



Research paper

(Received 26 July 2025

Accepted 28 Oct. 2025)

## **The effect of using mineral adsorbents along with nanoparticles in porous concrete to improve the quality of urban runoff**

Emad Kahrizi<sup>1</sup>, Mehdi Sedighi<sup>2</sup>, Ebrahim Salami<sup>3</sup>, Taher Rajaei<sup>4</sup> and Fatemeh Nadali<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Qom, Qom, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

<sup>5</sup>Masters Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

### **Abstract**

In the last decade, porous concrete has been considered as one of the effective options in urban runoff management, especially in sidewalks and surface pavements. In the present study, the combined performance of nanoparticles (5 wt%) and mineral adsorbents (15% zeolite, travertine, scoria and pumice) in porous concrete to improve the quality of urban runoff was investigated experimentally and numerically. The samples were evaluated in the laboratory under the passage of 10 liters of runoff for 2 hours and under constant temperature, porosity and permeability. TSS, COD and lead concentration parameters were measured before and after the runoff passage. Experimental results showed that adding pumice with 5% nanoparticles resulted in 75% lead removal, combining 10% zeolite with 5% nanoparticles resulted in 32% TSS removal and 15% zeolite with 2% nanoparticles resulted in 23% COD reduction. In numerical simulation using COMSOL Multiphysics, after calibrating the model with laboratory data, lead removal was reproduced to approximately 80% (with an error of about 20% compared to the experiment) and TSS and COD removal were reproduced to 17% and 9%, respectively (difference of 14–15%). The results show that the addition of inorganic adsorbents and nanoparticles, by reducing pores and increasing the contact surface, plays an effective role in the absorption of physical and chemical pollutants in runoff.

**Keywords:** Porous Concrete; Mineral Absorbents; Nanoparticles; Comsol

\*Corresponding Author: Emad Kahrizi

Email: [Emad.kahrizi@gmail.com](mailto:Emad.kahrizi@gmail.com)

Phone: +989160501587

Doi: 10.48306/juem.2025.534489.1085



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۴

## تأثیر به کارگیری جاذب‌های معدنی به همراه نانوذرات در بتن متخلخل به منظور بهبود کیفیت رواناب شهری

عماد کهریزی<sup>\*</sup>، مهدی صدیقی<sup>۲</sup>، ابراهیم سلامی<sup>۳</sup>، طاهر رجائی<sup>۴</sup> و فاطمه نادعلی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه قم، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه قم، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، ایران

<sup>۵</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه قم، ایران

### چکیده

در دهه اخیر، بتن متخلخل به عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر در مدیریت رواناب‌های شهری، به ویژه در پیاده‌روها و روسازی‌های سطحی، مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، عملکرد ترکیبی نانوذرات (۵ درصد وزنی) و جاذب‌های معدنی (۱۵ درصد زئولیت، تراورتن، اسکوریا و پومیس) در بتن متخلخل جهت بهبود کیفیت رواناب شهری به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت عبور ۱۰ لیتر رواناب طی ۲ ساعت و در شرایط ثابت دما، تخلخل و نفوذپذیری ارزیابی شدند. پارامترهای TSS، COD و غلظت سرب پیش و پس از عبور رواناب اندازه‌گیری شد. نتایج تجربی نشان داد افزودن پومیس با ۵٪ نانوذره منجر به حذف ۷۵٪ سرب، ترکیب ۱۰٪ زئولیت با ۵٪ نانوذره به حذف ۳۲ درصد TSS و حالت ۱۵٪ زئولیت با ۲٪ نانوذره به کاهش ۲۳ درصد COD انجامید. در شبیه‌سازی عددی با استفاده از COMSOL Multiphysics، پس از کالیبراسیون مدل با داده‌های آزمایشگاهی، حذف سرب به تقریب ۸۰٪ (با خطای حدود ۲۰٪ نسبت به آزمایش) و حذف TSS و COD به ترتیب ۱۷٪ و ۹٪ (اختلاف ۱۴-۱۵ درصد) بازتولید گردید. نتایج نشان می‌دهد افزودن جاذب‌های معدنی و نانوذرات، از طریق کاهش منافذ و افزایش سطح تماس، نقش مؤثری در جذب آلاینده‌های فیزیکی و شیمیایی رواناب دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل؛ جاذب‌های معدنی؛ نانوذرات؛ کامسول

## ۱- مقدمه

آب به‌عنوان یک ماده حیاتی برای انسان و سایر موجودات زنده، نقشی تعیین‌کننده در جوامع امروزی ایفا می‌کند و اکنون تأمین آب در اکثر کشورها به یک بحران بزرگ تبدیل شده است. این ماده نیاز اولیه بسیاری از فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعت و شرب است. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک، ایران در زمره کشورهای بی‌آبی است که از منابع آب شیرین مانند رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی به میزان کم بهره‌مند شده، هرچند میانگین بارندگی، به‌جز نوار باریک در شمال ایران در اکثر مناطق کشور کمتر از میانگین جهانی است؛ بنابراین حفاظت و صیانت از این منابع آبی در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت ضروری است. در این میان، آب‌های نامتعارف مانند روان‌آب‌ها، سیلاب‌ها و پساب‌های شهری بخش‌های قابل‌توجهی از منابع آبی را تشکیل می‌دهند که به دلیل عدم مدیریت صحیح و به‌موقع، غیرقابل استفاده بوده و خسارات زیادی به حوضه‌های شهری و روستایی وارد می‌کنند. با این حال، این منابع به حجم زیادی از منابع آب شیرین کمک می‌کنند و می‌توانند از طریق عملیات تخصصی و برخی روش‌های کم‌هزینه به چرخه‌های صنعت و کشاورزی بازگردانده شوند [۱].

