



بررسی اثر پوزولان متاکائولین MK بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک در شرایط محیطی مهاجم

عقیل احمدی^۱، محمدرضا سهرابی^۲

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مازنداران-قائمشهر-خ بابل-ک توحید

2- استادیار، زاهدان-دانشگاه سیستان و بلوچستان

a_ahmadi@Yahoo.com

چکیده

با توجه به روند فزاینده استفاده از بتن سبک در جهان که به علت منافع حاصل از سبک نمودن ساختمان و در نتیجه کاهش بار مرده و نیروی زلزله وارد بر سازه ها و همچنین عملکرد بهتر از نظر عایق بندی حرارتی و صرفه جویی در مصرف انرژی می باشد، لزوم بررسی پتانسیل های استفاده از بتن سبک در صنعت ساختمان مشخص می گردد. در این پروژه تحقیقاتی که حاصل نتایج آزمایشگاهی و تئوریک پیرامون نوع خاصی از سنگدانه سبک به نام لیکا می باشد، هدف بر آنست: اولاً به طرح اختلاط بتن سبکی برسیم که شرایط لازم به عنوان یک بتن سبک سازه ای را دارا باشد. بر این اساس، طی تحقیقات آزمایشگاهی با کاربرد سنگدانه لیکا، بتنی با مقاومت فشاری 28 روزه 237 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و وزن مخصوص تقریبی 1460 کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد. همچنین تحقیقاتی پیرامون درصد تخلخل این نوع بتن صورت گرفت. ثانیاً به دوام بتن سبک پرداخته شده است. دوام بتن به ویژه در مناطق گرم و خورنده شبیه آنچه که در سواحل جنوبی کشور ما وجود دارد، از مسائل عمده دست اندرکاران و محققان امر بتن بوده است. خرابی های بسیاری بر اثر شرایط آب و هوایی بسیار مهاجم، عدم آگاهی کافی عوامل اجرایی در مراحل ساخت، بکارگیری مصالح نامناسب و بدون کیفیت بوجود آمده است. اقدامات انجام شده طی دو دهه اخیر در جهت افزایش دوام و عمر مفید سازه های بتنی در چنین مناطقی بوده است. همچنین سرعت رشد جمعیت و حرکت به سوی صنعتی شدن در کشورهای پیشرفته به یک اصلاح در برنامه ریزی نیاز دارد. می توان گفت که اولین و مهمترین مساله در برنامه ریزی، ساختن موادی همانند سیمان می باشد. نیاز به ذخیره انرژی در مراحل پرخرج انرژی، نظیر تولید سیمان نیاز به تلاش گسترده در بهینه سازی دارد. استفاده از پوزولان می تواند راهی بسوی حل این مشکل باشد. آشکار است که، استفاده از پوزولان بر روی خواص مهندسی بتن تاثیر می گذارد. پوزولانهای مصنوعی و طبیعی در جایگزینی با سیمان، عملکرد نسبتاً مناسب در محیط های خورنده در سازه های بتنی از خود نشان داده اند. بهمین منظور و برای بررسی عملکرد بتن های پوزولانی، نمونه های بتنی از سیمان پرتلند و متاکائولین ساخته شده و در محلول 5 درصد کلرید سدیم و سولفات سدیم و در شرایط مرطوب به مدت 7 ماه نگهداری شده است. در نتیجه آزمایشهای انجام شده روی کلیه نمونه ها، بتن های ساخته شده با پوزولان متاکائولین دارای مقاومت فشاری بیشتر و درصد تخلخل کمتر نسبت بتن شاهد می باشد.

کلمات کلیدی: بتن سبکدانه، سبکدانه لیکا، پوزولان متاکائولین، مقاومت فشاری، درصد تخلخل.

مقدمه

اجرای سازه های بتن آرمه به عنوان ارزان ترین و بادوام ترین سازه ها، پژوهشگران را به یافتن روشهایی برای افزایش هر چه بیشتر مقاومت بتن واداشته که در این راه موفقیت‌های زیادی نیز حاصل شده است. در این رابطه استفاده از متاکائولین و میکروسیلیس و مواد افزودنی فوق روان کننده جهت تولید بتن با مقاومت زیاد کاربرد پیدا نموده و نتایج جالب توجه و مهمی حاصل شده است. عمل دوگانه پرکنندگی خلل و فرج های بتن و فعالیت های قوی این پوزولانها موجب افزایش مقاومت بتن می گردد[1].

