

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Use of Recycled Materials in the Manufacture of Porous Concrete to Remove TOC from Municipal Runoff

H. Adab¹, M. Abbasi^{2*}

1,2- MSc and Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: mary_abbasi@sbu.ac.ir)

Received: 03-10-2021

Revised: 14-12-2021

Accepted: 20-12-2021

Available Online: 20-06-2022

استفاده از مصالح بازیافتی در ساخت بتن متخلخل به منظور حذف COT از رواناب شهری

حمید ادب^۱، مریم عباسی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: mary_abbasi@sbu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

Abstract

Purifier porous concrete as a new technology in the development of urban areas for the controlling and physical treatment of runoff has been considered in many industrialized countries in recent years. The use of recycled compounds in the manufacture of concrete in order to reduce the pressure on natural resources and also lower the carbon dioxide generation for environmental preservation and sustainable development is the main challenge of the civil industry. In this study, two types of recycled ceramic and crushed concrete aggregates and one type of pumice aggregate with pozzolanic properties were used to make porous concrete to achieve the study's goals and necessity. Six mixing plans were designed with high priority of permeability, sufficient strength, and suitable filtration. Mechanical properties including adsorption, density, porosity, permeability, and compressive strength and treatment efficiency (TOC removal) tests were performed on concrete samples. The results of studies showed that the use of pumice up to 25% replacement with recycled construction materials increased the porosity and permeability of concrete by 13 and 43%, respectively, and its density and compressive strength decreased by 12.5 and 39%, respectively, compared to the control sample. In the view of the removal of TOC, a 13% increase in yield was observed for the sample with a 25% replacement of pumice. The outstanding performance of the mixing plan containing pumice aggregates in mechanical strength and treatability can be considered a new approach to the use of recycled materials in the development and construction of urban areas.

Keywords: Total Organic Matter, Construction Waste, Recycling, Adsorption, Runoff Treatment.

چکیده

بتن متخلخل تصفیه‌گر به‌عنوان فناوری نوین در توسعه فضای شهری به‌منظور کنترل و تصفیه فیزیکی رواناب‌های شهری در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورهای صنعتی قرار گرفته است. استفاده از ترکیبات بازیافتی در ساخت بتن به‌منظور کاهش فشار بر منابع طبیعی و همچنین کاهش تولید گاز دی‌اکسیدکربن به‌منظور حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار چالش اساسی صنعت عمران می‌باشد. در این پژوهش جهت رسیدن به اهداف و ضرورت فوق، از دو نوع سنگ‌دانه بازیافتی سرامیک و بتنی خردشده و یک نوع سنگ‌دانه پامیس با خواص پوزلانی به‌منظور ساخت بتن متخلخل استفاده شد. ۶ طرح اختلاط با اولویت نفوذپذیری بالا، مقاومت کافی و تصفیه‌پذیری مناسب طراحی شدند. بر این اساس آزمایشات خواص مکانیکی (شامل جذب، چگالی، تخلخل، نفوذپذیری و مقاومت فشاری) و تصفیه‌پذیری (حذف TOC) بر روی نمونه‌های بتنی انجام پذیرفت. نتایج مطالعات نشان داد استفاده از پامیس تا ۲۵ درصد جایگزین با مصالح ساختمانی بازیافتی میزان تخلخل و نفوذپذیری بتن به‌ترتیب ۱۳ و ۴۳ درصد افزایش و میزان چگالی و مقاومت فشاری آن به‌ترتیب ۱۲/۵ و ۳۹ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است. در بحث حذف آلاینده آلی TOC افزایش عملکرد ۱۳ درصدی برای نمونه با ۲۵ درصد جایگزینی پامیس مشاهده شده است. عملکرد فوق‌العاده طرح اختلاط حاوی سنگ‌دانه‌های پامیس در مقاومت مکانیکی و تصفیه‌پذیری می‌تواند رویکرد نوین در استفاده از مصالح بازیافتی در توسعه و ساخت فضای شهری به‌حساب آید.

واژه‌های کلیدی: مواد آلی کل، نخاله ساختمانی، بازیافت، جذب، تصفیه رواناب.

نفوذپذیر مثل پیاده‌روها، خیابان‌ها، جاده‌ها و پارکینگ‌ها و سایر کاربردهای مشابه استفاده می‌شود (Nassiri و AlShareedah، ۲۰۲۰). کف‌پوش‌های متخلخل همچنین به‌عنوان جاذب آلاینده‌ها عمل می‌کنند. آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، هیدروکربن‌ها و مواد آلی به ذرات معلق و بدنه بتنی جذب شده و از بدنه آبی حذف می‌شوند (Muthu و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ekolu و Shabalala، ۲۰۱۹). فرآیندی که در بتن متخلخل اتفاق می‌افتد در واقع ترکیبی از فرآیند جذب سطحی و ترسیب می‌باشد (Office و Support، ۱۹۹۹). بنابراین بتن متخلخل در واقع به‌منظور مدیریت رواناب شهری و جلوگیری از ایجاد آبگرفتگی و سیلاب در سطوح شهر و همچنین کاهش بار برخی از آلاینده‌های موجود در رواناب و تصفیه آن تهیه و تولید می‌شود.