در گذشته حجم زیادی از رواناب شهری به رودخانه‌ها یا منابع آب زیرزمینی هدایت می‌شد. این موضوع مشکلات مختلفی از جمله کاهش کیفیت آب رودخانه، برهم زدن تعادل آب‌و‌خاک و از بین بردن برخی گونه‌های گیاهی و جانوری در حوضه رودخانه را در پی داشت. به‌طور کلی، تخلیه رواناب‌های آلوده به سفره‌های آب زیرزمینی نه‌تنها کیفیت آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد، بلکه خاک مورد استفاده برای نفوذ رواناب را نیز آلوده می‌کند و اثرات نامطلوبی بر کیفیت و ایمنی کشاورزی در منطقه ایجاد می‌کند. بنابراین، روشی باید توسعه یابد تا نه‌تنها بار آلودگی رواناب و سیلاب‌ها را مدیریت کند، بلکه سایر مشکلات ناشی از بارندگی شدید در این مناطق را نیز مدیریت کند [۲]. در این راستا بتن متخلخل جاذب راه‌حلی مناسب، کم‌هزینه و قابل اجرا برای مناطق مختلف کشور است. این سیستم رواناب‌ها و سیلاب‌های شهری را کنترل می‌کند، کیفیت آن‌ها را بهبود می‌بخشد و امکان استفاده از پساب زهکشی را در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، آبیاری گلخانه‌های شهری و صنعت فراهم می‌کند [۳]. شایان‌ذکر است که در تعداد زیادی از مطالعات استفاده از آن‌ها در بتن متخلخل، توانایی جاذب‌ها را در بهبود کیفیت آب و فاضلاب ارزیابی کرده‌اند [۴].

تاکنون محققان از جاذب‌های مختلفی برای جذب پارامترهای مختلف سطح آب، فاضلاب و رواناب استفاده کرده‌اند. این جاذب‌ها به‌طور کلی به دو گروه آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. جاذب‌های آلی شامل خاک اره افرا، پوست اکالیپتوس، باگاس، پوست برنج، پوست درخت کاج و گردو، زردآلو، خرما، دانه انگور و ضایعات برگ چای هست [۵]. این جاذب‌ها اغلب دارای طبیعت زیاده هستند و در تحقیقات بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مواد معدنی مانند ژئولیت، پرلیت، لیکا، پوک، دولومیت، ورمیکولیت، کائولن، متاکولین، تالک و سیلیس از جمله جاذب‌هایی هستند که برای جذب آلودگی سطحی یا کاهش شاخص‌های آلودگی ناشی از آب نامتعارف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. لازم به ذکر است که این جاذب‌ها به دلیل گستردگی در سطح زمین، مقرون‌به‌صرفه بودن و فسادناپذیری در اقلیم‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در مطالعه‌ای سونبی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی مخلوط بر بتن عبوری با مدل‌سازی آماری پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که W/C، محتوای سیمان، محتوای درشت‌دانه‌ها و برهم‌کنش‌های آن‌ها پارامترهای کلیدی هستند که به‌طور قابل توجهی بر عملکرد مشخصه PCPC تأثیر می‌گذارند. مدل‌های آماری توسعه یافته در این مطالعه می‌توانند با کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز، بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط را برای عملکرد بهتر تسهیل کنند [۷]. در مطالعه دیگر فانگ و همکاران (۲۰۲۲) به تأثیر عملیات تقویتی سنگ‌دانه بر عملکرد بتن نفوذپذیر سنگ‌دانه باز یافتی ژئوپلیمری از مطالعات آزمایشگاهی تا شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی PFC پرداختند، نتایج نشان داد که با افزایش نسبت فضای خالی بتن، نمونه تقویت‌کننده سنگ‌دانه مقاومت فشاری GRAPC را به ترتیب به میزان ۵/۶، ۵/۸، ۱۱/۷ و ۲۳/۲ درصد در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد [۸].

اخیراً در مطالعه هونکای و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب بر خواص مکانیکی بتن متخلخل از مطالعات آزمایشگاهی تا شبیه‌سازی پرداختند، در آن مقاله، بتن متخلخل با استفاده از خاکستر بادی، سرباره کوره بلند دانه بندی شده و خاکستر پوسته برنج به‌عنوان مواد سیمانی تکمیلی (SCMs) تهیه شد و خواص مکانیکی، نفوذپذیری آب و دوام یخ-ذوب بتن نفوذپذیر عمدتاً مشخص شد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای تصحیح هم‌بستگی عملکردی بین ویژگی‌های مکانیکی بتن تراوا، نتایج آزمایش صحت سنجی شد. تأثیر تخلخل‌های مختلف و مقاومت فشاری تک‌محوری اولیه (UCS) بر ثابت تضعیف مقاومت یخ-ذوب بتن گذرا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ثابت فروپاشی UCS با افزایش تخلخل و مدول الاستیک افزایش یافت، در حالی که با افزایش UCS اولیه کاهش

یافت؛ بنابراین، ثابت پوسیدگی UCS و مدول الاستیک پس از FTC های دلخواه را می توان به راحتی با استفاده از پارامترهای اولیه بتن عبوری تخمین زد [۹]. در مطالعه اخیر جینفینگ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی شبیه سازی عملکرد مواد بتن متخلخل همراه با نانوتکنولوژی در مدیریت آب باران پرداختند. آن ها دریافتند که تجزیه و تحلیل اجزای محدود نشان می دهد ترکیب نانو ذرات می تواند مقاومت فشاری بتن نفوذپذیر را بهبود بخشد. در عین حال، تحت یک شبیه سازی محیط آب باران، زمان نگهداری آب باران بتن متخلخل تنها ۲،۳۵ ثانیه است. نتایج نشان می دهد که ترکیب نانو ذرات در بتن گذر می تواند نفوذپذیری آب بتن گذر را بهبود بخشد، خواص مکانیکی بتن گذر را بهبود بخشد و عمر مفید آن را افزایش دهد که برای توسعه شهری و مدیریت شهری اهمیت زیادی دارد [۱۰].

در مطالعه ای جدید فوشنگ و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی شبیه سازی عددی ساده تراکم تک محوری برای بتن تراوا تقویت شده با الیاف پلی اکریلونیتریل بر اساس تصاویر CT انجام دادند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مدل دارای خواص مکانیکی مشابه با نمونه واقعی است و می توان از آن برای شبیه سازی مرحله الاستیک فرآیند تراکم تک محوری و پیش بینی مقاومت با خطای کمتر از ۱۵ درصد استفاده کرد. دقت و پایایی مدل نیز با الگوی توزیع عمودی و ترک های برشی X شکل از دیدگاه های ماکرو و مزو تأیید شده است [۱۱]. اخیراً سوران احمد و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه در خصوص تکنیک های مدل سازی ریاضی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن متخلخل اصلاح شده با پودرهای شیشه ای زباله داشته اند. این مقاله بر مدل های ریاضی مختلف مانند رگرسیون خطی (LR)، رگرسیون غیرخطی (NLR) و مدل های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن گذر در هنگام استفاده از پودر شیشه ضایعات تمرکز دارد. جاذب ها طبق یافته ها، مدل ANN از نظر دقت و کارایی از هر دو مدل LR و NLR بهتر عمل می کند [۱۲].