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

² استادیار گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان



یکی از محدودیت‌های عمده کاربرد بتن معمولی، وزن زیاد آن است و یکی از راه کارهای برطرف کردن این نقیصه در بتن معمولی، سبک کردن آن است. سبک کردن بتن از سه طریق انجام می‌گیرد که معمول ترین آنها استفاده از سبکدانه در بتن بجای دانه های معمولی می باشد. اگر چه وزن بتن را می توان با استفاده از سنگدانه های سبک در آن کاهش داد ولی همزمان مقاومت بتن نیز کاهش می یابد و فلسفه استفاده از بتن سبک را زیر سؤال می برد. بتن سبکی که مقاومت کافی داشته و دیگر مشخصه های فیزیکی آن نیز به علت کاهش وزن بهبود یافته باشد تحولی عظیم در کاربرد بتن بوجود خواهد آورد و جوابگوی مسائل زیادی خواهد بود. افزایش مقاومت فشاری بتن سبک علاوه بر اینکه طراحان و محاسبین سازه ها را به کاهش حجم و ابعاد اعضای سازه وامی دارد، سبب سبک تر شدن وزن سازه ها و به همراه آوردن امتیازات اقتصادی آن نیز خواهد شد. با مصرف سبکدانه های با کیفیت مرغوب و تحت شرایط خاص و استفاده از پوزولانهای بسیار فعال می توان بتن سبک با مقاومت بالایی بدست آورد.

بتن سبک سازه ای باید دارای مقاومت و وزن مخصوص کافی باشد. بطوریکه بتوان از آن در اعضای باربر سازه ای استفاده نمود. این نوع بتن اغلب دارای وزن مخصوص بین 1400 تا 1850 کیلوگرم بر متر مکعب بوده و حداقل مقاومت فشاری تعریف شده برای آن معادل 170 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. در مناطق زلزله خیز، آیین نامه ها حداقل مقاومت فشاری بتن سبک را به 280 کیلوگرم بر مترمربع محدود می کنند.

از جمله راه کارهایی که برای افزایش دوام بتن سبک می توان در نظر گرفت بهینه ساختن طرح اختلاط بتن می باشد. با بهینه سازی طرح اختلاط بتن، می توان بتن هایی با خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام بهبود یافته تولید کرد. از جمله مشخصات این نوع بتن خصوصیات رفتاری بهینه شده مانند کارایی، روانی و افزایش تراکم پذیری، بهبود پایداری ابعادی و طاقت بتن و همچنین کاهش نفوذپذیری و در واقع بهبود چشم گیر دوام، خصوصا در شرایط محیطی مهاجم می باشد. بسته به کاربرد خاص آن، خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام این نوع بتن ها تنظیم می گردد. از بین مزایای چشم گیر این نوع بتن ها می توان به موارد زیر اشاره نمود [2]:

- 1- کاهش نفوذپذیری و بهبود خصوصیات دوام دراز مدت
- 2- بهبود خصوصیات رفتار بتن در شرایط سخت مانند سیکل های یخبندان، حمله مواد شیمیایی و شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب
- 3- بهبود عملکرد دراز مدت تحت بارگذاری استاتیکی، دینامیکی و خستگی
- 4- کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری سازه
- 5- کاهش مقدار خزش و جمع شدگی

با بهینه سازی طرح اختلاط در این نوع بتن ها، وزن مخصوص بتن ها افزایش یافته، توده بتن تازه دارای حباب ها و فضاهای خالی کمتری خواهد شد، در نتیجه کارایی و تراکم پذیری بتن افزایش خواهد یافت [3].

یک روش موثر در طراحی بتن سبک با دوام و مقاومت مناسب، محاسبه متراکم ترین وضعیت مخلوط سنگدانه و خمیر چسباننده است که با بکارگیری محدوده دانه بندی کاملی از سنگدانه ها که این محدوده باید تا ریزترین ذرات سیمان و پوزولان در خمیر چسباننده ادامه یابد، انجام می شود. در حقیقت با بهینه سازی طرح مخلوط، مقدار خمیر چسباننده نسبت به بتن های متداول تا حدود 50 درصد کاهش یافته و بتن با تراکم و دانسیته بیشتری حاصل می گردد. با ایجاد این تراکم مناسب، مسیر ورود مواد مضر به درون بتن طولانی تر و در نتیجه مقاومت و دوام بتن در برابر نفوذ عوامل مهاجم و خورنده بطور مطلوبی کاهش پیدا می کند [4].