در بحث تصفیه‌پذیری بتن متخلخل مطالعاتی صورت پذیرفته است که در آن، Delatte نشان داد با عبور رواناب از بتن ۶۴٪ از جامدات معلق و ۷۹٪ از غلظت سرب درون رواناب بکاهد (Delatte، ۲۰۱۸). Booth و Brattebo (۲۰۰۳) عملکرد طولانی‌مدت کف‌پوش نفوذپذیر را به‌عنوان جایگزین آسفالت‌های نفوذناپذیر معمولی در یک محوطه پارکینگ بررسی کرده است. ۸۹٪ از نمونه‌های رواناب آسفالتی حاوی روغن‌موتور بوده و هیچ یک از نمونه‌های رواناب عبوری از کف‌پوش متخلخل حاوی روغن‌موتور نبوده است. همچنین، Nnadi و همکاران (۲۰۱۵) امکان‌سنجی استفاده از فاضلاب سطحی تصفیه‌شده توسط روسازی بتنی در کشاورزی را بررسی کردند. Zhange و همکارانش (۲۰۱۵)، بر روی پاک‌سازی آب رودخانه توسط بتن متخلخلی پیش‌ساخته تحقیق کردن، آن‌ها در نتیجه یافتند که نرخ پاک‌سازی در TOC در حدود ۶۰-۸۰ درصد و در مورد T-P در حدود ۲۰-۴۰ درصد می‌باشد. Shabalala و همکاران (۲۰۱۷) ستون بتن متخلخل برای حذف فلزات سنگین از پساب زهکشی معدن اسید را بررسی کردند. به تازگی Yoo و همکارانش (۲۰۱۸)، بتنی متشکل از لجن خشک، رسوب کلسیم کربنات و کلسیت را ساختند که قادر به جذب آلاینده‌هایی شامل مس، سرب و روی است. اگرچه مطالعات مختلفی امکان استفاده از بتن متخلخل به‌عنوان کف‌پوش در تصفیه آلاینده‌های موجود در رواناب و سیلاب‌های شهری را بررسی کردند، اما مطالعات کمی در زمینه استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و همچنین استفاده از پامیس در ساخت و توسعه بتن متخلخل و بررسی تأثیر آن بر عملکردهای مکانیکی و تصفیه‌پذیری بتن متخلخل صورت گرفته است.

هدف از این مطالعه استفاده از مصالح بازیافتی و سرامیک خردشده در مخلوط بتن متخلخل و بررسی تأثیرات آن‌ها بر تصفیه شاخص TOC در رواناب شهری است، همچنین به‌منظور بهبود عملکرد تصفیه بتن متخلخل، از سنگ‌دانه پامیس به‌صورت درصدی از سنگ‌دانه‌های بازیافتی استفاده می‌شود و اثرات این جایگزینی بر خصوصیات مکانیکی و تصفیه‌پذیری بتن متخلخل بررسی می‌شود.

در سال‌های اخیر پدیده گرمایش جهانی سبب بروز تغییرات اقلیمی در سرتاسر جهان شده است (Al-Ghussain، ۲۰۱۹). این تغییرات در ایران با شدت بیشتر همراه بوده است، به‌طوری‌که می‌توان به سیلاب‌های شدید ۱۳۹۸ و خشک‌سالی ۱۴۰۰ اشاره کرد (Afshar و Fahmi، ۲۰۱۹؛ Yadollahie، ۲۰۱۹). افزایش مناطق شهری و ساخت انواع پوشش‌های نفوذناپذیر همانند آسفالت، بتن و... سبب شده است، سطح نفوذپذیر حوضه‌های آبی بسیار کاهش یابد و در زمان بارندگی‌های شدید و طولانی‌مدت به علت کاهش میزان نفوذپذیری حجم رواناب تولیدی بسیار افزایش می‌یابد. با افزایش سطح رواناب و شستن سطوح، حجم وسیع از آلاینده‌های نوظهور به رواناب شهری وارد شده که می‌تواند منجر به سیلاب‌های منطقه‌ای با آلودگی فراوان شود (Wicke و همکاران، ۲۰۲۱). در فصول بارانی بسیاری از ترکیبات موجود در سطح خیابان توسط رواناب ایجاد شده شسته می‌شود، این ترکیبات همانند هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک، مشتقات نفتی، روغن و... در رواناب موجود می‌باشند و می‌تواند مخاطرات فراوانی برای محیط‌زیست داشته باشد (Shang و Sun، ۲۰۱۸). برای اندازه‌گیری این ترکیبات شاخص کربن آلی کل (TOC) می‌تواند اطلاعاتی در جهت میزان آلودگی موجود در رواناب بدهد، TOC یا کل کربن آلی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی ترکیبات آلی در آب و فاضلاب است. در دهه ۱۹۷۰ میلادی در بخش کیفیت آب، TOC یک شاخص کیفی و تمیزی آب معرفی شد. مقادیر TOC در آب‌های طبیعی ناشی از تخریب ریشه گیاهان، تجزیه بدن جانوران می‌باشد. همچنین منابع تولید این آلاینده‌ها توسط انسان شامل آفت‌کش‌ها، کودهای معدنی، تماس آب با فاضلاب می‌باشد، این عوامل به همراه عوامل متعدد دیگر در مجموع باعث افزایش غلظت مواد آلی بیش‌ازحد استاندارد در اکثر منابع آبی در جهان شده است (Visco و همکاران، ۲۰۰۵). به‌طورکلی کربن آلی تأثیری بر سلامتی انسان ندارد؛ اما زمانی که این مواد با مواد ضدعفونی‌کننده ترکیب شوند باعث به وجود آمدن تولیدات جانبی (DBPs) شده که شامل ترکیباتی نظیر تری‌هالومتان‌ها (THMs) و هالوآستیک‌ها می‌شود (EPA، ۲۰۱۰). بنابراین حذف این نوع آلاینده‌ها از آب امری ضروری به شمار می‌رود.

سیستم‌های روسازی نفوذپذیر، به‌طور گسترده‌ای در مدیریت آب باران شهری مورد استفاده قرار گرفته است، بتن متخلخل یک سیستم روسازی نفوذپذیر است که توانایی کاهش آلودگی رواناب‌های سطحی با قابلیت کاربرد در فضای شهری را دارد که می‌تواند جهت کنترل سیلاب موردتوجه باشد (Pratt و همکاران، ۱۹۸۹). این بتن شامل خمیر سیمان و درشت‌دانه هست که می‌تواند مایعات را زهکشی کرده و به‌عنوان کف‌پوش در سطح شهر استفاده شود (Liu و همکاران، ۲۰۱۶). بتن متخلخل بیشتر در سیستم‌های روسازی

۱۵ درجه سانتی‌گراد وجود دارد، این سیمان کاربرد گسترده دارد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

- مواد و مصالح

۱-سیمان:

