Archive of SID

تحقیقات بتن
سال دوازدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۹۸
ص ۱۱۹ – ۱۰۵
تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۸/۱/۲۵

بررسی برهمکنش پساب صنعتی، زئولیت و عیار سیمان بر بتن غیرمسلح در سنین مختلف

کامی کابوسی *
گروه مهندسی آب، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.
خشایار امامی
گروه عمران- سازه، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.
مهران فدوی
گروه عمران- سازه، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.

چکیده

بحران‌های جهانی کمبود آب و آلودگی هوا به گازهای گلخانه‌ای لزوم استفاده از به ترتیب آب‌های نامتعارف و مصالح دوستدار محیط زیست در صنعت بتن را تشدید کرده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی برهمکنش کیفیت آب (شامل سه سطح آب شهری، ترکیب آب شهری و پساب صنعتی با نسبت برابر و پساب صنعتی)، زئولیت (شامل چهار سطح ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی سیمان با زئولیت در طرح اختلاط)، عیار سیمان (شامل ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و سن عمل‌آوری (شامل سنین ۳، ۷، ۲۱، ۵۶ و ۹۰ روز) بر مقاومت فشاری بتن صورت گرفت. با عنایت به تعداد زیاد تیمارهای آزمایش (۱۲۰ تیمار) در این پژوهش و عدم تجزیه و تحلیل‌های آماری در پژوهش‌های قبلی، داده‌های مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی با استفاده از آزمون‌های تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد بررسی آماری قرار گرفت. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده عوامل مورد بررسی و برهمکنش‌های دوگانه آنها، بجز نوع آب در سن آزمونه و زئولیت در سن آزمونه، و همچنین برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی معنی‌دار بود. با عنایت به عدم مشاهده تاثیر منفی معنی‌دار پساب صنعتی و ترکیب آب شهری و پساب صنعتی بر مقاومت فشاری بتن، استفاده از آنها در ساخت بتن غیرمسلح توصیه می‌گردد. با این حال، وجود برهمکنش سه‌گانه معنی‌دار بین نوع آب با زئولیت و عیار سیمان نشان داد که اثر آب‌های مورد بررسی بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در سطوح مختلف زئولیت به عیار سیمان بستگی دارد. بر این اساس، انتخاب بهترین سطح کاربرد زئولیت و نوع آب با توجه به عیار سیمان مورد نظر باید بر اساس آزمون طرح اختلاط در کارگاه به دست آید.

واژه‌های کلیدی: **آب نامتعارف، تجزیه واریانس، طرح اختلاط، مصالح بتن، مقاومت فشاری.**

* نویسنده مسئول: kkaboosi@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

کمبود منابع آب یکی از مهمترین مشکلات امروز جوامع بشری است و در این میان صنعت ساختمان به عنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان آب در بین صنایع مختلف، یک ششم آب شیرین را مصرف می‌کند [۱ و ۲]. بتن یکی از مهمترین مواد صنعت ساختمان است که تولید آن وابسته به آب است به طوری که برای تولید هر مترمکعب بتن ۱۵۰ لیتر آب مصرف می‌شود [۱]. تخمین زده شده است که سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن تولید می‌شود که بدون در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای عمل‌آوری، به حدود ۳/۸ میلیارد مترمکعب آب احتیاج است [۲]. در این شرایط تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از آن یکی از مهمترین راه‌حل‌های مقابله با مسئله کمبود آب می‌باشد [۳] و صنعت ساختمان (جهت ساخت سیمان و بتن) به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان بالقوه این آب‌ها معرفی شده است [۲]. آمارها نشان می‌دهد از ۱۰۷۹ میلیون مترمکعب آب مصرفی بخش صنعت و معدن کشور در سال ۱۳۸۰ حدود ۵۷۹ میلیون مترمکعب فاضلاب تولید می‌شود و پیش‌بینی می‌گردد این مقادیر در سال ۱۴۰۰ به ترتیب به ۲۱۱۰ و ۱۰۸۸ میلیون مترمکعب خواهد رسید [۴]. فاضلاب صنعتی نسبت به فاضلاب شهری و کشاورزی از دامنه تغییرات کیفی وسیع‌تری برخوردار است و به همین دلیل استفاده مجدد از آن باید با ملاحظات کیفی و زیست‌محیطی بیشتری صورت گیرد [۴] و نیازمند مدیریت بیشتری است [۲].

کیفیت آب اختلاط نقش مهمی در ویژگی‌های بتن بازی می‌کند [۳]. استاندارد کیفیت آب بتن در ASTM C1602 [۵]، BS EN1008 [۶]، ISO 12439 [۷] و استاندارد ملی شماره ۱۴۷۴۸ [۸] ارائه شده است. دانش متداول در متون علمی فناوری بتن استفاده از آب آشامیدنی در ساخت و عمل‌آوری بتن می‌باشد. دلیل این امر آن است که آب آشامیدنی به ندرت دارای بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مواد محلول است [۹]. در صورتی که کاهش مقاومت بتن تهیه شده از پساب یا سایر آب‌های نامتعارف کمتر از ۱۰ درصد مقاومت بتن تهیه شده از آب آشامیدنی باشد، استفاده از این آب‌ها در طرح اختلاط بتن قابل قبول است [۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳]. با این حال بر اساس استاندارد BS 3148 انگلستان [۱۴] (نسخه جایگزین آن BS EN1008 می‌باشد) کاهش مقاومت فشاری بتن در صورت استفاده از آب غیرآشامیدانی تا ۲۰ درصد نیز مجاز دانسته شده است مشروط بر آن که این کاهش مقاومت از طریق اصلاح طرح اختلاط جبران گردد [۱۰]. ناخالصی‌های موجود در آب اختلاط آثار متفاوتی بر بتن دارند و ممکن است همه ناخالصی‌ها اثر منفی بر روی بتن ایجاد نکنند به‌گونه‌ای که برخی می‌توانند بی‌زیان باشند و حتی باعث بهتر شدن خصوصیات بتن شوند. در بیشتر مواقع محدودیت‌های مجازی برای مقدار ناخالصی‌های موجود در آب اختلاط بتن وجود دارد در حالی که در آن محدوده ناخالصی‌ها می‌توانند بی‌زیان باشند [۱۲]. استفاده از آب‌های نامتعارف مانند آب شور [۲]، فاضلاب و پساب‌های شهری [۲، ۳، ۹، ۱۲ و ۱۵]، آب روغنی [۲]، کارواش [۱۱]، شستشوی تراک‌میکسر، کارگاه تولید بتن صنعتی و کارگاه شن و ماسه [۱ و ۱۶]، کارخانه سیمان [۱۷] و تصفیه‌خانه‌های اسمز معکوس آب شرب [۱۰] برای ساخت بتن مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیبات آلی موجود در پساب می‌تواند فرآیند آبگیری سیمان را به تاخیر اندازد، زمان گیرش اولیه و نهایی را افزایش دهد یا هوای بیشتری را در بتن حبس کند [۳ و ۹]. وجود فضای خالی بیشتر بین سنگدانه‌ها و تراکم کمتر ذرات در بتن ساخته شده با پساب شهری در مقایسه با آب آشامیدنی گزارش شده است [۳]. ترکیبات آمونیومی موجب سیلان ملات (جریان آب به سمت بالا از بتن به دلیل فشار اسمزی) می‌گردد [۹]. غلظت بالای سولفات آب موجب حمله سولفات‌ها و ایجاد ترک در بتن می‌گردد [۱۱].

در پژوهشی مقاومت فشاری بتن ۷ و ۲۸ روزه با افزایش BOD[1] و COD[2] پساب شهری مورد استفاده در طرح اختلاط نسبت به آب آشامیدنی کاهش یافت، با این حال درصد کاهش مقاومت نسبت به آب شهری کمتر از ۱۰ درصد بود. همچنین افت مقاومت بتن ۷ روزه بیشتر از ۲۸ روزه گزارش شد [۱۲]. نتایج مشابهی برای بتن ۹۰ روزه نیز گزارش شد [۳]. افزایش نسبت پساب شهری به آب شهری (از ۰ تا ۱۰۰ درصد) موجب کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن گردید که این امر به غلظت بالای TDS[3]، کلرید و سولفات پساب نسبت به حد مجاز نسبت داده شد. با این حال در نسبت ۲۰:۸۰ (پساب به آب شهری) این کاهش در محدوده مجاز ۱۰ درصد بود [۱۵].