با بررسی انجام شده در تحقیقات نشان داده شده است میزان آلاینده روانابها زیاد می باشد و استفاده از ابزار مناسب و مدیریتی برای حذف این مواد قابل چشم پوشی نیست، از طرفی استفاده از بتن متخلخل به جای روش های سنتی، باعث نفوذپذیری آب و تغذیه آب زیرزمینی می گردد و همچنین در صورت مدیریت کارآمد، زهکشی مناسب در زمان وقوع سیلاب باشد. در یک جمع بندی کلی می توان بیان کرد که استفاده از بتن متخلخل سبب می شود با شیوه مدیریتی مناسب با بهره برداری از رواناب شهری و استفاده مجدد آبها، مشکلات و بحران های آبی را تا حدی کاهش داد. با توجه به مطالعات اخیر جاذب های معدنی بر خواص فیزیکی بتن متخلخل تأثیرگذار است، از طرفی تأثیر این جاذب ها بر روی تصفیه آب حائز اهمیت می باشد.

مطالعه حاضر باهدف استفاده از جاذب های پومیس، اسکریا، زئولیت و تراورتن با مقادیر حجمی متفاوت به عنوان سنگدانه همراه با نانوذره سولفید فلزی برای افزایش شاخص های ساختاری و توانایی بتن متخلخل به منظور بهبود کیفیت رواناب شهری اهداف دیگر این پژوهش در موارد زیر ارائه شده است:

- ✓ بررسی اثر جاذب های سنگدانه ها (جاذب های پومیس، اسکریا، زئولیت و تراورتن با مقادیر حجمی متفاوت) همراه با نانوذره بر بهبود شاخص های کیفی COD، TSS و سرب رواناب شهری با استفاده از بتن متخلخل
- ✓ ارائه مدل عددی شبیه سازی شده بتن متخلخل در مدل شبیه ساز کامسول

قابل ذکر است که تمامی پارامترهای کمی و کیفی ذکر شده در این تحقیق به صورت مستقل مورد آزمایش و تعیین قرار گرفتند.

## ۲- مواد و روش ها

در این قسمت مواد مصرفی به تفصیل شرح داده شده و آزمایش ها و دستگاه های مورد استفاده در این تحقیق به تفصیل بیان می شود.

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در انجام این تحقیق از سیمان پرتلند معمولی تیپ یک کارخانه سیمان درود استفاده شده است. خصوصیات سیمان انتخابی طبق استاندارد ASTM C150 می باشد [۱۳]. نرمی سیمان مورد استفاده حدود  $3100 \text{ cm}^2/\text{g}$  بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن  $\text{kg/cm}^2$  ۳۶۵ می باشد. مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه سیمان درود

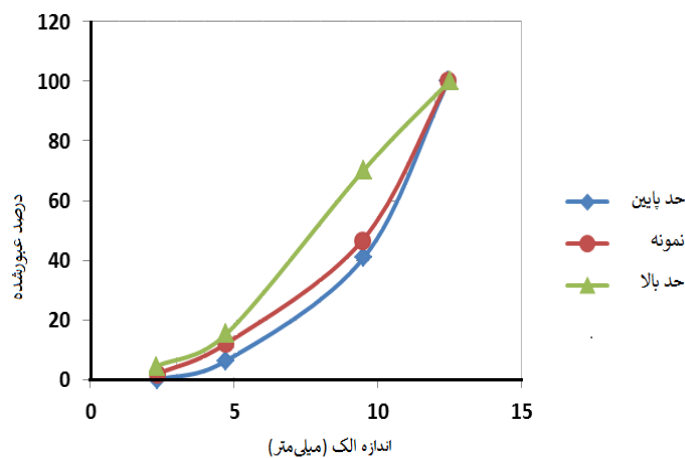
میانگین (%)	مشخصات شیمیایی
22.6	SiO <sub>2</sub>
5.3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3.7	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
62.4	CaO
1.6	MgO
1.8	SO <sub>3</sub>
0.8	K <sub>2</sub> O

افزودنی مورد استفاده در این تحقیق از نانوذرات سولفید روی متعلق به شرکت تولیدکننده arminano می باشد که از شرکت مهندسی پایدار ابتکار آرمینا تهیه گردید. در حال حاضر تولید این ذرات به دلیل تقاضای اندک به صورت انبوه در داخل کشور امکان پذیر نمی باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ذرات از قبیل اندازه، درصد و درجه خلوص در جدول ۲ آمده است.

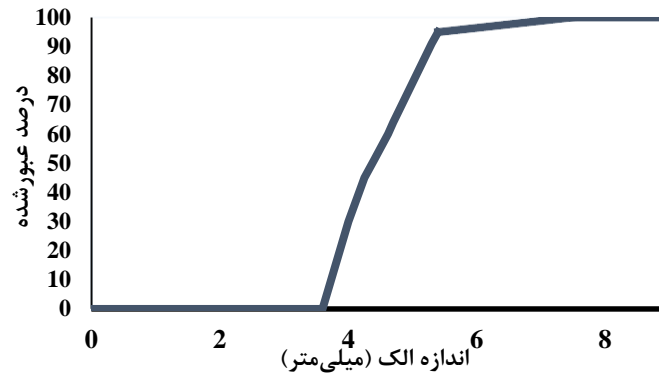
جدول (۲) مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات سولفید

نانوذره	مشخصه و شرکت تولیدکننده	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	قطر ذرات (نانومتر)	وزن مولکولی (گرم بر مول)
نانوذرات سولفید روی	ZnS arminano	۴,۰۷۹	۱۰-۵	۹۷/۴۶