در طرح اختلاط بتن با حداکثر تراکم، اندازه ذرات و چگونگی ترکیب بندی مواد جامد با استفاده از منحنی توزیع ایده آل اندازه ذرات براساس نظریه فولر و تامسون تعیین می شود. در این نمودار، منحنی توزیع ایده آل اندازه ذرات بر اساس این نظریه مشخص شده است [5]. با اصلاح دانه بندی طرح، می توان به مخلوط بتن متراکمتری دست یافت که در آن فضاهای خالی خمیر چسباننده کاهش یافته، بتنی با نفوذپذیری کم حاصل می گردد [6].

با توجه به شرایط محیطی بسیار مهاجم از نظر وجود عوامل خورنده مانند یونهای کلرید و سولفات و احتمال نفوذ به داخل سازه های بتن مسلح و روند سریع تخریب این سازه ها، اهمیت کاربرد این نوع بتن ها که از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و خصوصا دوام باید متناسب با شرایط سخت بهینه شده باشند، مشخص می گردد. بدیهی است با بهینه سازی طرح بتن ها از نظر پایایی، عملیات ساخت و ساز در شرایط مهاجم کشورمان موفقیت آمیز خواهد بود.

در این تحقیق طرح بتن سبک بهینه شده، با اصلاح دانه بندی و بکاربردن متاکائولین، در مقایسه با بتن شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش های مورد استفاده در این تحقیق شامل مقاومت فشاری و درصد تخلخل می باشد.

برنامه آزمایشگاهی

1- مصالح اولیه

1-1- سیمان : سیمان بکار رفته در ساخت بتن های مورد استفاده در این تحقیق از نوع (2) بوده، آنالیز شیمیایی آن در جدول 1 مشخص شده است.



جدول 1: آنالیز شیمیایی سیمان تپ (2) کارخانه قائن

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	LOI
Cement	20/99	6/19	65/96	3/86	0/20	0/17	0/60	0/05	0/40	0/06	1/53

1-2-2-1- مصالح سنگی: واژه لیکا به معنی دانه های رس منبسط شده (Light Expanded Clay Aggregate) می باشد. این دانه ها از انبساط خاک رس در کوره های گردان با حرارتی حدود 1100 تا 1200 درجه سانتیگراد بدست می آیند و یکی از انواع سنگدانه های سبک مورد استفاده در بتن به شمار می روند. از مهمترین خواص فیزیکی لیکا، وزن مخصوص بسیار کم، هدایت حرارتی پایین، مقاومت در برابر آتش و جذب آب کمتر نسبت به سایر انواع سنگدانه های سبک می باشد.[7].

1-2-1- مشخصات سنگدانه**1-1-2-1- جذب آب**

جذب آب دانه ها مطابق با استاندارد ASTM C127 انجام می گیرد. وجود منافذ و ساختمان سلولی و متخلخل در این دانه ها باعث جذب آب زیاد می گردد. جدول 2 مقادیر میانگین جذب آب 24 ساعته برای دانه بندی مورد استفاده در تحقیق را بر اساس قطر دانه ها و مصالح مختلف نشان می دهد.

جدول 2: جذب آب 24 ساعته سنگدانه لیکا بر اساس نتایج آزمایش

سنگدانه لیکا			ماسه ریز (فیلر)	سنگدانه
درشت: 4/74-9/6 میلیمتر	میانه: 2/3-4/74 میلیمتر	ریز: 0-2/3 میلیمتر	کوچکتر از الک 100	
14	13	11	4	درصد جذب آب 24 ساعته

1-2-1-2- وزن مخصوص

وزن مخصوص دانه های درشت بر اساس استاندارد ASTM C127 و وزن مخصوص دانه های ریز بر اساس استاندارد ASTM C128 انجام می گیرد. جدول 3 وزن مخصوص حقیقی (دانه ای) خشک و اشباع، وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص انبوهی متراکم مصالح سبک وزن مورد استفاده را بر اساس نتایج آزمایشات نشان می دهد. وزن مخصوص انبوهی دانه های مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C129 و به روش تراکم کوبیدن تعیین گردیده است.

جدول 3: وزن مخصوص مصالح بر اساس نتایج آزمایش (kg/cm³)

وزن مخصوص انبوهی	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص حقیقی اشباع	وزن مخصوص حقیقی خشک	اندازه سنگدانه	سنگدانه
652	1206	1190	1067	ریز 0-2/3 میلیمتر	لیکا
477	964	968	858	میانه 2/3-4/74 میلیمتر	
375	719	743	656	درشت 4/74-9/6 میلیمتر	
-	-	-	2570	کوچکتر از الک نمره 100	فیلر

1-2-1-3- دانه بندی

دانه بندی لیکا بر اساس توصیه استاندارد ASTM C330 انجام گرفت.