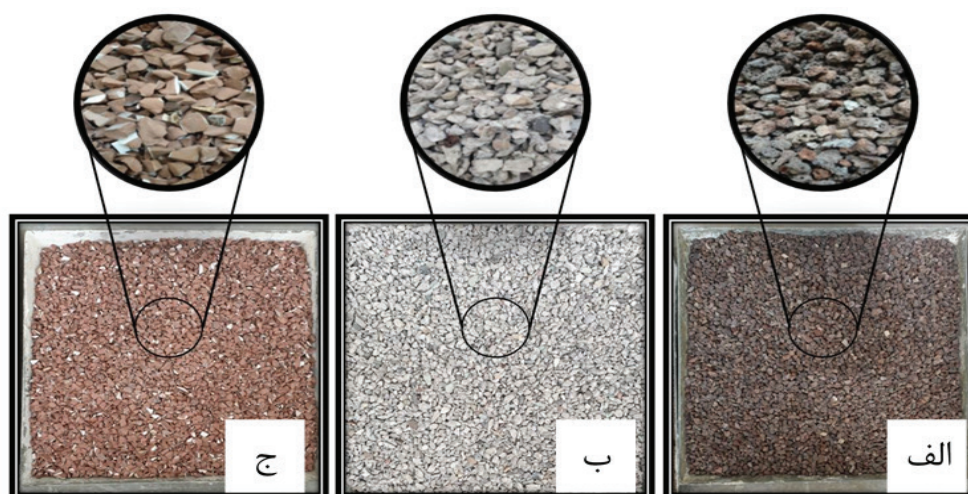
سیمان مورد استفاده در این آزمایش سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است. سیمان پرتلند نوع ۲ برای ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط در آن‌ها ضروری بوده و حمله سولفات‌ها به آن‌ها در حد متوسط باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیمان در کلیه سازه‌های بتنی قابل استفاده می‌باشد و در محیط‌های آب‌و‌خاک که غلظت یون سولفات در حد متوسط است، کاربرد دارد. همچنین برای بتن‌ریزی در هوای تاندازه‌ای گرم که خطر افزایش دمای بتن معمولی به بیش از ۳۲ درجه سانتی‌گراد و بتن حجیم به بیش از

۲-سنگ‌دانه‌های درشت:

در این پژوهش از مصالح بازیافتی خردشده و سرامیک خردشده با اندازه ۴/۷۵ الی ۹/۵ میلی‌متر (الک شماره ۴ و ۳/۸ اینچ) و همچنین از سنگ‌دانه‌های پامیس با اندازه‌های اسمی ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر که از معدن یاران واقع در شهرستان قروه تهیه شده است، استفاده می‌شود. شکل (۱) تصویر مربوط به سنگ‌دانه‌های پامیس، بتنی، سرامیکی را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۲) مشخصات شیمیایی و فیزیکی سنگ‌دانه‌های پامیس را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان

| Na ₂ O | SO ₂ | K ₂ O | MgO | Fe ₂ O ₃ | CaO | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | اجزاء (درصد) |
|-------------------|-----------------|------------------|-----|--------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------|
| - | ۲/۳ | - | ۲/۰ | ۴/۰ | ۶۳/۰۴ | - | ۵/۰ | ۲۱/۷۴ | سیمان |



شکل ۱- تصاویر مربوط به سنگدانه مورد مطالعه در این پژوهش (الف) پامیس، (ب) مصالح بازیافتی، (ج) سرامیک

جدول ۲- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سنگ‌دانه‌های پامیس

| Na ₂ O | K ₂ O | MgO | Fe ₂ O ₃ | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | اجزاء | مشخصات |
|-------------------|------------------|--------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|-------|---------|
| ۳/۷ | ۴/۱ | ۰/۴۸ | ۱/۵ | ۱/۵۶ | ۱۵/۸ | ۷۲/۸۶ | درصد | شیمیایی |
| pH | | ظاهر | سختی | دانسیته (gr/cm ³) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | | | مشخصات |
| ۶/۳ - ۶/۸ | | متخلخل | ۷ - ۸/۵ | ۰/۶ - ۰/۸ | ۱/۶ - ۲/۴ | | | فیزیکی |

در یک گزارشی، یک روش ۸ مرحله‌ای برای طرح اختلاط در نظر گرفت. ورودی‌های این روش نسبت آب به سیمان، تخلخل، چگالی مصالح درشت‌دانه به صورت خشک هست. مقدار آب

-طرح اختلاط و ساختن نمونه‌ها

هیچ استاندارد برای طرح اختلاط بتن متخلخل وجود ندارد، با این حال کمیته ۵۲۲ بتن متخلخل موسسه بتن آمریکا (ACI)

به سیمان با استفاده از یک رابطه بین تخلخل و حجم خمیر برای یک بتن متخلخل فشرده خوب و سبک تعیین می‌شود. هرچند، این روش فقط برای متناسب‌سازی اولین دوره آزمایشی استفاده می‌شود که سپس برای دستیابی به ویژگی‌های مطلوب اصلاح می‌شوند (Nassiri, 2020). Duan و همکاران (2018)، برای تأثیر نسبت آب به سیمان و نسبت مصالح به سیمان گزارش داد، افزایش این نسبت آب به سیمان در یک محدوده خاص، موجب افزایش تخلخل و نفوذپذیری بتن متخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری آن می‌شود، همچنین برای تأثیر نسبت مصالح به سیمان (A/C) نتایج حاکی از افزایش تخلخل و نفوذپذیری بتن در اثر افزایش این نسبت می‌باشد. در این پژوهش به منظور حفظ مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان برای همه نمونه‌ها 0/4 در نظر گرفته می‌شود همچنین نسبت مصالح به سیمان (A/C) برای همه نمونه‌ها 3/5 در نظر گرفته می‌شود و به منظور مقایسه نتایج تصفیه بتن، پامیس به میزان 5 تا 25 درصد جایگزین مصالح بازیافتی سرامیکی و بتنی می‌شود.