بتن معمولاً از سنگدانه‌هایی با اندازه‌های متفاوتی تولید می‌گردد. سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن متخلخل فاقد ریزدانه، یا حاوی مقدار کمی ریزدانه هستند. به همین دلیل ساختار بتن متخلخل دارای حفره‌های به هم پیوسته می‌باشد و در نتیجه خاصیت نفوذپذیری بالایی دارد. [۱۴]. دانه‌بندی مصالح سنگی عبارت است از تقسیم‌بندی یک نمونه از دانه‌ها با اندازه‌های یکسان و هدف از آن یافتن درجه‌بندی و توزیع ذرات مختلف در یک نمونه انتخاب شده است. آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM C136 انجام گردید [۱۵]. چون نحوه توزیع اندازه دانه‌ها بر خواص بتن تأثیر دارد، لذا دانه‌بندی مصالح سنگی بایستی مطابق با مقادیر پیش‌بینی شده توسط استاندارد باشد؛ بنابراین لازم است در محدوده مقادیر استاندارد قرار داشته باشد. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده در شکل ۱ و دانه‌بندی استفاده شده جذب‌ها در شکل ۲ آورده شده است که در محدوده مجاز شناخته شده توسط استاندارد ASTM C33 می‌باشد [۱۶].



شکل (۱) منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ی مصرفی



شکل (۲) منحنی دانه‌بندی جاذب‌ها

## ۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن شامل تعیین نسبت اجزای بتن (سیمان، آب شن و ماسه) برای دستیابی به خواص مشخص می‌باشد. برای طرح اختلاط بتن متخلخل از آیین‌نامه ACI 211.3R که برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های با اسلامپ صفر تهیه شده است، استفاده گردید. این آیین‌نامه نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ الی ۰/۴۵ را جهت پوشش مناسب سنگ‌دانه‌ها با خمیر سیمان و پایداری خمیر سیمان، پیشنهاد نموده است [۱۷]. در این تحقیق، یک طرح اختلاط پایه که توسط محققین قبلی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته بود به‌عنوان طرح اولیه انتخاب شده است که مطابق با ACI 211.3R می‌باشد [۱۸]. جاذب‌های به‌کاررفته در این تحقیق شامل پومیس، اسکریا، زئولیت و تراورتن با مقادیر حجمی ۱۵ درصد همراه با نانوذره سولفید فلزی با قطر ۵ میکرون و درصد وزنی ۵ درصد جایگزین سنگ‌دانه می‌شوند (شکل ۳).



شکل (۳) جاذب‌های مصرفی: (a) پومیس، (b) اسکریا، (c) تراورتن و (d) زئولیت

### ۳-۲- اندازه‌گیری TSS

پس از قرار دادن در دسیکاتور و ثابت شدن دما وزن کاغذ صافی و رسوب اندازه‌گیری می‌شود. میزان از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$TSS(mg/L) = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \quad (1)$$

### ۴-۲- اندازه‌گیری COD

نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت داخل راکتور با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود (شکل ۴). پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از راکتور، با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر میزان COD هر نمونه قرائت می‌شود (شکل ۵).



شکل (۴) دستگاه راکتور جهت انجام آزمایش COD



شکل (۵) دستگاه اسپکتوفتومتر برای محاسبه COD

### ۵-۲- اندازه‌گیری غلظت فلز سنگین سرب

برای اندازه‌گیری فلز سنگین سرب نمونه‌ها از دستگاه جذب اتمی به روش کوره گرافیتی استفاده شد. ابتدا دستگاه توسط محلول‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکروگرم بر لیتر سرب کالیبره شده و سپس هریک از نمونه‌ها داخل سل‌های مخصوص دستگاه ریخته شده و قرائت انجام می‌شود دستگاه هر نمونه را دو بار قرائت را در نرم‌افزار خاص مربوط به دستگاه بروی نمایشگر نشان می‌دهد. در شکل ۶ تصویر دستگاه نشان داده شده است.



شکل (۶) دستگاه جذب اتمی برای تعیین غلظت فلزات سنگین

## ۲-۶- شبیه‌سازی آزمایش با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

امروزه استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای به‌منظور شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف بسیار متداول است. از آنجایی که در بعضی مسائل پیچیده امکان حل تحلیلی وجود ندارد و همچنین انجام آزمایش‌ها و آزمون‌های تجربی پرهزینه و زمان‌بر است لذا روش‌های حل عددی و شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌تواند در کمترین زمان با دقت خوبی مسائل را حل نماید و تأثیر پارامترهای مختلف و نقش هر یک از آنها را مورد مطالعه قرار دهد. یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه شبیه‌سازی نرم‌افزار COMSOL Multiphysics است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را به روش المان محدود در فضاهای یک، دو و سه‌بعدی حل عددی نماید. در این نرم‌افزار به دلیل استفاده از ساختارهای فیزیکی از پیش تعبیه‌شده، ایجاد مدل موردنظر بسیار سریع بوده و می‌توان گستره‌ی عظیمی از مدول‌ها و پدیده‌ها را مورد بررسی قرار داد [۱۹].

شبیه‌سازی آزمایش در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics در چند مرحله انجام می‌شود [۱۹]:

- ۱- انتخاب مدل فیزیکی مسئله
- ۲- رسم هندسه مدل
- ۳- انتخاب نوع ماده
- ۴- شرایط اولیه و مرزی
- ۵- مش بندی
- ۶- حل مسئله
- ۷- تجزیه و تحلیل نتایج

برتری‌های این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارها را می‌توان در چهار مورد کلی بیان نمود. اول اینکه مولتی فیزیک بودن نرم‌افزار این قابلیت باعث شده که نرم‌افزار ماژول‌های بسیار مختلفی از قبیل مکانیک سیالات، انتقال حرارت، انتقال جرم، مباحث مربوط به برق و الکترونیک مباحث فیزیک و شیمی محض و حتی بروزترین دانش‌ها از قبیل لایه‌نازک محیط‌های پلاسما و لایه‌های شفاف را شامل شود به طوری که مهندسين در رشته‌های مختلف هیچ مشکلی برای انجام محاسبات دینامیکی سیالات و یا هر نوع مدل‌سازی دیگری نداشته باشند. در نهایت به جرئت می‌توان گفت که سایر نرم‌افزارهای تحلیلی را می‌تواند زیرمجموعه خود گیرد. دوماً بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیلی مانند فلونت قابلیت مش‌بندی هندسه را ندارند و کاربر مجبور به استفاده از نرم‌افزار دیگری برای مش‌بندی می‌باشد اما نرم‌افزار کامسول نتایج حاصل از مش‌بندی انجام‌شده توسط خودش را تحلیل می‌کند. به اصطلاح ساده‌تر می‌توان گفت که دیگر نیاز به نرم‌افزار جانبی برای مش‌بندی نیست. سوماً این نرم‌افزار از روش المان محدود استفاده می‌کند که خطای آن در رسیدن به ایزوتروپی و پاسخ نهایی کمتر از نرم‌افزارهایی است که از روش حجم محدود استفاده می‌کنند؛ و در نهایت قابلیت اتصال با نرم‌افزارهای زیادی مانند Solid works Cad, Matlab, Catia, و ... از نقاط قوت این نرم‌افزار است [۲۰].