[1] Boichemical Oxygen Demand
[2] Chemical Oxygen Demand
[3] Total Dissolved Solids

www.SID.ir

Archive of SID

صنعت سیمان به تنهایی مسئول تولید ۷-۶ درصد دی‌اکسید کربن جهان است [۱۸، ۱۹ و ۲۰]. تولید هر تن سیمان موجب انتشار ۹۰۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به اتمسفر می‌گردد [۲۱]. گزارش شده است که کاربرد ۱۰ تا ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان موجب کاهش پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از گازهای گلخانه‌ای به میزان ۷۰-۶۰ درصد نسبت به شرایط عدم مصرف زئولیت در طول دوره عمر ۱۵ ساله سازه‌های بتنی می‌گردد [۱۸]. بنابراین کاهش مصرف سیمان همزمان با افزایش یا حفظ مقاومت و دوام بتن، برای توسعه پایدار ضروری است. استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی به عنوان بخشی از سیمان مصرفی به عنوان یکی از راه‌های دستیابی به این موضوع می‌باشد [۱۸ و ۲۰]. با توجه به مصرف سالانه بیش از ۳۰ میلیون تن زئولیت در صنعت سیمان چین [۲۰ و ۲۲] و به دلیل اهمیت موضوع، این کشور دو استاندارد ملی در زمینه ویژگی‌های فنی و کاربرد زئولیت طبیعی در بتن ارائه کرده است [۲۲].

در پژوهش‌های مختلف امکان‌سنجی استفاده از زئولیت برای جایگزینی سیمان تا میزان ۵۰ درصد صورت گرفته است [۲۰]. یکی از افزودنی‌های معدنی پوزولانی که در ایران به وفور یافت می‌شود زئولیت است که قیمت آن بسیار کمتر از خاکستر بادی و دوده سیلیس بوده ولی فعالیت پوزولانی آن بین این دو می‌باشد [۲۰، ۲۳ و ۲۴]. تاکنون بیش از ۵۰ نوع زئولیت طبیعی و بیش از ۱۵۰ نوع زئولیت مصنوعی شناخته یا ساخته شده است [۲۵ و ۲۶]. زئولیت‌های طبیعی شامل گروه وسیعی از آلومینوسیلیکات‌های هیدراته کریپتوکریستالی[1] با ساختار لانه زنبوری سه وجهی ساخته شده با تتراهدروس‌های[2] Si-O و Al-O (دارای یک شبکه تتراهیدرال[3] اتم‌های اکسیژن در اطراف سیلیسیوم و آلومینیوم) با فرمول کلی AlO_2SiO_2, H_2O می‌باشند که در آنها حفره‌ها و کانال‌هایی با ابعاد ۱۰-۳ آنگستروم وجود دارد [۲۴، ۲۶ و ۲۷]. بالا بودن سطح ویژه زئولیت (۴۵-۳۵ مترمربع بر گرم) به همراه عدم توازن الکتریکی (بار منفی) آنها ناشی از حضور تتراهدروس‌های Al-O موجب قابلیت تبادل کاتیونی بالای (حدود ۳۰۰-۲۰۰ میلی‌اکی‌والان در صد گرم) آنها شده است [۲۴ و ۲۶]. این ساختار همچنین باعث توانایی بالای زئولیت طبیعی در جذب و پس دادن آب تا ۳۰ درصد وزنی می‌باشد [۲۴]. علی‌رغم ساختار بلوری، ویژگی‌های پوزولانی زئولیت‌های طبیعی اثبات شده است که به دلیل وجود مقدار قابل توجه SiO_2 و Al_2O_3 واکنش‌پذیر آن که با $Ca(OH)_2$ برای تولید بیشتر سیلیکات کلسیم و آلومینوسیلیکات کلسیم واکنش می‌دهد، می‌باشد [۲۴]. کاربرد زئولیت در بتن به دلیل توان تبادل یونی، چگالی پایین و روزنه‌های فراوان [۲۸] موجب ریزتر شدن منافذ، کاهش خلل و فرج، افزایش منافذ بسته و انفصال ارتباط موئینه حفرات جذب آب [۲۵، ۲۹ و ۳۰]، کاهش اسلامپ [۲۴ و ۳۱]، جلوگیری از آب انداختگی و جداشدگی بتن تازه [۲۳، ۲۴ و ۲۸]، سهولت پمپاژ [۲۸]، افزایش مقاومت و پایایی بتن به ویژه در برابر واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها [۲۳، ۲۴ و ۲۸]، کاهش درصد جذب آب و نفوذپذیری اولیه و نهایی بتن [۲۳، ۲۵، ۲۸، ۲۹، ۳۰ و ۳۱]، کاهش عمق نفوذ آب [۲۹]، کاهش ضریب جذب آب موئینه [۲۱ و ۳۰]، کاهش ضریب مهاجرت و نفوذ یون کلر [۲۱، ۲۹ و ۳۰]، دوام در مقابل حملات شیمیایی به دلیل کاهش جذب آب و افزایش مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش احتمال خوردگی آرماتور [۲۱، ۲۹ و ۳۲] و نهایتاً افزایش مقاومت فشاری بتن [۲۸] می‌گردد. البته گزارش شده است که عموماً تاثیر زئولیت بر مقاومت بتن به نسبت آب به سیمان بستگی دارد به طوری که کاربرد زئولیت در نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ به ترتیب موجب افزایش و کاهش مقاومت فشاری بتن گردید [۲۰ و ۳۱]. در مقابل جایگزینی سیمان با زئولیت موجب می‌شود به دلیل سطح ویژه بالای آن اسلامپ بتن کاهش یابد [۲۴] و پوزولان‌ها برای انجام واکنش‌های تکمیلی منتظر تولید هیدروکسید کلسیم بمانند. به همین دلیل گیرش اولیه و نهایی سیمان-های آمیخته پوزولانی طولانی‌تر شده و نهایتاً مقاومت‌های اولیه به میزان ۱۵-۵ درصد (بسته به درصد پوزولان مصرفی) کاهش یابد [۲۱] و بر این اساس زمان عمل‌آوری طولانی‌تری نیاز است. در همین راستا اگرچه کاربرد ۱۰ و ۲۰ درصد [۳۲] و ۱۰ و ۱۵ درصد [۳۱] زئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب ۷ و ۳ روزه بتن نسبت به عدم کاربرد زئولیت گردید، لیکن مقاومت به ترتیب ۲۸ و ۹۰ روزه بتن نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد که این موضوع با نتایج [۲۷] نیز همخوانی دارد. همچنین این افزایش در سطح ۱۰ درصد بیشتر از ۲۰ درصد بود [۳۲]. در پژوهشی جایگزینی تمام

