

مقایسه تاثیر تغییر در هر یک از عوامل اسلامپ، نسبت آب به سیمان و عیار سیمان بر مقاومت فشاری بتن

علی اکبر کفاش بازاری^۱، مهدی چینی^۲

۱- رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه کارخانه سیمان تهران (نویسنده مسئول)؛

۲- استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

Eliaskafash@gmail.com

چکیده

طبق مراجع مختلف افزایش نسبت w/c ، افزایش اسلامپ به کمک آب و کاهش عیار سیمان باعث کاهش مقاومت بتن می‌گردد. اما آنچه حائز اهمیت می‌باشد از میان ۳ عامل مذکور، نسبت w/c تاثیر واضح‌تری دارد؛ آنچنان‌که می‌توان گفت کاهش مقاومت بتن به سبب افزایش اسلامپ با افزایش آب و یا کاهش عیار سیمان باعث افزایش نسبت w/c شده و در نهایت افزایش این نسبت به کاهش مقاومت منتهی می‌شود. در این مقاله به کمک ایجاد یک شرایط نسبتاً یکسان سعی بر آن بوده است که تاثیر این عوامل هر یک جداگانه بررسی شوند. لذا حدود ۳۰۰ کیلوگرم نمونه سیمان و ۱۰۰۰ کیلوگرم شن و ماسه تهیه شد. سپس ۲۰ طرح مخلوط بتن (۱۶۰ آزمونه) مشابه و بدون افزودنی ساخته شدند. در مرحله اول مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با عیارهای ۳۳۰، ۳۴۰، ۳۵۰، ۳۶۰ و ۳۷۰ کیلوگرم در متر مکعب تهیه شد که سعی بر حفظ کارایی (اسلامپ ۸-سانتی‌متر) بود. در مرحله دوم مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵۳، ۰/۵۴، ۰/۵۵، ۰/۵۶، ۰/۵۷، ۰/۵۸ و ۰/۵۹ و عیار ثابت ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب اجرا شد. در مرحله سوم مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با اسلامپ‌های مختلف ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سانتی‌متر و عیار ثابت ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب تهیه گردید. بر روی ۲۰ مخلوط بتن آزمایش مقاومت فشاری ۱، ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه انجام گرفت. نتایج این عملیات آزمایشگاهی تاثیر بیشتر تغییرات w/c در مقاومت بتن نسبت به تغییرات اسلامپ یا عیار را نشان داد؛ به گونه‌ای که با کاهش هر ۰/۰۱ نسبت w/c حدود ۱/۳ مگاپاسکال مقاومت ۲۸ روزه افزایش می‌یابد، لیکن به ازای افزودن هر ۱۰ کیلوگرم سیمان در یک متر مکعب بتن، مقاومت حدود ۱/۲ مگاپاسکال (مشابه هر ۱ سانتی‌متر افزایش اسلامپ) افزایش دارد. در حقیقت ضریب تاثیر کاهش پارامتر w/c واضح‌تر می‌باشد. (البته همواره کاهش w/c بدون مصرف افزودنی مطلوب نیست).

کلمات کلیدی: اسلامپ، w/c ، عیار سیمان، مقاومت بتن.

۱. ۲. تاریخچه تحقیق و مبانی تئوری پژوهش:

۳ عامل نسبت w/c ، اسلامپ و عیار سیمان در مقاومت و کارایی بتن نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. مراجع متعددی نقش این عوامل را بررسی و تشریح نموده‌اند (شکل ۱). لیکن نسبت آب به سیمان از پارامترهای مهم طراحی مخلوط‌های بتنی است. آزمایش اسلامپ [۶] به علت سادگی و صحت آن حدود ۹۰ سال در اکثر کارگاه‌ها و پروژه‌های همه کشورها مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. اگر چه آئین‌نامه ACI ۱۱۶R-۹۰ آزمایش اسلامپ را بعنوان سنجشی از روانی توصیف می‌نماید؛ اما بطور مسلم کاملاً کارایی بتن را نمی‌آزماید. طی بررسی نمونه‌های متعدد مشخص شده که رابطه زمان وی بی و اسلامپ تقریباً خطی و معکوس است [۸]. تحقیقات گسترده‌ای جهت یافتن ارتباط بین نتیجه این آزمایش با مشخصات مکانیکی و رئولوژیکی خمیر سیمان انجام گرفته و حتی روابطی مابین اسلامپ و تنش تسلیم خمیر سیمان و بتن بدست آمده است [۹]. تاکنون بحث‌های زیادی در مورد کارایی آزمایش اسلامپ و قابل اعتماد بودن آن مطرح شده است [۱۰]. موضوع اندازه‌گیری روانی با اسلامپ بتن در زمان بکارگیری آن در لحظات اولیه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. اندازه‌گیری روانی بتن به عنوان یک شاخص

ساده و مهم در تکنولوژی بتن تلقی می‌شود. تعیین ارتباط و رابطه‌ای بین عدد اسلامپ و مقاومت فشاری بتن به دلیل وابستگی مقاومت بتن به پارامترهای زیاد مشکل به نظر می‌رسد. به این جهت تاکنون نیز از اندازه‌گیری کمی روانی در ارتباط با مقاومت فشاری به طور مستقیم تحقیقی مشاهده نشده است. همواره افزودن آب به بتن برای افزایش اسلامپ مورد بحث می‌باشد [۱۱]؛ از این رو باید بهترین اسلامپ متناسب با مصرف انتخاب شود [۱۲].