1-3- مواد افزودنی: در این تحقیق از پوزولان متاکائولین با مشخصات جدول 4 در ساخت برخی نمونه ها استفاده شده است. برای بررسی اثر افزودنی متاکائولین در بتن سبک ساخته شده با لیکا، نمونه هایی حاوی 10، 15 و 20 درصد مصالح سیمانی حاوی متاکائولین ساخته شد و نتایج مقاومت فشاری، درصد تخلخل آنها با نمونه های شاهد مقایسه گردید.



جدول 4: آنالیز شیمیایی پوزولان متاکائولین

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	LOI
MK	57/40	35/26	0/02	0/94	0/18	<0/01	3/17	0/09	0/43	<0/01	2/52

2- تعیین نسبت اختلاط اجزای بتن

هدف اصلی در این تحقیق، ساخت بتن های سبک با دوام و مقاومت مناسب با حداکثر تراکم و حداقل فضاهای خالی می باشد که در نتیجه، نفوذپذیری بتن نیز کاهش خواهد یافت. با استفاده از منحنی اصلاح شده فولر و تامسون کل مصالح سنگی و مواد چسبنده بتن به گونه ای انتخاب شده که بر این منحنی منطبق گردند [5]. در این منحنی با استفاده روابط ریاضی، نحوه توزیع دانه ها به گونه ای انتخاب می گردد که مصالح ریز، فضاهای بین مصالح درشت را پر نموده و مخلوط در وضعیت بسیار متراکمی درآید. به علت تراکم سنگدانه ها، در مقایسه با بتن های معمولی نیاز به سیمان کمتری خواهد بود. قابلیت نگهداری آب افزایش یافته، همچنین آب افتادگی بتن کاهش می یابد. در این نوع مخلوط ها، با کاهش دانه های متوسط، کارایی نیز بهبود می یابد و علی رغم کاهش میزان سیمان لازم، مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن با دانه بندی معمولی، افزایش پیدا می کند. تمامی نمونه ها بتن سبک لیکا با عیار سیمان 500 کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان 0/30 و 0/45 ساخته شده است. ابتدا طرح شاهد فاقد متاکائولین تهیه، سپس طرحهایی با جایگزینی 10، 15 و 20 درصد وزنی سیمان با متاکائولین ساخته شد. مقادیر مخلوط های بتنی در جداول 5 و 6 نشان داده شده است.

جدول 5: طرح اختلاط بتن سبک لیکا با نسبت آب به سیمان 0/30

وزن مخصوص	W/B	فوق روان کننده	آب	ماسه ریز (فیلر)	ریزدانه سبک	درشتدانه سبک	متاکائولین	سیمان	شماره طرح
1465/61	0/30	1/5	150	250	447/66	117/95	-	500	SH
1461	0/30	2	150	250	443/05	117/95	50	450	M3010
1458/67	0/30	2/25	150	250	440/72	117/95	75	425	M3015
1456/34	0/30	2/5	150	250	438/39	117/95	100	400	M3020

جدول 6: طرح اختلاط بتن سبک لیکا با نسبت آب به سیمان 0/45

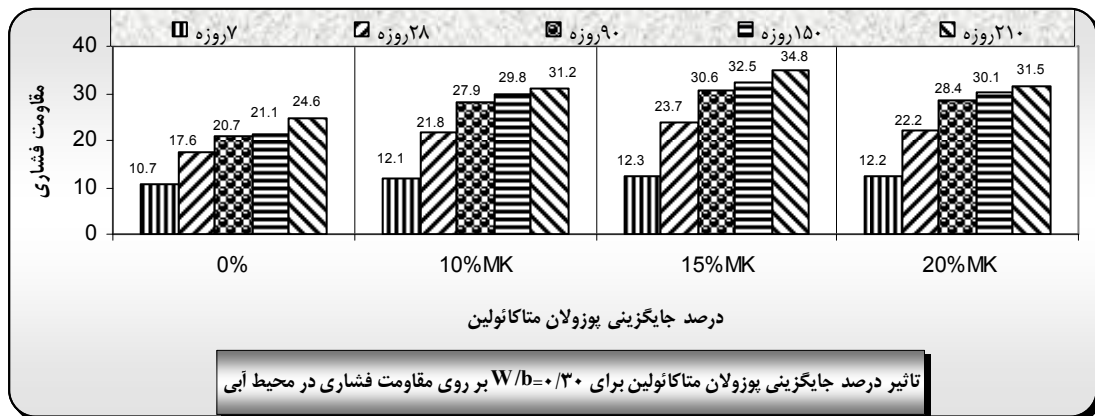
وزن مخصوص	W/B	فوق روان کننده	آب	ماسه ریز (فیلر)	ریزدانه سبک	درشتدانه سبک	متاکائولین	سیمان	شماره طرح
1460/60	0/45	-	225	250	367/65	117/95	-	500	SH
1455/98	0/45	-	225	250	363/03	117/95	50	450	M4510
1453/65	0/45	-	225	250	360/70	117/95	75	425	M4515
1451/31	0/45	-	225	250	358/36	117/95	100	400	M4520