[1] Cryptocrystalline alumino-silicate
[2] Tetrahedroids
[3] Tetrahedral

www.SID.ir

Archive of SID

سطوح از ۱۰ تا ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن خودتراکم نسبت به عدم کاربرد زئولیت شد با این حال مقدار جایگزینی بهینه برای مقاومت ۷ و ۲۸ روزه برابر ۱۵ درصد و برای مقاومت ۹۰ روزه برابر ۲۰ درصد به دست آمد [۲۸]. افزایش مقاومت بتن در اثر کاربرد زئولیت به واکنش مقدار زیاد اکسید سیلیسیوم (SiO_2) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) زئولیت با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) سیمان نسبت داده شده است به طوری که با مصرف هیدروکسید کلسیم در واکنش، مقدار آن در بتن کاهش یافته و در مقابل از طریق تولید بیشتر ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) با مواد سیلیسی موجود در مواد شبه‌سیمانی موجب کاهش فضای خالی و پر شدن حفرات بیشتر بتن شده و در نهایت با بهبود ریزساختار بتن نفوذ آب را کاهش و مقاومت فشاری آن را افزایش می‌دهد. علت دیگر این امر درصد بالای مواد سیلیسی و ضریب نرمی بالای زئولیت می‌باشد [۱۸، ۲۳، ۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۰ و ۳۳]. همچنین حل شدن هیدروکسید کلسیم و مواد قابل حل و مهاجرت آنها به سطح بتن نقش زیادی در تشکیل فضاهای خالی در بتن دارد که با تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته از فرار ترکیبات قابل حل به سطح بتن جلوگیری می‌گردد و موجب افزایش وزن مخصوص و کاهش فضای خالی بتن می‌گردد [۲۸]. از سوی دیگر در برخی پژوهش‌ها کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد زئولیت مشاهده شده است. گزارش گردید که جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با زئولیت طبیعی موجب ۱۷-۵ درصد کاهش مقاومت فشاری بتن ۳ تا ۹۰ روزه گردید. در عین حال این کاهش در سنین کمتر بیشتر بود [۱۹]. در پژوهش دیگری، اگرچه جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با زئولیت موجب افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن گردید ولی این اثر در سطح کاربرد ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب غیرمحسوس و کاهشی بود [۱۸]. همچنین کاربرد ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه بتن را به طور غیرمحسوس (کمتر از ۴ درصد) افزایش داد [۲۱] در حالی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خودتراکم با عملکرد بالا را به ترتیب یک درصد افزایش و هشت درصد کاهش داد [۲۴].

به دلیل گوناگونی میزان و نوع آلودگی‌ها در آب‌های نامتعارف، ارائه یک جمع‌بندی کامل برای استفاده از این آب‌ها در ساخت بتن مشکل است [۱۱] و به همین دلیل لزوم ادامه پژوهش بر روی استانداردهای موجود کیفیت آب مورد استفاده در ساخت بتن مورد تاکید قرار گرفته است [۱۱]. از سوی دیگر، اگرچه در بسیاری از پژوهش‌ها کاربرد زئولیت طبیعی موجب افزایش دوام بتن گردید، با این حال به دلیل تنوع زئولیت‌های طبیعی و تفاوت ساختار، ترکیبات شیمیایی، واکنش‌پذیری و درجه خلوص آنها نتایج مطالعات آزمایشگاهی مشابه نبوده و حتی بعضاً متناقض نیز می‌باشد [۲۰ و ۳۳]. همچنین با توجه به عدم بررسی امکان‌سنجی استفاده از پساب‌های صنعتی به عنوان آب اختلاط بتن و نیز عدم بررسی آماری برهمکنش کیفیت آب، زئولیت و عیار سیمان بر مقاومت فشاری بتن، پژوهش حاضر به مطالعه اثر سه نوع آب، چهار سطح زئولیت و دو عیار سیمان بر مقاومت فشاری سنین مختلف بتن خواهد پرداخت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تیمارها و طرح آماری

پژوهش حاضر با هدف امکان‌سنجی استفاده از پساب (فاضلاب تصفیه شده) صنعتی و زئولیت در عیارهای مختلف سیمان برای تهیه و عمل‌آوری بتن غیرمسلح صورت گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل چهار عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ساخت ۳۶۰ مکعب بتنی در قالب ۱۲۰ تیمار دربرگیرنده سه سطح کیفیت آب (شامل W1: آب شهری، W2: ترکیب آب شهری و پساب صنعتی با نسبت برابر و W3: پساب صنعتی)، چهار سطح زئولیت (شامل کاربرد Z1: ۰٪، Z2: ۱۰٪، Z3: ۲۰٪ و Z4: ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان در طرح اختلاط)، دو عیار سیمان بتن (شامل C1: ۲۵۰ و C2: ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و پنج سطح سن آزمون مقاومت فشاری بتن (شامل شکستن نمونه‌ها در d1: ۳، d2: ۷، d3: ۲۱، d4: ۵۶ و d5: ۹۰ روز پس از ساخت آزمونه‌های بتنی) در سه تکرار صورت گرفت.

۲-۲- آب اختلاط

پساب (فاضلاب تصفیه شده) مورد استفاده از خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی آق‌قلا واقع در حدود ۱۵ کیلومتری شهر گرگان (مرکز استان گلستان) تهیه گردید. این تصفیه‌خانه در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۸ ثانیه عرض شمالی و ۵۴ درجه، ۲۷ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول شرقی در فاصله حدود ۴ کیلومتری جنوب شهر آق‌قلا واقع شده است. شهرک صنعتی آق‌قلا با ۲۰۲ واحد صنعتی در مساحتی بالغ بر ۱۶۸ هکتار دارای نرخ

www.SID.ir

Archive of SID

پوشش شبکه فاضلاب ۸۰ درصد است. تصفیه‌خانه این شهرک با ظرفیت ۴۵۰ مترمکعب بر شبانه‌روز از سال ۱۳۸۳ مورد بهره‌برداری بوده و در حال حاضر پساب خروجی از آن به آب‌های سطحی تخلیه می‌گردد. روش تصفیه فاضلاب در این تصفیه‌خانه لجن فعال است. به منظور مقایسه کیفیت آب‌های مورد بررسی با محدوده مجاز ناخالصی‌های آب اختلاط بتن غیرمسلح بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی (جدول ۱)، پارامترهای کیفی هر سه نوع آب (پساب صنعتی، آب شهری و آب ترکیبی) مطابق روش استاندارد APHA [۳۴] اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۱- میزان مجاز ناخالصی آب برای ساخت بتن غیرمسلح (کلیه واحدها بر حسب ppm است بجز pH)

ویژگی	محدوده مجاز	منبع	ویژگی	محدوده مجاز	منبع	ویژگی	محدوده مجاز	منبع
pH	۷-۹	[۱۴]	کربنات	۱۰۰۰	[۱۰]	قلیائیت کل*	۵۰۰	[۱۴]
	۵-۸/۵	[۱۳]		۱۰۰۰	[۳۵]		۶۰۰	[۱۳]
کل جامدات معلق (TSS)	۲۰۰۰	[۱۰]	بی‌کربنات	۴۰۰	[۱۰]	سولفات	۳۰۰۰	[۱۳]
	۲۰۰۰	[۱۳]		۴۰۰-۱۰۰۰	[۳۵]		۲۰۰۰	[۸]
کل جامدات محلول (TDS)	۲۰۰۰	[۱۴]	کلرید	۱۰۰۰۰	[۱۳]	فسفات	۱۰۰	[۸]
	۳۵۰۰۰	[۱۳]		۴۵۰۰	[۸]	نیترات	۵۰۰	[۸]
کل جامدات (TS)	۵۰۰۰۰	[۵]	مواد غیرآلی	۳۰۰۰	[۱۰]	مواد آلی	۲۰۰	[۱۰]

* بر حسب میلی‌گرم بر لیتر معادل کربنات کلسیم

جدول ۲- غلظت ترکیبات شیمیایی موجود در آب‌های مورد بررسی (بر حسب ppm بجز برای pH و هدایت الکتریکی)

غلظت یون‌ها	کربنات	بی‌کربنات	کلرید	سولفات	کل آنیون‌ها	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	کل کاتیون‌ها
آب شهری	۰/۰	۳۹۶/۶	۱۳۴/۷	۱۱۵/۳	۶۴۶/۶	۵۸/۱	۵۸/۴	۵۹/۸	۴/۰	۱۸۰/۳
آب ترکیبی	۴۸/۱	۴۶۳/۷	۲۳۷/۶	۲۰۱/۷	۹۵۱/۰	۹۹/۲	۵۵/۹	۱۷۹/۴	۴/۶	۳۳۹/۰
پساب صنعتی	۹۶/۲	۵۳۰/۸	۳۴۰/۴	۲۸۸/۲	۱۲۵۵/۴	۱۴۰/۳	۵۳/۵	۲۹۹/۰	۵/۲	۴۹۷/۸
ویژگی	کل جامدات محلول	هدایت الکتریکی ($ds.m^{-1}$)		pH	سختی کل	فسفر کل	نیتروژن کل	BOD	COD	TSS
آب شهری	۸۰۶	۱۲۶۰		۷/۶	۳۸۵	۰/۵	۱/۲	۰	۰	۰
آب ترکیبی	۱۲۲۲	۱۹۱۰		۸/۱	۴۷۷/۵	۱۴/۳	۶/۴	۴۹/۵	۱۷۵	۱۵
پساب صنعتی	۱۶۳۸	۲۵۶۰		۸/۵	۵۷۰	۲۸/۱	۱۱/۶	۹۹	۳۵۰	۳۰

