس) افزودني	پايه شيميايي	نسل
1	N50	روان کننده نرمال	ليگنوسولفونات	اول
2	M20	فوق روان کننده نرمال	نفتالين سولفونات	دوم
3	P10	فوق روان کننده نرمال	پلي کربکسيلات	سوم

جدول شمارهٔ ۳- مشخصات طرح شاهد

ردیف	کد طرح	عیار سیمان (Kg/m3)	نسبت w/c	میزان آب	مصالح سنگي (Kg/m3)			نام افزودني	مقدار افزودني (در صد وزن سیمان)
					شن درشت	شن ریز	ماسه		
1	I -1	450	0/45	202	512	82	1060	ـــــ	ـــــ

٤-۲- آزمایش‌های انجام گرفته بر روی بتن تازه:

۴-۲-۱- آزمایش اسلامپ (طبق استاندارد ASTM C 143)

۴-۲-۲- آزمایش درصد هوای بتن تازه (طبق استاندارد ASTM C 231)

۴-۲-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه (طبق استاندارد ASTM C 138)

۴-۲-۴- انجام نمونه گیری جهت آزمایش تعیین مقاومت فشاری(طبق استاندارد ASTM C31)

۴-۲-۵- انجام نمونه‌گیری جهت آزمایش تعیین عمق نفوذ آب

۴-۲-۶- انجام نمونه‌گیری جهت آزمایش تعیین جذب آب کوتاه مدت

۴-۲-۷- دمای بتن (طبق استاندارد ASTM C1064)

۴ -۳- آزمایش‌های انجام گرفته بر روی بتن سخت شده

۴-۳-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز (طبق استاندارد ASTM C39)

۴-۳-۲- آزمایش تعیین عمق نفوذ آب در اثر فشار ۵ اتمسفر

۴-۳-۳- آزمایش تعیین میزان جذب آب کوتاه مدت *

* آزمایش تعیین جذب آب حجمی هر مخلوط بر روی دو آزمونهٔ مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری انجام گرفت. این آزمونه‌ها پس از ۲۸ روز ماندن در آب به مدت ۵ روز در داخل اون با دمای ۱۰۰ درجه خشک گردیدند.سپس وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد؛آنگاه آزمونه‌های خشک شده در ظرف آب به نحوی غوطه‌ور شدند که سطح آب ۵ ± ۲۵ میلی‌متر بالاتر از سطح آزمونه‌ها قرار گرفت. آزمونه‌ها به مدت یک ساعت در ظرف آب باقی ماندند و پس از خروج از آب توسط پارچه، آب سطحی آنها پاک شده توزین گشتند. به این ترتیب با داشتن وزن آزمونه در حالت خشکو وزن آزمونه پس از غوطه‌وری درصد جذب آب بر حسب وزن آزمونهٔ خشک از رابطهٔ زیر به دست آمد:

$$i = \frac{m_i - m_o}{m_o} \times 100$$

که در آن i درصد جذب آب، و mo و mi به ترتیب وزن آزمونه‌ها در حالت خشک و پس از غوطه‌وری بر حسب گرم است.

۵- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها:

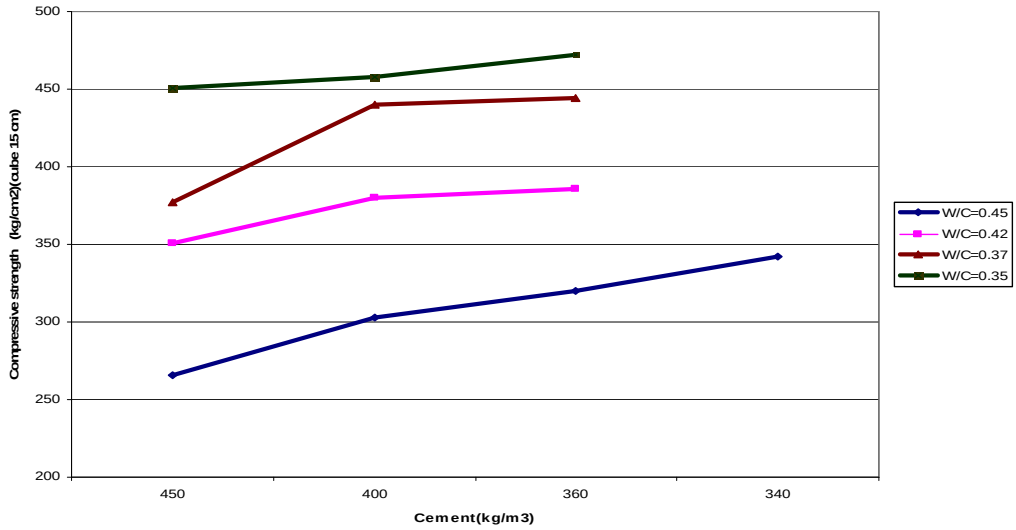
۵-۱- نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن تازه و سخت شده در کلیه طرحهای آزمایشی در جدول شمارهٔ ۵ و نمودارهای شمارهٔ ۳،۴،۵ و۶ آورده شده است.