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تهیه بتن، حرارت و دمای محلی است که فرایند تهیه بتن انجام می‌شود، به طوری که با افزایش دما مقاومت فشاری بتن افزایش و تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد (Chan و همکاران، 2000). نمونه‌های بتنی بر مبنای روش‌های ACI 522R-10 آماده می‌شوند. نمونه‌ها تحت شرایط محیطی (دمای 24 ± 2 و رطوبت نسبی 50 ± 5) تهیه و قالب‌بندی می‌شوند، ابتدا اجزای خشک مخلوط شامل سیمان، سنگ‌دانه‌های

بازیافتی و پامیس به مدت 3 دقیقه در ظرف همزن مخلوط می‌شوند. سپس آب به تدریج اضافه می‌شود و مخلوط دوباره به مدت 3 دقیقه دیگر هم زده می‌شود تا یک مخلوط همگن به دست بیاید. مخلوط بتن متخلخل تازه در لوله‌های پلیکا با قطر و ارتفاع به ترتیب 5 و 20 سانتی‌متری و همچنین مکعب‌های $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری در دو لایه قالب‌ریزی می‌شوند و به منظور اطمینان از تراکم خوب به مدت 10 ثانیه روی میز ویراتور قرار می‌گیرند، پس‌از آن به منظور جلوگیری از تبخیر آب، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت با یک ورق پلاستیکی پوشانده می‌شوند. سپس از قالب جدا می‌شوند و تا زمان آزمایش (به مدت 28 روز) در یک مخزن آب در دمای 25 درجه قرار می‌گیرند.

ابتدا نمونه کنترلی ساخته می‌شود و سپس به منظور افزایش عملکرد بتن در بهتر کردن کیفیت رواناب و فاضلاب شهری و صنعتی در نمونه‌های بعدی از پامیس با اندازه 9/5-4/75 میلی‌متر با نسبت‌های 5، 10، 15، 20، 25 درصد وزنی استفاده می‌شود، این سنگ‌دانه‌ها به صورت درصد وزنی جایگزین دانه‌های سرامیکی و بتنی می‌شود. هر نمونه با حرف p و یک عدد علامت‌گذاری می‌شود که عدد نشان‌دهنده درصد پامیس استفاده‌شده در نمونه به عنوان مثال برچسب p0 نشان‌دهنده نمونه بتنی با 0 درصد پامیس و برچسب p25 نمایانگر نمونه با 25 درصد جایگزینی پامیس می‌باشد، از هر ترکیب 3 نمونه ساخته می‌شود و تمامی آزمایشات مانند تخلخل، نفوذپذیری و مقاومت فشاری روی هر 3 نمونه انجام می‌شود. جزئیات طرح اختلاط بتن در جدول (3) نشان داده شده است.

جدول 3- جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

| نمونه | W/C | A/C | RA (kg/m ³) | C (kg/m ³) | W (kg/m ³) | Pumice (kg/m ³) |
|-------|-----|-----|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| P0 | 0/4 | 3/5 | 1102/5 | 262/5 | 105 | 0 |
| P5 | 0/4 | 3/5 | 1047/375 | 262/5 | 105 | 55/125 |
| P10 | 0/4 | 3/5 | 992/25 | 262/5 | 105 | 110/25 |
| P15 | 0/4 | 3/5 | 937/125 | 262/5 | 105 | 165/375 |
| P20 | 0/4 | 3/5 | 882 | 262/5 | 105 | 220/5 |
| P25 | 0/4 | 3/5 | 826/175 | 262/5 | 105 | 275/625 |

3-2- تهیه محلول شبیه‌سازی شده رواناب

به منظور تهیه رواناب شهری شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه ابتدا آب خام بر اساس روش‌های مرسوم تهیه می‌شود و سپس افزودنی موردنظر به آب اضافه می‌شود تا محلول با شرایط مشابه با رواناب شهری ساخته شود. براین اساس مقدار 69/14 میلی‌گرم بر واحد لیتر گلوکز به عنوان عامل شبیه‌ساز رواناب مصنوعی شهری به محلول مورد آزمایش اضافه می‌شود. تمامی آزمایشات بر روی محلول تازه انجام پذیرفت.

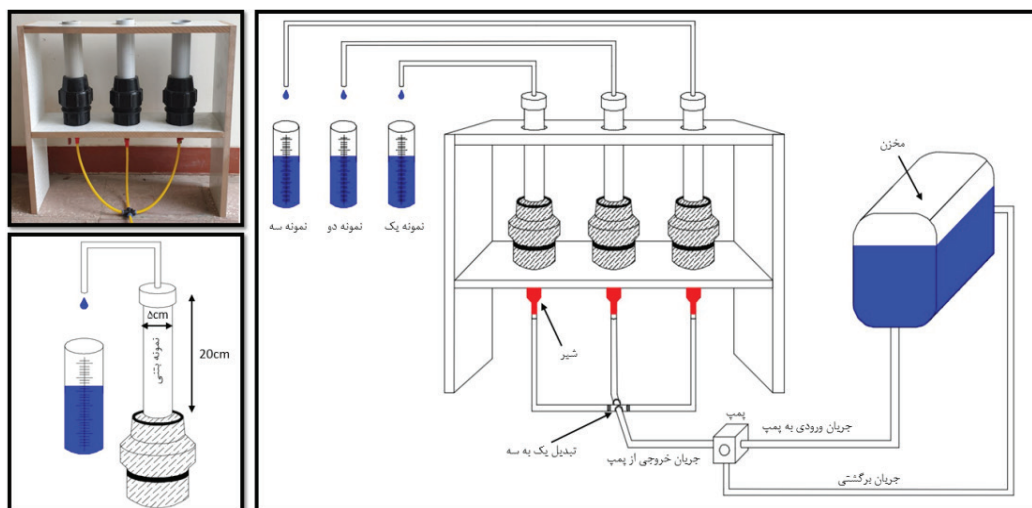
3-1- روش‌های آزمایش

1- آزمایشات تصفیه

جهت مطالعه ستون جذب از پایلوت شکل (2) استفاده شد، ستون جذب با ارتفاع 20 سانتیمتر و قطر داخلی 5 سانتیمتر از جنس پلیکا انتخاب شد، برای انجام آزمایش از محلول شبیه‌سازی شده رواناب شهری استفاده می‌شود، همچنین دبی جریان با استفاده از یک پمپ با نرخ 6/5 ml/min مطابق با سرعت معمول رواناب شهری تنظیم می‌شود، به عبارت دیگر جریان دائمی با دبی 6/5 ml/min از

سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند. لازم به ذکر است به منظور پرهیز از اثر دیواره جانبی و ایجاد ثبات در فرایند جذب، جهت جریان از پایین به بالا در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری میزان TOC از دستگاه Shimadzu TOC ۵۰۰۰ استفاده شد.