کمپانی مصالح ساختمانی سمکس امریکا در مقاله‌ای با عنوان "تأثیر افزودنی‌های آب به بتن: کمی آب می‌خواهد صدمه ببیند؟" به این معضل پرداخت. خلاصه این مطلب آنست که برای توسعه مخلوط‌های بتنی باید دقت زیادی انجام شود. ممکن است با افزودن آب بیش از میزان طراحی، ویژگی‌های عملکردی مطلوب بتن مانند مقاومت فشاری و مقاومت در برابر انجماد و ذوب‌شدن، سولفات‌ها و خوردگی آسیب‌پذیر شود. لذا پیروی دقیق از طراحی w/cm مندرج در ACI ۳۱۸ برای بتن‌های سازه‌ای تاکید شده است [۱۳]. کارایی و روانی بتن تازه باید به اندازه کافی باشد تا بتواند به سهولت در قالب‌ها ریخته شود و بدون اینکه جدائی سنگدانه‌ها یا آب‌انداختگی زیاد روی دهد، پیرامون همه میلگردها را پر کند. روش اسلامپ بخاطر سادگی، در کارگاه‌ها ملاک روانی و کارایی قرار گرفته است. لازم است تا بر اساس محل بتن‌ریزی و ویژگی‌های محل مصرف نسبت به انتخاب اسلامپ بتن اقدام شود.

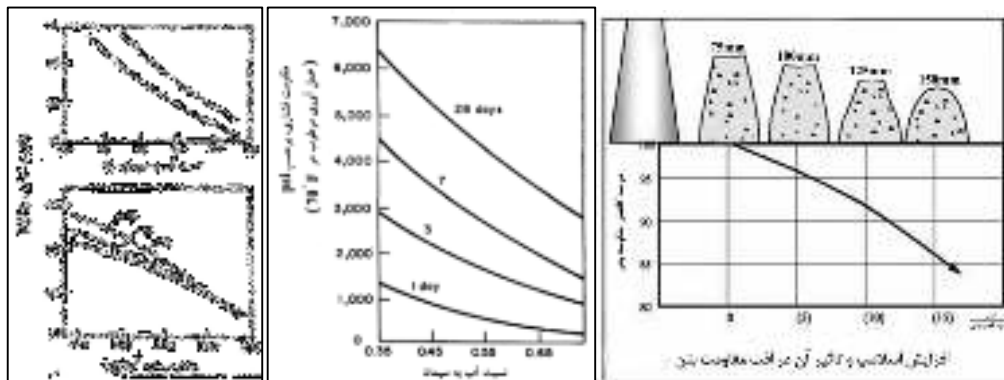
جهت هیدراسیون سیمان منابع و مراجع مختلف حداقل نسبت آب به سیمان (W/C) را $0/۲$ تا $0/۲۲$ معرفی نموده‌اند؛ لیکن در این نسبت کارایی به اندازه‌ای کم است که ساخت و تراکم‌سازی آن خمیر بسیار مشکل است. از این رو میزان آب اولین محدودیت برای کارپذیری مطلوب در بتن (بدون افزودنی) است [۱۴]. حال آنکه این موضوع به سیمان (غلظت نرمال) و سنگدانه‌ها (دانه‌بندی، درصد شکستگی، شکل و جنس آنها) مربوط می‌شود.

رستم‌زاده و قاسمی (۱۳۹۰) اثر تغییرات روانی بتن بر روی تغییرات مقاومت فشاری در عیارهای متعارف را مطالعه نمودند. آنها ۱۲۰۰ نمونه مکعبی تهیه و مقاومت فشاری نمونه‌ها را تعیین کردند. با توجه به خصوصیات سیمان‌ها و بررسی‌های آماری لازم روابط بین اسلامپ بتن و مقاومت فشاری نمونه‌ها (که مهمترین ویژگی بتن سخت شده محسوب می‌شود) حاصل و بررسی شده است. به زعم آنها مهمترین نیازهای از پیش تعیین شده بری عموم بتن‌ریزی‌ها عبارتست از: ۱- کارایی در بتن تازه که با آزمایش روانی یا اسلامپ اندازه‌گیری می‌شود؛ ۲- مقاومت فشاری در بتن سخت شده. ارتباط این دو پارامتر در مطالعه آنها به شرح زیر می‌باشد:

۱- تغییرات بیش از حد معمول در مقادیر اسلامپ‌ها، اکثراً در اثر تغییرات غیر قابل انتظار در نسبت‌های مخلوط می‌باشد که مهمترین و عمده‌ترین این تغییرات مربوط به رطوبت است؛ بنابراین کنترل دقیق رطوبت مصالح، اسلامپ‌های واقعی یکنواختی را نتیجه خواهد داشت؛

۲- ماهیت مرکب بتن و تبعیت مقاومت از روش ساخت، جای‌دهی، تراکم و عمل‌آوری، ارزش و اعتبار نتیجه آزمایش اسلامپ را، که متداول‌ترین آزمایش در سطح جهان است، کاهش می‌دهد و می‌توان گفت این آزمایش روشی ساده و مناسب برای کنترل یکنواختی پیمان‌های مختلف مخلوط بتن آماده است. بر خلاف تصور قبلی مشاهده می‌شود که با افزایش عدد اسلامپ، و به شرط ثابت ماندن سایر ترکیبات مخلوط بتن، مقاومت فشاری بتن، در تمام رده‌های بتن کاهش نمی‌یابد.