جدول شمارهٔ ۴- مشخصات طرح‌های آزمایشی

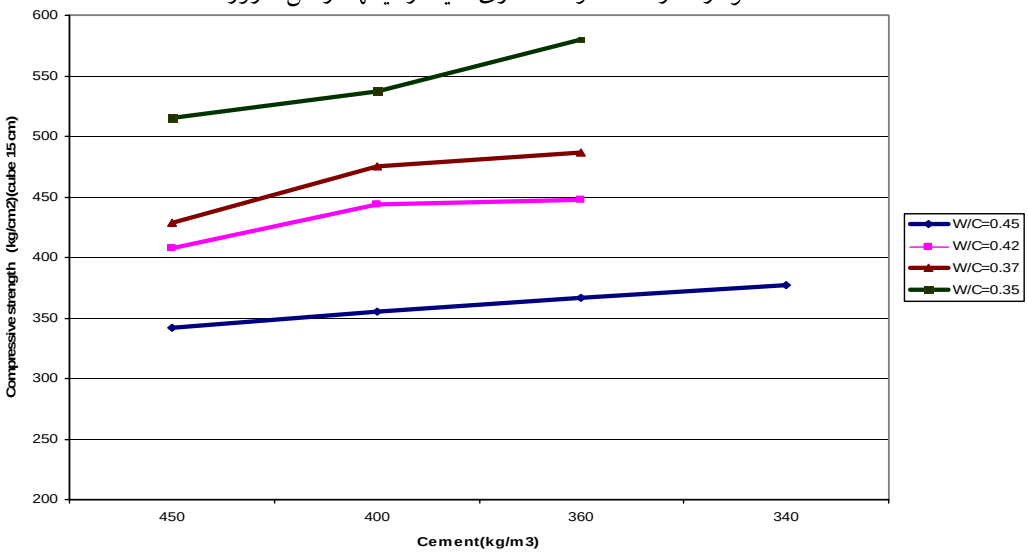
ردیف	کد طرح	عیار سیمان (Kg/m3)	نسبت w/c	میزان آب	مصالح سنگي (Kg/m3)			نام افزودني	مقدار افزودني (در صد وزن سیمان)
					شن درشت	شن ریز	ماسه		
1	I -1	450	0/45	202	512	82	1060	____	_____
2	I -2	400	0/45	180	545	87	1130	____	_____
3	I -3	360	0/45	162	569	91	1180	M20	0.33
4	I -4	340	0/45	153	581	93	1205	P10	0.24
5	N-1	450	0/42	189	524	84	1087	N50	0.23
6	N-2	400	0/42	168	554	89	1148	N50	0.37
7	N-3	360	0/42	151	578	93	1198	N50	0.7
8	M-1	450	0/37	166	542	87	1124	M20	0.48
9	M-2	400	0/37	148	570	91	1182	M20	0.88
10	M-3	360	0/37	133	592	95	1227	M20	1.4
11	P-1	450	0/35	157	550	88	1140	P10	0.15
12	P-2	400	0/35	140	577	92	1195	P10	0.32
13	P-3	360	0/35	126	598	96	1240	P10	0.7