۲-۳- زئولیت مورد استفاده

زئولیت پودری مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت با جرم مخصوص ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود که از شرکت نگین پودر سمنان تهیه شد. ویژگی‌های شیمیایی این زئولیت طبیعی در جدول (۳) آمده است. حداقل فعالیت پوزولانی، که برابر مجموع اکسید سیلیسیوم، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن است، بر اساس ASTM برای پوزولان‌های طبیعی گروه N باید ۷۰٪ باشد [۲۰ و ۳۲] که برای زئولیت مورد استفاده برابر با ۸۰/۲۰

www.SID.ir

Archive of SID

درصد است. همچنین بر اساس این استاندارد بیشینه مقدار تری اکسید گوگرد و درصد کسر وزنی باید به ترتیب ۴ و ۱۰ درصد باشد [۲۰ و ۳۲] که اولی مطابق استاندارد و دومی کمی بیشتر است. دلیل این امر دمای بالای فرآوری زئولیت (تا ۱۲۰۰ درجه سیلسیوس) به جای دمای استاندارد ASTM(تا ۷۵۰ درجه سیلسیوس) است.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان و زئولیت مصرفی (واحدها بر حسب درصد)

ترکیب	سیمان	زئولیت	ترکیب	سیمان	زئولیت	ترکیب	سیمان	زئولیت
اکسید سیلیسیوم (SiO_2)	۲۱/۱۱	۶۹/۲۸	اکسید کلسیم (CaO)	۶۳/۳۶	۳/۵۶	اکسید منیزیم (MgO)	۱/۵۱	۰/۵۰
اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	۴/۴۲	۱۰/۴۳	اکسید سدیم (Na_2O)	۰/۳۸	۰/۷۳	تری اکسید گوگرد (SO_3)	۲/۶۱	۰/۰۰۵
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۳/۹۶	۰/۴۹	اکسید پتاسیم (K2O)	۰/۵۱	۱/۲۷	درصد کسر وزنی (LOI)	۲/۹۸	۱۲/۹۷

۲-٤- طرح اختلاط و روش ساخت و عمل‌آوری

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه ماسه و شن شکسته دوبار شستشو با وزن مخصوص به ترتیب ۲۵۵۰ و ۲۶۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. آزمون دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد ملی شماره ۴۹۷۷ [۳۶] صورت گرفت. منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه و اطلاعات حاصل از آن نشان داد که الزامات استاندارد ملی شماره ۳۰۲ [۳۷] رعایت گردیده است به طوری که بیشینه اندازه مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب ۹/۵ و ۱۹ میلی-متر و ضریب نرمی مصالح ریزدانه ۲/۹ بود. سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند تیپ ۲ با خاصیت ضدسولفات بود که از کارخانه سیمان شاهرود تهیه گردید. ویژگی‌های شیمیایی سیمان در جدول (۳) ارائه شده است.

مکعب‌های بتنی (۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر) با رعایت ضوابط استاندارد ملی شماره ۵۸۱ [۳۸] در میکسر ۱۰۰ لیتری ساخته شد و در قالب به روش دستی متراکم شد. نمونه‌برداری از بتن تازه مطابق استاندارد ملی شماره ۳۲۰۱-۱ [۳۹] صورت گرفت. علی‌رغم آن که در این پژوهش مقاومت خاصی از بتن مدنظر نمی‌باشد و نتایج صرفاً جهت مقایسه نسبی با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، به منظور افزایش دقت آزمایش، ابتدا ۵۴ مکعب بتنی مشتمل بر ۱۸ طرح اختلاط مختلف متشکل از سه نسبت سنگدانه شن و ماسه، دو نسبت آب به سیمان و سه میزان وزن مخصوص بتن در سه تکرار ساخته شد و در نهایت بر مبنای بیشترین مقاومت سه روزه، طرح اختلاط مناسب بر اساس وزن مخصوص بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مکعب، نسبت وزنی برابر مصالح شن و ماسه و نسبت آب به مواد سیمانی ۴۵ درصد (با لحاظ کردن میزان رطوبت مصالح بر اساس درصد رطوبت وزنی) انتخاب گردید. جزئیات طرح اختلاط تیمارهای مختلف در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به این که کاربرد زئولیت موجب کاهش روانی و اسلامپ بتن می‌گردد، از یک فوق-روان‌کننده تجاری بر پایه کربوکسیلاتی استفاده شد. مقدار مصرف آن بر اساس آزمون و خطا در طرح‌های اختلاط مقدماتی به دست آمد. همچنین برای اطمینان از کارایی بتن و کنترل آن در طول آزمایشات، آزمایش اسلامپ بتن برای هر طرح اختلاط (تیمار) حداقل یک‌بار تکرار شد.

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاط (مقادیر بر حسب کیلوگرم در هر مترمکعب بتن است)

تیمار	آب	سیمان	زئولیت	شن	ماسه	تیمار	آب	سیمان	زئولیت	شن	ماسه
C1Z1	۱۱۲	۲۵۰	۰	۹۶۹	۹۶۹	C2Z1	۱۵۸	۳۵۰	۰	۸۹۶	۸۹۶
C1Z2	۱۱۲	۲۲۵	۲۵	۹۶۹	۹۶۹	C2Z2	۱۵۸	۳۱۵	۳۵	۸۹۶	۸۹۶
C1Z3	۱۱۲	۲۰۰	۵۰	۹۶۹	۹۶۹	C2Z3	۱۵۸	۲۷۵	۷۵	۸۹۶	۸۹۶
C1Z4	۱۱۲	۱۷۵	۷۵	۹۶۹	۹۶۹	C2Z4	۱۵۸	۲۴۵	۱۰۵	۸۹۶	۸۹۶

www.SID.ir

Archive of SID

در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن ۵۴ عدد آزمونه بتنی برای انتخاب طرح اختلاط مناسب و ۳۶۰ عدد آزمونه برای آزمایش نهایی، مجموعاً ۴۱۴ مکعب بتنی ساخته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ساخته شدن به مدت ۲۴ ساعت درون قالب در محیط آزمایشگاه (دمای ۴±۲۰ درجه سیلسیوس) نگهداری شدند. سپس قالب‌ها باز شده و عملیات عمل‌آوری آغاز گردید [۱۱ و ۳۰]. به منظور شبیه‌سازی کامل تاثیر تیمارهای کیفیت آب بر مقاومت فشاری، عمل‌آوری مکعب‌های ساخته شده با آب اختلاط صورت گرفت. برای این منظور سه حوضچه بتنی جداگانه با ابعاد ۱*۱*۱ متر ساخته شد و هر یک از حوضچه با یکی از انواع آب اختلاط بتن پر شد. در طول مدت آزمایش ضمن پوشش سطح حوضچه‌ها با ورقه فایبرگلاس، افت سطح آب در هر حوضچه به دلیل نشت از دیواره با اضافه کردن همان نوع آب جبران گردید به گونه‌ای که سطح آب درون حوضچه همواره ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح بالایی مکعب‌ها باشد. به منظور اطمینان از یکنواختی شرایط آزمایش تمام آب مورد نیاز برای ساخت و عمل‌آوری بتن در یک زمان تهیه شد و آب مازاد نیز در دمای چهار درجه سیلسیوس نگهداری شد [۹]. مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی توسط دستگاه جک هیدرولیکی دیجیتال و با رعایت الزامات و شرایط استاندارد ملی شماره ۳۲۰۶ [۴۰]اندازه‌گیری شد. شکل (۱) نمایی از مصالح و مراحل اجرایی پژوهش را نشان می‌دهد.