۳- درصد افزایش مقاومت‌های ۲۸ روزه نمونه‌ها نسبت به مقاومت‌های ۷ روزه در رده‌های مختلف بتن و در اسلامپ‌های متفاوت به صورت غیرخطی تغییر می‌کند و از ۱۸۰-۱۲۰٪ متغیر است. کمترین درصد افزایش برای بتن با رده ۳۰۰ و با دامنه تغییرات اندک (۱۲۰-۱۳۵٪) و بیشترین میزان افزایش برای بتن با رده ۲۰۰ و با دامنه تغییرات بیشتر (۱۴۰-۱۸۰٪) بوده است [۱].



شکل ۱- ارتباط تغییرات محتوی سیمان، نسبت w/c و اسلامپ در برابر مقاومت بتن [۲، ۳، ۱۵ و ۱۶]

تأثیر نسبت آب به سیمان و میزان سیمان در بتن تحت تنش می‌تواند از اثرات متضادی که میزان هوا در بتن دارد، نتیجه و بیان گردد. با افزایش تخلخل خمیر، حباب هوا اثر معکوسی بر روی مقاومت ماده مرکب می‌گذارد. از طرف دیگر با افزایش کارایی و قابلیت تراکم خمیر، حباب هوا می‌تواند باعث افزایش مقاومت ناحیه انتقال (به خصوص در مخلوط‌های با آب و سیمان پایین) شده و در نتیجه مقاومت بتن را بهبود بخشد. چنین به نظر می‌رسد که در بتن کم سیمان، زمانی که ایجاد حباب هوا همراه با کاهش مقدار قابل ملاحظه‌ای از آب مخلوط باشد، تأثیر معکوس حباب هوا بر روی مقاومت خمیر بیش از اثر مثبت و جبران کننده‌ای است که بر روی ناحیه انتقال دارد.

تدین و همکارانش (۱۳۸۷) تاثیر سطوح مختلف عیار سیمان بر مقاومت فشاری، جذب آب مویینه و انتشار یون کلرید در بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان (W/C) ثابت را بررسی نمودند. نسبت های آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ بودند که با هر یک از آنها، چهار مخلوط باعیارهای سیمان ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب ساخته شد. در ساخت مخلوط‌ها سیمان پرتلند نوع ۲ و سنگدانه‌های با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش حاکی از آن است که یک نسبت آب به سیمان، کاهش عیار سیمان در مخلوط از ۴۵۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش جذب آب مویینه و انتشار یون کلرید در بتن می‌گردد. مشابه چنین حالتی نیز در افزایش عیار سیمان از ۳۰۰ به ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب وجود دارد. بنابراین به عنوان یک نتیجه کلی انتظار می‌رود که در محدوده نسبت آب به سیمان ۰/۴ تا ۰/۵، مخلوط های دارای عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب نسبت به سایر مخلوط‌ها، از عملکرد مناسب‌تری در شرایط محیطی مهاجم برخوردار باشند [۴].

یورداکول (۲۰۱۰) بهینه‌سازی مخلوط‌های بتونی با حداقل محتوای سیمان برای عملکرد و پایداری را بررسی نمود. هدف اصلی تحقیق وی بررسی حداقل مقدار سیمان مورد نیاز با نسبت W/C مناسب برای تحقق کارایی، استحکام، الزامات دوام در روسازی بتنی و کاهش انتشار دی اکسید کربن، مصرف انرژی و هزینه‌ها بود. وی یک سری آزمایش بر روی ۱۶ مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان (W/C) ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵ و میزان سیمان از ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب انجام داد. ترکیب سنگدانه‌ها برای همه مخلوط‌ها یکسان بود. نتایج آزمایش وی نشان داد که مقاومت تابعی از W/C و مستقل از سیمان است؛ افزایش میزان W/C یا سیمان باعث افزایش کارایی می‌شود؛ با افزایش محتوی سیمان برای W/C مقدار مشخص، زمان گیرش کاهش می‌یابد؛ برای یک W/C مشخص با افزایش محتوی سیمان، نفوذپذیری افزایش می‌یابد؛ از این‌رو افزایش سیمان باعث افزایش مقاومت نمی‌شود و ممکن است مقدار زیاد سیمان، دوام را کاهش دهد (افزایش نفوذپذیری هوا و نفوذ کلرید). علاوه بر این، برای یک W/C بیش از ۰/۳۵، محتوای سیمان بیش از ۵۰۰ pcy^۱ بر عملکرد بتن اثر منفی می‌گذارد که

