بررسی تاثیر میزان هوای غیر عمدی بر مقاومت و دوام بتن حاوی مواد افزودنی طبیعی و شیمیایی

امید بهنامی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ایران

رضا فرخ زاد
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ایران
R.farokhzad@qiau.ac.ir

چکیده

جهت استفاده از بتن به عنوان یک ماده ساختمانی با کاربردهای متعدد، می بایست به خواص مکانیکی و دوامی آن توجه شود. امروزه خواص دوامی بتن، به دلیل اهمیت طول عمر سازه ها، مورد توجه محققین و دانشمندان قرار گرفته است. در تمامی خواص ذکر شده میزان هوای غیرعمدی بتن، رابطه ای ویژه با خواص مکانیکی و دوامی آن دارد. در تحقیق پیش رو به بررسی رابطه بین هوای غیرعمدی و خواص مکانیکی و دوامی بتن پرداخته شده است. همچنین تاثیر مواد افزودنی شیمیایی و طبیعی شامل زئولیت، متاکائولن، میکروسیلیس و درصد های مختلف روان کننده بر روی هوای غیرعمدی بتن مورد توجه قرار گرفته است. نمونه ها با آزمایش های اسلامپ، هوای بتن، نفوذپذیری آب، مقاومت الکتریکی، جذب آب و مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد بتن حاوی میکروسیلیس و زئولیت به ترتیب کمترین میزان هوا را دارد. نمونه های دارای متاکائولن و زئولیت به ترتیب بیشترین جذب آب را دارند و بتن های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن به ترتیب کمترین میزان جذب آب را دارند. در آزمایش مقاومت الکتریکی در سن ۷ و ۲۸ روزه، نمونه شامل متاکائولن و زئولیت به ترتیب بیشترین نتایج را نشان داده اند. در سن ۹۰ روزه، نمونه حاوی زئولیت و میکروسیلیس به ترتیب دارای بیشترین مقاومت الکتریکی می باشند. در مورد مقاومت فشاری نیز نمونه دارای میکروسیلیس و متاکائولن به ترتیب مقاومت بالایی دارند. نمونه های حاوی زئولیت در سن ۷ روزه مقاومت کمتری از خود نشان دادند که در سنین بالاتر رشد نسبی بهتری داشتند. همچنین می توان به این نتیجه رسید که با افزودن میکروسیلیس و ۱,۵٪ روان کننده به نمونه بتن، کمترین میزان هوای بتن و بیشترین مقدار مقاومت فشاری حاصل می گردد. در مجموع نتایج نشان داد، اگر میزان هوای غیر عمدی بتن کاهش داده شود، به صورت مستقیم یا غیر مستقیم خواص مکانیکی و دوامی بتن افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: هوای غیر عمدی بتن، زئولیت، متاکائولن، میکروسیلیس، روان کننده.

مقدمه

می دانیم که بتن تشکیل شده است از دانه های درشت شن و بین این دانه های درشت، دانه های متوسط ماسه جای می گیرند و بین این دانه های متوسط نیز، دانه های ریز سیمان قرار می گیرد. البته شن و ماسه نیز خودشان به دانه های درشت، متوسط و ریز تقسیم می گردند. با توجه به نوع دانه بندی و تراکم بتن، همچنان فضای خالی در بتن وجود خواهد داشت. البته ذکر این نکته در اینجا لازم است که میزان آب آزاد در بتن بعد از خشک شدن تبدیل به فضای خالی می گردد؛ همچنین درصد زیاد سنگدانه های درشت در مخلوط بتن منجر به افزایش درصد فضای خالی و نهایتا کاهش مقاومت می گردد؛ حتی درصد زیاد سنگدانه های ریز در مخلوط بتن همین اثر را دارد ولی به مراتب کمتر از سنگدانه های درشت است. همانگونه که بیان گردید هوای بتن بر روی خواص مکانیکی و دوامی آن موثر است؛ به عنوان مثال همواره مقاومت فشاری بتن ارتباط مستقیم با تراکم بتن دارد و نسبت معکوس با حجم منافذ آن دارد. هرچه بتن متراکم تر باشد تاب فشاری آن بیشتر است.

از آنجا که تعیین میزان هوای بتن نیازمند دقت بالایی می باشد و تغییرات در میزان و شکل مصالح، افزودنی ها و ... بر روی هوای غیر عمدی بتن موثر است، لذا تحقیقات و پژوهش هایی در این زمینه صورت پذیرفته است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

مهدی ولی پور [۱] در سال ۱۳۸۹ مطالعه آزمایشگاهی نفوذپذیری گاز در بتن های توانمند حاوی پوزولان های متاکائولن و میکروسیلیس را انجام داده و بیان نموده که فرآیند تولید متاکائولن کنترل شده بوده و به عنوان یک پوزولان مهندسی شده شناخته می شود. تولید متاکائولن با آلایندگی کمتر و مصرف انرژی محدودتر همراه است پوزولان متاکائولن یکی از جدیدترین پوزولان ها در تولید بتن های توانمند محسوب می شود. در این تحقیق، نفوذپذیری گاز بتن های حاوی متاکائولن (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی) و میکروسیلیس (۵، ۷,۵ و ۱۰ درصد جایگزینی) بررسی شده و نتایج آن با بتن شاهد مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان از اثرات مثبت استفاده از پوزولان متاکائولن در مقایسه با میکروسیلیس دارد.

رزاقی و همکاران [۲] در سال ۱۳۸۹ به بررسی تاثیر جایگزینی سیمان با متاکائولن در خواص رفتارشناسی و مکانیکی ملات خودتراکم پرداخته اند. به منظور بررسی تاثیر پودر متاکائولن به عنوان جایگزین سیمانی بر خواص مکانیکی و رفتارشناسی ملات خودتراکم، ۸ طرح اختلاط حاوی صفر،۲۰ و ۳۰ درصد متاکائولن در دو سطح روانی با نسبتهای آب به سیمان ۳۵ درصد و ۴۵ درصد ساخته شد. تحلیل نتایج بدست آمده نشان می دهد که حضور متاکائولن در ملات خودتراکم تا حد زیادی خواص رفتارشناسی و مکانیکی ملات را تحت تاثیر قرار داده است. از این رو با دستیابی به مقدار بهینه ی متاکائولن در ملات سیمانی خودتراکم می توان علاوه بر دستیابی به خواص مکانیکی مناسب، خواص رفتارشناسی را نیز تا حد زیادی بهبود بخشید.

جاویدان و همکاران [۳] در سال ۱۳۹۱ بر روی تاثیرات همزمان استفاده از زئولیت و متاکائولن بر خواص بتن به ارائه مقاله ای پرداخته است. در این مقاله ده طرح اختلاط به شیوه ای طرح ریزی شده که در آن تاثیر این دو ماده سیمانی جایگزین چه به صورت مجزا و چه به صورت هم زمان بررسی شده است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته جایگزینی ۱۵٪ متاکائولن، مقاومت فشاری را افزایش می دهد و از ۲۰٪ به بالا مقاومت فشاری کاهش می یابد.

شکرچی زاده و همکاران [۴] در رابطه با بهبود خواص بتن های توانمند با استفاده از متاکائولن مقاله ای ارائه داده اند. بدین مضمون که متاکائولن یکی از پوزولان های فعال است که در دهه های اخیر مورد استفاده قرار می گیرد. این ماده که از پختن رس کائولن بدست می آید به منظور افزایش مقاومت مکانیکی و پایایی بتن و در مواردی بهبود ویژگی های ظاهری بتن های تزئینی کار برد دارد. در این تحقیق اثرات جایگزینی این پوزولان با سیمان با درصد های پنج، ده و پانزده بر مشخصات بتن تازه، روانی، درصد هوا، زمان گیرش، چگالی، مقاومت فشاری، خمشی، کششی برزیلی (و پایایی) عمق نفوذ در برابر آب، نفوذ پذیری هوا، جذب آب، مقاومت الکتریکی، پتانسیل واکنش سیلیکاتی

قلیایی و نفوذ یون کلر با بتن شاهد بدون پوزولان مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود خواص بتن با افزایش درصد متاکائولن بوده است.

رمضانیانپور و همکاران [۵] در ارتباط با زئولیت و اثر آن بر مقاومت خمیر و ناحیه انتقال مقاله ای ارائه کرده اند. در این مقاله آمده است که مقاومت بتن مهمترین خاصیت و مشخصه بتن نزد طراحان و مهندسان کنترل کیفیت بتن می باشد. دلیل این امر آنست که در مقایسه با سایر خواص ، مقاومت بتن به آسانی قابل آزمایش و اندازه گیری است. علاوه بر این، بسیاری از خواص بتن ، نظیر مدول ارتجاعی ، ضد آب بودن یا نفوذناپذیری و مقاومت در مقابل هوازدگی و عوامل ایجاد کننده آن نظیر نفوذ آب حاوی املاح مضر، مستقیما با مقاومت مربوط بوده و می توان از نتایج مقاومت به آن خواص پی برد. از آنجا که سنگدانه ها عموما متراکم و با مقاومت بالا هستند، لذا تخلخل خمیر سیمان سخت شده و ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر، اغلب تعیین کننده مقاومت مشخصه بتن های معمولی است. در این مقاله که حاصل یک پژوهش آزمایشگاهی است، استفاده از زئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی در بتن بررسی و اثر آن بر مقاومت خمیر و ناحیه انتقال ارزیابی شده است. علاوه بر آن، اثر عوامل دیگر موثر بر مقاومت فشاری بتن، از جمله نسبت آب به سیمان، عمل آوری و سن بتن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از انجا که مقاومت تک محوری فشاری اغلب به عنوان نشانه مقاومت بتن انتخاب می شود، لذا رابطه آن با مقاومت کششی نیز بررسی شده است. ویژگی های ناحیه انتقال به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDX مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد افزودن زئولیت در سنین مختلف و سیستم های عمل اوری مختلف اثرات متفاوتی بر مقاومت فشاری دارد. لیکن تصاویر SEM به وضوح اثر مثبت زئولیت را در خواص ناحیه انتقال نشان می دهد.

پیکرنگار و همکاران [۶] در مورد بررسی دوام بتن حاوی متاکائولن و خاکستر بادی مقاله ای ارائه نموده اند. در این مطالعه سعی بر آن است که دوام نمونه های بتنی حاوی پوزولان های متاکائولن و خاکستر بادی با جایگزینی به ترتیب ٪ ۱۵ و ٪ ۳۰ وزنی سیمان در مقایسه با بتن معمولی در مدت شش ماه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. در این راستا نمونه های آزمایشی با سه نسبت آب به مواد سیمانی مختلف تهیه شد. نمونه ها در دو شرایط محیطی نمکی مغروق و نمکی با سیکل تر و خشک حاوی ٪ ۵ کلرید سدیم نگهداری گردید. نتایج تحقیق حاکی از آن است که استفاده از پوزولان سبب بهبود خواص دوام بتن می شود.