شکل ۱- مخازن عمل‌آوری، تجهیزات و مصالح مورد استفاده و آزمونه‌های بتنی ساخته شده

۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر چهار عامل نوع آب، درصد زئولیت، عیار سیمان و سن آزمونه‌ها و برهمکنش بین آنها (۱۰ حالت برهمکنش) می‌تواند موجب تغییر میزان مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی گردد. با توجه به این که در پژوهش‌های پیشین میزان تغییرات مقاومت فشاری بتن فقط به صورت درصد بیان شده بود و تجزیه و تحلیل-های آماری داده‌ها جهت بررسی معنی‌داری یا عدم معنی‌داری تغییرات صورت نگرفته بود، در پژوهش حاضر آزمون‌های تجزیه واریانس[1] و مقایسه میانگین (بر مبنای آزمون حداقل تفاوت معنی-دار[2] در سطح احتمال ۵ درصد) با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ (IBM, 2010) بر روی داده‌های مقاومت فشاری انجام گرفت. توضیح این که در آزمایش فاکتوریل دو یا چند دسته از عوامل (فاکتور)، که هر یک دارای تیمارها یا سطوح مختلف هستند، همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های آزمایش فاکتوریل آن است که تمام ترکیبات ممکن حاصل از سطوح مختلف عوامل مورد بررسی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. به اثری که هر یک از عوامل به تنهایی ایجاد می‌کنند، اثر ساده و به اثری که چند عامل همزمان در ایجاد آن نقش دارند، برهمکنش گفته می‌شود. در شرایطی که نتیجه آزمون تجزیه واریانس نشان دهنده معنی‌داری اثرات ساده و برهمکنش بین عوامل مورد بررسی باشد، از آزمون مقایسه میانگین برای بررسی برابری یا عدم برابری میانگین‌ها با یکدیگر استفاده می‌شود.

[1] Analysis of variance (ANOVA)

[2] Least Significant Difference (LSD)

www.SID.ir

Archive of SID

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی کیفیت آب اختلاط

بررسی استانداردهای مختلف ناخالصی‌های مجاز آب اختلاط بتن غیرمسلح (جدول ۱) نشان داد که محدوده مجاز ویژگی‌های شیمیایی آب اختلاط در استانداردهای مختلف عموماً به یکدیگر نزدیک و بعضاً مشابه است. با این حال، بین حد مجاز غلظت کلرید آیین‌نامه بتن ایران (۱۰۰۰۰ ppm) و استاندارد ملی ۱۴۷۴۸ (۴۵۰۰ ppm) و همچنین بین حد مجاز میزان کل جامدات محلول استاندارد انگلستان (۲۰۰۰ ppm) و آیین‌نامه بتن ایران (۳۵۰۰۰ ppm) اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. همچنین با بررسی ویژگی‌های کیفی آب‌های مورد استفاده (جدول ۲) می‌توان دریافت که همه ویژگی‌های کیفی آب شهری و آب ترکیبی در دامنه مجاز استانداردهای ملی و بین‌المللی (جدول ۱) است. با این حال، این موضوع در خصوص پساب صنعتی برای پارامترهای pH، که حد بالای محدوده مجاز را دارا است، و میزان مواد آلی، که بر اساس ویژگی COD تقریباً ۷۵ درصد بیشتر از استاندارد مجاز (۳۵۰ در مقایسه با ۲۰۰ قسمت در میلیون) است، صادق نمی‌باشد.

۳-۲- تجزیه آماری

بر اساس نتایج آزمون تجزیه واریانس (جدول ۵)، اثر ساده عیار سیمان، نوع آب، کاربرد زئولیت و سن آزمونه، برهمکنش‌های دوگانه آنها، بجز نوع آب در سن آزمونه و زئولیت در سن آزمونه، و همچنین برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در سطح احتمال یک درصد ($P\ value \leq 0.01$) معنی‌دار است. همچنین برهمکنش‌های سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در سن آزمونه و نوع آب در زئولیت در سن آزمونه و برهمکنش چهارگانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت در سن آزمونه بر میزان مقامت فشاری آزمونه‌های بتنی معنی‌دار نبود. عدم معنی‌داری برهمکنش‌های دوگانه نوع آب در سن آزمونه و زئولیت در سن آزمونه نشان‌دهنده روند مشابه تاثیرگذاری به ترتیب نوع آب و کاربرد زئولیت بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها در سنین مختلف است. همچنین عدم معنی‌داری برهمکنش‌های سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در سن آزمونه و نوع آب در زئولیت در سن آزمونه بیانگر تاثیرپذیری مشابه مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی از نوع آب در سنین مختلف آزمونه‌ها به ترتیب در عیارهای مختلف سیمان و سطوح مختلف زئولیت است. به طریق مشابه غیرمعنی‌داری برهمکنش چهارگانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت در سن آزمونه نشان می‌دهد که عیارهای مختلف سیمان در انوع مختلف آب و در شرایط مورد بررسی کاربرد زئولیت تاثیرگذاری مشابهی بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در سنین مختلف دارند. بنابراین در بخش بعد صرفاً نتایج مقایسه میانگین منابع تغییری که موجب اثر معنی‌داری برمقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی شدند، ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که در مقایسه میانگین هر عامل، تیمارهایی که حداقل یک حرف مشترک با یکدیگر دارند، به احتمال ۹۵ درصد (سطح آماری ۵ درصد) اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۵- نتایج آزمون تجزیه واریانس بر روی مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی

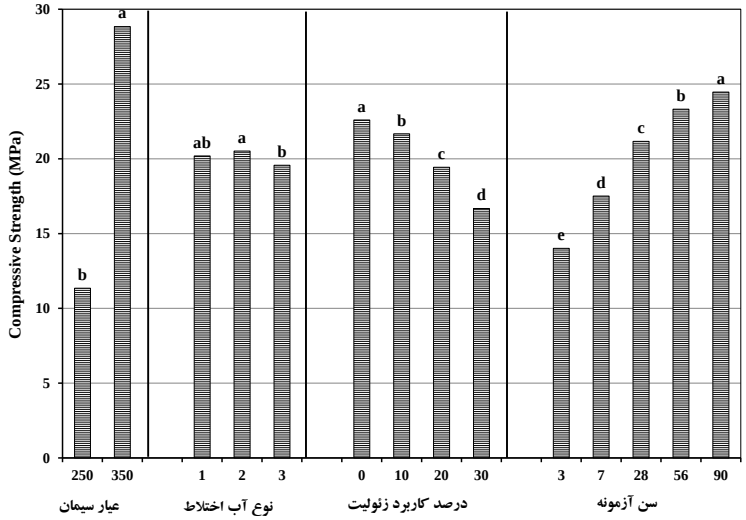
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	سطح معنی‌داری
عیار سیمان (C)	۱	۲۷۵۶۰/۶	۰/۰۰۰
نوع آب (W)	۲	۲۷/۶	۰/۰۳۷
کاربرد زئولیت (Z)	۳	۶۲۶/۰	۰/۰۰۰
سن آزمونه (d)	۴	۱۳۳۷/۳	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C*W	۲	۱۲۳/۳	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C*Z	۳	۱۱۹/۸	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C*d	۴	۲۷۱/۲	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه W*Z	۶	۵۸/۳	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه W*d	۸	۱/۲	۰/۹۹۷
برهمکنش دوگانه Z*d	۱۲	۱۰/۲	۰/۲۵۸
برهمکنش سه‌گانه C*W*Z	۶	۶۰/۵	۰/۰۰۰
برهمکنش سه‌گانه C*W*d	۸	۳/۷	۰/۸۹۰
برهمکنش سه‌گانه W*Z*d	۲۴	۸/۸	۰/۳۸۹
برهمکنش چهارگانه C*W*Z*d	۳۶	۹/۳	۰/۲۹۷
خطای کل	۲۴۰	۸/۳	-

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۳- مقایسه میانگین اثرات ساده

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده چهار عامل مورد بررسی بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در شکل (۲) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که با توجه به وجود برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه عوامل مورد بررسی (جدول ۵)، بررسی مقایسه میانگین اثرات ساده این عوامل به تنهایی کافی نیست و ضروری است به نتایج بخش‌های بعد توجه بیشتری گردد. مطابق انتظار، افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌ها با افزایش سن در تمام سطوح معنی‌دار بود و افزایش عیار سیمان از ۲۵۰ به ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز موجب افزایش معنی‌داری (۱۵۴ درصد) مقاومت فشاری بتن گردید (شکل ۲).



