نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال چهارم، شماره ۴، صفحات ۶۹-۸۰، زمستان ۱۳۹۸

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 4, No. 4, PP. 69-80, Winter 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2019.189220.1161

مقاله پژوهشی

تاثیر استفاده از آب خاکستری به‌همراه زئولیت در ساخت و عمل‌آوری بتن غیرمسلح در عیارهای سیمان و سنین مختلف

کامی کابوسی[۱*]، فرزاد کابوسی[۲] و مهران فدوی[۲]

۱- گروه مهندسی آب، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.
۲- گروه عمران، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: kkaboosi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴

چکیده

نظر به سهم قابل‌توجه صنعت بتن در مصرف آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای، بررسی امکان استفاده از آب‌های نامتعارف و مصالح دوستدار محیط‌زیست در این صنعت ضروری است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی برهم‌کنش سه نوع آب (شامل آب شهری، آب خاکستری و ترکیب آب شهری و آب خاکستری با نسبت برابر)، ۴ جایگزینی سیمان با زئولیت (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد)، دو سطح مصالح سیمانی (شامل ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و پنج سن عمل‌آوری (۳، ۷، ۲۱، ۵۶ و ۹۰ روز) بر مقاومت فشاری بتن در سه تکرار با ساخت ۳۶۰ آزمونه بتنی صورت‌گرفت. نظر به تنوع قابل‌ملاحظه تیمارهای آزمایش در این پژوهش و با توجه به عدم تجزیه و تحلیل‌های آماری در پژوهش‌های قبلی، نتایج پژوهش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت آزمایش فاکتوریل تحت آزمون‌های تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها (LSD) قرارگرفت. نتایج نشان داد که استفاده از آب خاکستری و ترکیبی موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شد. هم‌چنین، اگرچه کاربرد زئولیت در هر دو عیار سیمان عموماً منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن شد، نرخ تغییرات در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به‌مراتب کمتر از عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود، به‌طوری‌که جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت در مقایسه با تیمار عدم‌کاربرد زئولیت در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کاهش مقاومت فشاری به‌میزان به‌ترتیب ۱۵/۰، ۲۶/۱ و ۳۴/۰ درصد شد. ولی در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌ها را به‌ترتیب ۲/۴-، ۵/۴+ و ۱۳/۷- درصد تغییر داد. با این‌حال، با توجه به برهم‌کنش معنی‌دار این دو عامل با نوع آب، که به‌معنای اثرات متفاوت نوع آب و درصد زئولیت در عیارهای مختلف سیمان است. انتخاب بهترین سطح کاربرد زئولیت و نوع آب با توجه به عیار سیمان موردنظر باید براساس آزمون طرح اختلاط در کارگاه به‌دست آید.

کلمات کلیدی: آب نامتعارف، برهم‌کنش، تجزیه واریانس، سن بتن، طرح اختلاط.

Research Paper

The Effect of Greywater and Zeolite Usage in the Construction and Curing of Plain Concrete in Different Cement Contents and Ages

Kami Kaboosi[1*], Farzad Kaboosi[2] and Mehran Fadavi[2]

1- Department of Water Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran.
2- Department of Civil Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran.
* Corresponding author, Email: kkaboosi@yahoo.com

Received: 09/06/2019
Revised: 05/10/2019
Accepted: 06/10/2019

Abstract

Regarding the significant contribution of the concrete industry in water consumption and greenhouse gas emissions, it is necessary to study the possibility of using unconventional waters and environmental friendly materials in this industry. Accordingly, the present study was conducted to investigate 120 treatments including three levels of water quality (tap water, greywater and mixture of equal ratio of tap water and greywater), four levels of zeolite (0, 10, 20 and 30 percent of zeolite application instead of cement in the concrete mix), two levels of cement content (250 and 350 $kg.m^{-3}$) and five curing ages (3, 7, 21, 56 and 90 days) in three replications by construction of 360 concrete specimens. Considering the considerable types of the experimental treatments in this study and in respect to the lack of statistical analysis in previous studies, the results of this study were analyzed based on a completely randomized design with factorial experiment using analysis of variance (ANOVA) and means comparison (LSD) tests. The results showed that the use of greywater, in whole or combined, increased the compressive strength of concrete. Also, although the application of zeolite in both cement contents generally reduced the compressive strength of concrete, the rate of change was significantly lesser in cement content 350 $kg.m^{-3}$ than 250 $kg.m^{-3}$, so that replacement of 10%, 20% and 30% of cement by zeolite led to decrease of the compressive strength by 15.0%, 26.1% and 34.0%, respectively; whereas in the cement content 350 $kg.m^{-3}$, the changes of compressive strength of specimens were -2.4%, +5.4% and -13.7%, respectively. However, considering the significant interaction of these two factors with water type, which means the different effects of water quality and the percentage of zeolite on different contents of cement, the best level of application of zeolite and water type regarding the cement content should be selected based on in-situ mix design test.

Keywords: Analysis of variance, Curing age, Interaction, Mix design, Unconventional water.

۱- مقدمه

برآورد شده است که آب‌پوشی (hydration) هر گرم سیمان به حدود ۰/۲۵ گرم (Alradhawi and Angalekar, 2016) و ساخت هر مترمکعب بتن به ۱۵۰ لیتر آب نیاز دارد (Asadollahfardi et al., 2015). به‌همین دلیل، صنعت ساختمان با مصرف یک ششم آب شیرین دنیا، یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان آب در بین صنایع مختلف شناخته شده است (Asadollahfardi et al., 2015; Al-Joulani, 2015). در این شرایط آب خاکستری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌های جایگزینی با آب شرب در صنعت بتن معرفی شده است (Ghrair et al., 2018). آب خاکستری (greywater) که به‌آن فاضلاب خاکستری (grey wastewater) نیز گفته می‌شود، فاضلاب خروجی از وان حمام، دوش، ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی و سینک ظرف‌شویی آشپزخانه را شامل می‌شود، اما فاضلاب سرویس بهداشتی (توالت) را دربر نمی‌گیرد (Alqam et al., 2014). البته برخی از پژوهشگران فاضلاب آشپزخانه را نیز مستثنی کرده‌اند (Ghrair et al., 2018).

براساس اغلب استانداردهای کیفیت آب بتن، در صورتی‌که 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 قابل‌قبول است (Babu and Ramana, 2018; ASTM C1602, 2012; Al-Jabri et al., 2011؛ آبا، ۱۳۸۳؛ استاندارد ملی شماره ۱۴۷۴۸، ۱۳۹۱؛ مهردادی و همکاران، ۱۳۸۸). با این حال بر اساس استاندارد BS 3148 (1980) انگلستان (نسخه جایگزین آن BS EN1008, 2002 می‌باشد) کاهش مقاومت فشاری بتن در صورت استفاده از آب غیرآشامیدنی تا ۲۰ درصد نیز مجاز دانسته شده است، مشروط بر آن‌که این کاهش مقاومت از طریق اصلاح طرح اختلاط جبران شود (Babu and Ramana, 2018).