^۱pounds per cubic yard (pcy) of cement

(افزایش مقدار سیمان از ۵۰۰ پوند در یاردمکعب به ۷۰۰ پوند در یاردمکعب که تقریباً معادل ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد) منتهی به کاهش ۱۵٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ترک‌خوردگی ناشی از انقباض می‌شود [۱۷]

سلیمانی راد و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر محتوای سیمان بر عملکرد بتن در محیط‌های خورنده (آب دریا) را بررسی کردند. در مطالعه آنها، مخلوط‌های بتونی با نسبت آب به سیمان یکسان (۰/۴۵، ۰/۴۰، و ۰/۵۰) بودند و برای هر نسبت W/C سه مخلوط با سیمان ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب تهیه شد. در این مطالعه مشخص شد که اگر نسبت W/C ثابت نگه داشته شود، هنگامی که محتوای سیمان در مخلوط از ۴۵۰ به ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش یابد، مقاومت افزایش می‌یابد، ضریب انتشار یون کلر کاهش و احتمال خوردگی آرماتورهای فولادی نیز کاهش می‌یابد [۱۸].

استفاده بهینه از مصالح سنگدانه‌ای به خصوص سنگدانه‌های درشت-به لحاظ اینکه باعث کاهش مصرف سیمان می‌شود- باعث تغییر در نسبت W/C و در نتیجه نسبت مقاومت ۲۸ روزه/۷ روزه می‌شود. همچنین کاهش سهم سنگدانه‌ها در بتن و افزایش محتوای سیمان آن، باعث افزایش مقاومت زود هنگام می‌گردد؛ اما طی حدود ۱۰۰ پژوهش اثر نامطلوب این افزایش (عیار سیمان در بتن) بر دوام بتن اثبات شده است [۱۹].

بر اساس مبانی علمی مطروحه، هدف از این مطالعه بررسی و مقایسه تاثیر ۳ عامل مذکور (اسلامپ، W/C و عیار سیمان) بر مقاومت بتن می‌باشد.

۲. برنامه آزمایشگاهی:

۱.۲ مواد اولیه و چارچوب کلی تحقیق:

در این مطالعه، ۳۰۰ کیلوگرم نمونه سیمان پرتلند نوع ۲ از کارخانه سیمان تهران تهیه شد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Alkaline equivalent
21.10	4.50	3.80	63.00	3.40	2.15	0.72	0.13	0.88	54.2	19.6	5.5	11.6	0.60

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

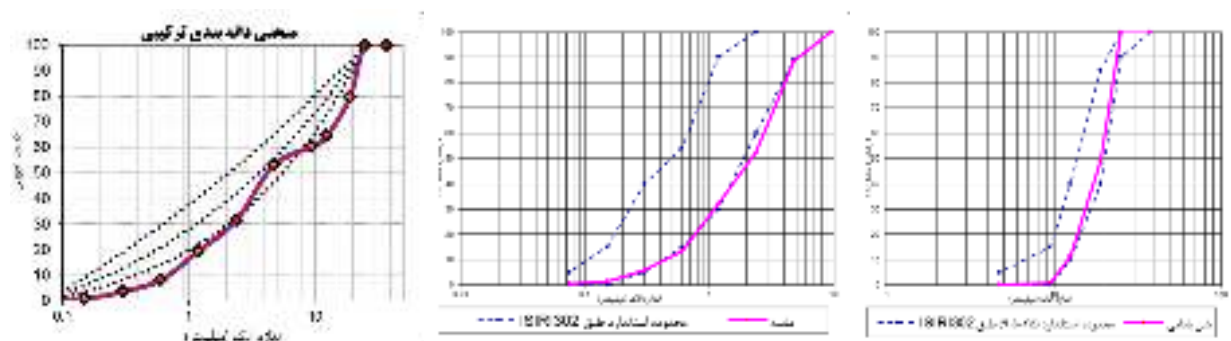
مقاومت فشاری [^۲ Kg/Cm]	باقیمانده روی الک [%]			بلین [Cm ² /g]	گیرش [min]	غلظت نرمال
	۲۸ روزه	۷ روزه	۲ روزه			
۲۲۸	۳۹۶	۵۴۴	۲/۲	۲۱/۷	۱۲/۲	۳۰۵۲
						۱۶۰
						۲۴۵
						۲۴/۵

در مرحله بعدی با تهیه حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم مصالح سنگدانه‌ای، ساخت مخلوط‌های بتنی در دستور کار قرار گرفت. به طور معمول افزایش حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)، منجر به افزایش مقاومت، کاهش هزینه، افزایش چگالی [۲۰]، کاهش پمپ‌پذیری، کاهش قابلیت بتن‌ریزی در مقاطع نازک یا تراکم آرماتور، افزایش آب‌انداختگی و غیره می‌شود. لذا غالباً ساخت بتن صنعتی با سنگدانه MSA: ۲۵mm انجام می‌گیرد. مبنای انتخاب مصالح سنگدانه‌ای برای تهیه مخلوط بتن‌های آزمایشی در این تحقیق نیز بر همین منوال (مشابه اجرای بتن در ساختمان‌ها) بوده است. شکل ۲ و جدول ۱ مشخصات سنگدانه‌های

مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد. از سنگدانه‌های درشت به لحاظ کاهش مصرف سیمان [۲۱]، استفاده بهینه شد.