نرم‌افزار کامسول یک محیط ارتباطی قدرتمند برای ایجاد مدل و حل انواع مسائل مهندسی و علمی می‌باشد. این نرم‌افزار دارای محیط دستکاپ یکپارچه و قدرتمندی می‌باشد که با استفاده از مدل‌ساز، دید کامل از مدل و امکان دسترسی به تمام قابلیت‌های آن را در اختیار محققان قرار می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار کامسول می‌توان به‌سادگی مدل‌های متداول برای یک نوع از فیزیک خاص را توسعه

داده و در مدل های کامسول، تأثیر فیزیک های کوپل شده که حل آن ها به طور هم زمان است انجام گیرد. دسترسی به این قابلیت قدرتمند نیازمند داشتن دانش و علم کافی در زمینه ریاضیات و تحلیل عددی نیست می توان با استفاده از رابط های فیزیکی، پشتیبانی پیشرفته از خواص مواد، بارها قیدها منابع و شارها با تعریف معادلات اساسی، مدل سازی انجام گیرد. همچنین می توان متغیرها عبارات یا اعداد را مستقیماً به محدوده های مختلف، مرزها لبه ها و یا نقاط جامد یا سیال مستقل از مش های محاسباتی اعمال کرد سپس کامسول با جمع آوری مجموعه ای از معادلات کل مدل را حل می کند.

## ۲-۶-۱- شبیه سازی عددی رفتار بتن متخلخل در نرم افزار اجزاء محدود کامسول

در این بخش، به تحلیل پدیده جذب در محیط اجزاء محدود نرم افزار کامسول پرداخته می شود. هدف اصلی این بخش، شبیه سازی اثر جذب پارامتر سرب، که پیش تر در آزمایشگاه و در بخش های قبلی مورد بررسی قرار گرفت، در مدل عددی می باشد. برای این منظور، رفتار بتن متخلخل در تعامل با جاذب های معدنی و نانوذرات تحت شرایط مختلف به طور دقیق شبیه سازی می گردد تا روند جذب سرب در سیستم های بتن متخلخل در شرایط واقعی بهتر درک شود. این شبیه سازی عددی با استفاده از مدل های پیچیده دینامیک سیالات و انتقال جرم در نرم افزار کامسول انجام می شود، که قادر است فرآیندهای جذب را در داخل ساختار متخلخل بتن تحت شرایط مختلف مدل سازی کند. نتایج به دست آمده از این شبیه سازی می تواند به طور مستقیم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و میزان دقت مدل در پیش بینی رفتار جذب سرب ارزیابی شود.

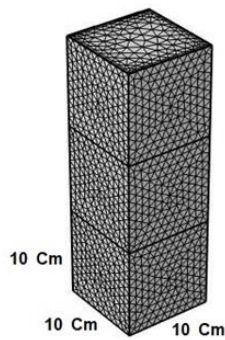
### فرضیات

فرضیات مدل عددی به شرح زیر می باشد:

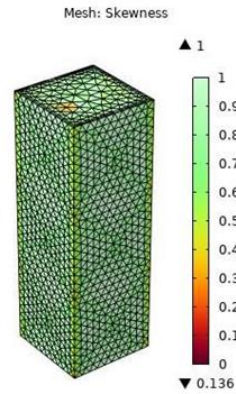
۱. جذب آلاینده در دمای ثابت انجام می شود: فرآیند جذب فرض شده است که در دمای ثابت صورت می گیرد، به این معنا که تغییرات دما در طول فرآیند جذب بر رفتار سیستم تأثیر نمی گذارد.
۲. در طول فرآیند جذب، نفوذپذیری و تخلخل ثابت هستند: فرض بر این است که ویژگی های فیزیکی بتن متخلخل مانند نفوذپذیری و تخلخل در طول فرآیند جذب ثابت باقی می ماند و تغییرات این ویژگی ها به عنوان متغیر در نظر گرفته نمی شوند.
۳. سرعت و نرخ جذب آلاینده توسط محیط متخلخل ثابت است: فرض شده است که سرعت جذب و نرخ آن در طول فرآیند جذب ثابت بوده و هیچ گونه تغییر در سرعت جذب در زمان های مختلف مشاهده نمی شود.
۴. معادله پیوستگی همواره برقرار است: معادله پیوستگی به عنوان یک اصل بنیادی در مدل سازی در نظر گرفته می شود که نشان دهنده حفظ جرم در سیستم است و در تمامی مراحل شبیه سازی رعایت می شود.

## ۲-۶-۲- هندسه مقطع

برای شبیه سازی عددی محیط متخلخل، ابعاد بتن به طور دقیق برابر با  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر در نظر گرفته شد که مطابق با مقطع استفاده شده در آزمایشگاه می باشد. به منظور بهبود دقت نتایج و همچنین تسهیل فرآیند تحلیل، برای ابتدای و انتهای مقطع، حجمی خالی به ابعاد محیط متخلخل در نظر گرفته شد. این اقدام به بهینه سازی شرایط شبیه سازی و تسهیل در دستیابی به نتایج دقیق تر کمک می کند. شکل ۱۲ ابعاد و مش بندی هندسی مقطع شبیه سازی شده را نشان می دهد. در طراحی مش بندی سعی شده است از مشی استفاده گردد که ضمن حفظ سرعت بالای محاسبات، دقت محاسبات به طور قابل قبولی تأمین شود. برای این منظور، انتخاب مش بندی به گونه ای انجام شده است که تعادلی میان زمان محاسبات و دقت در نتایج برقرار باشد. شکل ۱۳ کیفیت مش بندی را در نواحی مختلف مقطع نشان می دهد. بر اساس تحلیل انجام شده، کیفیت مش بندی در ناحیه نزدیک به یک است که نشان دهنده دقت بالای مش بندی در این ناحیه می باشد. این ویژگی باعث می شود که مدل شبیه سازی قادر به شبیه سازی دقیق فرآیند جذب آلاینده ها در بتن متخلخل باشد.