استفاده از آب‌های نامتعارف مانند آب شور (Al-Joulani, 2015)، فاضلاب و پساب‌های شهری (Asadollahfardi et al., 2016; Al-Joulani, 2015; Al-Ghusain and Terro, 2003; El-Nawawy and Ahmad, 1991؛ مهردادی و همکاران، ۱۳۸۸)، آب خاکستری (Ghrair et al., 2018; Alradhawi and Angalekar, 2016; Alqam et al., 2014)، آب روغنی (Al-Joulani, 2015)، کارواش (Al-Jabri et al., 2011)، شستشوی تراک‌میکسر، کارگاه تولید بتن صنعتی (batching plants) و کارگاه شن و ماسه (Asadollahfardi et al., 2015; Chatveera and Lertwattanaruk, 2009)، کارخانه سیمان (اسراری و شجاع‌پور، ۱۳۹۵) و تصفیه‌خانه‌های اسمز معکوس آب شرب (Babu and Ramana, 2018) برای ساخت بتن مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیبات آلی موجود در پساب می‌تواند آب‌پوشی (hydration) سیمان را به تاخیر اندازد، زمان گیرش اولیه و نهایی را افزایش دهد یا هوای بیشتری را در بتن حبس کند (Asadollahfardi et al., 2016; Al-Ghusain and Terro, 2003). 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 (Asadollahfardi et al., 2016). ترکیبات آمونیومی موجب سیلان ملات (جریان آب به سمت بالا از بتن به دلیل فشار اسمزی) می‌شود (Al-Ghusain and Terro, 2003). غلظت بالای سولفات آب موجب حمله سولفات‌ها و ایجاد ترک در بتن می‌شود (Al-Jabri et al., 2011). انتظار می‌رود که وجود ترکیبات صابونی که موجب ایجاد حباب‌های هوا در بتن می‌شود، اثر منفی بر مقاومت فشاری بتن ایجاد کند. با این‌حال با توجه به حجم آب مورد استفاده، این اثر معنی‌دار نیست (Alqam et al., 2014). Alqam et al. (2014) گزارش کردند که استفاده از آب خاکستری تاثیر محسوسی بر زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان ندارد، در حالی‌که پژوهش Ghrair et al. (2018) نشان داد زمان گیرش اولیه توسط آب خاکستری ۲۵-۲۰ دقیقه دیرتر از آب مقطر است. با این‌حال، این مدت در محدوده استاندارد ASTM C94 است که بیان می‌کند اختلاف زمان گیرش اولیه خمیر سیمان ساخته شده با آب مورد تردید نسبت به آب مقطر نباید زودتر از ۶۰ دقیقه یا دیرتر از ۹۰ دقیقه باشد. هم‌چنین استفاده از آب خاکستری به‌دلیل وجود شوینده‌ها (و کاهش کشش سطحی آب) و مواد محلول موجب کاهش جزئی اسلامپ بتن شد که این موضوع می‌تواند پتانسیل کاهش هزینه‌های ساخت بتن به‌دلیل کاهش مصرف فوق روان‌کننده‌ها را ایجاد نماید (Ghrair et al., 2018; Alqam et al., 2014).

گزارش شده است که استفاده از آب خاکستری تصفیه‌شده و تصفیه‌نشده موجب کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف (تا ۲۰۰ روز) شد؛ با این‌حال درصد کاهش در سنین بالا و هم‌چنین در آب خاکستری تصفیه‌شده کمتر و عموماً در محدوده کاهش مجاز ۱۰ درصد بود (Ghrair et al., 2018). هم‌چنین استفاده از آب خاکستری برای ساخت و عمل‌آوری بتن نه تنها منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین تا ۶۰ روز نشد بلکه در برخی موارد آن را به‌میزان جزئی افزایش داد. استفاده از آب خاکستری برای عمل‌آوری بتن ساخته شده با آب آشامیدنی نیز موجب اثر مثبت بر مقاومت فشاری بتن شد (Alqam et al., 2014). نتایج مهردادی و همکاران (۱۳۸۸) و Asadollahfardi et al. (2016) نشان داد که اگر چه استفاده از پساب شهری به‌دلیل بالا بودن اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD) و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) در آن‌ها موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شد، درصد این کاهش نسبت به آب شهری کمتر از ۱۰ درصد بود.

زئولیت‌های طبیعی با فرمول کلی AlO_2SiO_2, H_2O شامل

گروه وسیعی از آلومینوسیلیکات‌های هیدراته هیپتوکریستالی (Cryptocrystalline alumino-silicate) با ساختار لانه زنبوری سه‌وجهی دارای یک شبکه تتراهیدرال اتم‌های اکسیژن در اطراف سیلیسیوم (Si-O) و آلومینیوم (Al-O) است (Sabet et al., 2013; Valipour et al., 2013; Ahmadi and Shekarchi, 2010). بالا بودن سطح ویژه (۴۵-۳۵ مترمربع بر گرم) به‌همراه عدم توازن الکتریکی (بار منفی) زئولیت‌ها موجب قابلیت تبادل کاتیونی بالای (حدود ۳۰۰-۲۰۰ میلی‌اکی‌والان در صد گرم) آن‌ها شده است (Sabet et al., 2013; Ahmadi and Shekarchi, 2010) علی‌رغم ساختار بلوری، ویژگی‌های پوزولانی زئولیت‌های طبیعی اثبات شده است. این ویژگی به‌وجود مقدار قابل‌توجه اکسید سیلیسیوم (SiO_2) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) واکنش‌پذیر در زئولیت که با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) سیمان برای تولید بیشتر سیلیکات کلسیم و آلومینوسیلیکات کلسیم واکنش می‌دهد، نسبت داده شده است (Khoshroo et al., 2018a; Sabet et al., 2013). این واکنش از طریق تولید بیشتر ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موجب کاهش فضای خالی و پر شدن حفرات بیشتر بتن شده و در نهایت با بهبود ریزساختار بتن نفوذ آب به آن‌را کاهش و مقاومت فشاری آن‌را افزایش می‌دهد. علت دیگر این امر، درصد بالای مواد سیلیسی زئولیت و ضریب نرمی بالای آن ذکر شده است (Valipour et al., 2014; Ahmadi and Shekarchi, 2010; Jana, 2007؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ قویدل شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳). هم‌چنین حل شدن هیدروکسید کلسیم و مواد قابل‌حل 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 قابل‌حل به سطح بتن جلوگیری کرده و موجب افزایش وزن مخصوص و کاهش فضای خالی بتن می‌شود (اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳).

گزارش شده است که کاربرد زئولیت در بتن به‌دلیل توان تبادل یونی، چگالی پایین و روزنه‌های فراوان (اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳) موجب ریزتر شدن منافذ، کاهش خلل و فرج، افزایش منافذ بسته و انفصال ارتباط موئینه حفرات جذب آب (Nagrockiene and Girskas, 2016؛ قویدل‌شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴)، کاهش سیالیت و اسلامپ (Khoshroo et al., 2018a؛ Raggiotti et al., 2018؛ Markiv et al., 2016؛ Sabet et al., 2013؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۲؛ جاویدان و زمانی‌ابیانه، ۱۳۹۱)، کاهش نرخ افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه (Khoshroo et al., 2018a)، جلوگیری از آب انداختگی و جداشدگی بتن تازه (Sabet et al., 2013؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳)، سهولت پمپاژ (اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳)، افزایش مقاومت و پایایی بتن به‌ویژه در برابر واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها (Sabet et al., 2013؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳)، کاهش درصد جذب آب و نفوذپذیری اولیه و نهایی بتن (Nagrockiene and Girskas, 2016؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ قویدل شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۲)، کاهش عمق نفوذ آب (Markiv et al., 2016؛ قویدل‌شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵)، کاهش ضریب جذب آب موئینه (Khoshroo et al., 2018b؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴)، کاهش ضریب مهاجرت و نفوذ یون کلر (Khoshroo et al., 2018b؛ قویدل شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴)، افزایش مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش احتمال خوردگی آرماتور (Khoshroo et al., 2018b؛ سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ قویدل‌شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵) شده است.