جدول ۳- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	وزن مخصوص (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن متوسط نیمه شکسته (بادامی)	۷/۵	۲/۲۰	۲/۵۵	۴۵	۰/۴
ماسه نیمه شکسته	۳/۹	۳/۳	۲/۵۱	*	۳/۱



شکل ۲- نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن در کلیه مخلوط‌ها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمون‌ها، شرایط عمل‌آوری و ... تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان مصرفی باشد طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود $n: 0.35$ (میانگین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۵]. برای تهیه این مخلوط ۶۰٪ ماسه با ۴۰٪ شن درشت استفاده شد (شکل ۲).

جهت تهیه مخلوط‌های بتنی بدون افزودنی به سه روش (طی سه گام) اقدام شد: ۱-اسلامپ $3/5 \pm 8/5$ سانتی‌متر؛ ۲- عیار سیمان 20 ± 350 کیلوگرم بر مترمکعب؛ ۳-نسبت $W/C 0.4 \pm 0.56/3$ در نهایت مقاومت آزمون‌های بتنی در سنین ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند (شکل ۳).



شکل ۳- نماهایی از عملیات آزمایشگاهی در این تحقیق

۲,۲ تهیه مخلوط‌های بتنی با اسلامپ متغیر:

در این مرحله عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌های مخلوط بتنی 350 kg/m^3 بود. در این مرحله مبنای تهیه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارایی مناسب (اسلامپ $8/5 \pm 3/5$ سانتی‌متر) بود که در نتیجه نسبت w/c کمی متغیر به دست آمد. البته در طرح‌های اولیه مخلوط بتنی این نسبت $0/55$ در نظر گرفته شد. در این گام ۸ مخلوط بتن آزمایشگاهی با اسلامپ‌های مختلف ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سانتی‌متر و عیار ثابت 350 kg/m^3 تهیه شد.

۳,۲ تهیه مخلوط‌های بتنی با نسبت w/c متغیر:

در این مرحله نسبت w/c مخلوط‌های بتنی $0/56 \pm 0/3$ لحاظ گردید. بنابراین ۷ مخلوط بتن آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان‌های $0/53$ ، $0/54$ ، $0/55$ ، $0/56$ ، $0/57$ ، $0/58$ و $0/59$ و عیار ثابت 350 کیلوگرم در متر مکعب اجرا شد.

۴,۲ تهیه مخلوط‌های بتنی با عیار سیمان متغیر

در این گام عیار سیمان 350 ± 20 لحاظ گردید. از این رو ۵ مخلوط بتن آزمایشگاهی با عیارهای 330 ، 340 ، 350 ، 360 و 370 کیلوگرم در متر مکعب تهیه شد که سعی بر حفظ کارایی (اسلامپ 8 سانتی‌متر) بود.

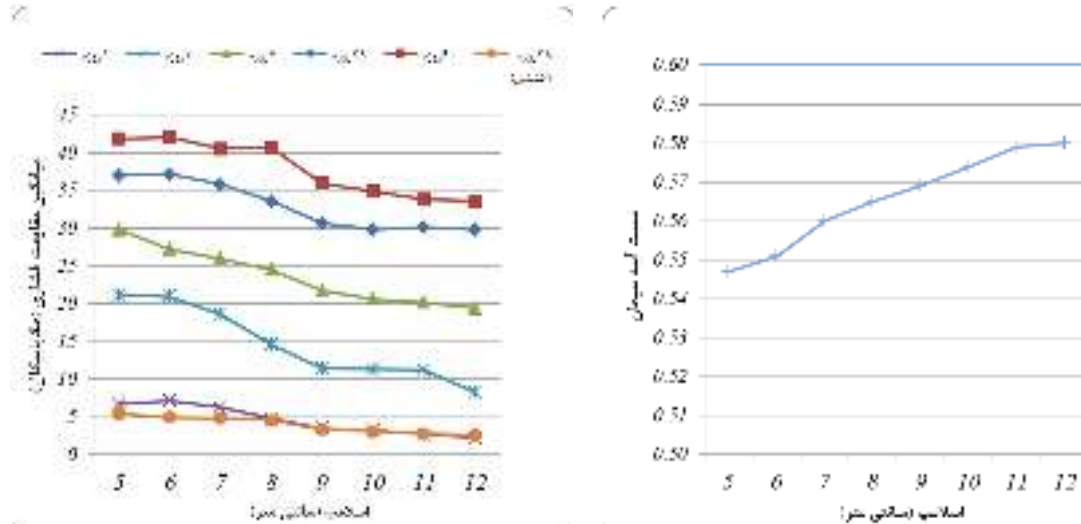
۳. نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل:

جدول ۲ خلاصه نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۴- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی در این مطالعه