3- عمل آوری و نگهداری نمونه ها

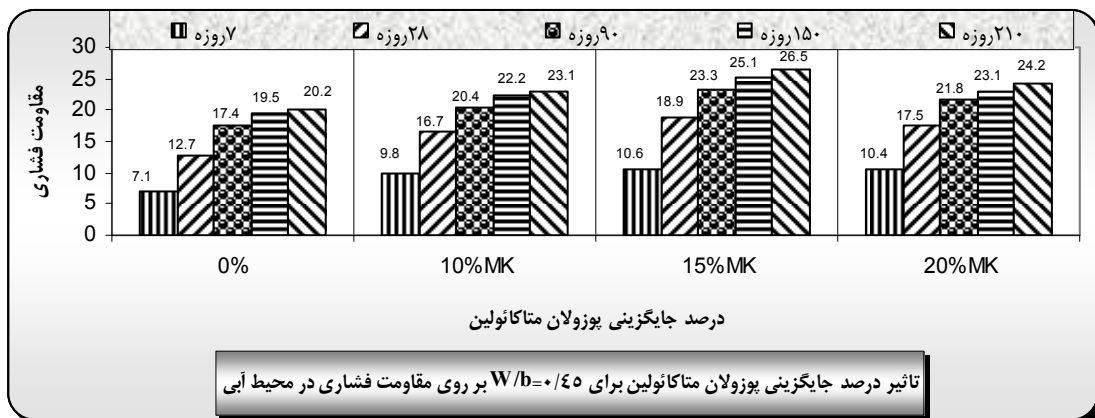
تمام نمونه ها بعد از یک روز از قالب خارج شده و در شرایط استاندارد عمل آوری گردیدند. سپس نمونه ها تا زمان انجام آزمایشها به محل های اعمال شرایط محیطی آزمایشگاهی و در محیط های مهاجم کلریدی و سولفاته قرار داده شده اند.

نتایج آزمایشها**1- مقاومت فشاری**

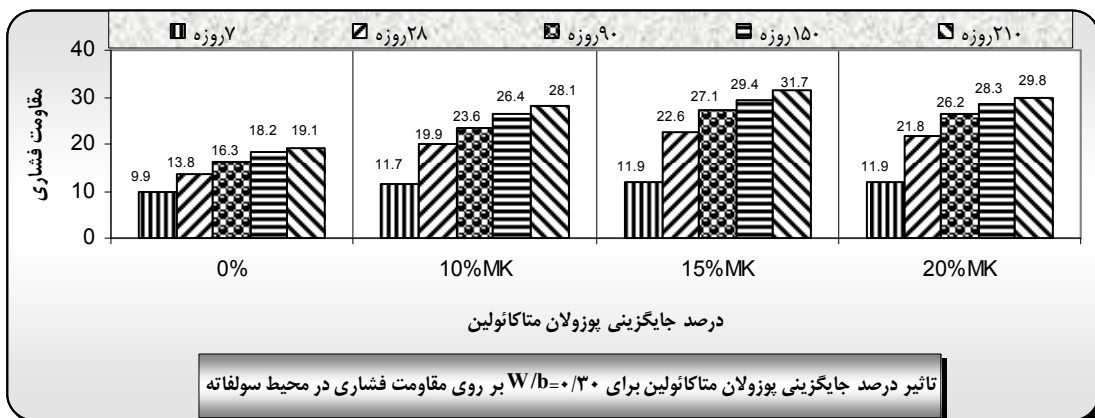
آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی 10*10*10 سانتیمتر، مطابق استاندارد BS 1881 : Part 116 در سنین 7، 28، 90، 150 و 210 روز انجام گرفت که نتایج حاصله (بر حسب مگاپاسکال) در نمودار 1 تا 6 نشان داده شده است.