ستون جذب عبور داده می‌شود، بنابراین مدت زمان تماس رواناب با سطح حفرات موجود در بتن حدود ۱ ساعت می‌باشد و در نهایت محلول خروجی از ستون جمع‌آوری شده و در بطری‌های نمونه‌گیری ریخته می‌شوند و تا زمان آزمایش در یخچال با دمای ۴ درجه



شکل ۲- شماتیک پایلوت مورد استفاده جهت آزمایش تصفیه

نفوذپذیری عبارت است از توانایی یک ترکیب یا ماده در زهکشی در واحد زمان از واحد سطح بر اساس شیب هیدرولیکی. به‌طور کلی دو روش برای اندازه‌گیری نفوذپذیری ماده وجود دارد: روش افست هد (FHM) و روش هد ثابت (CHM). نتایج به‌دست آمده از این دو آزمایش برای تعیین ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل قابل اعتماد می‌باشد. با این حال مقدار ضریب نفوذپذیری به‌دست آمده از روش CHM پایین‌تر از روش FHM می‌باشد. هد ابتدایی و نهایی آب به‌طور قابل‌توجهی نتایج آزمایش را در FHM تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اما در روش CHM هد آب ثابت است (Al-Ghussain, ۲۰۱۹). در مطالعه‌ی حاضر برای به‌دست آوردن ضریب نفوذپذیری از روش هد ثابت بر مبنای قانون داریسی و سیساک استفاده می‌شود. مقدار دبی خروجی از نمونه بتن متخلخل با استفاده از زمان سنج و یک ظرف مدرج اندازه‌گیری شده و در نهایت ضریب نفوذپذیری بر مبنای رابطه (۲) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که طول نمونه‌ها، اختلاف ارتفاع آب (هد) و سطح مقطع نمونه‌ها ثابت است، که به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۴۰ سانتی‌متر و ۱۹/۶۳ سانتی‌متر مربع می‌باشد. شکل (۳) پایلوت استفاده شده برای تعیین نفوذپذیری را نشان می‌دهد.

$$K_f = QL/AH \quad (2)$$

در رابطه فوق K_f : ضریب نفوذپذیری (cm/s) و Q : دبی جریان خروجی آب (ml/s) و L : طول نمونه (cm) و A : سطح مقطع نمونه‌ها (cm^۲) و H : ارتفاع هد ثابت آب (cm) می‌باشند.

۲-آزمایشات تخلخل و نفوذپذیری

تخلخل یکی از مشخصات قابل اعتماد بتن می‌باشد که می‌تواند به کمک آن، یک ماده متخلخل و نفوذپذیر را ارزیابی کرد. در واقع تخلخل مقدار منافذ و فضاهای خالی بتن است که به‌صورت درصدی از حجم یک ماده تعریف می‌شود. مقدار تخلخل بتن متخلخل با استفاده از روش‌های مختلف می‌تواند اندازه‌گیری شود، به‌عنوان مثال روش Corelok (براساس استاندارد ASTM D ۷۰۶۳)، روش مونتز و همکاران، روش خلأ و روش تحلیل تصاویر، در این مطالعه با استفاده از روش استاندارد ASTM C ۱۷۵۴ یا همان روش مونتز و همکاران تخلخل بتن محاسبه می‌شود. این تست محبوبیت زیادی دارد چون به ابزار پیچیده‌ای نیاز ندارد و همچنین یک آزمون سریع و سراسر است، مقدار تخلخل بتن متخلخل به‌صورت اختلاف وزن بین حالت غوطه‌ور شده نمونه در آب باحالت خشک نمونه تعریف می‌شود؛ و مقدار میانگین ۳ نمونه مکعبی به‌صورت درصد تخلخل بتن متخلخل معرفی می‌شود. رابطه (۱) میزان تخلخل نمونه‌های بتنی را مشخص می‌کند.

$$p = [1 - (W_{Dryoven} - W_{Sum}) / (V \times \rho_w)] \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق p : تخلخل حجمی نمونه‌ها و $W_{Dryoven}$: وزن نمونه خشک‌شده در آون (g) و W_{Sum} : وزن نمونه‌ها در حالت غوطه‌وری (g) و V : حجم نمونه‌ها (cm^۳) و ρ_w : چگالی ظاهری آب (gr/cm^۳) می‌باشند.

با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود، این آزمایش بر هر ۳ نمونه بتنی انجام شده و در آخر میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه گزارش می‌شود. شکل (۴) تست مربوط به مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

$$f_c = W/A \quad (3)$$

در رابطه فوق f_c : مقاومت فشاری نمونه (Mpa) و W : حداکثر بارگذاری (N) و A : سطح بارگذاری نمونه (cm^2) می‌باشند.

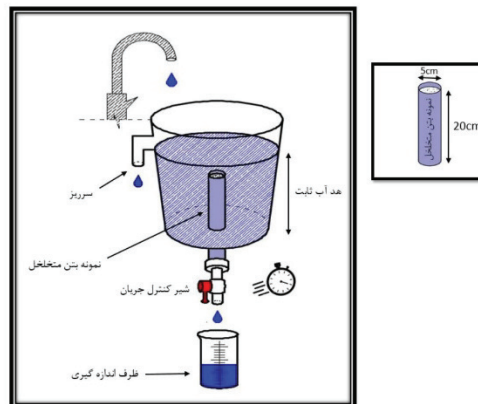


شکل ۴- تست مربوط به آزمایش مقاومت فشاری

۲۰۲۰). طبق نتایج میزان نفوذپذیری نمونه‌ها برای نمونه کنترلی ۲/۲ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد که با افزایش درصد جایگزینی پامیس با افزایش همراه بوده و برای نمونه با ۲۵ درصد پامیس، میزان نفوذپذیری به ۳/۱۶ سانتیمتر بر ثانیه می‌رسد، که در مقایسه با نمونه کنترلی ۴۳ درصد افزایش یافته است. میزان نفوذپذیری به‌طور مستقیم به تخلخل مؤثر نمونه‌ها بستگی دارد (Ibrahim و Razak، ۲۰۱۶). جدول (۴) نتایج تخلخل و نفوذپذیری را نشان می‌دهد، طبق نتایج جدول (۴)، قابل مشاهده است که با افزایش تخلخل نمونه‌ها، میزان نفوذپذیری افزایش می‌یابد. شکل (۵) نتایج آزمایش تخلخل و نفوذپذیری را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج آزمایشات تخلخل و نفوذپذیری

| شماره نمونه | تخلخل (درصد) | ضریب نفوذپذیری (cm/s) |
|-------------|--------------|-----------------------|
| P۰ | ۲۰/۷۷ | ۲/۲۰ |
| P۵ | ۲۱/۴۶ | ۲/۶۷ |
| P۱۰ | ۲۴/۷۷ | ۲/۶۹ |
| P۱۵ | ۲۶/۳۳ | ۳/۰۴ |
| P۲۰ | ۲۷/۸۱ | ۳/۱۱ |
| P۲۵ | ۲۹/۵۷ | ۳/۱۶ |