شکل (۱۳) مشخصات و مش بندی هندسه



شکل (۱۴) کیفیت مش بندی هندسه

## ۲-۶-۳- معادلات حاکم بر نرم افزار

در این بخش، معادلات به کاررفته در مدل عددی به تفصیل تشریح می گردد.

### معادله پیوستگی و مومنتوم:

معادله پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر و ثابت ماندن حجم کنترلی به صورت (۲) هست:

$$\int_{cs} \rho W \cdot \hat{n} dA = 0 \quad (2)$$

که  $\rho$  چگالی جسم،  $W$  دبی جسم و  $A$  مساحت حجم کنترل هست.

معادله مومنتوم: رابطه (۳)

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla \tau_{ij} \quad (3)$$

معادله (۴) انتقال جرم که برای جابه جایی و انتقال جرم در نرم افزار استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (J_i + uc_i) &= R_i + S_i \\ J_i &= -(D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن سمت راست معادله پارامترهای جابه جایی و انتقال جرم و سمت چپ معادله نرخ جذب ماده است.

مدل عددی برای اثر نفوذپذیری و برای محاسبه افت فشار سیال شبیه سازی از معادله کازنی-کارمن استفاده شده است که به صورت

(۵) است:

$$k = \frac{d_p^2}{180} \frac{\epsilon_p^3}{(1 - \epsilon_p)^2} \quad (5)$$

که در این رابطه:

$d_p^2$ : افت فشار،  $\epsilon_p$ : تخلخل بستر و  $d$  قطر ذرات کروی می‌باشد.

با در نظر گرفتن سیال ویسکوز غیرقابل تراکم در یک دامنه به ضخامت  $H$  از محیط متخلخل، معادله حاکم بر جریان را می‌توان به شکل معادلات ۶ و ۷ نمایش داد:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۶)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u^*}{\partial t} + (u^* \cdot \nabla) u^* \right] = -\nabla p^* + \mu \nabla^2 u^* - \alpha u^* \quad (۷)$$

که در اینجا برابر است با  $\frac{\mu}{k}$  و بردار است و معادلات (۴-۵) و (۴-۶) به ترتیب، پیوستگی و معادله کلی جریان سیال در محیط متخلخل است که با فرض پایستار بودن نیروی حجمی  $f = -\nabla \phi$  و  $P = p + \rho \phi$  بدین شکل ارائه شده است. معادلات (۶) و (۷) را با معرفی متغیرهای بدون بعد می‌توان به شکل (۸) رابطه بازنویسی کرد:

$$DaRe \frac{\partial u}{\partial t} + (u^* \cdot \nabla) u^* = -DaRe \nabla p + Da \nabla^2 u - u \quad (۸)$$

$$\nabla \cdot u = 0$$

که در آن:

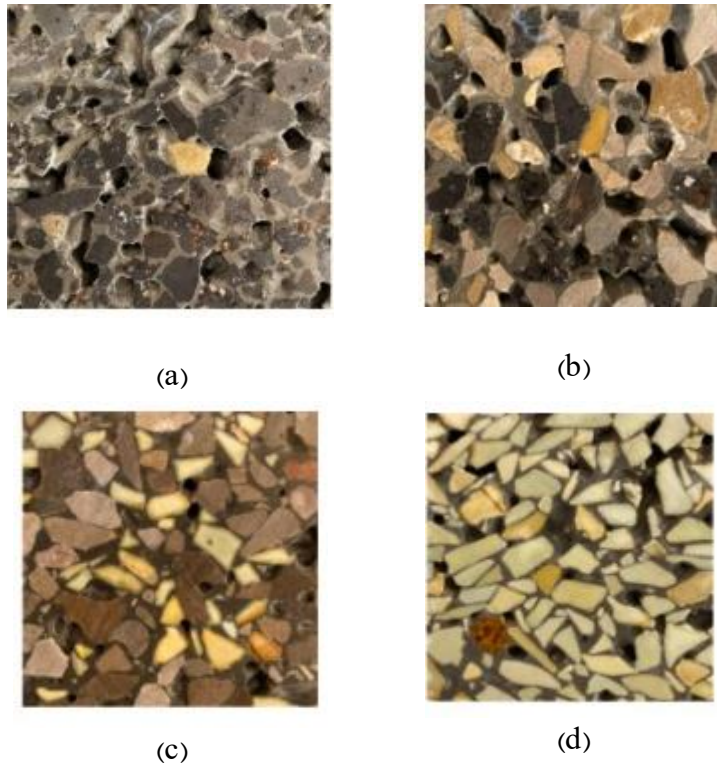
$$x = \frac{x^*}{H}, v = \frac{v^*}{U}, t^* = \frac{U}{h} t, p^* = \frac{p}{\rho U^2}$$

و  $U$  سرعت مشخصه سیستم تعریف شده است. همچنین  $Re = \frac{\rho U H}{\mu}$  و  $Da = \frac{\mu}{\alpha H^2}$  که به ترتیب، عدد رینولدز و دارسی جریان هستند.

## ۲-۶-۴-شرایط مرزی

برای تعیین شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی، از دبی جرمی در ورودی استفاده شد. به‌گونه‌ای که حجم ۱۰ لیتر رواناب در مدت زمان ۲ ساعت از بتن متخلخل عبور داده می‌شود. این مقدار به‌عنوان شرایط مرزی ورودی در مدل عددی لحاظ گردید تا جریان رواناب به‌طور دقیق شبیه‌سازی شود. در شرایط مرزی خروجی، فشار اتمسفریک به‌عنوان مرز استفاده گردید. این فرض به این دلیل اعمال می‌شود که در شبیه‌سازی‌های مربوط به جریان‌های سطحی و فرآیندهای انتقال آلاینده، فشار اتمسفریک معمولاً به‌عنوان مرز طبیعی برای خروجی جریان در نظر گرفته می‌شود.