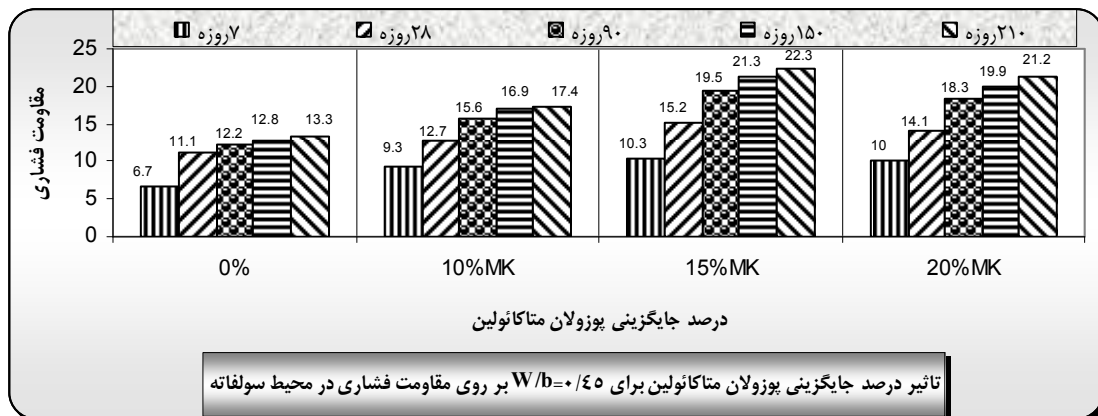
نمودار 1: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط آبی



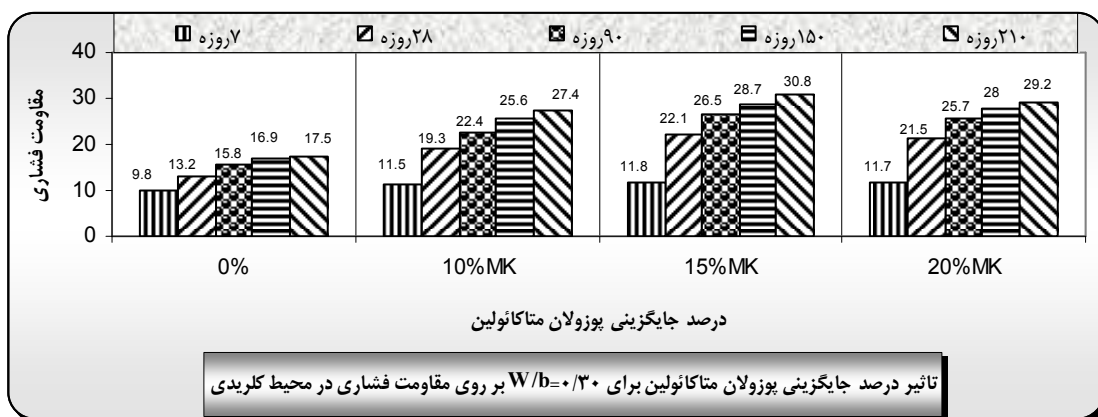
نمودار 2: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط آبی



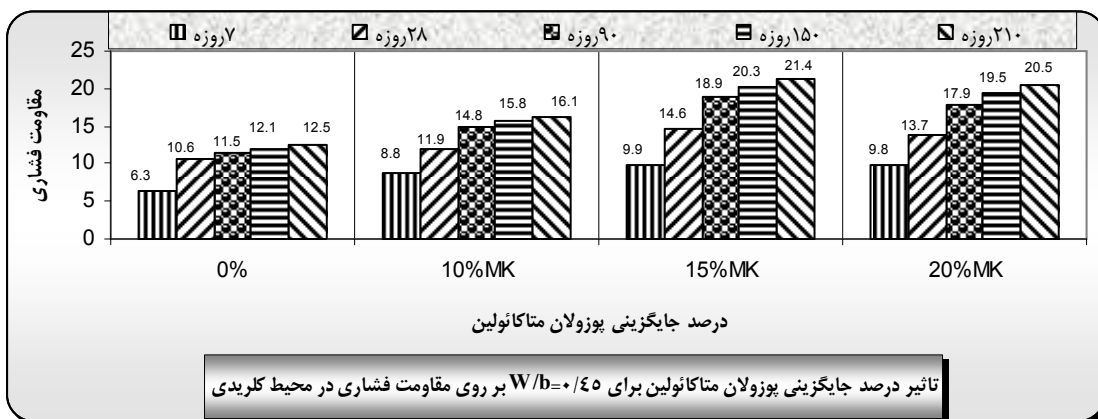
نمودار 3: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط سولفات



نمودار 4: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط سولفات



نمودار 5: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط کلریدی



نمودار 6: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در محیط کلریدی

مطابق با نتایج این نمودارها، نمونه های بتن سبکدانه لیکا حاوی متاکائولین دارای مقاومت فشاری و دوام بهتری نسبت به بتن شاهد می باشند. بیشترین تاثیر پوزولان متاکائولین در بتن، با جایگزین کردن این پوزولان با 15 درصد وزنی سیمان بوجود می آید. از نتایج حاصله از نمودارها این چنین استنباط می شود که متاکائولین در کوتاه مدت تاثیر بیشتری بر بتن سبک خواهد داشت بطوریکه افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی پوزولان متاکائولین بعد از 28 روز عمل آوری در محیط آبی برای دو نسبت آب به سیمان 0/30 و 0/45 به ترتیب 65 و 48 درصد می باشد.