گزارش شده است که مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰ درصد زئولیت در طولانی مدت تقریباً مشابه با بتن شاهد (بدون استفاده از زئولیت) بود (Khoshroo et al., 2018a). هم‌چنین در حالی‌که استفاده از ۱۰ و ۲۰ درصد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶) و ۱۰ و ۱۵ درصد (رنجبر و همکاران (۱۳۹۲) زئولیت در بتن به‌جای سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری به‌ترتیب ۷ و ۳ روزه بتن نسبت به‌عدم کاربرد زئولیت شد، مقاومت فشاری به‌ترتیب ۲۸ و ۹۰ روزه بتن نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت که این موضوع با نتایج Valipour et al. (2013) نیز همخوانی دارد. سلطانی و همکاران (۱۳۹۶) افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد زئولیت در سطح ۱۰ درصد را بیشتر از ۲۰ درصد گزارش کردند در حالی‌که نتایج Khoshroo et al. (2018a) نشان داد که این افزایش در سطح ۱۵ درصد بیشتر از ۱۰ درصد است. در پژوهشی جایگزینی تمام سطوح از ۱۰ تا ۳۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم در تمام سنین نسبت به عدم کاربرد زئولیت شد (اسماعیل‌نیا عمران و فریدی، ۱۳۹۳). از سوی دیگر در برخی پژوهش‌ها کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد زئولیت مشاهده شده است. گزارش شده است که جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با زئولیت طبیعی موجب ۱۷-۵ درصد کاهش مقاومت فشاری بتن شد (Madandoust et al., 2013). براساس نتایج یک پژوهش، اگرچه جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با زئولیت موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شد ولی این اثر در سطح کاربرد ۲۰ درصد جزئی و در سطح کاربرد ۳۰ درصد کاهشی بود (Valipour et al., 2014). هم‌چنین نتایج Khoshroo et al. (2018b) و Sabet et al. (2013) نشان داد که کاربرد ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت مقاومت فشاری بتن را به‌طور معنی‌داری تغییر نداد. پژوهش Raggiotti et al. (2018) نشان داد که استفاده از

سطوح مختلف زئولیت تا ۲۰ درصد در بتن به‌جای سیمان (دو تیپ سیمان متفاوت) موجب کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز شد، اگرچه این کاهش در سنین ابتدایی بیشتر و در سنین بالاتر جزئی بود. نتایج مشابهی برای زئولیت ۱۰ درصد توسط Markiv et al. (2016) نیز گزارش شد.

اگرچه نتایج پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهد که کاربرد زئولیت طبیعی می‌تواند موجب افزایش دوام بتن شود، نتایج مطالعات به‌دلیل تنوع و تفاوت ساختار، ترکیبات شیمیایی، واکنش‌پذیری و درجه خلوص زئولیت‌های طبیعی مشابه نبوده و حتی بعضاً متناقض است (Najimi et al., 2012; Jana, 2007). از سوی دیگر، در کشورهای دارای کمبود منابع آب شیرین، انجام پژوهش مستمر برای یافتن منابع آب جایگزین (Alqam et al., 2014) و ارزیابی و توسعه استانداردهای آب اختلاط بتن ضروری است (Al-Jabri et al., 2011). لذا، با توجه به داده‌های منتشر شده اندک در زمینه استفاده از آب خاکستری به‌عنوان آب اختلاط بتن و نیز عدم بررسی برهمکنش کیفیت آب، زئولیت، عیار سیمان و سن عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن، پژوهش حاضر به مطالعه اثر خواهد پرداخت. هم‌چنین در پژوهش‌های پیشین، تغییر مقاومت فشاری بتن تحت تاثیر کاربرد زئولیت یا کیفیت آب فقط برحسب میزان یا نرخ تغییر گزارش شده بود. از آن‌جا که این نوع گزارش‌ها نمی‌توانند معنی‌داری اختلاف بین تیمارها (طرح‌های اختلاط بتن) را از نظر آماری منعکس نمایند، در پژوهش حاضر از تحلیل‌های آماری شامل آزمون تجزیه واریانس و آزمون مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تیمارها و طرح آماری

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر استفاده منابع آب نامتعارف به‌همراه زئولیت برای تهیه و عمل‌آوری بتن غیرمسلح در عیارهای مختلف سیمان صورت گرفت. آزمایش با چهار عامل به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ساخت ۳۶۰ بلوک بتنی در قالب ۱۲۰ تیمار در سه تکرار صورت گرفت. تیمارها شامل ترکیب حالت‌های مختلف متشکل از سه نوع آب (شامل W1: آب شهری، W2: ترکیب آب‌های شهری و خاکستری با نسبت برابر و W3: آب خاکستری)، چهار درصد جایگزینی سیمان با زئولیت (شامل کاربرد Z1: ۰٪، Z2: ۱۰٪، Z3: ۲۰٪ و Z4: ۳۰٪)، دو سطح مصالح سیمانی بتن (شامل C1: ۲۵۰ و C2: ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و پنج سن عمل‌آوری (شامل d1: ۳، d2: ۷، d3: ۲۱، d4: ۵۶ و d5: ۹۰ روز) بود. مقاومت فشاری بتن به‌عنوان متغیر وابسته مورد سنجش قرار گرفت.

۲-۲- آب اختلاط

آب خاکستری مورد استفاده از محل تخلیه کانال اصلی جمع‌آوری فاضلاب خانگی و رواناب بارندگی یک شهرک مسکونی در شهر گرگان (مرکز استان گلستان) به رودخانه تهیه شد. با توجه به این‌که در ده روزه منتهی به زمان تهیه آب از این کانال هیچ بارندگی در محدوده تحت زهکشی آن صورت نگرفت، بنابراین آب مورد استفاده صرفاً فاضلاب خانگی است. فاضلاب خانگی این کانال صرفاً دربرگیرنده فاضلاب تصفیه نشده آشپزخانه، حمام و کف‌شور حیاط است. پارامترهای کیفی هر سه نوع آب (آب خاکستری، آب شهری و آب ترکیبی) مطابق روش استاندارد (APHA, 2012) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). برای مقایسه کیفیت آب‌های مورد بررسی با استانداردهای ملی و بین‌المللی، محدوده مجاز ناخالصی‌های آب برای ساخت بتن غیرمسلح در جدول ۲ ارائه شده است. با مقایسه حدود ذکر شده استانداردهای مختلف برای ناخالصی‌های مجاز آب اختلاط بتن در جدول ۲ می‌توان دید که محدوده مجاز استانداردهای مختلف عموماً به یکدیگر نزدیک و بعضاً مشابه یکدیگر هستند. با این‌حال، بین حد مجاز کل جامدات معلق استاندارد EPA (2012) با سایر استانداردها، کل جامدات محلول کشور انگلستان (۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با آبا (۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و بین حد مجاز کلرید آبا (۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و استاندارد ۱۴۷۴۸ ایران (۴۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با یکدیگر و با دیگر استانداردها اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد. همچنین مقایسه ویژگی‌های کیفی آب‌ها (جدول ۱) با دیگر استانداردها (جدول ۲) نشان می‌دهد که کیفیت آب شهری، آب خاکستری و آب ترکیبی در تمام ویژگی‌ها، به‌جز پارامترهای BOD_5 و TSS در آب خاکستری و ترکیبی، در محدوده مجاز است؛ به‌طوری‌که BOD_5 این آب‌ها به‌ترتیب ۱۶۷ و ۳۳ درصد بیشتر از حد مجاز استاندارد است. گزارش شده است که افزایش BOD_5 منجر به کاهش مقاومت بتن شد (مهردادی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین می‌توان انتظار داشت که مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی ساخته شده با آب خاکستری کمتر از آب ترکیبی و آب شهری باشد.