فرخ زاد و همکاران [۷] در سال ۱۳۹۳ در مورد محدوده دانه بندی مناسب برای ساخت بتن خودتراکم با استفاده از پارامترهای طبقه بندی خاک، مقاله ای ارائه نموده است. بدین مضمون که امروزه از بتن خودتراکم به دلیل دارا بودن خواص تازه و سخت شده مناسب، به صورت انبوه در پروژه های عمرانی استفاده می شود. این خصوصیات به پارامترهای متعددی از قبیل ترکیب و میزان خمیر سیمانی، میزان حجم سنگدانه، دانه بندی سنگدانه و عوامل دیگر وابسته می باشد. در این بین سنگدانه ها می توانند در تأمین خواص مورد نیاز بتن خودتراکم تأثیر قابل توجهی داشته باشند. از آنجا که افزایش مقدار مصالح سنگی در بتن سبب کاهش میزان خمیر سیمان مصرفی جهت پرکردن فضای خالی سنگدانه ها می شود، لذا در این مقاله هدف، دستیابی به محدوده دانه بندی مناسب با کمترین فضای خالی با استفاده از روابط کاربردی ضریب یکنواختی و ضریب انحناء در مکانیک خاک می باشد. نتایج نشان می دهد که رابطه مستقیم و معکوسی بین به ترتیب ضریب انحناء و ضریب یکنواختی با میزان فضای خالی در مصالح سنگی وجود دارد.همچنین محدوده دانه بندی به دست آمده برای ساخت بتن خودتراکم شامل دانه بندی هایی است که تمامی ضوابط پذیرش خصوصیات تازه و سخت شده بتن خودتراکم را ارضاء میکند.

فرخ زاد و همکاران [۸] در سال ۱۳۹۴ به بررسی تاثیر سولفات ها بر مقاومت فشاری انواع بتن پوزولانی و اندازه گیری میزان نفوذ با آزمون فراصوت در سنین مختلف پرداخته است. در این مطالعه از انواع مختلف مواد افزودنی شامل میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی، متاکائولن و نانوسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گرفت. سپس نمونه ها با آزمایش مقاومت فشاری و آزمون غیر مخرب عبور امواج فراصوتی مورد ارزیابی

قـرار گرفتنـد. نتـایج نشـان داد بـتن هـای حـاوی میکـرو و نانوسـیلیس بـه ترتیـب بیشـترین مقاومـت را در برابـر حمـلات سولفاتی دارند. بررسـی هـای سـرعت امـواج فراصـوتی نیـز نشـان داد کـه بـا افـزایش سـن سـرعت امـواج افـزایش محسوسـی دارد. همچنـین بـا افـزایش تشـکیل مـاده مخـرب اترینگایـت در بـتن سـرعت مـوج نیـز افـزایش مـی یابـد. بیشـترین تـاثیر افزایش سرعت با افزایش اترینگایت در نمونه های سولفات کلسیم مشاهده شد.

پیاسـتا و همکـاران [۹] در سـال ۲۰۱۵ بـرروی تـاثیر هـوای غیـر عمـدی بـرروی جمـع شـدگی مخلـوط بـتن هـای سـیمانی مطالعاتی انجـام داده انـد کـه عبارتسـت از، کشـش انقباضـی بـتن بـا هـوای غیـر عمـدی (AE) بیشـتر از جمـع شـدگی بـتن های ساخته شده با مقدار سـیمان مشـابه و هـوای عمـدی مـی باشـد. نتـایج بصـورت واضـح نشـان مـی دهـد کـه افـزایش در کشش انقباضـی بـا افـزایش مقـدار حفـرات هـوا، صـرفنظر از نـوع سـیمان مـرتبط اسـت. جمـع شـدگی بیشـتر (AE) ممکـن اسـت بـه احتمـال زیـاد بـا سـاختار میکروسـکوپی ترکیبـی از تخلخـل و در حالـت خـاص، نفـوذ خمیـر سـیمان در حفـرات هوا، ارتبـاط داشـته باشـد. ورود خمیـر سـیمان در حفـرات هـوا و در قسـمت هـای سـطحی بـا تخلخـل بیشـتر ممکـن اسـت سـرعت تبخیـر آب را افـزایش داده و باعـث کـاهش رطوبـت و جمـع شـدگی بـر اثـر خشـکی گـردد. یکـی دیگـر از دلایـل افزایش انقباض ممکن است افزایش در حجم خمیر سیمان و کاهش در حجم سنگدانه ها در بتن (AE) باشد.

ماهوتیـان و همکـاران [۱۰] در سـال ۲۰۱۵ بـر روی اثـر پـودر کـربن فعـال بـر مشخصـات حفـرات هـوای بـتن حـاوی خاکستر بادی تحقیقاتی انجام داده انـد بـدین شـرح کـه یکـی از روش هـای رایـج جهـت کـاهش بخـار جیـوه منتشـر شـده از زغال سنگ، تزریق پودر کـربن فعـال (PAC) بـه گازهـای درون لولـه بخـار بـرای جـذب سـطحی بخـار جیـوه مـی باشـد. اگـر (PAC) بـا خاکسـتر بـادی در تـه نشـین کننـده الکترواسـتاتیکی، جـایگزین شـود، توانـایی اسـتفاده از خاکسـتر بـادی جمـع شـده بـه عنـوان مکمـل مخلـوط سـیمانی در بـتن وجـود خواهـد داشـت. ایـن مطالعـه تـاثیر (PAC) در خاکسـتر بـادی بـر روی شـبکه حفـرات هـوا و در نتیجـه خـواص بـتن سـاخته شـده بـا مخلـوط هـوای غیـر عمـدی را مـورد آزمـایش قـرار مـی دهد. نمونه ها شـامل آنهـایی کـه (PAC) اضـافه شـده بـه خاکسـتر بـادی در آزمایشـگاه و همچنـین نمونـه هـای (PAC) کـه خاکسـتر بـادی جمـع شـده در یـک واحـد تولیـدی بـوده انـد، مـی باشـند. مقـدار حفـره هـوا، در بخـش سـطحی مشـخص و همچنین میزان فضای بتن سخت شده، توسط یک تکنیک آنالیز تصویری روی اپوکسی اشباع شده تعیین گردید.

نوس و همکاران [۱۱] در سـال ۲۰۱۵ در رابطـه بـا ارزیـابی مقاومـت بـتن کربناتـه از طریـق انـدازه گیـری نفـوذ پـذیری هـوا و در مورد طراحـی بـر پایـه اجـرا و تعیـین بـتن مقـاوم کـه مـوثرترین راه بـوده و اسـتفاده از آن افـزایش یافتـه اسـت بررسـی هایی انجام داده انـد. در هـر صـورت جهـت دسـتیابی بـه سـختی، مقاومـت بـا مشخصـات مربوطـه بایسـتی در محـل ارزیـابی گردد. این بررسی می تواند اطلاعـات مفیـد واقـع بینانـه ای جهـت تخمـین خـدمت رسـانی سـازه هـای بتنـی جدیـد سـاخته شـده، را ارائـه دهـد. بنـابراین ایـن کـار هـدفی در تخمـین سـازگاری روش آزمـایش غیرمخـرب در محـل، جهـت ارائـه اطلاعـات از ایـن دسـت را دارد. یـک مطالعـه مقـدماتی شـامل آزمایشـاتی بـر روی نفوذپـذیری هـوا و مقاومـت کربناتـه مخلوط های بتن مختلف و آنـالیزی از نتـایج آن، صـورت پذیرفتـه اسـت. نتـایج آنالیزهـا یـک مـدل تحلیلـی را بـر پایـه مـدل نظـری مـرتبط بـا نفوذپـذیری هـوا و مقاومـت در برابـر کربنـات هـا ارائـه داده اسـت کـه تخمـین قابـل قبـولی را در مقاومـت کربناسـیون در نتـایج نفوذپـذیری هـوا مـی دهـد. گرچـه تحقیـق بیشـتری جهـت تهیـه اطلاعـات تکمیلـی نتـایج اسـتفاده از یک روش آزمایش ساده که بر اساس آزمایشات کاملا غیرمخرب می باشد نیز نیاز است.

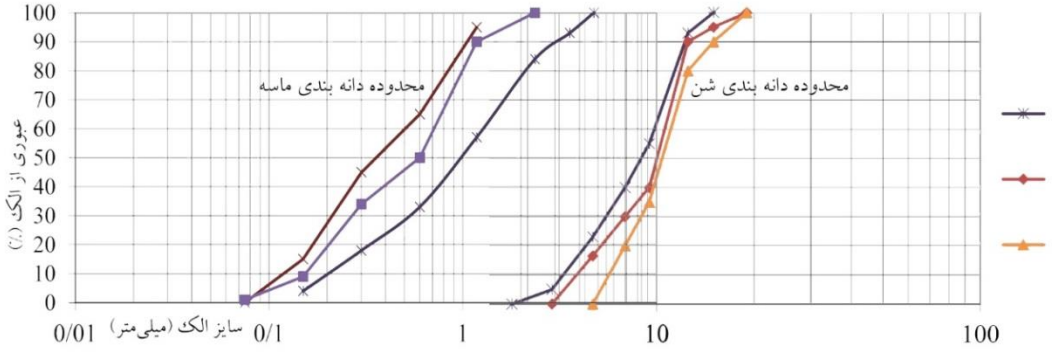
از آنجا که بررسی میزان تـاثیر مـواد افزودنـی مختلـف بـروی هـوای غیـر عمـدی بـتن، تـا کنـون در تحقیقـات و پـژوهش هـا، کمتر مورد توجـه قـرار گرفتـه اسـت، لـذا در تحقیـق پـیش رو سـعی بـر آن شـده، تـاثیر مـواد افزودنـی شـیمیایی و طبیعـی شـامل زئولیـت، متاکـائولن، میکروسـیلیس و درصـدهای مختلـف روان کننـده بـر روی هـوای بـتن بررسـی و رابطـه بـین مقدار هوای بتن و خواص مکانیکی و دوامی آن بدست آورده شود.

برنامه آزمایشگاهی

مواد و مصالح مصرفی

در این مقاله از سیمان پرتلند تیپ دو، استفاده شده است که مقادیر آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

ماسه مصرفی از نوع رودخانه ای با وزن مخصوص ۲۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با اندازه دانه بین ۰,۰۷۵ تا ۴,۷۵ میلیمتر می باشد. درشت دانه از نوع شکسته با وزن مخصوص ۲۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با اندازه دانه بین ۴,۷۵ تا ۱۹ میلیمتر می باشد. این محدوده ها با منحنی دانه بندی تقسیم شده اند که در شکل ۱ نمایش داده شده است. محدوده دانه بندی شن و ماسه مطابق با آئین نامه ASTM C33 انتخاب شده است[۱۳].



شکل ۱- نمودار تقسیم بندی محدوده دانه بندی شن و ماسه

با توجه به اینکه ترکیبات شیمیایی پوزولان ها در بتن، موثر و قابل بررسی است، لذا در طرح های اختلاط مقاله پیش رو، مواد افزودنی به نسبت های مشخصی اضافه گردیده و آزمایشات بروی آن ها انجام گرفته است. از پوزولان‌های استفاده شده در طرح های اختلاط، می توان به میکروسیلیس، متاکائولن، و زئولیت اشاره کرد؛ که مقادیر آنالیز شیمیایی آن ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مقادیر آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان های مورد مصرف

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	kO_2
سیمان	22.57	4.12	3.51	63.22	2.70	1.50	0.18	0.54
میکروسیلیس	93.16	1.13	0.72	-	1.6	0.05	-	-
متاکائولن	51.85	43.87	0.99	0.2	0.18	-	0.01	0.12
زئولیت	67.79	13.66	1.44	1.68	1.2	0.5	2.04	1.42

در این تحقیق، از مایع روان کننده Plasticizer A750 که با ترکیبات پلیمری، دارای جرم حجمی ۱,۱۰ کیلوگرم در لیتر، رنگ قهوه ای تیره، میزان یون کلر و خاکستر صفر، مقدار PH نیز ۷ ($\pm$ ۱) می باشد، استفاده شده است.