برای هرکدام از نمونه‌ها، با توجه به درصد نانو، درصد جاذب و نوع جاذب به‌کاربرده شده، یک کد آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی اسکریا، پومیس، تراورتن و زئولیت به ترتیب از علائم اختصاری C، S، P، T و Z که حرف اول نام لاتین نمونه می‌باشد، استفاده شده است. برای بیان کردن میزان نانوذره و درصد افزودنی از نام لاتین نمونه، عدد متناسب با درصد افزودنی، خط تیره و پس‌از آن عدد متناسب با درصد نانوذره آورده شده است. به‌عنوان مثال، نمونه حاوی ۱۰٪ زئولیت و ۵٪ نانوذره به‌صورت Z-10-5 آورده شده است. در شکل ۷ بتن متخلخل حاوی جاذب ساخته‌شده در آزمایشگاه مشاهده می‌شود.



شکل (۷) بتن متخلخل حاوی (a) پومیس (b) اسکریا (c) تراورتن (d) زئولیت

### ۳- یافته‌ها و بحث

#### ۳-۱- بررسی اثر جاذب‌ها بر روی پارامترهای کیفی رواناب عبوری

در این بخش از تحقیق، آزمایش‌های تجربی به‌منظور بررسی تأثیر جاذب‌های معدنی بر پارامترهای کیفی رواناب عبوری از بتن متخلخل انجام گرفت. بدین منظور، پیش از عبور رواناب، ویژگی‌های کیفی نمونه آب از جمله شاخص‌های موردنظر اندازه‌گیری گردید. سپس، پس از عبور رواناب از بستر بتن متخلخل، همان پارامترها مجدداً اندازه‌گیری و با مقادیر اولیه مقایسه شدند. در این آزمایش‌ها، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، حجم مشخصی از رواناب به میزان ۱۰ لیتر طی مدت‌زمان ۲ ساعت از نمونه‌های بتن متخلخل عبور داده شد تا تغییرات کیفی آب بر اثر تماس با ساختار اصلاح‌شده بتن به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

برای هرکدام از نمونه‌ها، با توجه به درصد نانو، درصد جاذب و نوع جاذب به‌کاربرده شده، یک کد آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی اسکریا، پومیس، تراورتن و زئولیت به ترتیب از علائم اختصاری C، S، P، T و Z که حرف اول نام لاتین نمونه می‌باشد، استفاده شده است. برای بیان کردن میزان نانوذره و درصد افزودنی از نام لاتین نمونه، عدد متناسب با درصد افزودنی، خط تیره و پس‌از آن عدد متناسب با درصد نانوذره آورده شده است. به‌عنوان مثال، نمونه حاوی ۱۰٪ زئولیت و ۵٪ نانوذره به‌صورت Z-10-5 آورده شده است.

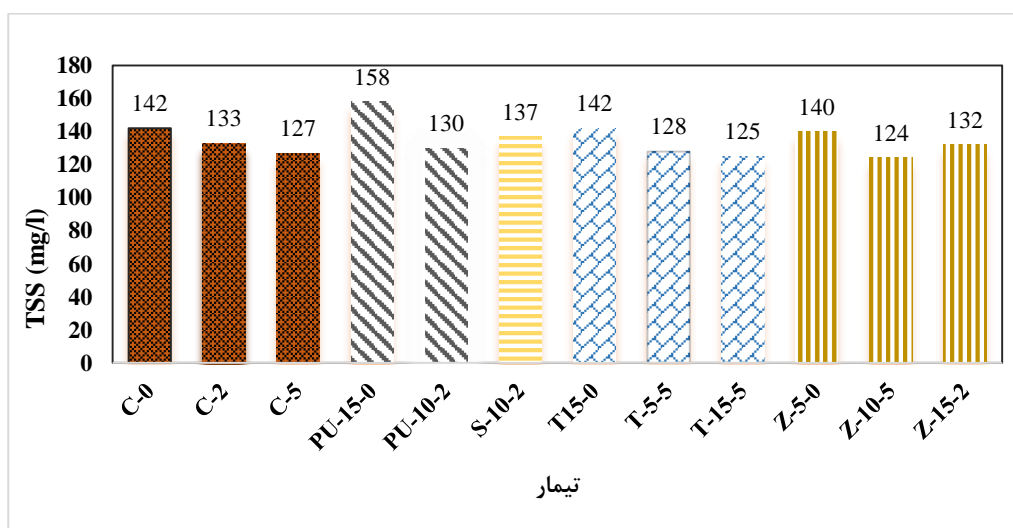
#### ۳-۱-۱- تأثیر جاذب‌ها بر تغییر درصد TSS

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۲ و شکل ۸، نتایج حاصل از آزمایش مجموع جامدات معلق (TSS) برای نمونه‌های مختلف و درصد حذف مربوطه تحلیل گردید. مقدار اولیه TSS در نمونه پایه برابر با ۱۸۲ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانوذرات، به‌دلیل کاهش اندازه حفرات و انسداد نسبی در ساختار بتن متخلخل، کارایی حذف TSS به‌طور جزئی بهبود یافته است. این روند به‌صورت مشخص در تمامی نمونه‌های دارای جاذب نیز مشاهده شد، به‌طوری‌که با افزایش درصد جاذب‌های معدنی در ترکیب بتن، میزان TSS در رواناب خروجی کاهش یافته است. این امر بیانگر نقش مؤثر ساختار متراکم‌تر و خاصیت جذب بالاتر در

نمونه‌های اصلاح‌شده است که منجر به فیلتراسیون مؤثرتر ذرات معلق می‌گردد.