۲-۳- زئولیت

زئولیت پودری مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت (Clinoptilolite) با فرمول شیمیایی $KNa_2Ca_2(Si_{29}Al_7)O_{72}.24H_2O$ و 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 ارائه شده است. حداقل فعالیت پوزولانی، که برابر مجموع درصد وزنی اکسید سیلیسیوم (SiO_2)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و اکسید آهن (Fe_2O_3) است، براساس ASTM C618 برای پوزولان‌های طبیعی

گروه N باید ۷۰ درصد باشد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Najimi et al., 2012) که برای زئولیت مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۸۰/۲۰ درصد است. هم‌چنین براساس این استاندارد بیشینه مقدار تری‌اکسید گوگرد و درصد کسر وزنی باید به‌ترتیب ۴ و ۱۰ درصد باشد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Najimi et al., 2012) که اولی مطابق استاندارد و دومی کمی بیشتر است. دلیل این‌امر دمای بالای فرآوری زئولیت (تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس) به‌جای دمای استاندارد ASTM C618 (تا ۷۵۰ درجه سلسیوس) است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی آب‌های مورد استفاده (بر حسب $mg.l^{-1}$ به‌جز برای pH و هدایت الکتریکی)

نوع آب	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	۰/۰	۵۰۹/۴	۲۰۲/۱	۱۳۴/۵	۸۴۶/۰	۱۰۵/۲	۵۷/۲	۱۰۴/۷	۵/۰	۲۷۲/۰
آب خاکستری	۰/۰	۶۲۲/۳	۲۶۹/۵	۱۵۳/۷	۱۰۴۵/۵	۱۵۲/۳	۵۵/۹	۱۴۹/۵	۶/۰	۳۶۳/۷

نوع آب	کل جامدات محلول	هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	pH	سختی کل	فسفر کل	نیتروژن کل	BOD	COD	TSS
آب شهری	۸۰۶	۱/۲۶	۷/۶	۳۸۵	۰/۵	۱/۲	۰	۰	۰
آب ترکیبی	۹۹۵	۱/۵۶	۷/۸	۴۹۷/۵	۴/۴	۱۷/۹	۹۸	۱۵۵	۴۰
آب خاکستری	۱۱۸۴	۱/۸۵	۷/۹	۶۱۰	۸/۲	۳۴/۶	۱۹۶	۳۱۰	۸۰

جدول ۲- محدوده مجاز ناخالصی آب اختلاط برای بتن غیرمسلح (برحسب $mg.l^{-1}$ به‌جز در موارد علامت‌دار)[+]

ویژگی	محدوده مجاز	منبع	ویژگی	محدوده مجاز	منبع	ویژگی	محدوده مجاز	منبع
pH	۷-۹	BS 3148	کربنات	۱۰۰۰	Babu and Ramana (2018)	نیترات	۵۰۰	استاندارد ۱۴۷۴۸
	۶-۹	EPA (2012)		۱۰۰۰	تفسیر آبا		۵۰۰	BS EN1008
	۵-۸/۵	آبا	بی‌کربنات	۴۰۰	Babu and Ramana (2018)	قلیائیت کل*	۵۰۰	BS 3148
کل جامدات معلق (TSS)	۲۰۰۰	Babu and Ramana (2018)		۴۰۰-۱۰۰۰	تفسیر آبا		۱۵۰۰	BS EN1008
	۳۰	EPA (2012)	سولفات	۳۰۰۰	ASTM C1602		۶۰۰	آبا
	۲۰۰۰	آبا		۳۰۰۰	آبا	مواد غیرآلی	۳۰۰۰	Babu and Ramana (2018)
کل جامدات محلول (TDS)	۲۰۰۰	BS 3148		۲۰۰۰	Ghrair et al. (2018)	مواد آلی	۲۰۰	Babu and Ramana (2018)
	۳۵۰۰۰	آبا		۲۰۰۰	استاندارد ۱۴۷۴۸	شوینده‌ها**	۲	BS EN1008
کل جامدات	۵۰۰۰۰	ASTM C1602	منیزیم	۲۰۰۰	BS 3148	شکر	۱۰۰	Babu et al. (2018)
کلرید	۱۰۰۰۰	آبا	سدیم	۲۰۰۰	BS 3148		۱۰۰	استاندارد ۱۴۷۴۸
	۱۰۰۰	ASTM C1602	کلسیم	۲۰۰۰	BS 3148	BOD_5	۳۰	EPA (2012)
	۵۰۰	Ghrair et al. (2018)	پتاسیم	۲۰۰۰	BS 3148	COD	۵۰۰	Ghrair et al. (2018)
	۴۵۰۰	استاندارد ۱۴۷۴۸	فسفات	۱۰۰	استاندارد ۱۴۷۴۸	چربی و روغن	۵۰	Babu et al. (2018)
باقی‌مانده کلر	۱	EPA (2012)		۱۰۰	BS EN1008	کلیفرم مدفوعی***	۲۰۰	EPA (2012)

[+] در این جدول مقادیر استاندارد EPA (2012) برای استفاده مجدد از فاضلاب شهری پس از تصفیه ثانویه و گندزدایی است.

* بر حسب میلی‌گرم بر لیتر معادل کربنات کلسیم، ** کف باید طی مدت دو دقیقه محو شود، *** تعداد در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان و زئولیت مصرفی (برحسب 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 (K_2O)	۰/۵۱	۱/۲۷	درصد کسر وزنی (LOI)	۲/۹۸	۱۲/۹۷

۲-۴- مصالح مورد استفاده، طرح اختلاط، روش ساخت و عمل‌آوری بلوک‌های بتنی

برای ساخت بتن از دو نوع سنگدانه شن و ماسه از نوع شکسته به‌صورت دوبار شسته استفاده شد. وزن مخصوص مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به‌ترتیب ۲۵۵۰ و ۲۶۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. آزمون دانه‌بندی سنگدانه‌ها براساس استاندارد ملی شماره ۴۹۷۷ (۱۳۹۳) صورت گرفت. منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه و اطلاعات حاصل از آن نشان داد که الزامات استاندارد ملی شماره ۳۰۲ (۱۳۹۴) رعایت شده است، به‌طوری که بیشینه اندازه مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به‌ترتیب ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر 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 شد. ویژگی‌های شیمیایی سیمان در جدول ۳ ارائه شده است.