طرح اختلاط مورد استفاده

در این پژوهش، طرح های اختلاط گوناگونی با درصدهای مختلف روان کننده (۰٪، ۰,۵٪، ۱٪ و ۱,۵٪)، متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس ارائه شده است؛ در طرح های تهیه شده نسبت آب به سیمان، برابر ۰,۴۵ و عیار سیمان ثابت و برابر (kg/m^3) ۴۰۰ در نظر گرفته شده است. مواد پوزولان، جایگزین سیمان بوده و به مقدار افزودن آن (۱۰٪ وزن سیمان) از میزان سیمان کاسته شده است. طرح های تهیه شده بر اساس نسبت درصد شن به ماسه (۴۰ به ۶۰ به معنای ۴۰٪ شن و ۶۰٪ ماسه)(۶۰ به ۴۰ به معنای ۶۰٪ شن و ۴۰٪ ماسه)، وجود و یا عدم وجود افزودنی بتن و درصد روان کننده، به شرح جدول ۲ نامگذاری گردیده‌اند.

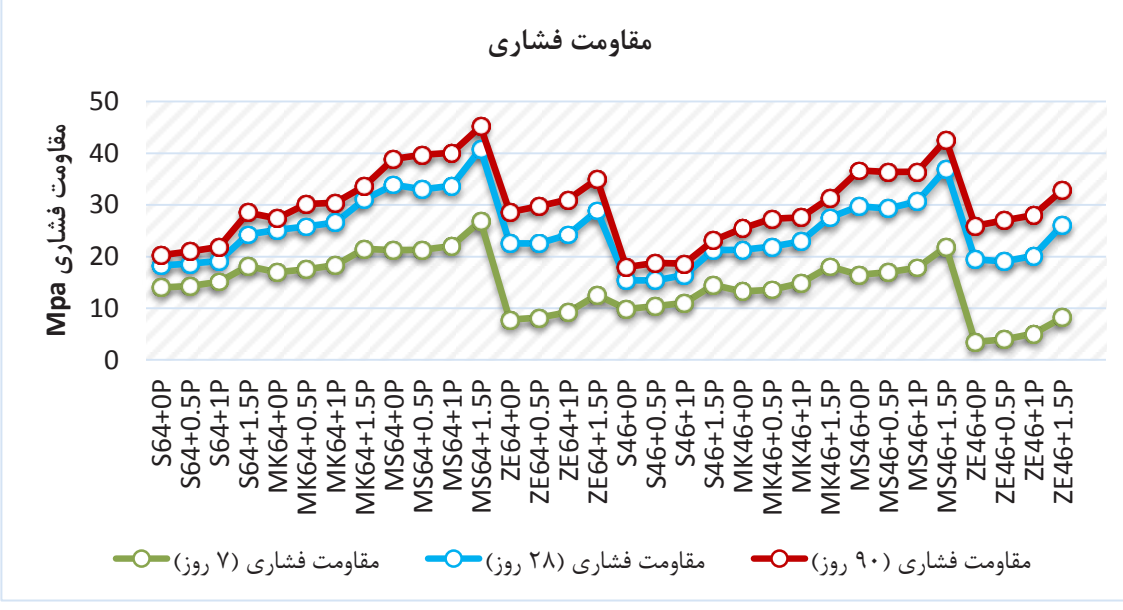
جدول ۲- طرح های اختلاط مورد استفاده

کد طرح	وزن شن (Kg/m^3)	وزن ماسه (Kg/m^3)	وزن سیمان (Kg/m^3)	وزن روان کننده (Kg/m^3)	وزن متاکائولن (Kg/m^3)	وزن میکروسیلیس (Kg/m^3)	وزن زئولیت (Kg/m^3)
S64+0P	۱۰۹۲	۷۲۸	۴۰۰	۰	۰	۰	۰
S64+0.5P	۱۰۹۱,۷	۷۲۷,۸	۴۰۰	۲	۰	۰	۰
S64+1P	۱۰۹۱,۴	۷۲۷,۶	۴۰۰	۴	۰	۰	۰
S64+1.5P	۱۰۹۱,۱	۷۲۷,۴	۴۰۰	۶	۰	۰	۰
MK64+0P	۱۱۱۶	۷۴۴	۳۶۰	۰	۴۰	۰	۰
MK64+0.5P	۱۱۱۵,۷	۷۴۳,۸	۳۶۰	۱,۶	۴۰	۰	۰
MK64+1P	۱۱۱۵,۴	۷۴۳,۶	۳۶۰	۳,۲	۴۰	۰	۰
MK64+1.5P	۱۱۱۵,۱	۷۴۳,۴	۳۶۰	۴,۸	۴۰	۰	۰
MS64+0P	۱۱۱۶	۷۴۴	۳۶۰	۰	۰	۴۰	۰
MS64+0.5P	۱۱۱۵,۷	۷۴۳,۸	۳۶۰	۱,۶	۰	۴۰	۰
MS64+1P	۱۱۱۵,۴	۷۴۳,۶	۳۶۰	۳,۲	۰	۴۰	۰
MS64+1.5P	۱۱۱۵,۱	۷۴۳,۴	۳۶۰	۴,۸	۰	۴۰	۰
ZE64+0P	۱۱۱۶	۷۴۴	۳۶۰	۰	۰	۰	۴۰
ZE64+0.5P	۱۱۱۵,۷	۷۴۳,۸	۳۶۰	۱,۶	۰	۰	۴۰
ZE64+1P	۱۱۱۵,۴	۷۴۳,۶	۳۶۰	۳,۲	۰	۰	۴۰
ZE64+1.5P	۱۱۱۵,۱	۷۴۳,۴	۳۶۰	۴,۸	۰	۰	۴۰
S46+0P	۷۲۸	۱۰۹۲	۴۰۰	۰	۰	۰	۰
S46+0.5P	۷۲۷,۸	۱۰۹۱,۷	۴۰۰	۲	۰	۰	۰
S46+1P	۷۲۷,۶	۱۰۹۱,۴	۴۰۰	۴	۰	۰	۰
S46+1.5P	۷۲۷,۴	۱۰۹۱,۱	۴۰۰	۶	۰	۰	۰
MK46+0P	۷۴۴	۱۱۱۶	۳۶۰	۰	۴۰	۰	۰
MK46+0.5P	۷۴۳,۸	۱۱۱۵,۷	۳۶۰	۱,۶	۴۰	۰	۰
MK46+1P	۷۴۳,۶	۱۱۱۵,۴	۳۶۰	۳,۲	۴۰	۰	۰
MK46+1.5P	۷۴۳,۴	۱۱۱۵,۱	۳۶۰	۴,۸	۴۰	۰	۰
MS46+0P	۷۴۴	۱۱۱۶	۳۶۰	۰	۰	۴۰	۰
MS46+0.5P	۷۴۳,۸	۱۱۱۵,۷	۳۶۰	۱,۶	۰	۴۰	۰
MS46+1P	۷۴۳,۶	۱۱۱۵,۴	۳۶۰	۳,۲	۰	۴۰	۰
MS46+1.5P	۷۴۳,۴	۱۱۱۵,۱	۳۶۰	۴,۸	۰	۴۰	۰
ZE46+0P	۷۴۴	۱۱۱۶	۳۶۰	۰	۰	۰	۴۰
ZE46+0.5P	۷۴۳,۸	۱۱۱۵,۷	۳۶۰	۱,۶	۰	۰	۴۰
ZE46+1P	۷۴۳,۶	۱۱۱۵,۴	۳۶۰	۳,۲	۰	۰	۴۰
ZE46+1.5P	۷۴۳,۴	۱۱۱۵,۱	۳۶۰	۴,۸	۰	۰	۴۰

همانگونه که بیان گردید، جهت مقایسه و بررسی تأثیر افزودنی های نامبرده شده، برای تمامی طرح ها نمونه ای به عنوان شاهد، ساخته شده است. همچنین برای هر طرح اختلاط، خصوصیات تازه بتن شامل آزمایش اسلامپ، دمای بتن، تعیین درصد هوای بتن انجام گرفته است. سپس تمامی طرح های ساخته شده در داخل آب با دما و شرایط استاندارد، جهت عمل آوری قرار گرفتند. در نهایت آزمایش های مقاومت فشاری (نمونه ۱۰*۱۰ برای ۷، ۲۸ و ۹۰ روز)، نفوذپذیری آب (نمونه ۱۵*۱۵ برای ۲۸ و ۹۰ روز)، مقاومت الکتریکی (نمونه ۱۰*۱۰ برای ۷، ۲۸ و ۹۰ روز)، جذب آب اولیه و نهایی (نمونه ۱۰*۱۰ برای ۲۸ و ۹۰ روز) مورد بررسی قرار گرفتند.

سنجش مقاومت فشاری بتن

با توجه به اینکه مهمترین ویژگی که به عنوان مشخصه مکانیکی بتن بیان می شود مقاومت فشاری می باشد، برای سنجش مقاومت فشاری بتن، نمونه ها مطابق استاندارد BS EN 12390-3:2009 [۱۲] ساخته شدند. از قالب های مکعبی به ابعاد ۱۰*۱۰ سانتیمتر استفاده شده و برای سه سن ۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز آماده شده اند. در شکل ۲، مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز کلیه نمونه های ساخته شده نمایش داده شده است.



شکل ۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز کلیه نمونه های ساخته شده

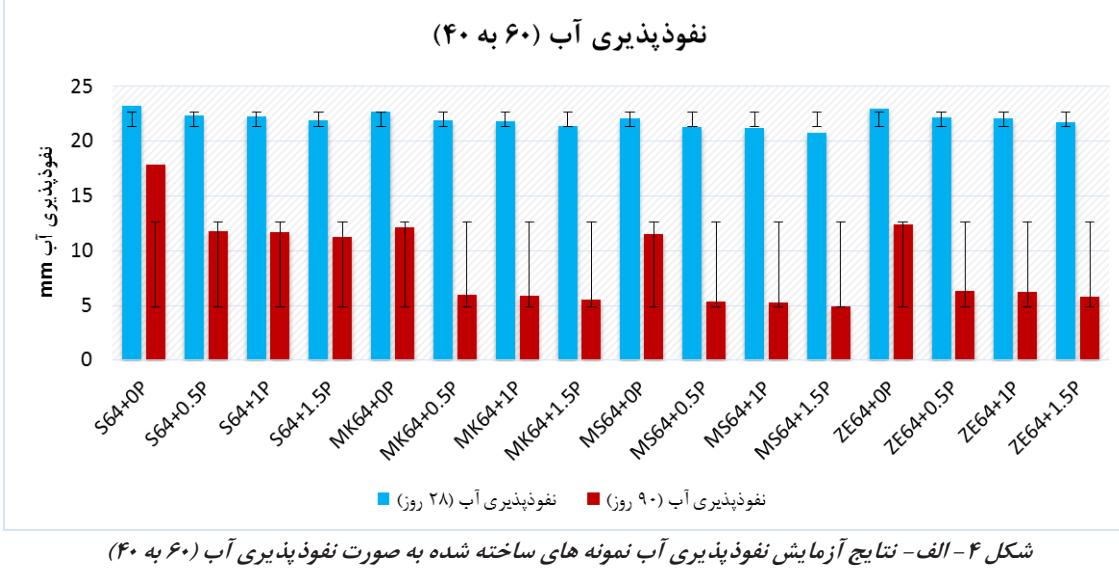
همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می گردد میزان مقاومت فشاری طرح میکروسیلیس به همراه ۱,۵٪ روان کننده MS64+1.5P نسبت به سایر طرح ها بالاتر و همچنین مقاومت فشاری ۷ روز در طرح اختلاط زئولیت بدون روان کننده ZE46+0P از سایرین پایین تر می باشد که در ۲۸ و ۹۰ روز رشد نسبی داشته است. با مقایسه‌ای اجمالی بین حالت نمونه فاقد پوزولان و نمونه دارای زئولیت می توان به این نکته پی برد که این ماده افزودنی در طولانی مدت تأثیر گذار بوده و رشد در سنین بالا، در نمونه های حاوی زئولیت نسبت به سایر طرح ها بیشتر می‌باشد. همانطور که انتظار می رود در تمام نمونه ها با افزایش طول عمل آوری در آب، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد[۳].