شکل ۲- اثر ساده عیار سیمان، نوع آب، درصد کاربرد زئولیت و سن آزمونه بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی

استفاده از پساب صنعتی اگرچه موجب کاهش مقاومت فشاری آزمونه بتنی نسبت به آب شهری گردید، این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲). میزان کاهش مقاومت فشاری در این شرایط حدود ۳ درصد بود که مطابق استاندارد ملی شماره ۱۴۷۴۸ [۸] و آبا [۱۳] و استانداردهای بین‌المللی در محدوده مجاز کمتر از ۱۰ درصد است. بنابراین به نظر می‌رسد کاربرد پساب صنعتی اثر منفی معنی-داری بر مقاومت فشاری بتن غیرمسلح به دنبال ندارد. همچنین آب ترکیبی (نسبت وزنی برابر از آب شهری و پساب صنعتی) موجب افزایش جزئی غیرمعنی‌دار (۱/۶ درصد) مقاومت آزمونه نسبت به آب شهری گردید ولی افزایش آن نسبت به پساب صنعتی (حدود ۵ درصد) از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۲). استفاده از زئولیت موجب کاهش معنی‌دار مقامت فشاری آزمونه‌های بتنی در تمام سطوح گردید. این کاهش برای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی سیمان با زئولیت نسبت به شرایط بدون کاربرد زئولیت به ترتیب ۴، ۱۴ و ۲۶ درصد بود (شکل ۲). این نتایج با یافته‌های [۲۰] که نشان داد جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد سیمان با زئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری بتن در تمام سنین (۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰ و ۳۵۶ روز) به ترتیب میزان بین ۱۵-۳ و ۳۸-۷ درصد گردید همخوانی دارد. همچنین گزارش شده است که کاربرد ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد زئولیت به جای سیمان به ترتیب منجر به کاهش مقاومت سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۳۶۰ روزه بتن با عملکرد بالا به میزان ۱۸-۴، ۳۵-۲۵ و ۶۳-۴۵ درصد شد [۴۱] که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. با این حال، با توجه به معنی‌داری برهمکنش دوگانه نوع آب در زئولیت و برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت (جدول ۵)، به ترتیب اثر آب‌های مورد بررسی در سطوح مختلف زئولیت و همچنین تاثیرگذاری این دو در عیارهای مختلف سیمان بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی متفاوت است و لذا برای بررسی جمع‌بندی بهتر اثر عوامل مورد بررسی بر بتن غیرمسلح باید به نتایج بخش‌های بعدی توجه بیشتری داشت.

۳-٤- مقایسه میانگین برهمکنش‌های دوگانه

مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌های دوگانه عیار سیمان در نوع آب، عیار سیمان در زئولیت، عیار سیمان در سن آزمونه و نوع آب در زئولیت در جدول (۶) ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر برهمکنش‌های دوگانه بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها (مگاپاسکال)

الف- برهمکنش عیار سیمان در نوع آب			ب- برهمکنش عیار سیمان در زئولیت		
عیار سیمان	نوع آب	مقاومت	عیار سیمان	درصد زئولیت	مقاومت
۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	شهری	۱۰/۳^{d}	۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰	۱۵/۱^{d}
	ترکیبی	۱۲/۳^{c}		۱۰	۱۲/۰^{e}
	پساب صنعتی	۱۱/۴^{c}		۲۰	۹/۶^{f}
۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	شهری	۳۰/۱^{a}		۳۰	۸/۷^{f}
	ترکیبی	۲۸/۷^{b}	۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰	۳۰/۱^{ab}
	پساب صنعتی	۲۷/۷^{b}		۱۰	۳۱/۳^{a}
ج- برهمکنش نوع آب در زئولیت				۲۰	۲۹/۳^{b}
نوع آب	درصد زئولیت	مقاومت		۳۰	۲۴/۷^{c}
آب شهری	۰	۲۱/۹^{bc}	د- برهمکنش عیار سیمان در سن آزمونه		
	۱۰	۲۰/۵^{cd}	عیار سیمان	سن آزمونه	مقاومت
	۲۰	۲۱/۱^{c}	۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۳	۸/۰^{i}
	۳۰	۱۷/۳^{ef}		۷	۹/۹^{h}
آب ترکیبی	۰	۲۴/۲^{a}		۲۸	۱۲/۰^{g}
	۱۰	۲۱/۵^{c}		۵۶	۱۳/۰^{fg}
	۲۰	۱۹/۴^{d}		۹۰	۱۳/۹^{f}
	۳۰	۱۶/۹^{ef}	۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۳	۲۰/۰^{e}
پساب صنعتی	۰	۲۱/۶^{bc}		۷	۲۵/۱^{d}
	۱۰	۲۳/۰^{ab}		۲۸	۳۰/۴^{c}
	۲۰	۱۷/۸^{e}		۵۶	۳۳/۷^{b}
	۳۰	۱۵/۸^{f}		۹۰	۳۵/۰^{a}

نتایج جدول ۶-الف نشان می‌دهد که اگر چه در هر دو عیار سیمان ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه ساخته شده با آب ترکیبی به ترتیب ۸/۲ و ۳/۴ درصد بیشتر از آزمونه‌های ساخته شده با پساب صنعتی بود ولی این اختلاف از نظر آماری معنی‌داری نبود. همچنین در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌ها در تیمارهای آب ترکیبی و پساب شهری نسبت به تیمار آب شهری به طور معنی‌داری بیشتر بود (به طور متوسط ۱۶ درصد) ولی این امر در در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برعکس بود به طوری که مقاومت فشاری آزمونه‌ها در تیمارهای آب ترکیبی و پساب شهری نسبت به تیمار آب شهری به طور معنی‌داری کمتر بود (به طور متوسط ۷ درصد).

مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌های دوگانه عیار سیمان در زئولیت (جدول ۶-ب) نشان می‌دهد در حالی که در تیمار عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، تمام تیمارهای کاربرد زئولیت موجب کاهش معنی‌دار مقاومت فشاریآزمونه‌های بتنی گردید ولی در تیمار عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بین تیمار ۰ و ۱۰ درصد کاربرد زئولیت اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید، حتی افزایش جزئی غیرمعنی‌دار (۳/۸ درصد) نیز وجود داشت، ولی سایر سطوح کاربرد زئولیت کاهش معنی‌دار مقاومت فشاری آزمونه-های بتنی را به دنبال داشت. همچنین نرخ کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌ها در اثر کاربرد زئولیت در عیار سیمان ۳۵۰ به مراتب کمتر از عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود به طوری که

www.SID.ir

Archive of SID

جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت در مقایسه با تیمار عدم کاربرد زئولیت در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۲۰، ۳۶ و ۴۳ درصد شد ولی در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌ها را به ترتیب ۳/۸ درصد افزایش و ۳ و ۱۸ درصد کاهش داد. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از زئولیت در بتن‌های با عیار سیمان کم از محدویت بیشتری برخوردار باشد.

مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌های دوگانه نوع آب در زئولیت (جدول ۶-ج) نشان می‌دهد بیشترین مقاومت فشاری در آزمونه‌های ساخته شده با آب ترکیبی بدون کاربرد زئولیت و پساب صنعتی با کاربرد ۱۰ درصد زئولیت و کمترین مقاومت فشاری در آزمونه‌های ساخته شده با هر سه نوع آب در شرایط کاربرد ۳۰ درصد زئولیت به دست آمد. استفاده از پساب صنعتی یا آب ترکیبی (نسبت برابر آب شهری و پساب صنعتی) در طرح اختلاط بتن در شرایط عدم کاربرد زئولیت یا ۱۰ درصد جایگزینی سیمان با زئولیت موجب کاهش معنی-دار مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در مقایسه با تیمار شاهد (آب شهری بدون کاربرد زئولیت) نگردید و حتی در برخی موارد موجب افزایش معنی‌دار آن نیز شد در حالی که استفاده از این آب‌های نامتعارف به همراه ۲۰ یا ۳۰ درصد جایگزینی زئولیت مقاومت فشاری بتن را نسبت به تیمار شاهد (آب شهری بدون کاربرد زئولیت) به طور معنی‌داری کاهش داد. این در حالی است که در صورت استفاده از آب شهری کاربرد زئولیت تا سطح ۲۰ درصد موجب کاهش معنی‌دار مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی نگردید. در همین راستا گزارش شده است که جایگزینی سیمان با زئولیت تا سطح ۲۰ درصد در شرایط کاربرد آب معمولی (شهری) موجب کاهش مقاومت فشاری آزمونه-ها نگردید [۲۱ و ۲۸] که با نتایج این پژوهش در شرایط آب معمولی مطابقت نزدیکی دارد. در جمع‌بندی نتایج ارائه شده در خصوص جدول (۶-الف) تا (۶-ج) مجدداً تاکید می‌کردد که با توجه به وجود برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت (جدول ۵)، اثر آب‌های مورد بررسی بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در سطوح مختلف زئولیت به عیار سیمان بستگی دارد و لذا ضروری است برای جمع‌بندی نهایی این وابستگی به نتایج بخش ۳-۵ توجه بیشتری داشت.