تاثیر این پوزولان در شرایط محیطی مهاجم، با درصدی کمتر تقریباً مشابه شرایط آبی می باشد با این تفاوت که در حالت مهاجم با جایگزینی 15 الی 20 درصد پوزولان با سیمان خواص مقاومتی و دوام تقریباً یکسانی بدست می آید.

2- درصد ضریب تخلخل

آزمایش درصد ضریب تخلخل بر روی نمونه های $10*10*10$ سانتیمتر، مطابق استاندارد ASTM C642-97 در سنین 7، 28، 90، 150 و 210 روز انجام گرفت که نتایج حاصله در نمودار 7 و 8 نشان داده شده است [8].

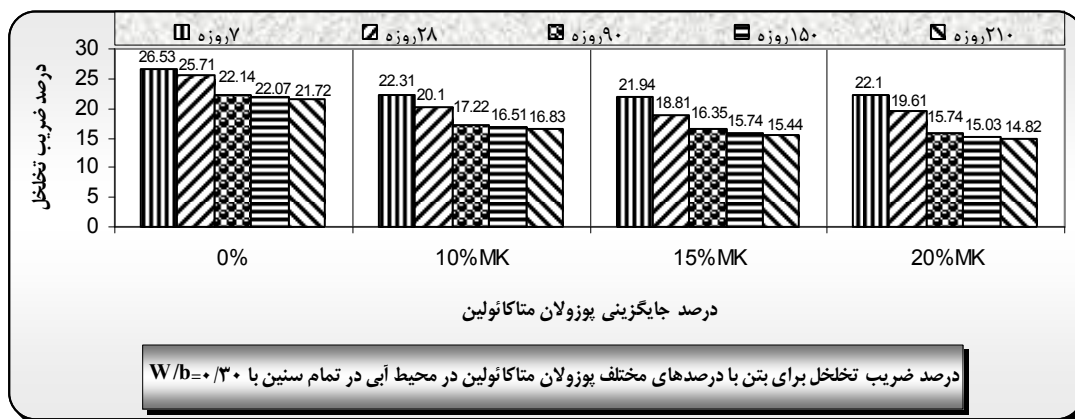
درصد ضریب تخلخل از فرمول زیر بدست می آید:

$$\text{درصد ضریب تخلخل (\%)} = \left(\frac{A - B}{V} \right) * 100$$

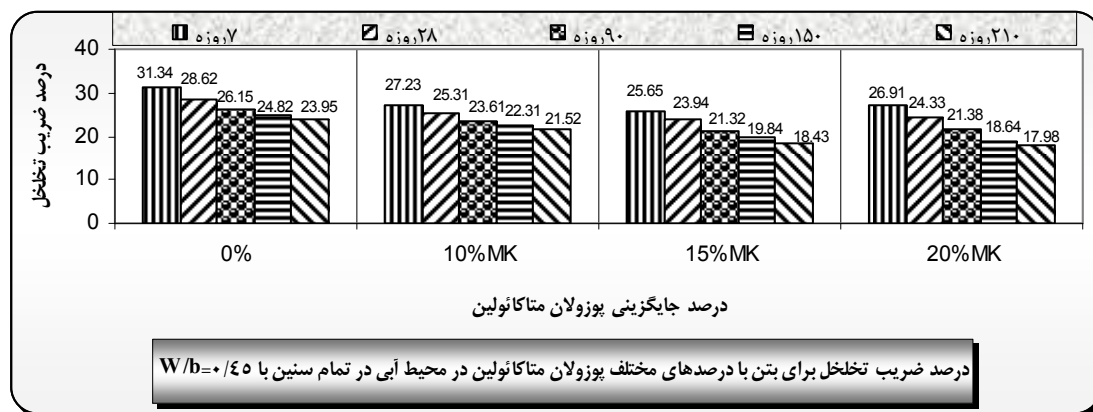
A = وزن نمونه بعد از قرار گرفتن 48 ساعت در دمای 105 ± 5 در داخل اون

B = وزن نمونه با سطح خشک

V = حجم نمونه مورد آزمایش



نمودار 7: نتایج آزمایش درصد تخلخل در محیط آبی



نمودار 8: نتایج آزمایش درصد تخلخل در محیط آبی

نتایج این آزمایش بیانگر آن است که افزودن متاکائولین باعث بهبود چشم گیری در کاهش تخلخل و کم کردن فضاهای خالی بتن می شود که اثر این پوزولان در دراز مدت در بتن پوزولانی بیشتر می باشد. همانگونه در نمودارهای ضریب تخلخل هم ملاحظه می شود با افزودن درصد جایگزینی پوزولان در بتن سبک این اثر افزایش می یابد بطوریکه با جایگزین کردن 20 درصد پوزولان با سیمان، تخلخل کمتر از سایر درصدهای جایگزینی شده است.