نفوذپذیری آب

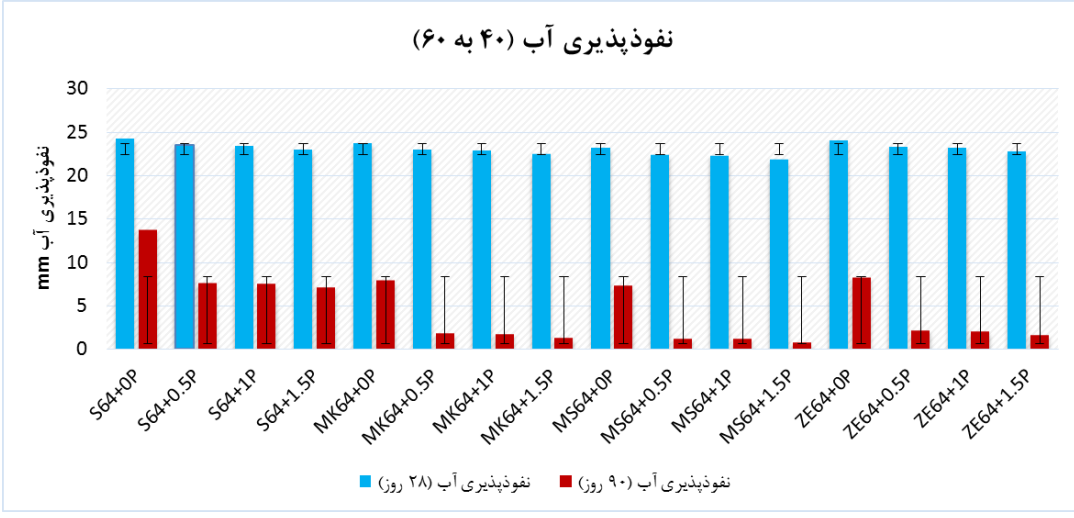
نفوذ پذیری، یک ویژگی مربوط به ریز ساختار بتن است که میزان قابلیت بتن را برای عبور سیالی با ویسکوزیته مشخص، تحت یک گرادیان فشار نشان می دهد. آزمایش نفوذپذیری آب در بتن توسط دستگاه مخصوصی صورت می پذیرد. در این آزمایش سطح فوقانی نمونه در معرض آب تحت فشار قرار داده می شود و پس از برقراری حالت تعادل میزان جریان آب از میان یک ضخامت معین از بتن در یک زمان معین اندازه گرفته می شود. برای بررسی نفوذپذیری آب تحت فشار مطابق استاندارد EN-12390 از قالب های مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵ استفاده گردیده است. پس از انجام آزمایش نمونه ها به دو نیم تقسیم شده و نهایتا میزان نفوذ آب در آن ها قرائت می گردد.

شکل۳- دستگاه نفوذ آب بتن تحت فشار

مقادیر حاصل شده از این آزمایش در شکل ۴ الف و ب قابل مشاهده است.



شکل ۴ - الف- نتایج آزمایش نفوذپذیری آب نمونه های ساخته شده به صورت نفوذپذیری آب (۶۰ به ۴۰)



شکل ۴ - ب- نتایج آزمایش نفوذپذیری آب نمونه های ساخته شده به صورت نفوذپذیری آب (۴۰ به ۶۰)

شکل ۴ - نتایج آزمایش نفوذپذیری آب ۲۸ و ۹۰ روز نمونه های ساخته شده

همانطور که در شکل ۴ (الف و ب)مشاهده می گردد میزان نفوذپذیری آب ۲۸ روز، در طرح S46+0P نسبت به سایر طرح های اختلاط بالاتر و همچنین نفوذپذیری آب ۲۸ روز در طرح اختلاط MS64+1.5P از سایر طرح های اختلاط پایین تر می باشد. همچنین با توجه به نمودار، میزان نفوذپذیری آب در سن ۹۰ روز در اکثر نمونه ها کاهش چشمگیری داشته، بیشترین مقدار آن در ۹۰روز، مربوط به S64+0P و کمترین مقدار متعلق است به MS46+1.5P ، که در رده بعدی نمونه حاوی زئولیت کمترین نفوذپذیری را دارد، علت هم می تواند واکنش زئولیت با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) ناشی از هیدراتاسیون و تولید ژل C-S-H پوزولانیک باشد که موجب بهبود ریز ساختار بتن شده و خلل و فرج آن را کم کرده و موجب ساختار همگن تر بتن شده است.

می توان اینگونه استنباط کرد که در صورت استفاده نکردن از افزودنی و پوزولان، نمونه بتن نفوذپذیری آب بالاتری خواهد داشت. در مجموع نیز با افزودن میکروسیلیس به همراه ۱,۵٪ روان کننده، چه در حالت ۴۰ به ۶۰ و چه در ۶۰ به ۴۰ کاهش نفوذپذیری مناسبی (حدود ۸۶٪ کاهش نفوذپذیری در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد) حاصل خواهد شد.

مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی به عنوان یکی از مشخصه های بتن نشان دهنده برخی از خواص مهم آن از جمله نفوذ پذیری، قابلیت نفوذ یون کلر می باشد. از مقاومت الکتریکی بتن می توان اطلاعاتی در رابطه با پایایی آن بدست آورد. آزمایش اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن در زمره آزمایش های غیر مخرب قرار می گیرد لذا بدون تخریب بتن انجام متوالی آزمایش ها بر روی یک نمونه خاص بتنی امکانپذیر می گردد. بتن تحت تاثیر میدان های الکتریکی مانند خازنی دارای مقاومت عمل می نماید.

برای بررسی مقاومت الکتریکی از قالب های مکعبی با ابعاد ۱۰*۱۰ استفاده گردیده است. پس از تعیین مقاومت الکتریکی با دستگاه ۲ نقطه ای می توان مقاومت الکتریکی ویژه را از فرمول زیر بدست آورد:

$$\rho = R\frac{A}{L}$$

ρ : مقاومت الکتریکی بر حسب اهم-متر

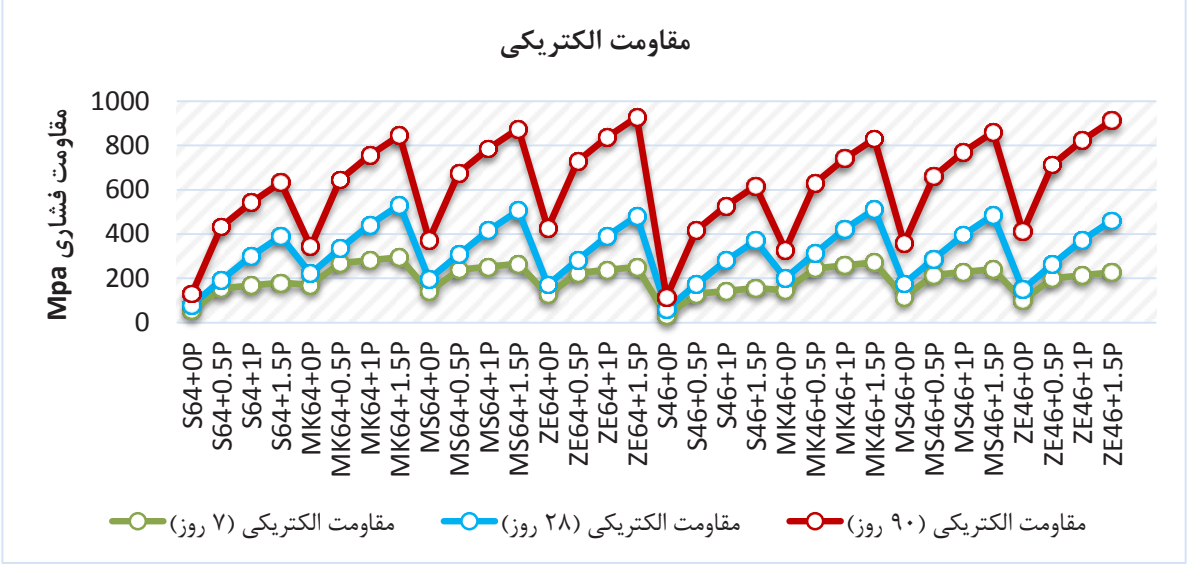
A: سطح مقطع نمونه بتن بر حسب متر مربع

R: مقاومت ظاهری بتن بر حسب اهم

L: طول نمونه بتن بر حسب متر

شکل ۵- دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی

مقادیر مقاومت های الکتریکی در شکل ۶ آمده است.



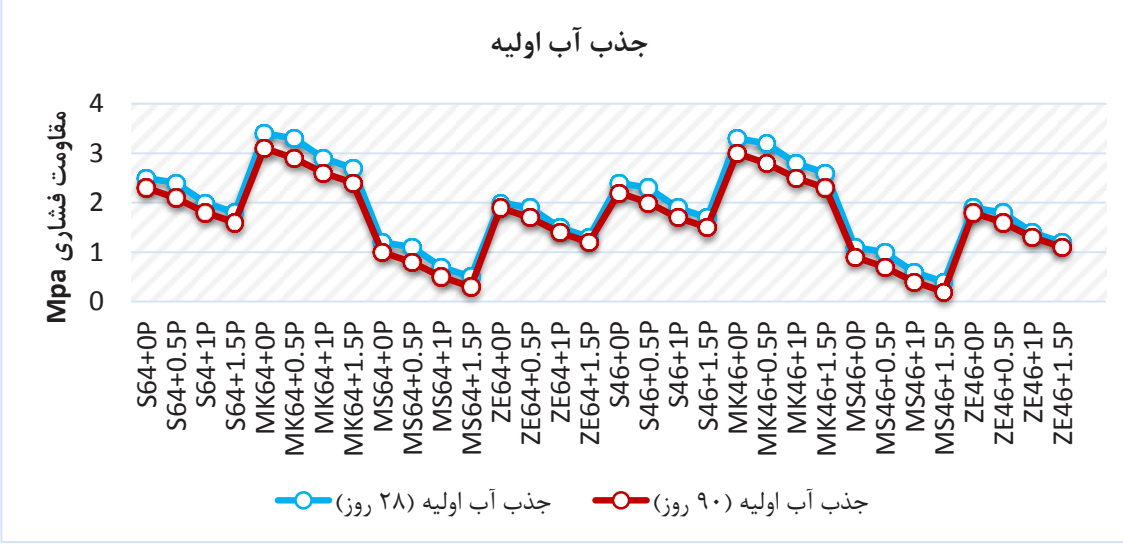
شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تمامی نمونه های ساخته شده

ملاحظه می گردد که کمترین میزان مقاومت الکتریکی ۷ و ۲۸روزه مربوط به S46+0P و بیشترین آن مربوط است به MK64+1.5P. در ۹۰ روز کمترین میزان باز هم مربوط به S46+0P ولی بیشترین مقدار متعلق است به ZE64+1.5P. پوزولان های اضافه شده به طرح های اختلاط، در اکثر موارد سبب ایجاد توزیع ریزتری در میزان اندازه حفرات موجود در نمونه ها و تمرکز یونی کمتر در آن ها می شوند. در نتیجه مقاومت الکتریکی را بیشتر خواهند کرد، به عنوان مثال زئولیت به همراه ۱,۵٪ روان کننده رشد بسیار زیادی در میزان مقاومت الکتریکی در سن ۹۰روز داشته است و یا پوزولان متاکائولن می تواند به افزایش دوام بتن و کاهش نفوذپذیری آن کمک نماید و این مزایا در کنار افزایش مقاومت الکتریکی بتن باعث می شود تا توجیه بیشتری برای مصرف آن داشته باشد[۲] و[۲۱].