ساخت بلوک‌های بتنی به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر بر اساس استاندارد ملی شماره ۵۸۱ (۱۳۹۳) در میکسر ۱۰۰ لیتری و تراکم بتن در قالب به‌روش دستی صورت‌گرفت. نمونه‌برداری از بتن تازه مطابق استاندارد ملی شماره ۳۲۰۱-۱ (۱۳۸۸) صورت گرفت. علی‌رغم آن‌که در این پژوهش مقاومت خاصی از بتن مدنظر نیست و نتایج صرفاً برای مقایسه نسبی با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌منظور افزایش دقت آزمایش، ابتدا ۵۴ بلوک 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 درنهایت برمبنای بیشترین مقاومت سه‌روزه، طرح اختلاط مناسب براساس وزن مخصوص بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مکعب (میانگین وزن مخصوص طرح‌های اختلاط نهایی ذکر شده در جدول ۴، نسبت وزنی برابر مصالح شن و ماسه و نسبت آب به مواد سیمانی ۴۵ درصد (با لحاظ‌کردن میزان رطوبت مصالح براساس درصد رطوبت وزنی) انتخاب شد. جزئیات طرح اختلاط تیمارهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این‌که کاربرد زئولیت موجب کاهش روانی و اسلامپ بتن می‌شود، از یک فوق‌روان‌کننده تجاری برپایه کربوکسیلاتی استفاده شد. مقدار مصرف آن براساس آزمون و خطا در طرح‌های اختلاط مقدماتی براساس اسلامپ ۱۰-۸ سانتی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین برای اطمینان از کارایی بتن و کنترل آن، آزمایش اسلامپ بتن برای هر طرح اختلاط (تیمار) حداقل یک‌بار تکرار شد.

در این پژوهش مجموعاً ۴۱۴ بلوک بتنی ساخته شد که از این تعداد ۵۴ عدد برای انتخاب طرح اختلاط مناسب و ۳۶۰ عدد برای آزمایش نهایی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ساخته شدن به‌مدت ۲۴ ساعت درون قالب در محیط آزمایشگاه (دمای ۴±۲۰ درجه سلسیوس) نگهداری شدند. سپس قالب‌ها باز شده و عملیات عمل‌آوری آغاز شد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Al-Jabri et al., 2011). به‌منظور شبیه‌سازی کامل تاثیر تیمارهای کیفیت آب بر مقاومت فشاری، عمل‌آوری بلوک‌های ساخته شده با آب اختلاط صورت گرفت. برای این‌منظور 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 به‌دلیل نشت از دیواره با اضافه کردن همان نوع آب جبران شد به‌گونه‌ای که سطح آب درون حوضچه همواره ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح بالایی بلوک‌ها باشد. به‌منظور 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 سلسیوس نگهداری شد (Al-Ghusain and Terro, 2003). مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی توسط دستگاه جک هیدرولیکی دیجیتال مدل ADR-Auto 3000 ساخت کارخانه ELE International با سرعت بارگذاری ۶/۸ کیلونیوتون بر ثانیه اندازه‌گیری شد. برای این‌منظور الزامات و شرایط استاندارد ملی شماره ۳۲۰۶ (۱۳۷۱) رعایت شد. شکل ۱ نمایی از مصالح و مراحل اجرایی پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاط (برحسب کیلوگرم در هر مترمکعب بتن)

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

۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل (نوع آب، درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، عیار سیمان و سن عمل‌آوری بتن) بر متغیر وابسته (مقاومت فشاری بتن) از تحلیل آماری استفاده شد. لازم‌به توضیح است که در پژوهش‌های قبلی در این زمینه عموماً اثر متغیرهای مستقل (عناصر طرح اختلاط) بر متغیر وابسته (ویژگی‌های مقاومتی و دوام بتن) صرفاً به‌صورت درصد تغییر بیان شده است و تجزیه و تحلیل‌های آماری برای بررسی معنی‌داری یا عدم معنی‌داری این تغییرات صورت نگرفته است. از سوی دیگر در پژوهش حاضر چهار عامل نوع آب، درصد زئولیت، عیار سیمان و سن آزمونه‌ها و برهمکنش بین آن‌ها (۱۰ حالت برهمکنش آماری) می‌تواند عامل تغییر میزان مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی باشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر آزمون‌های تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین (برمبنای آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪) با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ (IBM, 2010) بر روی داده‌های مقاومت فشاری انجام گرفت.

شکل ۱- محل تهیه آب خاکستری، مخزن عمل‌آوری و مصالح و تجهیزات مورد استفاده

۳- نتایج و بحث

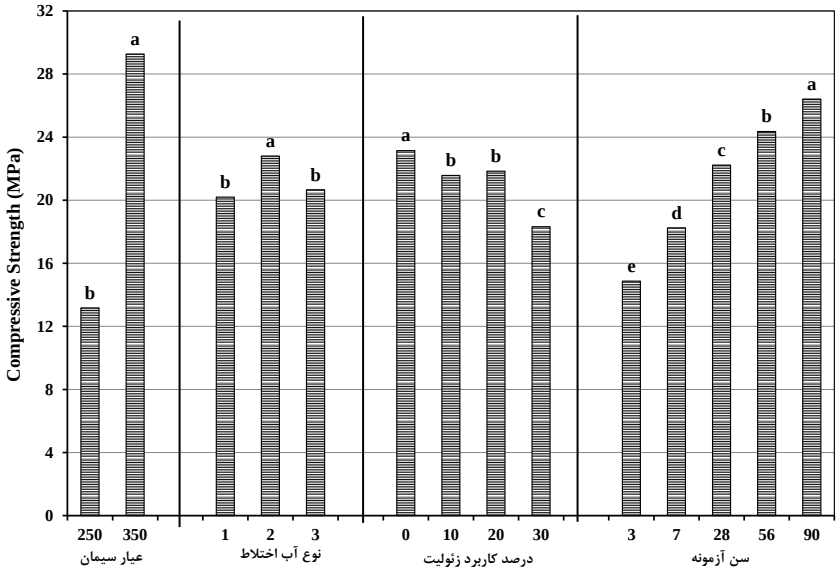
نتایج آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) نشان داد که اثر ساده عیار سیمان، نوع آب، زئولیت و سن آزمونه، برهمکنش‌های دوگانه عیار سیمان در نوع آب، عیار سیمان در زئولیت و عیار سیمان در سن آزمونه و برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت بر مقاومت فشاری بتن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۵). هم‌چنین برهمکنش‌های دوگانه نوع آب در زئولیت، نوع آب در سن آزمونه و زئولیت در سن آزمونه و 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 برهمکنش دوگانه نوع آب در زئولیت نشان‌دهنده روند مشابه تاثیرگذاری نوع آب بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها در سطوح مختلف زئولیت و عدم معنی‌داری برهمکنش‌های دوگانه نوع آب در سن آزمونه و زئولیت در سن آزمونه نشان‌دهنده روند مشابه تاثیرگذاری به ترتیب نوع آب و 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 به‌ترتیب در عیارهای مختلف سیمان و سطوح مختلف زئولیت است. به‌طریق 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 بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی شدند، ارائه می‌شود.