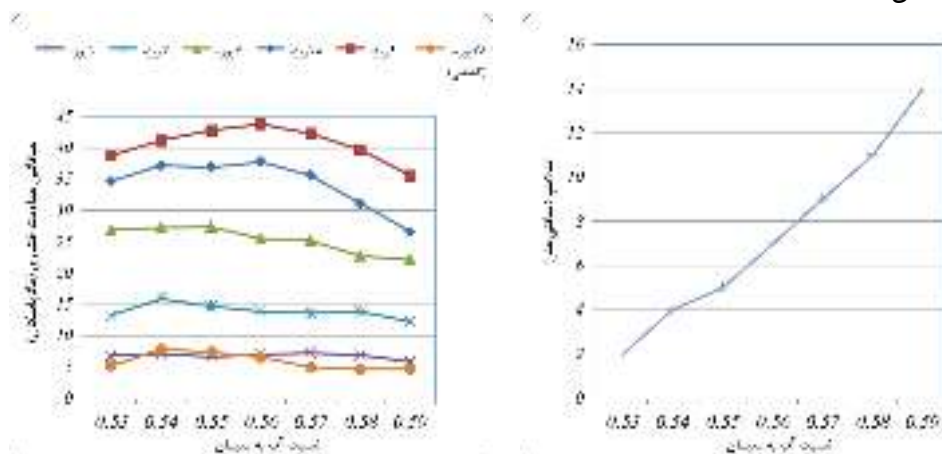
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)					دمای بتن (C)	اسلامپ (سانتی‌متر)	W/C	نام طرح
	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه				
5.4	41.8	36.9	29.8	21.2	6.7	21	5	0.55	S5
4.9	42.0	37.1	27.2	20.9	7.2	21	6	0.55	S6
4.8	40.5	35.8	26.0	18.6	6.3	21	7	0.56	S7
4.6	40.6	33.6	24.5	14.6	4.8	21	8	0.57	S8
3.4	36.0	30.6	21.7	11.5	3.5	21	9	0.57	S9
3.1	34.9	29.8	20.6	11.3	3.2	21	10	0.57	S10
2.8	33.8	30.1	20.2	11.2	2.7	23	11	0.58	S11
2.6	33.6	29.8	19.4	8.3	2.3	23	12	0.58	S12
5.3	38.8	34.7	26.9	13.3	6.8	22	2	0.53	W: 0.53
7.9	41.2	37.2	27.3	15.9	7.1	22	4	0.54	W: 0.54
7.4	42.8	36.9	27.4	14.7	6.7	22	5	0.55	W: 0.55
6.6	43.8	37.8	25.6	13.8	7.0	22	7	0.56	W: 0.56
5.0	42.3	35.6	25.3	13.6	7.3	22	9	0.57	W: 0.57
4.7	39.7	31.1	22.7	13.8	6.9	22	11	0.58	W: 0.58
4.7	35.6	26.6	22.2	12.2	5.8	22	14	0.59	W: 0.59
5.9	39.8	34.4	22.8	16.0	8.3	22	8	0.57	C: 330
6.2	40.4	35.1	23.4	16.2	8.2	22	8	0.57	C: 340
6.1	39.7	35.3	26.0	17.9	8.1	22	8	0.56	C: 350
7.7	40.4	37.1	26.5	18.4	8.4	22	8	0.55	C: 360
8.5	41.9	39.6	28.3	18.8	8.9	22	8	0.53	C: 370

شکل ۴ نمودار آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در مخلوط بتن آزمایشگاهی در برابر تغییرات اسلامپ را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که همواره با افزایش اسلامپ به کمک افزودن آب، مقاومت بتن (کوتاه، میان و بلندمدت) کاهش می‌یابد. البته در این مرحله، همبستگی نتایج نسبت W/C و مقاومت ۲۸ روزه در مقایسه با همبستگی نتایج اسلامپ و مقاومت ۲۸ روزه رابطه واضح‌تری را نشان می‌دهد.



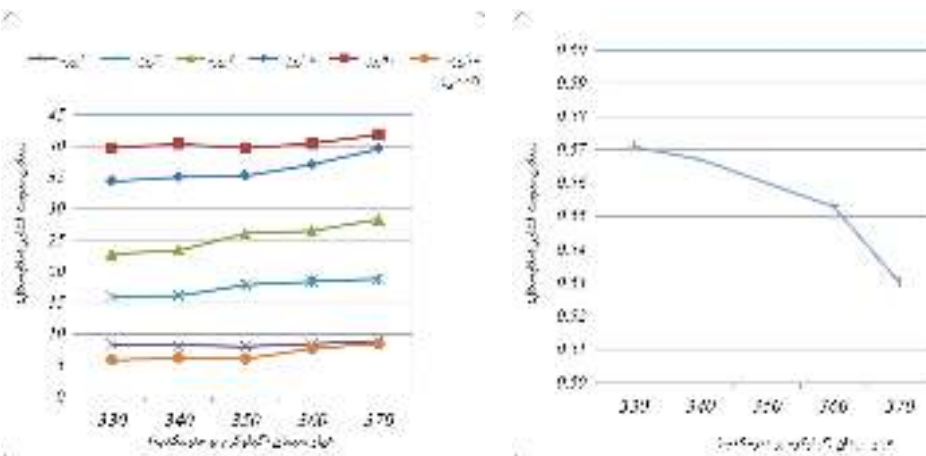
شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی با اسلامپ‌های متغیر در این مطالعه