شکل ۳- تصویر پایلوت آزمایش نفوذپذیری

۳-۴-۲- آزمایشات مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد (۲۰۱۸) ASTM C۳۹ به منظور بررسی رفتار مکانیکی بتن متخلخل انجام می‌شود. این آزمایش با استفاده از یک ماشین فشاری با حداکثر ظرفیت بارگذاری ۳۰۰۰ KN انجام می‌شود. نمونه‌های بتنی با اندازه‌های $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متری با سرعت بارگذاری ۰/۶ مگاپاسکال بر ثانیه به سطح بارگذاری می‌شوند تا زمانی که بشکنند. حداکثر بارگذاری انجام شده و مقاومت فشاری (f_c)

نتایج و بحث

-تخلخل و نفوذپذیری

برای آزمایشات تخلخل و نفوذپذیری از هر ترکیب ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج به صورت میانگین محاسبه شد. بر اساس نتایج افزایش جایگزینی پامیس موجب افزایش تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌های بتنی می‌شود روند نفوذپذیری و تخلخل به هم پیوسته است و با هم ارتباط مستقیم دارند. تخلخل بیشتر به اندازه سنگ‌دانه‌ها، شکل و طرح اختلاط بستگی دارد (Chang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین افزایش جایگزینی پامیس در ترکیب باعث افزایش تخلخل می‌شود. میزان تخلخل برای نمونه با ۲۵ درصد جایگزینی پامیس ۲۹/۵۷ درصد می‌باشد که در مقایسه نمونه کنترلی حدود ۹ درصد افزایش داشته است. دلیل این افزایش مربوط به شکل سنگ‌دانه‌های پامیس می‌باشد که در مقایسه با سنگ‌دانه‌های بازیافتی دارای بافت متخلخل‌تر و همچنین زاویه تیز کمتری می‌باشد.

مقدار تخلخل برای نمونه‌های بتنی متخلخل بیشتر در بازه ۱۵ تا ۳۷ درصد می‌باشد (Nassiri، ۲۰۲۰)؛ با توجه به نتایج به دست آمده، میزان تخلخل نمونه‌ها در محدوده ۲۰ تا ۲۹ درصد می‌باشد.

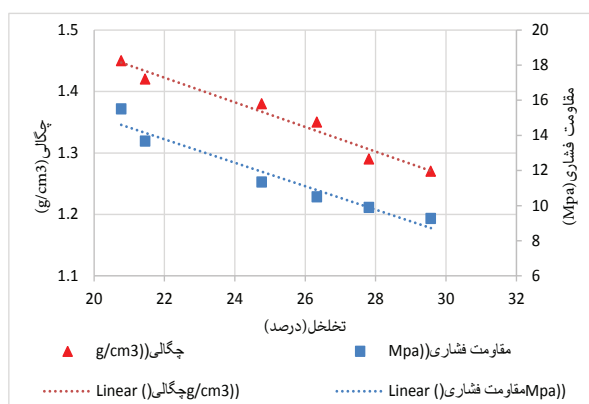
همچنین مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌های بتنی متخلخل بیشتر در محدوده ۰/۰۷۶ تا ۳/۵ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد (Nassiri،

سیمان باتوجه به افزایش حجم سنگدانه‌ها افزایش یابد، می‌توان انتظار داشت که نمونه‌های حاوی پامیس مقاومت بیشتری خواهند داشت، اما از آنجاکه هدف اصلی این مطالعه ارزیابی عملکرد حذف آلاینده‌های TOC توسط بتن متخلخل می‌باشد، افزودن پامیس به نمونه‌ها به منظور بهبود توانایی بتن در تصفیه و حذف آلاینده TOC بوده و از اثرات منفی این جایگزینی بر مقاومت بتن تا جایی که معیارها و ضوابط را جهت کاربرد به عنوان جمع‌آوری کننده رواناب در بام‌ها و جدول پیاده‌رو برآورده کند، صرف نظر می‌شود.

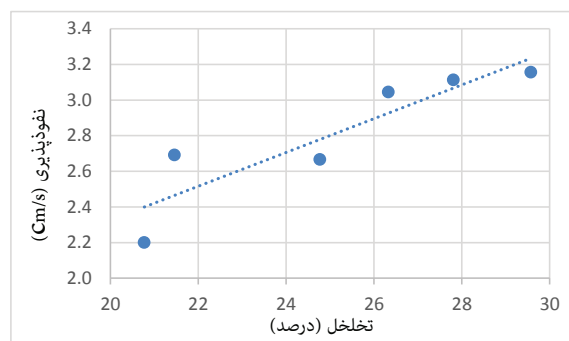
نتایج نشان دهنده ارتباط مستقیم بین چگالی توده و مقاومت فشاری بود، به عبارت دیگر با کاهش چگالی نمونه‌ها، مقاومت فشاری آن‌ها نیز کاهش می‌یابد، بنابراین ترکیبات با پامیس کمتر چگالی و مقاومت فشاری بیشتری دارند. طبق مطالعات قبلی هنگامی که متغیرهای مؤثر، جنس سنگدانه، طرح اختلاط، انواع درجه بندی، نسبت آب به سیمان و درصد ریزدانه استفاده شده در ترکیب باشد، ارتباط بین تخلخل و مقاومت فشاری، معکوس می‌باشد. طبق نتایج نشان داده شده در جدول (۵) می‌توان ارتباط بین تخلخل و مقاومت فشاری و همچنین چگالی نمونه‌ها را مشاهده کرد. شکل (۶) نتایج چگالی و مقاومت فشاری و تخلخل را به منظور مقایسه بهتر، نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و چگالی و تخلخل نمونه‌ها