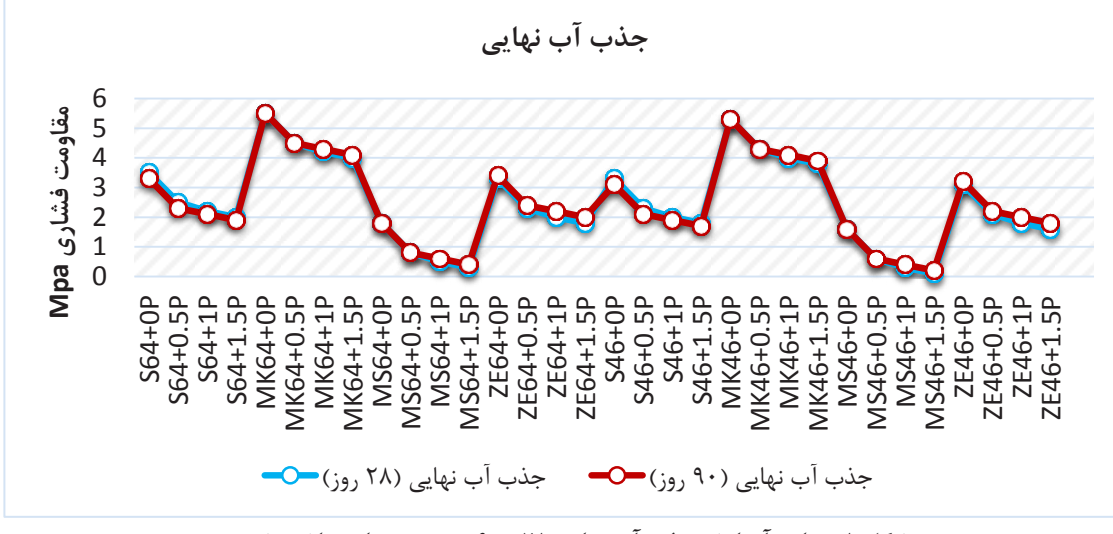
جذب آب

جذب آب بتن، همواره پارامتری موثر در رابطه با دوام و مقاومت بتن بوده است. آزمایش جذب آب یکی از راه هایی می باشد که در تعیین نفوذپذیری بتن استفاده می گردد. در این مطالعه، جذب آب اولیه و نهایی بتن بر روی نمونه های مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتیمتر تهیه و در سن ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شده است. آزمایش جذب آب اولیه مطابق استاندارد ASTM D6489 به وسیله خشک نمودن نمونه و سپس غوطه ور نمودن آن در آب و اندازه گیری افزایش وزن بصورت درصدی از وزن خشک آن بدست آمده است.

آب می تواند هم به صورت مایع و هم بخار از طریق حفرات موبینه به درون جسم متخلخل داخل شود. منظور از جذب، روندی است که طی آن بتن آب را به درون منافذ و حفرات موبینه می کشاند. میزان جذب کل معیاری برای پایایی بتن در نظر گرفته می شود. انجام آزمایش جذب آب نهایی نیز طبق ASTM C642 انجام شده است.



شکل ۷- نتایج آزمایش جذب آب اولیه ۲۸ و ۹۰ روز نمونه های ساخته شده



شکل ۸- نتایج آزمایش جذب آب نهایی ۲۸ و ۹۰ روز نمونه های ساخته شده

با توجه به شکل های ۷ و ۸، در اکثر نمونه ها با افزودن پوزولان، درصد جذب آب اولیه کاهش می یابد و استثنا آن نمونه های حاوی متاکائولن می باشد که از این روند تبعیت نکرده و کمی جذب آب آن بیشتر می باشد. MK64+0P بیشترین جذب آب را داشته و MS46+1.5P کمترین مقدار را داراست. متاکائولن به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان، آب بیشتری جذب می کنند و این باعث کاهش روانی بتن تازه و افزایش مقدار آزمایش جذب آب می شود.

کیفیت بتن توسط CEB [۱۵] به سه رده "ضعیف"، "متوسط" و "خوب" به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم بندی شده است. بر این مبنا، اکثر نمونه ها دارای جذب آب اولیه در رده کیفیتی "خوب" و جذب آب نهایی با رده "متوسط" و "خوب" هستند.

نفوذ یون کلر

یکی از روشهای تسریع یافته نفوذ یون کلراید که عملکرد خوبی از خود نشان داده است و نتایج آن ارتباط خوبی با روش های بلند مدت دارد، روش Rapid Chloride Migration Test (RCMT) می باشد. در این روش برای جلوگیری از افزایش دما در طول انجام آزمایش، اختلاف پتانسیل اعمالی بر اساس جریان اولیه تنظیم می شود. همچنین حجم محلول NaCl در تماس با بتن، زیاد در نظر گرفته می شود تا تغییرات غلظت یون کلراید در طول انجام آزمایش ناچیز باشد. در این روش برای جلوگیری از تأثیر یون های دیگر مانند OH^- بر نتایج، مستقیماً عمق نفوذ یون‌های کلراید، بدست می آید. در شکل ۹ دستگاه آزمایش RCMT ملاحظه می گردد.

شکل ۹- دستگاه آزمایش RCMT مورد استفاده در این تحقیق

مهمترین عامل زنگ زدگی و خوردگی آرماتور در بتن وجود یون های کلراید می باشد. یون های کلراید ممکن است از طریق مواد و مصالح اولیه آلوده (سنگدانه یا مواد افزودنی) و یا در اثر نفوذ از منابع خارجی مانند آب دریا وارد بتن گردند. جهت فعال شدن آرماتور برای خوردگی، غلظت کلراید در بتن باید از حد مشخصی بگذرد. در جدول زیر غلظت کلرایدی که در pH های مختلف خمیر سیمان برای حتمی بودن خوردگی لازم است آورده شده است.

جدول ۳- میزان کلراید لازم جهت شروع خوردگی

مقدار کلراید لازم برای آغاز خوردگی		pH خمیر سیمان
Ppm	gr/lit	
۶۷۴۰	۶,۷۴	۱۳,۵
۶۷۲	۰,۶۷۲	۱۲,۵
۲۱۳	۰,۲۱۳	۱۲
۶۷	۰,۰۶۷	۱۱,۵
۲۱	۰,۰۲۱۳	۱۱
۲	۰,۰۰۲۱	۱۰
۰,۲	۰,۰۰۰۲	۹,۰۲

آزمونه های قابل استفاده در آزمایش RCMT به صورت استوانه های ۱۰×۵ سانتیمتر می باشند. بنابراین نمونه ها در قالب های استوانه ای ۲۰×۱۰ سانتیمتری ساخته شدند و نهایتا با برش هر نمونه در سن ۹۰ روز یک آزمونه ۱۰×۵ سانتیمتری (به غیر از ۲ انتهای نمونه) به دست آمد. قبل از انجام آزمایش، نمونه ها در دستگاه خلاء دسیکاتور قرار گرفته و تمامی حباب ها از آن ها، پس از ۳ ساعت، خارج گردید؛ این عمل بدان جهت انجام می پذیرد که محلول در تمامی خلل و فرج نمونه ها نفوذ کند، چون اگر نمونه ها اشباع نشوند، جریانی در ۲ سر نمونه‌ها برقرار نخواهد شد و آزمایش عملا رد خواهد شد. سپس آب آهک را به دستگاه خلاء دسیکاتور حاوی نمونه‌ها وارد کرده و در همین حالت به مدت ۱۸ ساعت باقی ماند. قبل از آزمایش نمونه ها را با آب شسته، زیر نمونه ها کلمه NaCl و روی آن ها کلمه NaOH نوشته و داخل سلول دستگاه قرار دادیم. زیر نمونه ها ۱۲ لیتر (۱,۳۳ گرم در ۱۲ لیتر آب) کلرید سدیم (NaCl نمک طعام) به همراه الکترود استیل مشکی رنگ، و روی آن ها ۳۰۰ سی سی (۳,۶ گرم در ۳۰۰ سی سی آب)، مول هیدروکسید سدیم (NaOH سود سوزآور) به همراه الکترود استیل قرمز رنگ قرار گرفت. کابل مثبت به NaOH و کابل منفی به NaCl متصل گردید. استاندارد RCMT NT-Build 492 انتخاب شده سپس ولتاژی بین ۱۵-۳۵ ولت در طی مدت ۲۴ ساعت برقرار گردید (با توجه به طرح اختلاط، دستگاه به صورت اتوماتیک ولتاژ متفاوتی خواهد داد). سپس آزمونه به دو نیم شکافته شده و عمق نفوذ یون کلر تعیین شد و ضریب مهاجرت یون کلر براساس فرمول زیر محاسبه گردید.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239\,(273+T)L}{(U-2)t}\left[X_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)L\,X_d}{U-2}}\right]$$

که در آن مقادیر به صورت زیر هستند:

Dnssm: ضریب مهاجرت غیر پایدار یون کلر ($\times 10^{-12}$ m^2/s)

U: قدر مطلق مقدار ولتاژ اعمال شده (V)

T: مقدار متوسط درجه حرارت اولیه و نهایی در محلول آنولیت (درجه سانتیگراد)

L: ضخامت نمونه (میلیمتر)

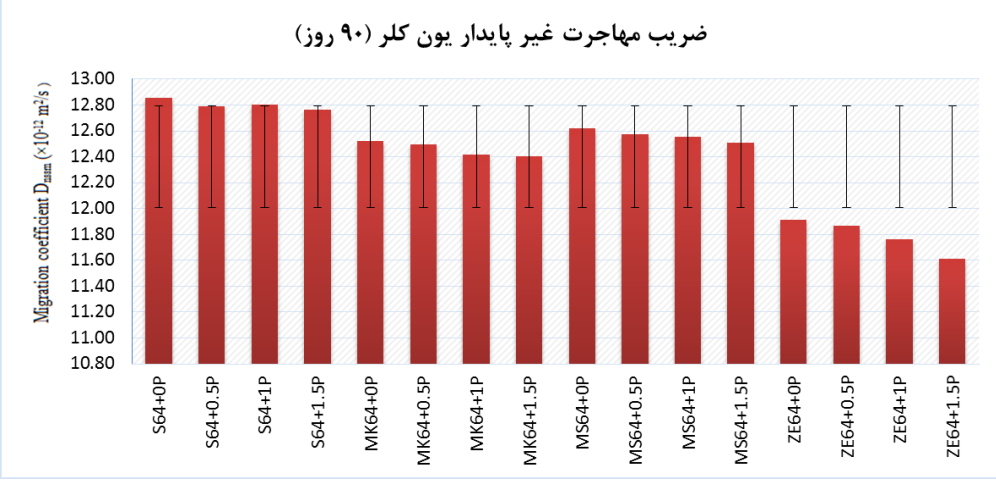
X_d: مقدار متوسط عمق نفوذ (میلیمتر)

t: مدت زمان آزمایش (ساعت)

در انتها نرخ نفوذ یون کلر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\boldsymbol{M = \frac{h}{Vt}}$$

در این رابطه M نرخ نفـود یـون کلـر برحسـب میلیمتـر بـر ولـت سـاعت، h میـانگین عمـق نفـوذ یـون کلـر بـرحسـب میلیمتـر، V ولتـاژ اعمـال شـده بـه آزمونـه هـا برحسـب ولـت، t مـدت زمـان آزمـایش برحسـب سـاعت مـی باشـد. نتـایج نهایی با استفاده از کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت گردید، که در شکل ۱۰ نمودار مربوطه ملاحظه می گردد.