۳-۱- مقایسه میانگین اثرات ساده عوامل مورد بررسی

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده چهار عامل مورد بررسی بر مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم‌به توضیح است که در هر عامل مورد بررسی، تیمارهایی که حداقل یک حرف مشترک با یکدیگر داشته باشند، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند. 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 (۱۲۲ درصد) مقاومت فشاری بتن گردید (شکل ۲).

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

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	سطح معنی‌داری
عیار سیمان (C)	۱	۲۳۳۱۵/۲	۰/۰۰۰
نوع آب (W)	۲	۲۳۲/۷	۰/۰۰۰
کاربرد زئولیت (Z)	۳	۳۷۸/۳	۰/۰۰۰
سن آزمونه (d)	۴	۱۵۶۶/۵	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C × W	۲	۵۴۹/۰	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C × Z	۳	۲۹۸/۰	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه C × d	۴	۲۷۱/۲	۰/۰۰۰
برهمکنش دوگانه W × Z	۶	۷/۸	۰/۳۴۸
برهمکنش دوگانه W × d	۸	۴/۷	۰/۷۷۱
برهمکنش دوگانه Z × d	۱۲	۱۲/۵	۰/۰۸۹
برهمکنش سه‌گانه C × W × Z	۶	۷۹/۶	۰/۰۰۰
برهمکنش سه‌گانه C × W × d	۸	۸/۹	۰/۳۳۰
برهمکنش سه‌گانه W × Z × d	۲۴	۱۰/۷	۰/۱۱۸
برهمکنش چهارگانه C × W × Z × d	۳۶	۳/۴	۰/۹۹۸
خطای کل	۲۴۰	۷/۷	-



در هر عامل، سطوح دارای یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪ اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

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

استفاده از آب خاکستری اگرچه موجب ۲/۳ درصد افزایش مقاومت فشاری آزمونه بتنی نسبت به آب شهری شد، لیکن این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲). در مقابل، استفاده از آب ترکیبی در ساخت بتن (نسبت برابر از آب شهری و آب خاکستری) موجب افزایش معنی‌دار (۱۲/۹ درصد) مقاومت فشاری آزمونه‌ها نسبت به آب شهری شد. این افزایش نسبت به آب خاکستری نیز از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۲). کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌های ساخته شده با آب خاکستری نسبت به آب ترکیبی را می‌توان به‌میزان قابل‌توجه مواد آلی (BOD_5) آن نسبت داد که با نتایج مهردادی و همکاران (۱۳۸۸) هم‌خوانی دارد. گزارش شده است که 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 حالی‌که در آن محدوده ناخالصی‌ها می‌توانند بی‌زیان باشند (Babu et al., 2018، مهردادی و همکاران، ۱۳۸۸). این موضوع می‌تواند توضیحی بر علت افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های ساخته شده با هر دو آب نامتعارف نسبت به آب شهری باشد.

استفاده از زئولیت منجر به کاهش معنی‌دار مقامت فشاری آزمونه‌های بتنی در تمام سطوح شد، اما اختلاف بین سطح کاربرد ۱۰ و ۲۰ درصد با یکدیگر معنی‌دار نبود. میزان کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی برای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی سیمان با زئولیت نسبت به شرایط بدون کاربرد آن به‌ترتیب ۶/۸، ۵/۶ و ۲۰/۸ درصد بود (شکل ۲). این نتایج با یافته‌های Madandoust et al. (2013) که گزارش کردند جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با زئولیت طبیعی موجب ۱۷-۵ درصد کاهش مقاومت فشاری بتن ۳ تا ۹۰ روزه شد و یافته‌های Najimi et al. (2012) 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) به‌ترتیب میزان بین ۱۵-۳ و ۳۸-۷ درصد شد، هم‌خوانی دارد. هم‌چنین گزارش شده است که کاربرد ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان به‌ترتیب منجر به کاهش مقاومت سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۳۶۰ روزه بتن با عملکرد بالا به‌میزان ۱۸-۴، ۳۵-۲۵ و ۶۳-۴۵ درصد شد (Vejmelková et al., 2012) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

۳-۲- مقایسه میانگین برهمکنش‌های دوگانه

مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌های دوگانه عیار سیمان در نوع آب، عیار سیمان در زئولیت و عیار سیمان در سن آزمونه در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج جدول ۶-الف نشان می‌دهد که در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه ساخته شده با آب ترکیبی با ۶۶/۴ و ۴۰/۶ درصد افزایش نسبت به‌ترتیب آب شهری و آب خاکستری اختلاف آماری معنی‌داری با آن‌ها داشت. هم‌چنین ۱۸/۳ درصد افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی ساخته شده با آب خاکستری نسبت به آب شهری موجب اختلاف معنی‌دار آن‌ها با یکدیگر شد. در مقابل، در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری تیمار آب ترکیبی با ۵/۳ درصد کاهش اختلاف معنی‌داری نسبت به آب شهری داشت، ولی بین سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به‌عبارت دیگر، استفاده از آب خاکستری در ساخت بتن تغییر معنی‌داری در مقاومت فشاری آزمونه‌ها نسبت به آب شهری و آب ترکیبی ایجاد نکرد. به‌این ترتیب میزان کاهش مقاومت فشاری در این شرایط در محدوده مجاز ۱۰٪ استاندارد ملی شماره ۱۴۷۴۸ (۱۳۹۱) و آبا (۱۳۸۳) و استانداردهای بین‌المللی است. بنابراین به‌نظر می‌رسد کاربرد آب خاکستری و آب ترکیبی به‌عنوان آب اختلاط بتن در این عیار سیمان نیز بدون ایجاد محدودیت قابل‌توصیه است.

مقایسه میانگین برهمکنش دوگانه عیار سیمان در زئولیت (جدول ۶-ب) نشان می‌دهد در حالی‌که در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، تمام سطوح کاربرد زئولیت موجب کاهش معنی‌دار مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی شد، در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بین تیمار ۰ و ۱۰ درصد کاربرد زئولیت اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و کاربرد ۲۰ درصد زئولیت با افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی به‌میزان ۵/۴ درصد، موجب ایجاد اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار عدم استفاده از زئولیت شد.