| نمونه | مقاومت فشاری (Mpa) | چگالی (gr/cm ³) | تخلخل (درصد) |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|--------------|
| P ₀ | ۱۵/۵۰ | ۱/۴۵ | ۲۰/۷۷ |
| P _۵ | ۱۳/۶۷ | ۱/۴۲ | ۲۱/۴۶ |
| P _{۱۰} | ۱۱/۳۴ | ۱/۳۸ | ۲۴/۷۷ |
| P _{۱۵} | ۱۰/۵۰ | ۱/۳۵ | ۲۶/۳۳ |
| P _{۲۰} | ۹/۹۰ | ۱/۲۹ | ۲۷/۸۱ |
| p _{۲۵} | ۹/۲۶ | ۱/۲۷ | ۲۹/۵۷ |



شکل ۶- نمودار نتایج چگالی و مقاومت فشاری و تخلخل



شکل ۵- نمودار نتایج نفوذپذیری و تخلخل

مقاومت فشاری

برای آزمایش مقاومت فشاری، ۳ نمونه از هر ترکیب مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه محاسبه شد. به طور کلی مشخص شد که با جایگزینی پامیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه کنترلی بود که ۱۵/۵ مگاپاسکال می‌باشد و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه با ۲۵ درصد پامیس می‌باشد که مقدار آن ۹/۲۶ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با نمونه کنترلی حدود ۳۹ درصد کاهش یافته است.

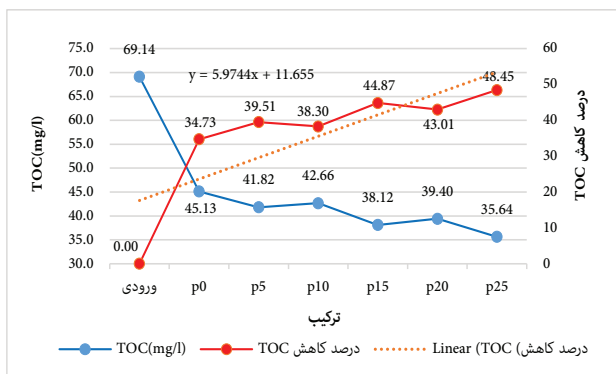
مقدار مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتنی متخلخل بیشتر در بازه ۲/۸ تا ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد (AlShareedah و Nassiri, ۲۰۲۰)؛ بنابراین باتوجه به نتایج به دست آمده، میزان مقاومت فشاری در محدوده قابل قبولی برای نمونه‌های بتنی متخلخل می‌باشد.

خواص مکانیکی و فیزیکی سنگدانه‌های استفاده شده در ترکیب بتن ارتباط مستقیم با خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل مانند مقاومت فشاری دارد (Lori و همکاران، ۲۰۱۹). میزان کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی پامیس، می‌تواند به دلیل افزایش میزان حجم نمونه‌ها (باتوجه به چگالی کمتر سنگدانه‌های پامیس نسبت به دانه‌های سرامیکی و بتنی) در یک وزن معین باشد و همچنین ساختار سنگدانه‌های پامیس که نسبت به سنگدانه‌های بتنی و سرامیکی بافت متخلخل تر دارد، با افزایش پامیس میزان جذب آب نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد، این عوامل می‌توانند منجر به کاهش میزان آب موثر در فرآیندهای هیدراتاسیونی سیمان شوند، همچنین میزان پخش شدن سیمان باتوجه به افزایش سطح موثر نمونه‌های بتنی در اثر افزایش پامیس افزایش می‌یابد بنابراین ضخامت فیلم تشکیل شده سیمان بر سطح سنگدانه‌ها کاهش یافته و در نتیجه آن پیوند بین سنگدانه‌ها ضعیف تر می‌شود که در نهایت منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. به منظور کاهش اثرات منفی افزایش پامیس بر مقاومت فشاری بتن، می‌توان میزان وزن خمیر سیمان مصرفی را افزایش داد (به عبارت دیگر نسبت A/C را در ترکیب بتن کاهش داد). بنابراین در صورتی که میزان

حذف TOC

در فرآیند تصفیه، پارامترهای تأثیرگذار در حذف آلاینده مدت زمان جذب، pH، ظرفیت جذب و میزان غلظت آلاینده در محیط آبی می‌باشد. در فرآیند انجام این تست میزان pH در حالت خنثی بوده است و مدت زمان جذب در حدود ۱ ساعت می‌باشد که از متغیرهای ثابت بوده است. در صورتی که مدت زمان جذب افزایش یابد میزان جذب می‌تواند افزایش یابد. شکل (۷) عملکرد نمونه‌های بتنی در تصفیه‌پذیری تغییرات شاخص TOC نشان می‌دهد. به‌طورکلی مشخص شد افزایش درصد جایگزینی پامیس موجب افزایش نسبی درصد حذف TOC می‌شود. میزان کاهش TOC در نمونه کنترلی P۰ بدون پامیس حدود ۳۵ درصد بود که با افزایش پامیس در نمونه‌های بعدی با شیب ۵/۹۷ افزایش می‌یابد و در نهایت برای نمونه برای ۲۵ درصد پامیس به بیش از ۴۸ درصد می‌رسد که در مقایسه با نمونه کنترلی ۱۳ درصد افزایش داشته است. همانطور که مشاهده می‌شود بتن متخلخل، عملکرد موثری در حذف آلاینده‌ها داشته که ناشی از فرآیند جذب است. تخلخل موجود در مصالح بازیافتی سبب جذب و ایجاد نیروی واندروالسی در سطوح سنگدانه‌ها شده است که سبب این فرآیند شده است.

افزایش سطح سنگدانه با جایگزینی ۲۵ درصد سنگدانه‌های پامیس سبب افزایش این راندمان شده است. پامیس سطح موثر بیشتری نسبت به سنگدانه سرامیکی و بتنی دارد. همین امر موجب افزایش درصد جذب شده است. لازم به ذکر است نقش سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بعد از پامیس در حذف TOC بیشتر از سرامیک بوده است. بدون تردید استفاده از مصالح بازیافتی متخلخل با ظرفیت جذب بالا به شرط تأمین مقاومت مکانیکی کافی، می‌تواند در تصفیه‌پذیری بتن مورد توجه باشد.