شکل ۱۰- نتایج آزمایش نفوذ یون کلر (RCMT)

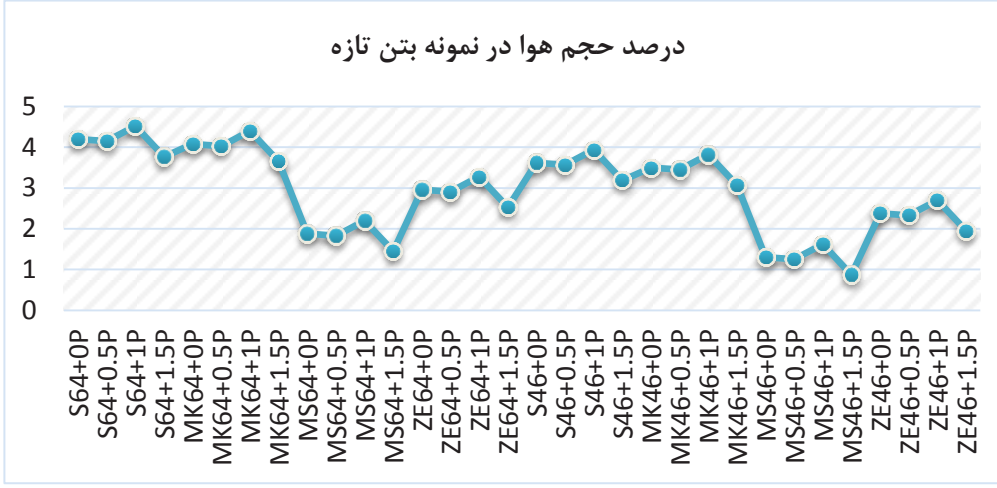
در روش RCMT میزان عمـق نفـوذ یـون کلرایـد مسـتقیماً انـدازه گیـری مـی شـود. بنـابراین بـه نظـر مـی رسـد نتـایج ایـن روش شاخصی مناسب تر برای بررسی نفوذپذیری کلرایدی بتن نسبت به سایر روش ها می باشد.

سنجش درصد هوای بتن تازه

بیشتر فضای خالی بتن ریزه سوراخهایی اسـت کـه از هـوا پـر شـده اسـت. ایـن سـوراخهای ریـز بـه یـک شـکل و یـک انـدازه نیستند و به یکـدیگر راه دارنـد لـذا آب در آنهـا نشـت مـی کنـد. مقـدار نشـت آب بسـتگی بـه انـدازه و تعـداد ایـن سـوراخها دارد. جهت تعیین میـزان هـوای بـتن، میتـوان توسـط آزمـایش هـوای بـتن، آب جـایگزین حفـرات آن را انـدازه گیـری نمـود. آزمون تعیین اندازه‌گیری مقدار هوای موجود در بتن تازه، بر اساس ASTM C 231 انجام شده است[۲۳].

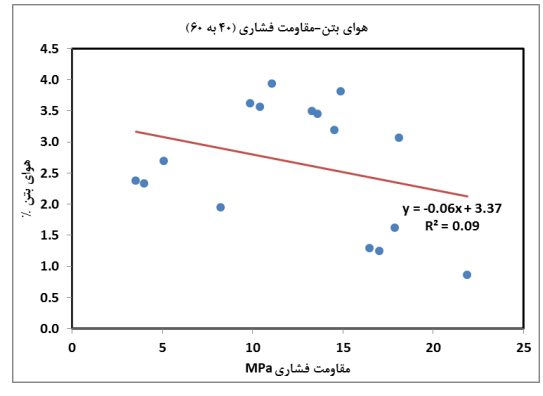
شکل ۱۱- دستگاه هواسنج بتن نوع A جهت تعیین درصد هوای بتن تازه

در شکل ۱۲، نتایج بدست آمده از درصد هوای بتن در نمونه های بتن تازه، نشان داده شده است.

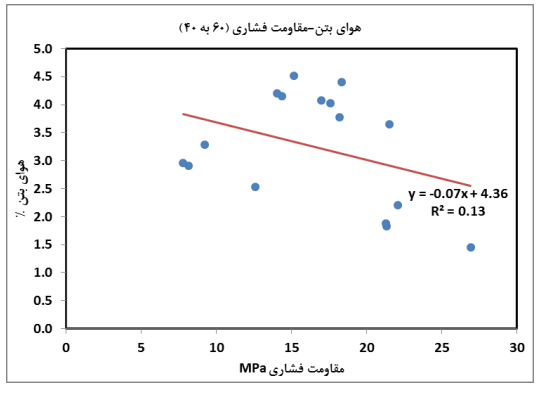


شکل ۱۲- نتایج آزمایش تعیین درصد حجم هوا در نمونه های بتن تازه

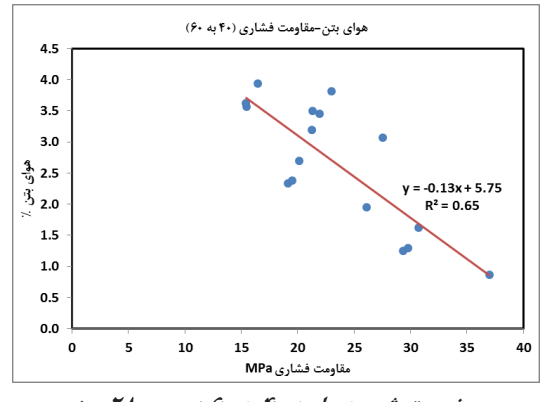
در شکل شماره ۱۲ ملاحظه می گردد که در ۴ گروه نمونه شاهد، متاکائولن، میکروسیلیس و زئولیت، بیشترین میزان هوای بتن متعلق به نمونه S64+1P است و همچنین کمترین میزان نیز مربوط است به نمونه MS46+1.5P. یعنی در آزمایشات انجام شده با افزودن میکروسیلیس به همراه ۱,۵ درصد روان کننده، میزان هوای بتن بطور چشمگیری کاهش یافته، بطور کلی با افزودن میکروسیلیس از مقدار هوای بتن کاسته شده است. با جایگزین کردن متاکائولن، اثر زیادی روی درصد هوای بتن تازه مشاهده نشده، زئولیت نیز تاثیرش نسبت به متاکائولن بیشتر بوده و درصد حجم هوا را در بتن تازه کاهش داده است. از آنجا که میزان هوای بتن با مقاومت فشاری آن مرتبط است، این ارتباط در شکل های ۱۳ نشان داده شده است.



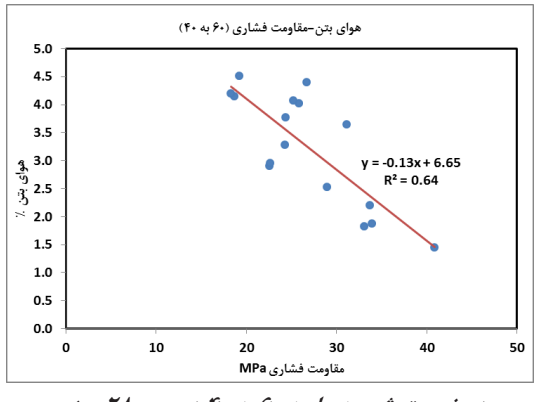
الف- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۷ روزه



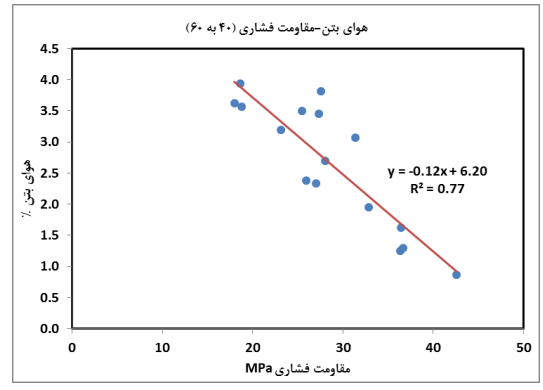
ب- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۷ روزه



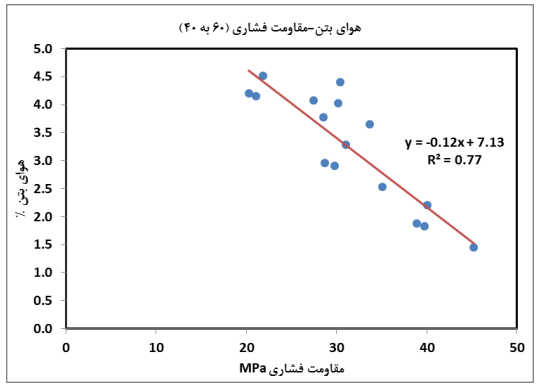
ج- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۲۸ روزه



د- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۲۸ روزه



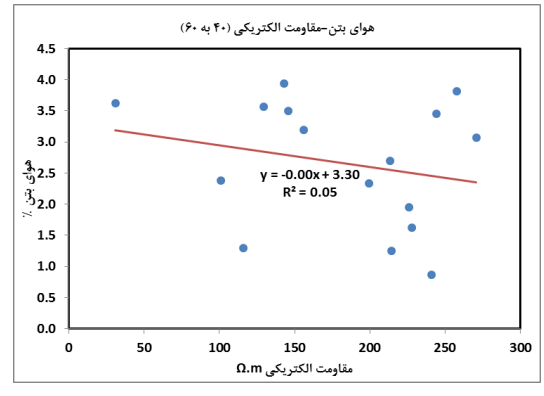
ه- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۹۰ روزه



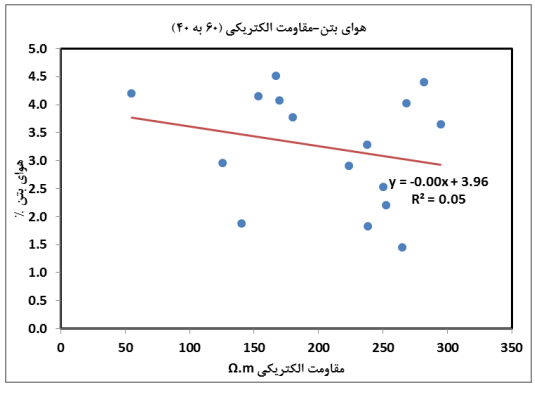
و- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۹۰ روزه

شکل ۱۳- بررسی رابطه مقاومت فشاری با هوای بتن

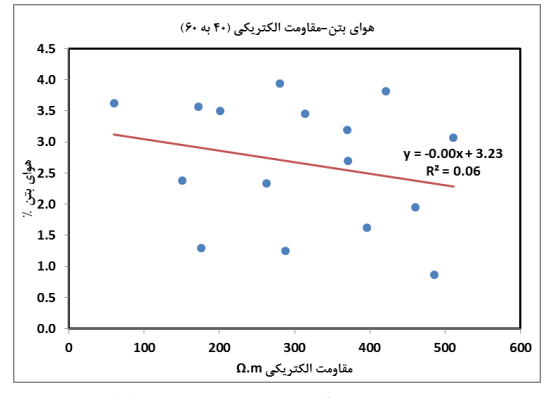
با توجه به شکل ۱۳ و بیشترین و کمترین مقادیر حاصل شده در مقاومت های فشاری و هوای بتن، می توان صرف نظر از مقدار درصد ۶۰ به ۴۰ و یا ۴۰ به ۶۰ شن به ماسه، به این نتیجه رسید که با افزودن میکروسیلیس و ۱,۵٪ روان کننده به نمونه بتن، کمترین میزان هوای بتن و بیشترین مقدار مقاومت فشاری حاصل گردد. با توجه به بررسی مقطعی نمودارها این مورد نیز حاصل می گردد که بتن های حاوی میکروسیلیس کمی مقاومت فشاری بالاتری از مخلوط های حاوی متاکائولن داشته و با افزایش درصد روان کننده، درصد هوای غیر عمدی بتن ها کاهش یافته است. به طور کلی استفاده از ۱,۵ درصد روان کننده، افزایش قابل ملاحظه ای در میزان مقاومت فشاری به خصوص در سن ۷و ۲۸روز و کاهش نسبی درصد هوای بتن را بوجود آورده است. در شکل های ۱۴، رابطه هوای بتن و مقاومت الکتریکی آن بحث می گردد.