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

الف- برهمکنش عیار سیمان در نوع آب		
عیار سیمان	نوع آب	مقاومت
۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	شهری	۱۰/۳^{e}
	ترکیبی	۱۷/۱^{c}
	آب خاکستری	۱۲/۲^{d}
۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	شهری	۳۰/۱^{a}
	ترکیبی	۲۸/۵^{b}
	آب خاکستری	۲۹/۲^{ab}
ب- برهمکنش عیار سیمان در زئولیت		
عیار سیمان	**درصد زئولیت**	**مقاومت**
۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰	۱۶/۲^{d}
	۱۰	۱۳/۸^{e}
	۲۰	۱۲/۰^{f}
	۳۰	۱۰/۷^{g}
۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰	۳۰/۱^{b}
	۱۰	۲۹/۴^{b}
	۲۰	۳۱/۷^{a}
	۳۰	۲۵/۹^{c}
ج- برهمکنش عیار سیمان در سن آزمونه		
عیار سیمان	**سن آزمونه**	**مقاومت**
۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۳	۹/۶^{i}
	۷	۱۱/۶^{h}
	۲۸	۱۳/۷^{g}
	۵۶	۱۴/۵^{g}
	۹۰	۱۶/۶^{f}
۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۳	۲۰/۱^{e}
	۲۰	۲۴/۹^{d}
	۲۸	۳۰/۸^{c}
	۵۶	۳۴/۲^{b}
	۹۰	۳۶/۳^{a}

در هر برهمکنش، گروه‌های با حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪ اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

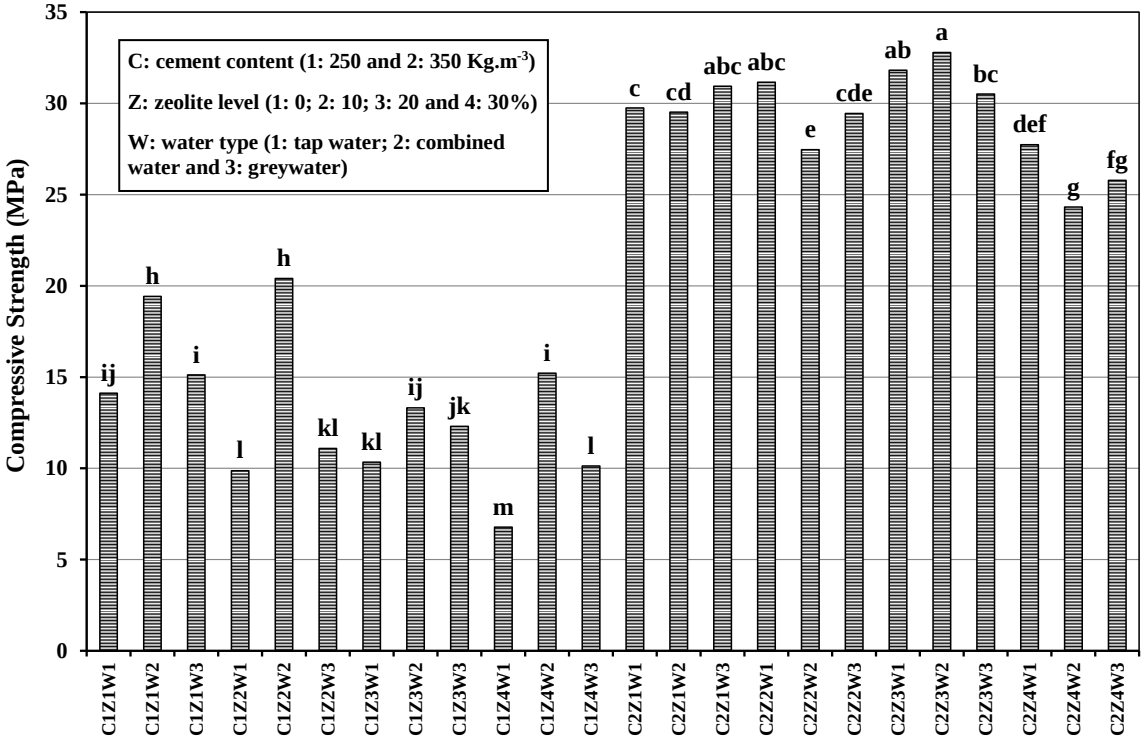
هم‌چنین نرخ کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌ها در اثر کاربرد زئولیت در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به‌مراتب کمتر از عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود، به‌طوری که جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت در مقایسه با تیمار عدم

کاربرد زئولیت در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کاهش مقاومت فشاری به‌ترتیب به‌میزان ۱۵/۰، ۲۶/۱ و ۳۴/۰ درصد شد ولی در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌ها را به‌ترتیب ۲/۴-، ۵/۴+ و ۱۳/۷- درصد تغییر داد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که استفاده از زئولیت در بتن-های با عیار سیمان بالا با موفقیت بیشتری در حفظ یا افزایش مقاومت فشاری بتن همراه است.

مقایسه میانگین برهمکنش دوگانه عیار سیمان در سن آزمونه (جدول ۶-ج) نشان می‌دهد که نرخ افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان در دو عیار سیمان با یکدیگر متفاوت است، به‌گونه‌ای که در تیمار عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به‌ترتیب ۲۱، ۴۲، ۵۱ و ۷۳ درصد نسبت به مقاومت فشاری ۳ روزه افزایش یافت، در حالی‌که در تیمار عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب این رشد به‌ترتیب ۲۴، ۵۳، ۷۰ و ۸۰ درصد بود. بنابراین این نرخ در عیار سیمان ۳۵۰ بیشتر از ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

۳-۳- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه

مقایسه میانگین 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 تیمارهای بدون زئولیت با آب ترکیبی (C1Z2W2) و ۱۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C1Z1W2) نسبت به تیمار شاهد (C1Z1W1: بدون زئولیت با آب شهری) از برتری آماری معنی‌داری (به ترتیب ۳۷/۶ و ۴۴/۶ درصد افزایش) برخوردار بود و در تیمارهای بدون زئولیت با آب خاکستری (C1Z1W3)، ۲۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C1Z3W2)، ۲۰ درصد زئولیت با آب خاکستری (C1Z3W3) و ۳۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C1Z4W2) اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. این در 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 ۲۰ درصد زئولیت با آب شهری (C2Z3W1) به‌میزان ۷/۰ درصد و ۲۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C2Z3W2) به‌میزان ۱۰/۲ درصد به‌دست آمد. هم‌چنین در این عیار سیمان، میزان کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در هیچ تیماری به‌جز تیمارهای ۱۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی (C2Z2W2) و ۳۰ درصد زئولیت با هر سه نوع آب (C2Z4W1، C2Z4W2 و C2Z4W3) با تیمار شاهد از نظر آماری معنی‌دار نبود. این نتایج نشان می‌دهد که امکان استفاده از آب خاکستری و زئولیت در طرح اختلاط بتن به‌ویژه در سطح عیار سیمان بالا بدون آن‌که موجب کاهش معنی‌دار مقاومت فشاری بتن شود، و حتی این ویژگی را در برخی شرایط به‌طور معنی‌داری افزایش دهد، وجود دارد. با این‌حال، با توجه به وجود برهمکنش سه‌گانه این عوامل که به‌دلیل اثرات متفاوت نوع آب و درصد زئولیت در عیارهای مختلف سیمان است، انتخاب بهترین سطح کاربرد زئولیت و نوع آب با توجه به عیار سیمان مورد نظر باید در کارگاه براساس آزمون طرح اختلاط به‌دست آید.