شکل ۷- نمودار تغییرات شاخص TOC

نتیجه‌گیری

در این پژوهش توسعه ساخت بتن متخلخل با رویکرد استفاده از مصالح بازیافتی و کاهش فشار بر روی منابع معدنی به‌منظور حذف TOC بررسی شد. بررسی خواص مکانیکی نمونه بتنی با ۲۵ درصد جایگزینی پامیس نشان می‌دهد که میزان تخلخل و نفوذپذیری بتن به ترتیب ۱۳ و ۴۳ درصد افزایش و میزان چگالی و مقاومت فشاری آن به ترتیب ۱۲/۵ و ۳۹ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است. در واقع جایگزینی پامیس سبب افزایش میزان نفوذپذیری، ایجاد روسازی با تخلخل مناسب و به دنبال آن سبب کاهش میزان مقاومت بتن شده است. با این حال مقاومت ایجادشده در محدوده استاندارد برای بتن متخلخل بوده است و می‌تواند به‌عنوان روسازی سبک استفاده شود. در بحث حذف آلاینده آلی TOC افزایش عملکرد ۱۳ درصدی برای نمونه با ۲۵ درصد جایگزینی پامیس مشاهده شده است. به‌طورکلی بتن متخلخل عملکرد مناسبی در نفوذپذیری و کاهش آلاینده‌ها دارد که با استفاده از پامیس به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه این عملکرد به‌مراتب بهتر می‌شود. اگرچه، با توجه به افزایش نفوذپذیری بتن، احتمال بروز واکنش‌ها نظیر خوردگی در بتن باید بررسی شود. علت اصلی بهبود عملکرد بتن در تصفیه‌پذیری با جایگزینی پامیس، توانایی بالای این

ماده معدنی در حذف آلاینده می‌باشد که در به دلیل ایجاد سطح بالا، تخلخل زیاد و به‌واسطه ایجاد جذب سطحی منجر به حذف آلاینده‌ها از منابع آب می‌شود. توصیه می‌شود در تحقیقات آینده در زمان‌بندی متفاوت عملکرد تصفیه‌پذیری این بتن مطالعه شود.

پی‌نوشت

1-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

منابع

- Afshar N.R. and Fahmi H. 2019. Impact of climate change on water resources in Iran. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3: 55-60.
- Al Ghussain L. 2019. Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38: 13-21.
- AlShareedah O. and Nassiri S. 2020. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production*, 125095.

- Concrete Pavement Based on Porosity. Final Report. Washington State University.
- Nnadi E.O., Newman A.P., Coupe S.J. and Mbanaso F.U. 2015. Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. *Journal of environmental management*, 147: 246-256.
- Office U.S.E.P.A.T.I. and Support E.M. 1999. Field applications of in situ remediation technologies: Permeable reactive barriers. DIANE Publishing.
- Pratt C., Mantle J. and Schofield P. 1989. Urban stormwater reduction and quality improvement through the use of permeable pavements. Urban discharges and receiving water quality impacts. Elsevier, 123-132.
- Shabalala A.N. and Ekolu S.O. 2019. Assessment of the suitability of mine water treated with pervious concrete for irrigation use. *Mine Water and the Environment*, 38: 798-807.
- Shabalala A.N., Ekolu S.O., Diop S. and Solomon F. 2017. Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage— column study. *Journal of Hazardous Materials* 323: 641-653.
- Shang H. and Sun Z. 2018. PAHs (naphthalene) removal from stormwater runoff by organoclay amended pervious concrete.
- Visco G., Campanella L. and Nobili V. 2005. Organic carbons and TOC in waters: an overview of the international norm for its measurements. *Microchemical Journal*, 79: 185-191.
- Wicke D., Matzinger A., Sonnenberg H., Caradot N., Schubert R.L., Dick R., Heinzmann B., Dünnebier U., von Seggern D. and Rouault P. 2021. Micropollutants in Urban Stormwater Runoff of Different Land Uses. *Water*, 13: 1312.
- Yadollahie M. 2019. The flood in Iran: a consequence of the global warming? *The international journal of occupational and environmental medicine*, 10: 54.
- Yoo J., Shin H. and Ji S. 2018. Evaluation of the applicability of concrete sludge for the removal of Cu, Pb, and Zn from contaminated aqueous solutions. *Metals*, 8: 666.
- Brattebo, B.O., Booth, D.B., 2003. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water research*, 37: 4369-4376.
- Chan Y., Luo X. and Sun W. 2000. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 C. *Cement and Concrete Research*, 30: 247-251.
- Chang J.J., Yeih W., Chung T. and Huang R. 2016. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, 109: 34-40.
- Delatte N. 2018. Concrete pavement design, construction, and performance. Crc Press.
- Duan P., Hu X., Ji Z., Yang X. and Sun Z. 2018. Enhanced oxidation potential of Ti/SnO₂-Cu electrode for electrochemical degradation of low-concentration ceftazidime in aqueous solution: Performance and degradation pathway. *Chemosphere*, 212: 594-603.
- EPA. 2010. Preparing Your Drinking Water Consumer. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Ibrahim H.A. and Razak H.A. 2016. Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 115: 70-77.
- Liu W., Chen W., Feng Q., Peng C. and Kang P. 2016. Cost-benefit analysis of green infrastructures on community stormwater reduction and utilization: a case of Beijing, China. *Environmental management*, 58: 1015-1026.
- Lori A.R., Hassani A. and Sedghi R. 2019. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 197: 130-142.
- Muthu M., Santhanam M. and Kumar M. 2018. Pb removal in pervious concrete filter: effects of accelerated carbonation and hydraulic retention time. *Construction and Building Materials*, 174: 224-232.
- Nassiri S. 2020. Development of Protocol to Maintain Winter Mobility of Different Classes of Pervious

Zhang Z., Zhang Y., Yan C. and Liu Y. 2017. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 135: 112-118.

Zhang R., Kanemaru K. and Nakazawa T. 2015. Purification of river water quality using precast porous concrete products. *Journal of advanced concrete technology*, 13: 163-168.