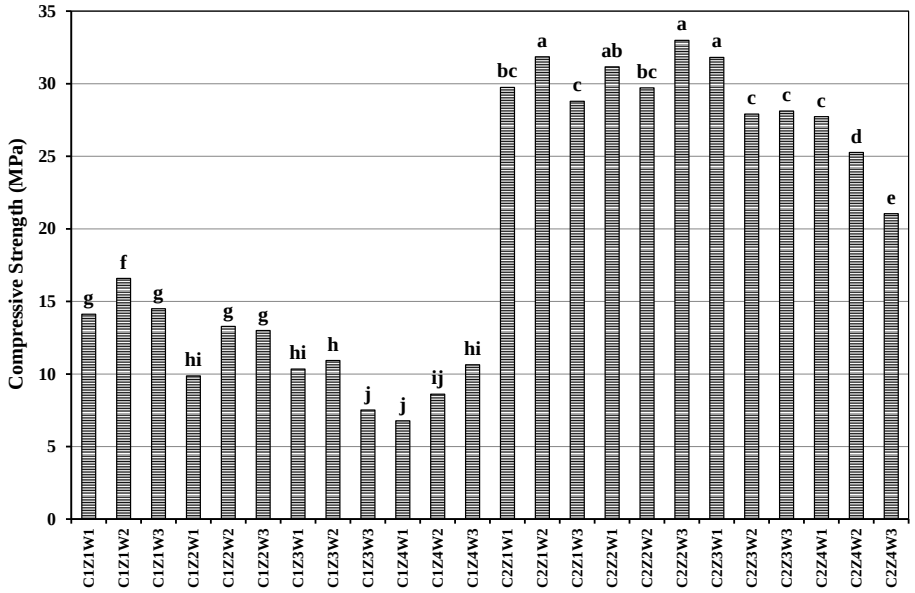
مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌های دوگانه عیار سیمان در سن آزمونه (جدول ۶-د) نشان می‌دهد که نرخ افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان در دو عیار سیمان با یکدیگر متفاوت است به گونه‌ای که در تیمار عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب ۲۳، ۴۹، ۶۱ و ۷۳ درصد نسبت به مقاومت فشاری ۳ روزه افزایش یافت در حالی که در تیمار عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب این رشد به ترتیب ۲۶، ۵۲، ۶۸ و ۷۵ درصد بود. بنابراین این نرخ در عیار سیمان ۳۵۰ بیشتر از ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

۳-۵- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه

مقایسه میانگین‌های برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در درصد زئولیت در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در تیمار بدون زئولیت با آب ترکیبی (C1Z1W2) نسبت به تیمار شاهد (C1Z1W1: بدون زئولیت با آب شهری) از برتری معنی‌داری (۱۷/۵ درصد افزایش) برخوردار بود و در تیمارهای بدون زئولیت با پساب صنعتی (C1Z1W3)، ۱۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C1Z2W2) و ۱۰ درصد زئولیت با پساب صنعتی (C1Z2W3) اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. ایندر حالی است که در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، اختلاف معنی‌دار مثبت مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی نسبت به تیمار شاهد (C2Z1W1: بدون زئولیت با آب شهری) در تیمارهای بدون زئولیت با آب ترکیبی (C2Z1W2) به میزان ۹/۷ درصد، ۱۰ درصد زئولیت با پساب صنعتی (C2Z2W3) به میزان ۱۰/۹ درصد و ۲۰ درصد زئولیت با آب شهری (C2Z3W1) به میزان ۷ درصد به دست آمد. همچنین در این عیار سیمان، میزان کاهش مقاومت فشاری آزمونه-های بتنی در هیچ تیماری بجز تیمارهای ۳۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C2Z4W2) و پساب (C2Z4W3) با تیمار شاهد از نظر آماری معنی‌دار نبود. این نتایج نشان می‌دهد که امکان استفاده از پساب صنعتی و زئولیت در طرح اختلاط بتن به ویژه در عیار سیمان بالا بدون آن که موجب کاهش معنی‌دار مقاومت فشاری بتن گردد و بلکه حتی این ویژگی را به طور معنی‌داری افزایش دهد وجود دارد. با این حال، با توجه به وجود برهمکنش سه‌گانه این عوامل که به دلیل اثرات متفاوت نوع آب و درصد زئولیت در عیارهای مختلف سیمان است، انتخاب بهترین سطح زئولیت و نوع آب با توجه به عیار سیمان مورد نظر باید در کارگاه بر اساس آزمون طرح اختلاط به دست آید.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در درصد زئولیت بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی

٤- نتیجه‌گیری

۱- نتایج نشان داد که همه ویژگی‌های کیفی آب شهری و آب ترکیبی در دامنه مجاز استانداردهای ملی و بین‌المللی است ولی این موضوع در پساب صنعتی برای پارامترهای pH و COD صادق نبود.

۲- استفاده از پساب صنعتی موجب کاهش غیر معنی‌دار (حدود ۳ درصد) مقاومت فشاری آزمونه بتنی نسبت به آب شهری گردید که این کاهش بر اساس استاندارد ملی شماره ۱۴۷۴۸ [۸] و آبا [۱۳] و استانداردهای بین‌المللی در محدوده مجاز کمتر از ۱۰ درصد است.

۳- جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان با زئولیت نسبت به شرایط بدون کاربرد زئولیت به ترتیب موجب ۴، ۱۴ و ۲۶ درصد مقامت فشاری آزمونه‌های بتنی گردید.

۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در درصد زئولیت نشان داد که در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در تیمار بدون زئولیت با آب ترکیبی نسبت به تیمار شاهد (بدون زئولیت با آب شهری) افزایش معنی‌داری (۱۷/۵ درصد افزایش) داشت در حالی که در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در تیمارهای بدون زئولیت با آب ترکیبی به میزان ۹/۷ درصد، ۱۰ درصد زئولیت با پساب صنعتی به میزان ۱۰/۹ درصد و ۲۰ درصد زئولیت با آب شهری به میزان ۷ درصد اختلاف معنی‌دار نسبت به تیمار شاهد (بدون زئولیت با آب شهری) داشت.

۵- استفاده همزمان از پساب صنعتی و زئولیت در طرح اختلاط بتن بدون ایجاد اثر منفی معنی‌دار بر مقاومت فشاری بتن امکان‌پذیر است. با این حال، با توجه به وجود برهمکنش این عوامل با عیار سیمان، انتخاب بهترین سطح این اجزاء باید بر اساس آزمون طرح اختلاط در کارگاه به دست آید.

٥- مراجع

[1]. Asadollahfardi, G, Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., Asadollahfardi, R. 2015. Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. Construction and Building Materials, 98: 305-314.

[2]. Al-Joulani, N.M.A. 2015. Effect of wastewater type on concrete properties.International Journal of Applied Engineering Research, 10(19): 39865-39870.

[3]. Asadollahfardi, G. Delnavaz, M., Rashnoiee, V., Ghonabadi, N. 2016. Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete. Construction and Building Materials, 105: 253-261.

[۴]. وزارت نیرو. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها. نشریه شماره ۵۳۵، ص ۱۳۵.