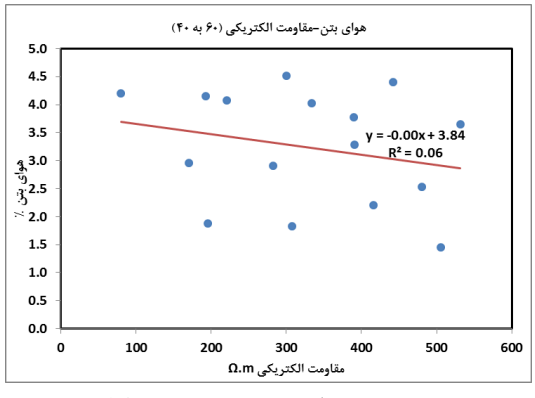
الف- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۷ روزه



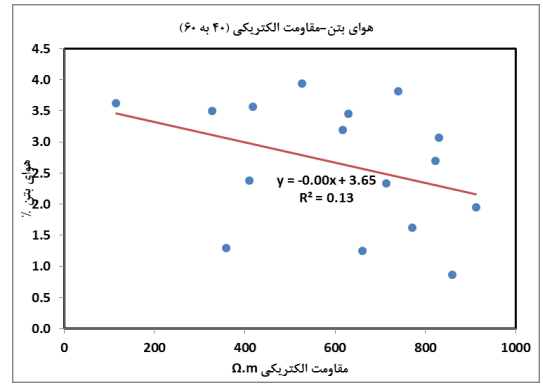
ب- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۷ روزه



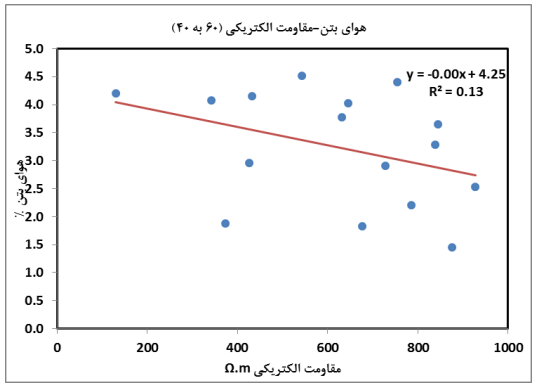
ج- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۲۸ روزه



د- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۲۸ روزه



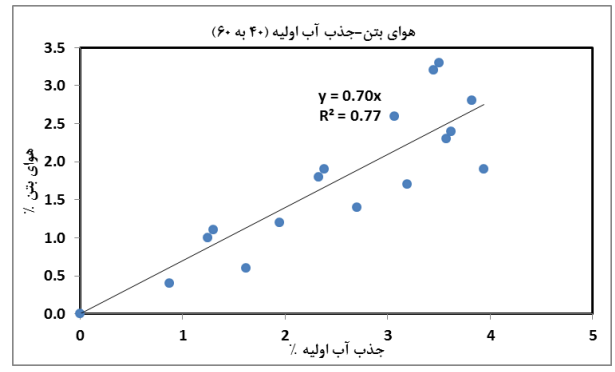
ه- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۹۰ روزه



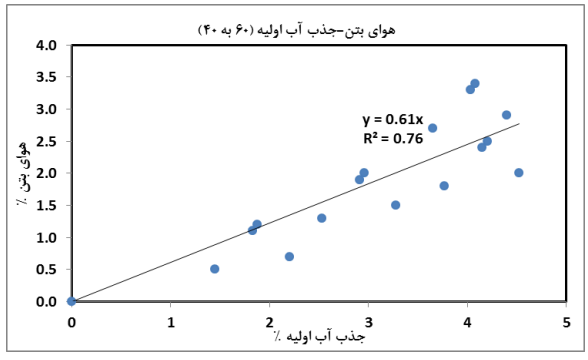
و- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۹۰ روزه

شکل ۱۴- بررسی رابطه مقاومت الکتریکی با هوای بتن

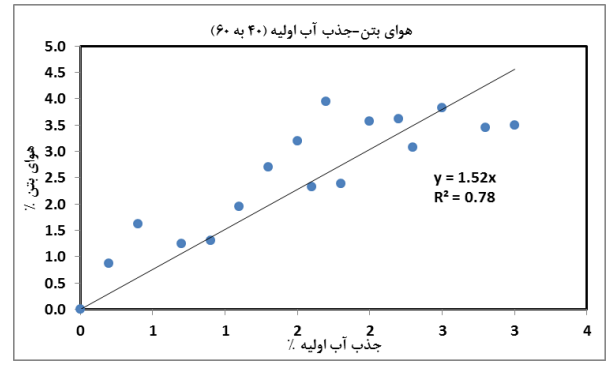
با ملاحظه شکل های ۱۴ بیشینه و کمینه مقادیر مقاومت های الکتریکی و هوای بتن، می توان به این نتیجه رسید که بیشترین میزان هوای بتن و کمترین مقدار مقاومت الکتریکی مربوط به S46+0P بوده که با افزودن پوزولان ها و روان کننده نمونه شاهد اصلاح شده و بهبود می یابد (البته به نظر میرسد وضعیت نمونه شاهد ۶۰ به ۴۰، در مجموع بهتر از نمونه با درصد شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ است) و در مجموع با بررسی مقطعی نمودارها به این نتیجه می رسیم که با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی شاهد کاهش نفوذ هوای غیرعمدی در بتن وجود دارد. لذا مطابق نمودارها و توضیحات ارائه شده، با استفاده از پوزولان های جایگزین سیمان در بتن، می توان به افزایش مقاومت الکتریکی، نقش موثر آن ها در بهبود مقاومت در برابر خوردگی و کاهش هوای بتن رسانده شود. فارغ از درصد شن به ماسه، نمونه حاوی میکروسیلیس و ۱,۵ ٪ روان کننده از لحاظ جذب آب و هوای بتن، نسبت به سایر نمونه ها در وضعیت بهتری قرار دارد (به طور کلی میکروسیلیس در کاهش نفوذپذیری بتن موثر واقع شده است)، در رده های بعدی متاکائولن و سپس زئولیت می باشد. با توجه به نمودارها می توان به این بحث رسید که مصرف پوزولان ها به طور کلی، باعث کاهش حرارت هیدراسیون و در نتیجه با کنترل مسایل حرارتی، کاهش میزان نفوذپذیری و ترک در بتن شده و مقاومت دراز مدت را افزایش می دهد و دیگر اینکه از خواص پوزولان ها به عنوان جایگزین سیمان، توانایی آن ها در کاهش منافذ بزرگ و در نتیجه کاهش نفوذ پذیری بتن است. علت را نیز می توان اینگونه دانست که واکنش های سیلیسی پوزولان ها و آهک ناشی از هیدراسیون سیمان، خاصیت پرکنندگی داشته و موجب کاهش منافذ بزرگ و کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می شود و نهایتا با افزودن مواد پوزولانی، نفوذپذیری هوا در بتن کاهش می یابد. ملاحظه می گردد که در صورت استفاده از روان کننده بالاخص با درصد ۱,۵ می توان به این نتیجه رسید که کاهش نفوذپذیری آب، بجز در نمونه شاهد فاقد پوزولان حاصل شده است، بنابراین استفاده از پوزولان بعلاوه ۱,۵٪ روان کننده جهت کاهش نفوذپذیری آب به نظر مناسب می آید. در شکل ۱۵، به ارتباط هوای بتن و جذب آب آن پرداخته می شود.



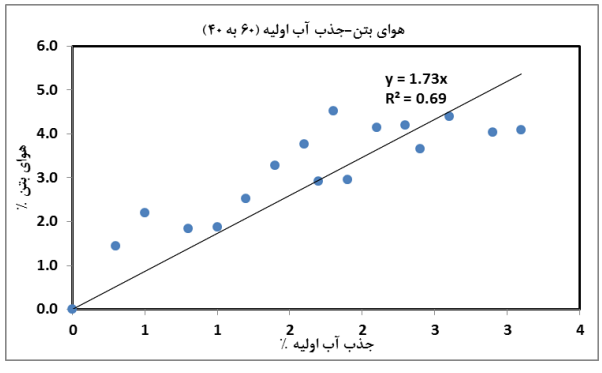
الف- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۲۸ روزه



ب- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۲۸ روزه

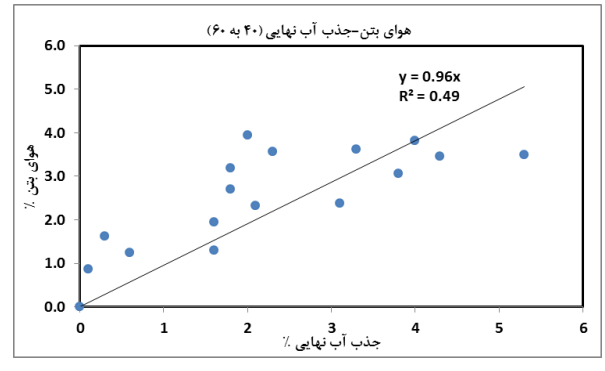


ج- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۹۰ روزه

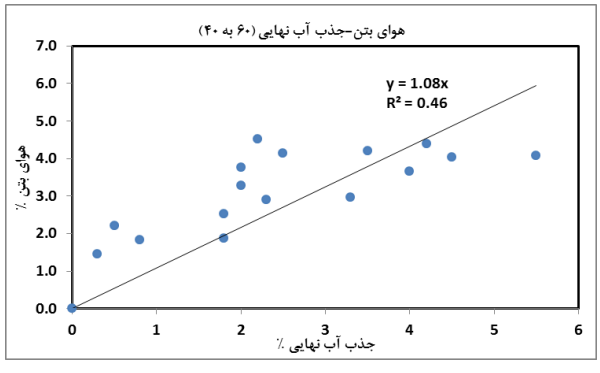


د- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۹۰ روزه

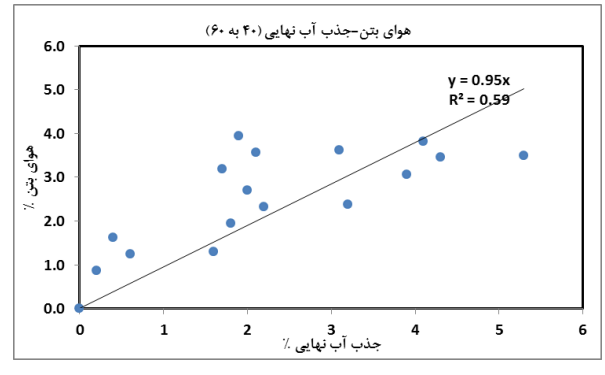
شکل ۱۵- بررسی رابطه جذب آب اولیه با هوای بتن



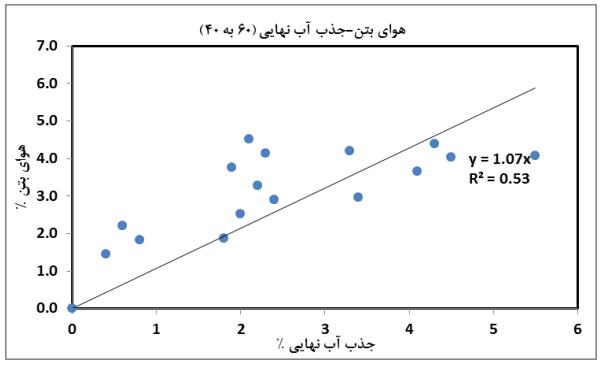
الف- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۲۸ روزه