تیمارهای با حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪ اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

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

۴- نتیجه‌گیری

- نتایج نشان داد که به‌جز میزان مواد آلی (BOD_5) در آب‌های نامتعارف، تمام ویژگی‌های کیفی هر سه نوع آب (آب شهری، آب خاکستری و آب ترکیبی) در محدوده مجاز آب اختلاط بتن براساس استانداردهای ملی و بین‌المللی قرار داشت.
- استفاده از آب خاکستری موجب افزایش غیرمعنی‌دار مقاومت فشاری آزمونه بتنی نسبت به آب شهری شد، در حالی‌که آب ترکیبی این ویژگی را به‌طور معنی‌داری (۱۲/۹ درصد) افزایش داد.
- جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان توسط زئولیت نسبت به‌شرایط بدون کاربرد زئولیت موجب کاهش مقامت فشاری آزمونه‌های بتنی به‌میزان به ترتیب ۶/۸، ۵/۶ و ۲۰/۸ درصد شد.
- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه عیار سیمان در نوع آب در زئولیت نشان داد که در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در تیمارهای بدون زئولیت با آب ترکیبی و ۱۰ درصد زئولیت با آب ترکیبی نسبت به تیمار شاهد (بدون زئولیت با آب شهری در عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) افزایش معنی‌داری (به‌ترتیب ۳۷/۶ و ۴۴/۶ درصد افزایش) داشت ولی در سایر تیمارها عموماً کاهش معنی‌داری مشاهده شد. این در حالی بود که در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی در اغلب تیمارها، به‌جز تیمارهای دارای ۳۰ درصد زئولیت، با افزایش همراه بود.
- نتایج نشان داد که پتانسیل استفاده از آب نامتعارف (آب خاکستری و آب ترکیبی) و زئولیت در طرح اختلاط بتن بدون ایجاد اثر منفی معنی‌دار بر مقاومت فشاری بتن، به‌ویژه در عیارهای سیمان بالا، وجود دارد. با این‌حال، نظر به برهمکنش سه‌گانه معنی‌دار عوامل مورد بررسی، انتخاب بهترین سطح کاربرد زئولیت و نوع آب با توجه به عیار سیمان موردنظر باید بر اساس آزمون طرح اختلاط در کارگاه به‌دست آید.

۵- مراجع

احمدی، ج.، بیگدلو، ا.، و سلیمانی‌راد، م.، (۱۳۹۶)، "تاثیر استفاده از زئولیت، میکروسیلیس و متاکائولین بر کارایی و مقاومت بتن خودتراکم"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، ۴۷(۳)، ۱-۷.

احمدی، ج.، عزیزی، ح.، و کوهی، م.، (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر زئولیت در عیارهای مختلف سیمان بر روی مقاومت و نفوذپذیری بتن"، *تحقیقات بتن*، ۸(۲)، ۵-۱۸.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۷۱)، *تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های بتن*، استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۶.

اسراری، ا.، و 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)، ۱۲۳-۱۳۰.

اسماعیل‌نیا عمران، م.، و 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)، ۷-۲۲.

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

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۷۱)، *تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های بتن*، استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۶.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۸۸)، *بتن تازه- قسمت ۱: نمونه‌برداری*، استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۱-۱.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۹۱)، *استاندارد آب اختلاط بتن*، استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۷۴۸.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۹۳)، *سنگدانه‌ها- دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت- روش آزمون*، استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۷۷.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۹۳)، *ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های بتن در آزمایشگاه- آیین کار*، استاندارد ملی ایران شماره ۵۸۱.

سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۹۴)، *سنگدانه‌های بتن- ویژگی‌ها*، استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۳)، *آیین‌نامه بتن ایران (آبا)*، نشریه شماره ۱۲۰، ۴۳۴ص.

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

قویدل‌شهرکی، م.، میری، م.، و 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)، ۴۹-۵۸.

مهردادی، ن.، اکبریان، ا.، و حق‌اللهی، ع.، (۱۳۸۸)، "استفاده از پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری در تهیه و نگهداری بتن"، *محیط‌شناسی*، ۳۵(۵۰): ۲۹-۱۳۶.

وزارت نیرو، (۱۳۸۹)، *ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها*. نشریه شماره ۵۳۵، ۱۳۵ ص.

Amadi, B., and Shekarchi, M., (2010), "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material",

"Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes", *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1519-1525.
ISO 12439, (2010), *Mixing water for concrete*, Last update: (2015).
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.
Khoshroo, M., Shirzadi Javid, A.A., and Katebi, A., (2018a), "Effect of chloride treatment curing condition on the mechanical properties and durability of concrete containing zeolite and micro-nano-bubble water", *Construction and Building Materials*, 177, 417-427.
Khoshroo, M., Shirzadi Javid, A.A., and Katebi, A., (2018b), "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.
Madandoust, R., Sobhani, J., and 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.
Markiv, T., Sobol, Kh., Franus, M., and Franus, W., (2016), "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 554-562.
Nagrockiene, D. and Girskas, G., (2016), "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition", *Construction and Building Materials*, 113, 964-969.
Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., and 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.
Raggiotti, B.B., Positieri, M.J., and Oshiro, Á., (2018), "Natural zeolite, A pozzolan for structural concrete", *Procedia Structural Integrity*, 11, 36-43.
Sabet, F.A., Libre, N.A, and 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.
Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M, and 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.
Valipour, M., Yekkalar, M., Shekarchi, M., and 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.
Vejmelková, E., Ondráček, M., and 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.
Cement and Concrete Composites, 32, 134-141.
Al-Ghusain, I., and Terro, M.J. (2003), "Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait", *Kuwait Journal of Science and Engineering*, 30(1), 213-228.
Al-Jabri, K.S., Al-Saidy A.H., Taha R., and Al-Kemyani, A.J., (2011), "Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete", *Procedia Engineering*, 14, 370-376.
Al-Joulani, N.M.A., (2015), "Effect of wastewater type on concrete properties", *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(19), 39865-39870.
Alqam, M., Jamrah, A., Al-Hafith, B.A., Al-Zubi, R., and Al-Shamari, N., (2014), "Fresh and hardened properties of sustainable concrete using recycled household greywater", Arabian Journal of Science and Engineering, 39, 1701-1708.
Alradhawi, H., and Angalekar, S.S., (2016), "Study the feasibility of use of grey water in concrete", *International Journal of Science and Research*, 5(6), 493-498.
APHA, (2012), *Standard methods for examination of water and wastewater*, American Public Health Association, 18th Edition, Washington DC.
Asadollahfardi, G, Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., and 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.
Asadollahfardi, G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V., and Ghonabadi, N., (2016), "Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete", *Construction and Building Materials*, 105, 253-261.
ASTM C1602, (2012), *Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
Babu, G.R., and Ramana, N.V. (2018), "Feasibility of wastewater as mixing water in cement", *Materials Today: Proceedings*, 5, 1607-1614.
Babu, G.R., Reddy, B.M., and Ramana, N.V., (2018), "Quality of mixing water in cement concrete: A review", *Materials Today: Proceedings*, 5, 1313-1320.
BS EN1008, (2002), *Mixing water for concrete: Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*, British Standard Institution, www.bsigroup.com
BS EN3148, (1980), *Method of test for water for making concrete (including notes on the suitability of the water)*. British Standard Institution.
Chatveera, B., and 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.
El-Nawawy, O.A., and Ahmad, S., (1991), "Use of treated effluent in concrete mixing in an arid climate, *Cement and Concrete Composites*, 13, 137-141.
EPA, (2012), *Guidelines for water reuse*, EPA/600/R-12/618, Washington, D.C.
Ghrair, A.M., Al-Mashaqbeh, O.A., Sarireh, M.K., Al-Kouz, N., Farfoura, M., and Megdal, S.B., (2018),