نتیجه گیری



- با توجه به تحقیق انجام شده بر روی طرح اختلاط و خصوصیات بتن سبک با سبکدانه لیکا و با طرح بهینه شده، نتایج زیر بدست آمده است:
- * بکارگیری طرح اختلاط بتن سبک با منحنی اصلاح شده فولر و تامسون، ضمن کاهش مقدار سیمان مصرفی افزایش تراکم بتن حاصل، بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن را بدنبال دارد.
 - * بکارگیری متاکائولین در بتن سبک بهینه شده تاثیر چشم گیری در بهبود خصوصیات از قبیل مقاومت فشاری و ضریب تخلخل داشته است. تاثیر متاکائولین در کاهش تخلخل و متراکمتر شدن نمونه های بتن سبک بسیار حائز اهمیت است. مقدار نفوذپذیری بتن های پوزولانی در هر دو نسبت آب به سیمان بعد از 7 ماه کاهش قابل ملاحظه ای را نشان می دهد که این کاهش برای دو نسبت آب به سیمان 0/30 و 0/45 به ترتیب 51 و 21 درصد نسبت به بتن شاهد می باشد.
 - * پوزولان متاکائولین باعث بهبود در مقاومت فشاری بتن سبک می شود که این روند رشد مقاومت در سنین کوتاه مدت با شتاب بیشتری انجام می گیرد. درصد افزایش مقاومت فشاری برای دو نسبت آب به سیمان 0/30 و 0/45 بعد از 28 روز به ترتیب 65 و 48 می باشد.
 - * بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن سبک حاوی پوزولان متاکائولین برای هر دو نسبت آب به سیمان مشهود می باشد که این بهبود خصوصیات در نسبت آب به سیمان پایینتر محسوستر می باشد.
 - * بررسی نتایج بدست آمده در محیط های سولفاتی و کلریدی، اثر پوزولان را رضایت بخش نشان می دهد. علت این اثر را می توان در متراکمتر شدن بتن سبک حاوی متاکائولین و کاهش نفوذ مواد مضر به داخل خلل و فرج بتن سبک دانست. این عملکرد متاکائولین را می توان در نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و ضریب تخلخل مشاهده کرد.
 - * نفوذ مواد مهاجم در هر دو حالت شاهد و پوزولانی در بتن سبک با نسبت آب به سیمان پایین تر، کمتر می باشد و بتن های پوزولانی نسبت بتن شاهد دارای شرایط بهتری در محیط مخرب می باشند.

مراجع

1. C.S.Poon, S.C.Kou, L.Lam, "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete", Hong kong, china, 2006, pp.858-865
2. T.C.Powers, L.E.Copeland, J.C.Hayes, and H.M.Mann, 1945. Permeability of portland cements paste, proceeding, ACI Journal, Vol. 51, pp 285-298
3. E.G.Newy, 2000. Reinforced concrete: A Fundamental Approach, 4th ed. (1st ed., 1985), prentice hall, Upper Saddle River, N.J.
4. B.H.A.Hillemeier, High Performance Concrete Specialized for Acid Resistance, "Concrete and development first international conference", Tehran, Iran, 2001, pp.425-443.
5. Puntke, W., Granulometrische Matrixoptimierung, Grundlagen and Anwendungsbeispiele, Wayss & Freytag, Baustoffaborschrift, unverffentlicht, Frankfurt, Main, Marz 1992.
6. C.Andrade, N.A.Sanguan and N.Roux, "Durability and life-expectancy conferency of ultra-high strength concrete", Fourth Cement/ACI International Conference on Durability, Sydeny, Australia. 1997. pp. 695-708.
7. M.N.Haque, H.AI-Khaiat, O.Kayali, "Strength and durability of lightweightconcrete", Kuwait, 2004, pp.307-314.
8. V.Saraswathy, Ha-Won Song, "Corrosion performance of rice husk ash blended concrete", Seoul, Republic korea, May 2006