در شکل ۵ تغییرات نسبت W/C در برابر نتایج مقاومت فشاری سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که همواره با کاهش نسبت W/C میزان مقاومت فشاری افزایش یابد. لیکن نمودار نسبت بهینه W/C را حدود ۰/۵۶ نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج علت آنست که با افزایش نسبت W/C از ۰/۵۳ تا ۰/۵۶ میزان اسلامپ از ۲ به ۷ سانتی‌متر تغییر یافته است. در بتن با اسلامپ حدود ۲ سانتی‌متر تراکم‌پذیری پایین می‌باشد و از این رو با اعمال انرژی تراکم یکسان در ساخت آزمون‌های همه مخلوط‌های بتنی مسلم است که بتن با اسلامپ پایین‌تر دارا بودن مزیت W/C پائین، مقاومت پائینی را نشان دهد.



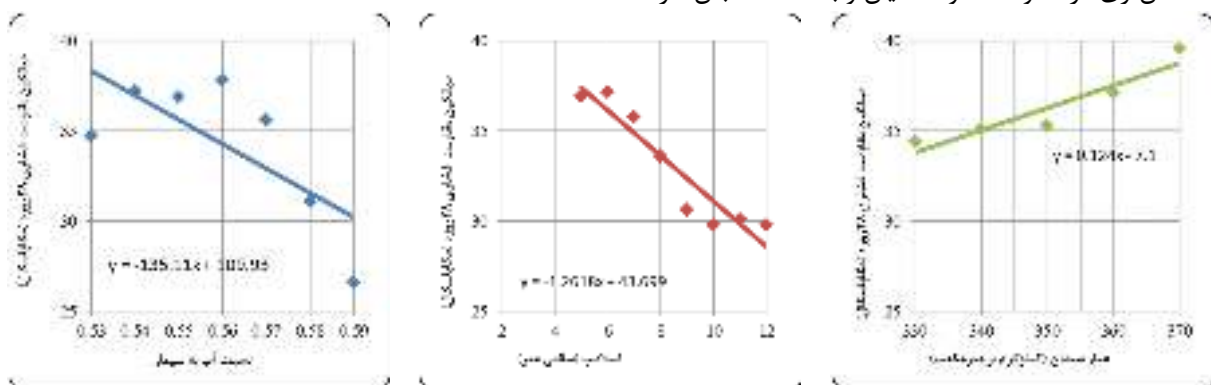
شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی با نسبت W/C متغیر در این مطالعه

در شکل ۶ تغییرات عیار سیمان را در برابر نتایج مقاومت فشاری سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به نمایش گذاشته است. علیرغم تصور بسیاری از کارشناسان و متولیان بر تاثیر چشمگیر عیار سیمان در مقاومت بتن، مقایسه این نتایج با نتایج مرحله قبلی (تغییرات نسبت W/C) در برابر مقاومت بتن نشان می‌دهد که عامل نسبت W/C اثر واضح‌تری بر مقاومت بتن دارد.



شکل ۶- نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی با عیار سیمان متغیر در این مطالعه

در نمودارهای شکل ۷ تاثیر ۳ عامل اسلامپ، نسبت W/C و عیار سیمان در مقایسه با مقاومت بتن و بر اساس نتایج این مطالعه مقایسه شده است. نتایج این عملیات آزمایشگاهی نشان داد که با کاهش هر ۰/۰۱ نسبت W/C حدود ۱/۳ مگاپاسکال مقاومت ۲۸ روزه افزایش می‌یابد، لیکن به ازای افزودن هر ۱۰ کیلوگرم سیمان در یک مترمکعب بتن، مقاومت حدود ۱/۲ مگاپاسکال (مشابه هر ۱ سانتی‌متر افزایش اسلامپ) افزایش دارد. البته همواره کاهش W/C بدون مصرف افزودنی مطلوب نیست. بنابراین با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت می‌توان پارامتر W/C در مقایسه با عوامل عیار سیمان و اسلامپ تاثیر واضح و مشخص تری در مقاومت (کوتاه، میان و بلند مدت) بتن دارد.



شکل ۷- نمودارهای مقایسه تاثیر ۳ عامل اسلامپ، نسبت W/C و عیار سیمان در برابر مقاومت بتن

۴. نتیجه‌گیری

- در این مطالعه به کمک ترکیب مصالح سنگدانه‌ای ثابت طی ۳ مرحله اثر تغییرات ۳ عامل اسلامپ، نسبت W/C و عیار سیمان بر مقاومت فشاری کوتاه، میان و بلند مدت (۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) بتن بررسی شد.
- در مرحله اول تغییرات اسلامپ در برابر مقاومت فشاری در ۸ مخلوط بتن آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که همواره با افزایش اسلامپ به کمک افزودن آب، مقاومت بتن (کوتاه، میان و بلند مدت) کاهش می‌یابد. در این مرحله، همبستگی نتایج نسبت W/C و مقاومت ۲۸ روزه در مقایسه با همبستگی نتایج اسلامپ و مقاومت ۲۸ روزه رابطه واضح تری را نشان داد.