جدول شمارهٔ ۵- نتایج طرح‌های آزمایشی

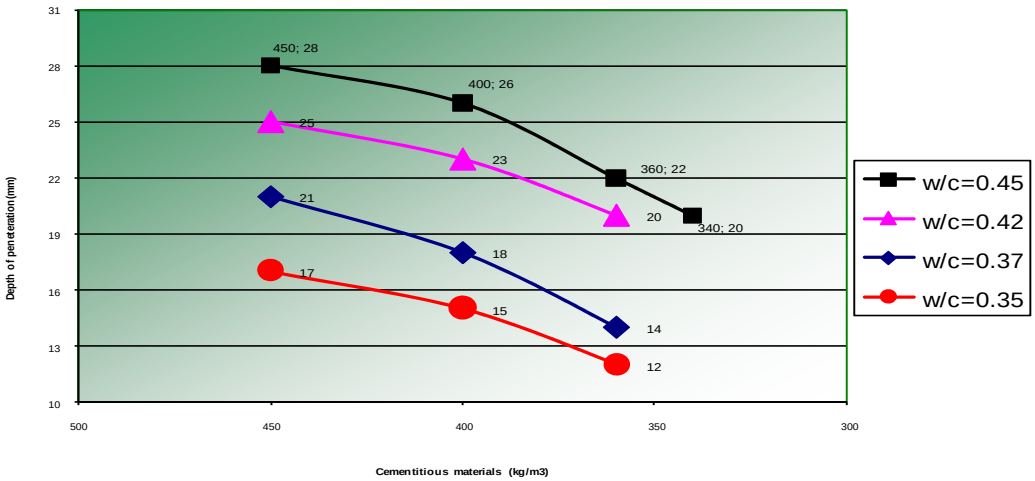
کد طرح	عیار سیمان (Kg/m3)	نسبت w/c	نام افزودني	مقدار افزودني (در صد وزن سیمان)	اسلامپ (cm)		مقاومت فشاري (kg/cm^2)		در صد هواي بتن تازه	میزان عمق نفوذ (mm)	در صد جـذب آب
					بدون افزودني	با افزودني	7روزه	28روزه			
I -1	450	0/45	____	_____	22	____	266	342	1.8	28	3.38
I -2	400	0/45	____	_____	18	____	303	355	2.5	26	3.02
I -3	360	0/45	M20	0.33	7	21	320	364	3.5	22	2.53
I -4	340	0/45	P10	0.24	4	22	342	377	1.7	20	2.36
N-1	450	0/42	N50	0.23	17	21	351	408	2.6	25	3.07
N-2	400	0/42	N50	0.37	10	22	380	444	3.9	23	2.71
N-3	360	0/42	N50	0.7	2	20	386	448	3.5	20	2.22
M-1	450	0/37	M20	0.48	7	21	377	429	2.2	21	2.49
M-2	400	0/37	M20	0.88	0	22	440	475	1.9	18	2.13
M-3	360	0/37	M20	1.4	0	20	444	487	1.4	14	2.01
P-1	450	0/35	P10	0.15	5.5	22	451	515	2	17	2.17
P-2	400	0/35	P10	0.32	0	20	458	537	2.4	15	1.94
P-3	360	0/35	P10	0.7	0	18	462	580	1.4	12	1.57



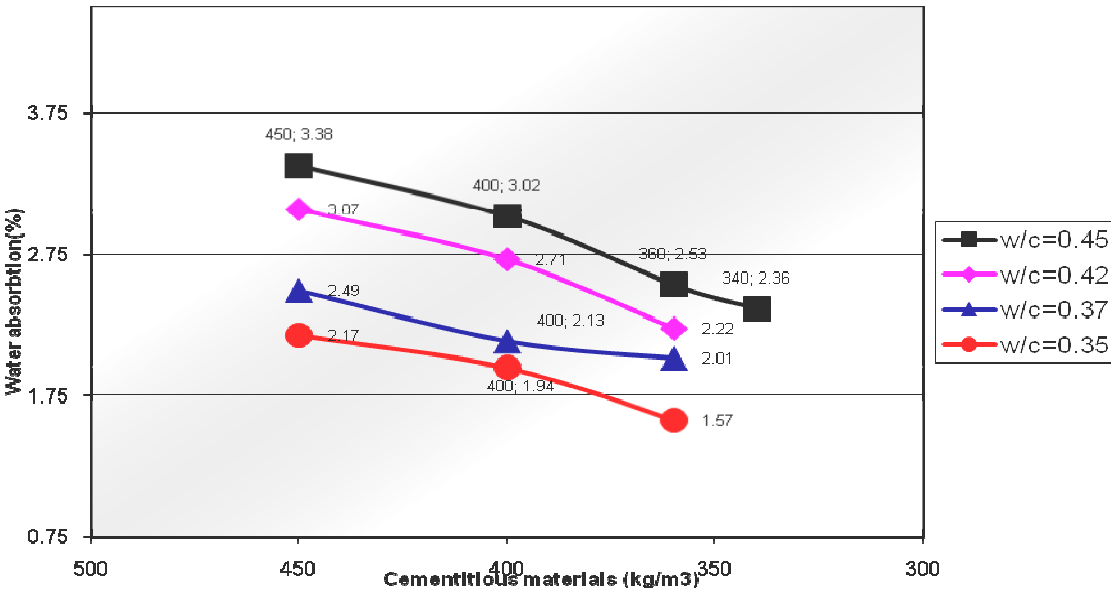
نمودارشمارهٔ ۳- مقاومت فشاری کلیه آزمایشها در سن ۷ روز



نمودارشمارهٔ ۴- مقاومت فشاری کلیه آزمایشها در سن ۲۸ روز



نمودارشمارهٔ ۵- میزان عمق نفوذآب



نمودار شمارهٔ ۶- درصد جذب آب کلیهٔ آزمایش‌ها

۵-۲- تفسیر نتایج:

۱-علت عمدهٔ این پدیده بهبود مشخصات مقاومتی و دوامی بتن با کاهش عیار سیمان ، کاهش حجم خمیر سیمان در واحد حجم بتن است. هنگامی که نسبت آب به سیمان ثابت باشد، کاهش حجم خمیر سیمان، موجب کاهش تخلخل در واحد حجم بتن می‌گردد.