[5]. ASTM C1602. 2012. Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org

[6]. BS EN1008. 2002. Mixing water for concrete: Specification for sampling, testing and assessing the

www.SID.ir

Archive of SID

suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. British Standard Institution, www.bsigroup.com
[7]. ISO 12439, 2010. Mixing water for concrete. Last update: 2015.
[۸]. استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۷۴۸. ۱۳۹۱. استاندارد آب اختلاط بتن.
[9]. Al-Ghusain, I., Terro, M.J. 2003. Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait. Kuwait Journal of Science and Engineering, 30(1): 213-228.
[10]. Babu, G.R., Ramana, N.V. 2018. Feasibility of wastewater as mixing water in cement. Materials Today: Proceedings, 5: 1607-1614.
[11]. Al-Jabri, K.S., Al-Saidy A.H., Taha R., Al-Kemyani A.J. 2011. Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete. Procedia Engineering, 14: 370-376.
[۱۲]. مهردادی، ن.، اکبریان، ا.، حق‌اللهی، ع. ۱۳۸۸. استفاده از پساب تصفیه شده فاضلاب شهری در تهیه و نگهداری بتن. محیط-شناسی، ۳۵(۵۰): ۱۳۶-۱۲۹.
[۱۳]. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۸۳. آیین‌نامه بتن ایران (آبا). نشریه شماره ۱۲۰، ۴۳۴ص.
[14]. BS EN3148. 1980. Method of test for water for making concrete (including notes on the suitability of the water). British Standard Institution.
[15]. El-Nawawy, O.A., Ahmad, S. 1991. Use of treated effluent in concrete mixing in an arid climate. Cement and Concrete Composites, 13: 137-141.
[16]. Chatveera B., Lertwattanaruk, P. 2009. Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture. Journal of Environmental Management, 90: 1901-1908.
[۱۷]. اسراری، ا.، شجاع‌پور، ف. ۱۳۹۵. بررسی کیفیت بتن سیمان سفید تهیه شده با پساب بهداشتی تصفیه‌خانه فاضلاب (مطالعه موردی: شرکت سیمان سفید نی‌ریز). تحقیقات بتن، ۹(۲): ۱۳۰-۱۲۳.
[18]. Valipour M, Yekkalar M, Shekarchi M, Panahi S. 2014. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. Journal of Cleaner Production, 65: 418-423.
[19]. Madandoust, R., Sobhani, J., Ashoori, P. 2013. Concrete made with zeolite and metakaolin: a comparison on the strength and durability properties. Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), 14(4): 533-543.
[20]. Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarchi M. 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and Building Materials, 35: 1023-1033.
[21]. Khoshroo, M., Shirzadi Javid, A.A., Katebi, A. 2018. Effects of micro-nano bubble water and binary mineral admixtures on the mechanical and durability properties of concrete. Construction and Building Materials, 164: 371-385.
[22]. Feng N.Q., Peng G.F. 2005. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. Construction and Building Materials, 19(8): 579-584.
[۲۳]. احمدی، ج.، بیگدلو، ا.، سلیمانی‌راد، م. ۱۳۹۶. تاثیر استفاده از زئولیت، میکروسیلیس و متاکائولین بر کارایی و مقاومت بتن خودتراکم. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷(۳): ۷-۱.
[24]. Sabet F.A., Libre N.A, Shekarchi M. 2013. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials, 44: 175-184.
[25]. Nagrockiene, D. Girskas, G. 2016. Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition. Construction and Building Materials, 113: 964-969.
[26]. Ahmadi, B., Shekarchi, M. 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, 32: 134-141.
[27]. Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S. 2013. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. Construction and Building Materials, 41: 879-888.
[۲۸]. اسماعیل‌نیا عمران، م.، فریدی، م. ۱۳۹۳. رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی در بتن خودتراکم حاوی سنگدانه بازیافتی و زئولیت طبیعی. تحقیقات بتن، ۷(۱): ۲۲-۷.
[۲۹]. قویدل‌شهرکی، م.، میری، م.، رخشانی‌مهر، م.ا. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۶(۱): ۵۸-۴۹.
[۳۰]. احمدی، ج.، عزیزی، ح.، کوهی، م. ۱۳۹۴. بررسی تاثیر

www.SID.ir

Archive of SID

زئولیت در عیارهای مختلف سیمان بر روی مقاومت و نفوذپذیری بتن. تحقیقات بتن، ۸(۲): ۱۸-۵.

[۳۱]. رنجبر، م.م.، مدندوست، ر.، موسوی، س.ی. ۱۳۹۲. بررسی تاثیر استفاده ترکیبی از دوده زئولیت بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم. تحقیقات بتن، ۶(۱): ۷۱-۵۳.

[۳۲]. سلطانی، ا.، طریقت، ا.، رستمی، ر.ا. ۱۳۹۶. تاثیر رس‌های کلسینه شده و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن. مهندسی سازه و ساخت، ۴(۱): ۵۰-۳۳.

[33]. Jana, D. 2007, A new look to an old pozzolan: Clinoptilolite, A promising pozzolan in concrete. Proceedings of the 29th conference on cement microscopy, quebec city, Canada, may 20-24.

[34]. APHA. 2012. Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association, 18th Edition, Washington DC.

[۳۵]. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۸۳. تفسیر بخش اول آیین‌نامه بتن ایران (آبا). ضمیمه نشریه شماره ۱۲۰، ۲۲۷ص.

[۳۶]. استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۷۷. ۱۳۹۳. سنگدانه‌ها- دانه-بندی سنگدانه‌های ریز و درشت- روش آزمون.

[۳۷]. استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲. ۱۳۹۴. سنگدانه‌های بتن- ویژگی‌ها.

[۳۸]. استاندارد ملی ایران شماره ۵۸۱. ۱۳۹۳. ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های بتن در آزمایشگاه- آیین کار.

[۳۹]. استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۱-۱. ۱۳۸۸. بتن تازه- قسمت ۱: نمونه‌برداری.

[۴۰]. استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۶. ۱۳۷۱. تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های بتن.

[41]. Vejmelková, E., Ondráček, M., Černý, R. 2012. Mechanical and hydric properties of high performance concrete containing natural zeolites. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, 6(3): 186-189.

www.SID.ir

Archive of SID

Interaction of treated industrial wastewater, zeolite and cement content on plain concrete at different curing ages

Kami Kaboosi *
Department of Water Engineering, Gorgan branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran.
Khashayar Emami
Department of Civil Engineering, Gorgan branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran.
Mehran Fadavi
Department of Civil Engineering, Gorgan branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran.

Abstract

Global water scarcity and air pollution by greenhouse gases have amplified the need to use of unconventional water and environmental friendly materials in the concrete industry. Accordingly, the present study was conducted to investigate interaction of water quality (three levels including including tap water, treated industrial wastewater and the mixture of equal ratio of tap water and treated industrial wastewater), zeolite (four levels including 0, 10, 20 and 30 percent of zeolite application instead of cement in the concrete mix design), cement content (two levels including 250 and 350 $kg.m^{-3}$) and curing age (including 3, 7, 21, 56 and 90 days) on concrete compressive strength. Regarding to the considerable types of the experimental treatments (120 treatment) in this research and with respect to the lack of statistical analysis in previous studies, the concrete compressive strength data of this study were statistically analyzed by analysis of variance and means comparison tests based on a completely randomized design with factorial experiment with three replications. The results of analysis of variance test showed that the simple effect of the investigated factors, their two-way interactions, except water type*curing age and zeolite *curing age, as well as the three-way interaction of cement content*water type*zeolite on the compressive strength of the concrete specimens were statistically significant. Due to the lack of significant negative effect of treated industrial wastewater and the mixture of equal tap water and treated industrial wastewater on the compressive strength of concrete, it is recommended to use these waters in the construction of plain concrete. However, the three-way interaction of water type with zeolite and cement content showed that the effect of investigated waters on compressive strength of concrete specimens in different percentage of zeolite is depended on cement content. So, the choice of the best application level of zeolite and water type according to the cement content should be selected based on the in- situ mix design test.

Keywords: Analysis of variance, Compressive strength, Concrete materials, Mix design, Unconventional water.

* Corresponding Author: kkaboosi@yahoo.com

www.SID.ir