ب- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۲۸ روزه



ج- نسبت شن به ماسه ۴۰ به ۶۰ در سن ۹۰ روزه



د- نسبت شن به ماسه ۶۰ به ۴۰ در سن ۹۰ روزه

شکل ۱۶- بررسی رابطه جذب آب نهایی با هوای بتن

از بررسی شکل های ۱۵ و ۱۶، ملاحظه می شود با توجه به اینکه نمونه حاوی متاکائولن MK64+0P در مجموع بیشترین میزان جذب آب را داشته ولی مقدار بیشینه هوای بتن همانگونه که قبلا بیان شد از آن S64+1P می‌باشد. همچنین کمترین میزان هوای بتن و کمترین میزان جذب آب چه در حالت جذب آب اولیه ۲۸ و ۹۰ روز و چه در حالت جذب آب نهایی ۲۸ و ۹۰ روز متعلق است به MS46+1.5P که نسبت به متاکائولن و زئولیت در شرایط بهتری قرار داد. از آنجایی که هوای بتن و جذب آب آن از طریق تخلخل موییننگی با هم ارتباط دارند لذا عامل هایی که بر روی هوای بتن تاثیر دارند بر جذب آب هم تاثیر خواهند گذاشت (مانند تخلخل سنگدانه، نسبت آب به سیمان، مواد افزودنی معدنی، مشخصات آب انداختگی، دانه بندی سنگدانه، هندسه، حداکثر قطر آن، درجه تراکم، درجه هیدراسیون، مدت عمل آوری، دما، رطوبت و واکنش های شیمیایی بین سنگدانه و خمیر سیمان و ...)؛ به عنوان مثال دانه بندی خوب سنگدانه ها، می تواند نقش مهمی در کاهش میزان هوا در بتن داشته و سبب کاهش جذب آب در بتن شود.

نتیجه گیری

۱- هوای بتن بر روی خواص مکانیکی و دوامی آن موثر است؛ همواره مقاومت فشاری بتن ارتباط مستقیم با تراکم بتن دارد و نسبت معکوس با حجم منافذ آن دارد. هرچه بتن متراکم تر باشد مقاومت فشاری آن بیشتر است.

۲- با مقایسه ای اجمالی بین مقاومت فشاری در حالت نمونه فاقد پوزولان و نمونه دارای زئولیت می توان به این نکته پی برد که این ماده افزودنی در طولانی مدت تأثیر گذار بوده و رشد در سنین بالا، در نمونه های حاوی زئولیت نسبت به سایر طرح های اختلاط شامل متاکائولن و یا میکروسیلیس بیشتر می باشد.

۳- با افزودن میکروسیلیس به همراه ۱,۵٪ روان کننده، چه در حالت ۴۰ به ۶۰ و چه در ۶۰ به ۴۰ کاهش نفوذپذیری مناسبی (حدود ۸۶٪ کاهش نفوذپذیری در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد) حاصل خواهد شد.

۴- زئولیت به همراه ۱,۵٪ روان کننده رشد بسیار زیادی در میزان مقاومت الکتریکی در سن۹۰روز داشته است.

۵- پوزولان متاکائولن می تواند به افزایش دوام بتن و کاهش نفوذپذیری آن کمک نماید و این مزایا در کنار افزایش مقاومت الکتریکی بتن باعث می شود تا توجیه بیشتری برای مصرف آن داشته باشد.

۶- متاکائولن به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان، آب بیشتری جذب می کنند و این باعث کاهش روانی بتن تازه و افزایش مقدار آزمایش جذب آب می شود.

۷- بتن های حاوی میکروسیلیس کمی مقاومت فشاری بالاتری از مخلوط های حاوی متاکائولن داشته و با افزایش درصد روان کننده، درصد هوای غیر عمدی بتن ها کاهش یافته است.

۸- در آزمایشات انجام شده با افزودن میکروسیلیس به همراه ۱,۵ درصد روان کننده، میزان هوای بتن بطور چشمگیری کاهش یافته، بطور کلی با افزودن میکروسیلیس از مقدار هوای بتن کاسته شده است. با جایگزین کردن متاکائولن، اثر زیادی روی درصد هوای بتن تازه مشاهده نشده، زئولیت نیز تاثیرش نسبت به متاکائولن بیشتر بوده و درصد حجم هوا را در بتن تازه کاهش داده است.

۹- به طور کلی استفاده از ۱,۵ درصد روان کننده، افزایش قابل ملاحظه ای در میزان مقاومت فشاری به خصوص در سن ۷و ۲۸روز و کاهش نسبی درصد هوای بتن را بوجود آورده است.

۱۰- در صورت استفاده از روان کننده بالاخص با درصد ۱,۵ می توان به این نتیجه رسید که کاهش نفوذپذیری آب، بجز در نمونه شاهد فاقد پوزولان حاصل شده است، بنابراین استفاده از پوزولان بعلاوه ۱,۵٪ روان کننده جهت کاهش نفوذپذیری آب به نظر مناسب می آید.

۱۱- در بررسی ضرایب نفوذ یون کلر بتن های تولیدی، بتن حاوی میکروسیلیس دارای کمترین مقدار نفوذپذیری بوده و بعد از آن به ترتیب زئولیت، متاکائولن و در آخر بتن شاهد نفوذپذیرترین بتن می باشد.

تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه مرکز تحقیقات بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین و مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین بابت فراهم نمودن تجهیزات و امکان استفاده از آن کمال تشکر و قدردانی می گردد.

مراجع

[۱] ولی پور مهدی، پرگر فرهاد، (۱۳۸۹)، مطالعه آزمایشگاهی نفوذپذیری گاز در بتن های توانمند حاوی پوزولان‌های متاکائولن و میکروسیلیس، دومین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۲] سید رزاقی مهران، امینی کامران، مهدی پور ایمان، باریک بین وحید، الهیاری میثم، (۱۳۹۰)، تاثیر جایگزینی سیمان با متاکائولن در خواص رفتارشناسی و مکانیکی ملات خودتراکم، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

[۳] جاویدان محمد مهدی، زمانی ابیانه محمدرضا، (۱۳۹۱) تاثیرات همزمان استفاده از زئولیت و متاکائولن بر خواص بتن، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران.

[۴] شکرچی زاده محمد، میردامادی علیرضا، بنکدار ابوذر، بخشی مهدی، (۱۳۸۷)، بهبود خواص بتن های توانمند با استفاده از متاکائولن، مجله تحقیقات بتن، ۱: ۵۵-۶۳.

[۵] رمضانیانپور علی اکبر، کلهری موسی، موسوی سیده رحیمه، (۱۳۹۱)، زئولیت و اثر آن بر مقاومت خمیر و ناحیه انتقال، چهارمین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۶] پیکرنگار میثم، رنجبر ملک محمد، مدندوست رحمت، (۱۳۸۹)، بررسی دوام بتن حاوی متاکائولن و خاکستر بادی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران.

[7] Bagheri A, Farrokhi F, Mahdikhani M ,Farokhzad R, Baghdadi J. (2016). Representing Appropriate Aggregates Grading Zone For Self-Consolidating Concrete by Using Soil Classifying Parameters, Journal of Concrete Research, 7, 2:31-46.

[8] Farokhzad R, Yaseri S, Entezarian MH, Yavari A, (2016). Investigating Effects of Sulfates on Compressive Strength of Different Types of Pozzolan Concrete and Measuring Penetration Rate by Ultrasound Tests at Different Ages, Journal of Concrete Research, 9, 1:113-130.

[9] Piasta Wojciech, Sikora Hubert, (2015). Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes, Construction and Building Materials, 99:298–307.

[10] Mahoutian Mehrdad, Lubell Adam S, Bindiganavile Vivek S, (2015), Effect of powdered activated carbon on the air void characteristics of concrete containing fly ash, Construction and Building Materials, 80: 84–91.

[11] Neves R, Sena da Fonseca B, Branco F, de Brito J, Castela A, Montemor M.F, (2015), Assessing concrete carbonation resistance through air permeability measurements, Construction and Building Materials, 82: 304–309.

[12] BS EN 12390-3, (2009). Testing hardened concrete, Compressive strength of test specimens.

[13] ASTMC33, (2010), Standard Specification for Concrete Aggregates.

[14] Jelokhani Niaraki, R., & Farokhzad, R. (2017). Prediction of mechanical and fresh properties of self-consolidating concrete (SCC) using multi-objective genetic algorithm (MOGA). Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques, 7(2), 1-13.

[15] CEB-FIP, (1989), Diagnosis and assessment of concrete structures state of the art report. CEB Bull 192; 835.

[16] Farokhzad, R., Mahdikhani, M., Bagheri, A., & Baghdadi, J, (2016). Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete. Construction and Building Materials, 115: 735-745.

[17] Angelin, A.F., Lintz, R.C.C., Gachet-Barbosa, L.A. and Osório, W.R., (2017). The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. Construction and Building Materials, 151:534-545.

[18] Šeputytė-Jucikė, J. and Kligys, M., (2016). The effects of modifying additives and chemical admixtures on the properties of porous fresh and hardened cement paste. Construction and Building Materials, 127: 679-691.

[19] Yaseri, S., Hajiaghaei, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M. and Farokhzad, R., (2017). The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. Construction and Building Materials, 157: 534-545.

[20] Samimi K, Kamali-Bernard S, Maghsoudi AA, Maghsoudi M, Siad H. (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. Construction and Building Materials, 151:292-311.

[21] Siddique R, Klaus J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science, 43,3:392-400.

[۲۲] میری، محمود، سارانی، ناصر، (۱۳۹۳). ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت بر خوردگی میلگرد و دوام بتن خودتراکم. سیستان و بلوچستان، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، ۲: ۲۱-۳۲

[23] ASTM C231. 2004. standard Test Method for Air Content Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. Annual Book of ASTM Standards.

Effect of Entrapped Air on Strength and Durability of Concrete Containing Chemical and Natural Admixtures

Omid Behnami
Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Reza Farokhzad
Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Abstract
To use concrete as a construction material with numerous applications, its mechanical and durability properties should be considered. Today, due to the importance of the service-life of structures, the durability properties of concrete receive considerable attention from researchers. In all the noted properties, the level of entrapped air in concrete has a special relationship with its mechanical and durability properties. The present study examined the relationship between entrapped air and the mechanical and durability properties of concrete. Also, it investigated the effect of chemical and natural additives, including zeolite, metakaolin, microsilica, and various percentages of plasticizers on entrapped air in concrete. Specimens were evaluated by slump test, concrete air test, water permeability, electrical resistance, water absorption, and pressure resistance for the ages of 7, 28, and 90 days. Results showed that the concretes including microsilica and zeolite respectively had the lowest amount of air. Specimens with metakaolin and zeolite respectively had the highest water absorption, while concrete with microsilica and metakaolin respectively had the lowest water absorption. In the electrical resistance test on the 7th and 28th days, the specimens consisting of metakaolin and zeolite respectively showed the highest results. On the 90th day, the specimens consisting of zeolinte and microsilica respectively demonstrated the highest electrical resistance. In terms of pressure resistance, specimens with microsilica and metakaolin respectively showed the highest resistance. Specimens containing zeolite had less resistance on the 7th day and showed an increase on the later days. Further, it was concluded that the least amount of air in concrete and highest amount of pressure resistance can be achieved by adding microsilica and 1.5% plasticizer to the concrete specimens. In general, results indicated that the mechanical and durability properties of concrete can be enhanced, directly or indirectly, by reducing its amount of air.

Keywords: Concrete Porosity, Zeolite, Meta Kaolin, Micro Silica, Plasticizer.