۳. در مرحله دوم تغییرات نسبت w/c در برابر نتایج مقاومت فشاری سنین مختلف مقایسه شدند. نتایج ۸ مخلوط نسبت بهینه w/c را حدود ۰/۵۶ به علت تراکم پذیری بهتر (نسبت به ۰/۵۳ w/c و اسلامپ ۲ سانتی متر) را نشان داد.
۴. در مرحله سوم تغییرات عیار سیمان را در برابر نتایج مقاومت فشاری سنین مختلف بررسی شد. مقایسه‌ها اثبات نمود که نتایج تغییرات عیار نسبت با نتایج مرحله قبلی (تغییرات نسبت w/c) در برابر مقاومت بتن نشان می‌دهد که عامل نسبت w/c اثر واضح تری بر مقاومت بتن دارد.
۵. بر اساس نتایج آزمایشگاهی با کاهش هر ۰/۰۱ نسبت w/c حدود ۱/۳ مگاپاسکال مقاومت ۲۸ روزه افزایش می‌یابد، لیکن به ازای افزودن هر ۱۰ کیلوگرم سیمان در یک مترمکعب بتن، مقاومت حدود ۱ مگاپاسکال افزایش خواهد یافت. البته همواره کاهش w/c بدون مصرف افزودنی مطلوب نیست.

۵. قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیران، کارشناسان، و تکنسین‌های آزمایشگاه و سایر پرسنل زحمتکش مجتمع صنعتی سیمان دارم.

۶. مراجع

- [۱] رستم زاده، اسماعیل و فاطمه قاسمی، ۱۳۹۰، "اثر تغییرات روانی بتن بر روی تغییرات مقاومت فشاری در عیارهای متعارف"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان.
- [۲] طرح و کنترل مخلوطهای بتن، چاپ سیزدهم، انجمن سیمان پرتلند اسکوکوی، سوم ۱۹۸۸، صفحه ۶.
- [۳] دستور العمل بتن، اداره آبادانی آمریکا، ۱۹۸۱ و و.آ. کوردون، خواص، ارزیابی و کنترل مصالح مهندسی، شرکت مک گروهیل، نیویورک، ۱۹۷۹.
- [۴] تدین محسن، رضایی فریدون، نیلی محمود، سلیمانی راد مهدی "تاثیر عیار سیمان بر مقاومت، جذب آب و انتشار یون کلرید در بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان ثابت" دانشکده فنی دانشگاه تبریز: پاییز ۱۳۸۷، دوره ۳۷، شماره ۳ (پیاپی ۵۵) مهندسی عمران؛ از صفحه ۱ تا صفحه ۸.
- [۵] راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن "مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.
- [۶] EN 12350-2: 2000 "Testing fresh concrete – Part 2: Slump test," European Committee for Standardization.
- [۷] Eric P. Koehler, David W. Fowler (August ۲۰۰۳), "Summary of Concrete Workability Test Methods". Aggregates Foundation for Technology, Research and Education. Research report ICAR-۱۰۵-۱. p۸۵.
- [۸] Khaled Marar and Özgür Eren (۱۶ October, ۲۰۱۱) "Effect of cement content and water/cement ratio on fresh concrete properties without admixtures" International Journal of the Physical Sciences Vol. ۶(۲۴), pp. ۵۷۵۲-۵۷۶۵.
- [۹] Jan Philip Plog (۲۰۱۴) "Measuring Yield Stress to Correlate Slump of Concrete and Cement Paste" Thermo Fisher Scientific.
- [۱۰] Popovics, S. (۱۹۹۴). "The Slump Test is Useless—Or Is It?" Concrete International. ۱۶(۹), ۳۰-۳۳.
- [۱۱] Eugene o. Goeb "adding water to the mix it's not all bad" concrete product january ۱۹۹۴.

- [۱۲] "Choose the Best "Slump" for the Job" (www.lhsfna.org)
- [۱۳] "The Effects of Water Additions to Concrete: 'What's a little water going to hurt?'" CEMEX USA Technical Bulletin ۹,۴, ۲۰۰۳, ۵ pp. (www.cemexusa.com).
- [۱۴] Dr. D. N. Ghosh (۱۹۹۲), "concrete and science technology & Cement private limited", p۳۲۷.
- [۱۵] www.betonpedia.ir
- [۱۶] NRMCA, CIP ۲۶. (۱۹۹۵) "Concrete in practice what, why & How?"
- [۱۷] Ezgi Yurdakul (۲۰۱۰) "Optimizing concrete mixtures with minimum cement content for performance and sustainability. A thesis submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE. Iowa State University.
- [۱۸] M. Soleimanirad; M. Tadayon; F. Rezaie (۲۰۱۳) "Influence of cement content on concrete performance in corrosive environments (sea water)". Int. J. MAr.Sci.Eng., ۳(۲), ۶۹-76, Spring, 2013.
- [۱۹] www.cemnet.com
- [۲۰] ACI ۲۱۱-1-91 (Reapproved ۲۰۰۲) "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete"
- [۲۱] Neville AM, Brooks JJ (۲۰۰۲). "Concrete technology". Prentice Hall, p۳۰.