۲-با کاهش حجم خمیر سیمان، جمع‌شدگی در بتن کاهش می‌یابد و موی ترک‌ها عملاً کمتر خواهند شد. لذا کیفیت مقاومتی و دوامی بتن بالا می‌رود.

۳-با افزایش سنگدانه و کاهش حجم خمیر سیمان، فضای پیچ در پیچ بیشتری در بتن ایجاد می‌شود که به کاهش نفوذپذیری منجر می‌گردد .

٦- نتیجه‌گیری و پیشنهاد:

۱-نباید پنداشت که با افزایش عیار سیمان و ثابت بودن نسبت آب به سیمان، همواره بهبود کیفی را شاهد خواهیم بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد با کاهش عیار سیمان ضمن ثابت حفظ نمودن نسبت آب به سیمان، کیفیت مکانیکی و دوامی بتن بهبود می‌یابد.

۲-کاهش حجم خمیر سیمان ضمن ثابت حفظ نمودن نسبت آب به سیمان، وقتی میسر است که آب و سیمان هر دو کاهش یابند. این امر مشکلاتی جدی برای کارایی بتن ایجاد می‌نماید. واقعیت آن است که امکان عملیات اجرایی نظیر انتقال با پمپ و تراکم کافی برای چنین بتن‌هایی امکان‌پذیر نیست. لذا مصرف افزودنی‌های روان‌کننده و فوق‌روان‌کننده اجتناب‌ناپذیر است.

۳-با مصرف فوق‌روان‌کننده و کاهش نسبت آب به سیمان، حتی با عیارهای پایین نظیر ۳۶۰ و ۳۴۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌توان مقاومت های بالا نظیر ۵۸ مگا پاسکال را به‌دست آورد.

۴- پخش و توزیع ذرات سیمان به علت وجود افزودنی روان‌کننده و فوق‌روان‌کننده بهتر شده و از طرفی تراکم‌پذیری بتن بهتر انجام می‌شود این امر سبب بهبود مقاومت و دوام بتن می‌گردد.

پیشنهادها :

۱- هر چند افزایش عیار سیمان و ثابت بودن مقدار آب به کاهش نسبت آب به سیمان منجر می‌شود و افزایش کیفیت را خواهیم داشت، توصیه می‌شود کاهش نسبت آب به سیمان با کاهش آب همراه باشد نه افزایش مواد سیمانی تا بهبود مضاعفی را ایجاد کنیم.

۲- انتخاب صحیح افزودنی‌های مناسب با توجه به نوع بتن امری تخصصی است و نیاز به شناخت از نوع و عملکرد آنها دارد.

۳- روان‌کننده‌ها و فوق‌روان‌کننده‌ها در کنار قدرت کاهندگی آب دارای خصوصیات افت اسلامپ هستند که می‌توان با انتخاب صحیح و یا مواد نگهدارنده اسلامپ آنها را اصلاح نمود.

۷-مراجع

[1]. Singh, B. G. "Specific Surface of Aggregates Related to Compressive and Flexural Strength of Concrete", J. Amer. Concr. Inst., No. 54, pp. 897 – 907, 1958.

[2]. Kolias, S., Georgiou, C. "The Effect of Paste Volume and of Water Content on the Strength and Water Absorption of Concrete", Cement & Concr - ete Composites, No. 27, pp. 211 – 216, 2005.

[3]. Yiğiter, H., Yazici, H., and Aydin, S. "Effect of Cement Type, Water/cement Ratio and Cement Content on Sea Water Resistance of Concrete" Building and Environment, 2006.

[4]. Deshpande, S., Darwin, D. and Browning, J. "Evaluation Free Shrinkage of Concrete for Contr - ol of Cracking in Bridge Decks", Structural Eng - ineering and Engineering Materials, SM Report No.89, The University of Kansas Center for Research, INC., Lawrence, Kansas, 2007.

[۵]. نویل، آ. خواص بتن، ترجمه : فامیلی، ه.، ابوریحان بیرونی، ص. ۱۰۰۹، ۱۳۷۸.

[۶]. قهرمانی، غ. ر. «تأثیر عیار سیمان بر برخی از پارامترهای دوام (خوردگی میلگرد) بتن خودتراکم»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۱۶۵، ۱۳۸۵.

[۷]. تدین، محسن، ، مقاله «تأثیر عیار سیمان بر کیفیت بتن» ۱۳۸۷.

[۸]. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه روش ملی طرح مخلوط بتن، ص-۴۷۹، ۱۳۸۶.