جدول (۲) نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش TSS

درصد حذف TSS	TSS(mg/l)	نمونه
22.0	142	C-0
13.2	158	PU-15-0
22.0	142	T-15-0
23.1	140	Z-5-0
26.9	133	C-2
28.6	130	PU-10-2
24.7	137	S-10-2
27.5	132	Z-15-2
30.2	127	C-5
31.9	124	Z-10-5
29.7	128	Te-5-5
31.3	125	Te-15-5



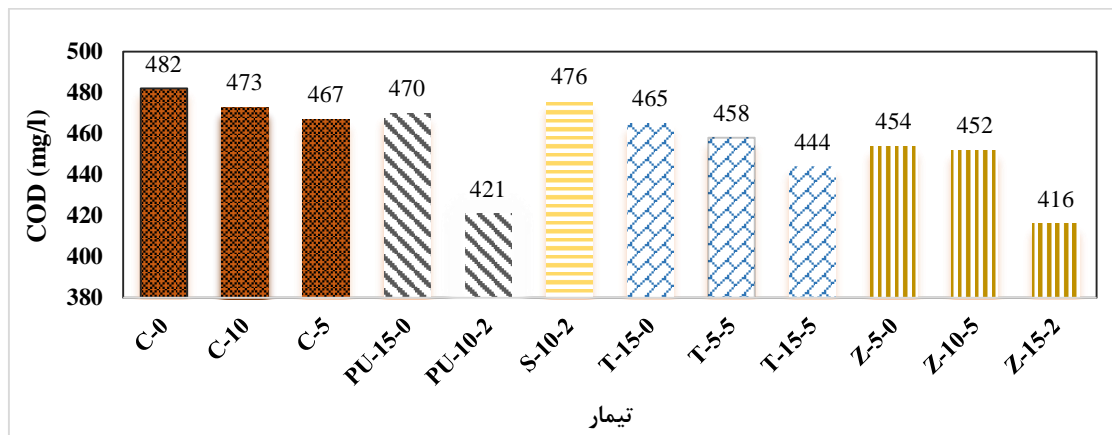
شکل (۸) تغییرات TSS در نمونه‌های حاوی جاذب همراه با نانوذره

### ۳-۱-۲- تأثیر جاذب‌های مختلف بر پارامتر COD

مطابق با داده‌های ارائه‌شده در جدول ۳ و شکل ۹، نتایج مربوط به پارامتر نیاز اکسیژن شیمیایی (COD) برای نمونه‌های مورد بررسی تحلیل شده است. مقدار اولیه COD در نمونه شاهد برابر با ۵۴۲ میلی‌گرم بر لیتر ثبت گردید. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد نانوذرات، کاهش نسبی در میزان COD مشاهده شده که این اثر به‌ویژه در نمونه شاهد (فاقد جاذب معدنی) به‌وضوح قابل توجه است. با این حال، ترکیب جاذب‌های معدنی با بتن متخلخل منجر به عملکرد مؤثرتر در کاهش COD گردیده است. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی جاذب‌ها تأثیر مثبتی در حذف آلاینده‌های آلی داشته‌اند که احتمالاً ناشی از افزایش سطح تماس و ظرفیت جذب بیشتر این ترکیبات در ساختار بتن متخلخل اصلاح‌شده است.

جدول (۳) نتایج به دست آمده از آزمایش COD

درصد حذف COD	COD(mg/l)	نمونه
11.1	482	C-0
13.3	470	PU-15-0
14.2	465	T-15-0
16.2	454	Z-5-0
12.7	473	C-2
22.3	421	PU-10-2
12.3	476	S-10-2
23.2	416	Z-15-2
13.8	467	C-5
16.6	452	Z-10-5
15.5	458	Te-5-5
18.1	444	Te-15-5



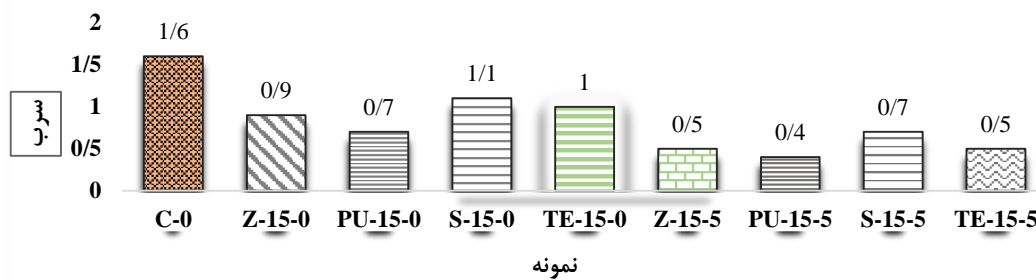
شکل (۹) تغییرات COD در نمونه‌های حاوی جاذب همراه با نانوذره

### ۳-۱-۳- تأثیر جاذب‌ها در جهت حذف سرب

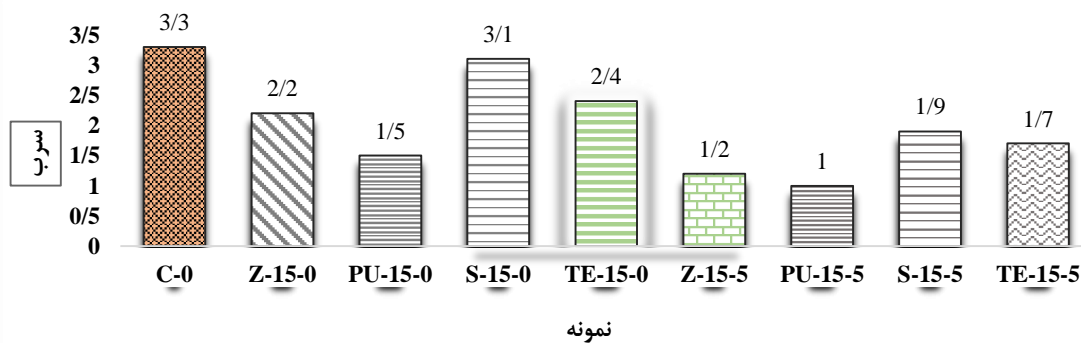
در ادامه، عملکرد بتن متخلخل حاوی جاذب‌های معدنی همراه با نانوذرات در حذف فلز سنگین سرب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۴ و نمودارهای ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌اند. در آزمایش اول، غلظت اولیه سرب برابر با ۲ میلی‌گرم بر لیتر و در آزمایش دوم برابر با ۴ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شد. این بررسی صرفاً بر نمونه‌هایی متمرکز بود که دارای بالاترین درصد جاذب‌ها بودند. پس از عبور رواناب از نمونه‌های بتن متخلخل اصلاح‌شده، غلظت سرب به اندازه‌ای کاهش یافت که دیگر با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (FAAS) قابل اندازه‌گیری نبود و برای تعیین دقیق آن، از روش جذب اتمی با کوره گرافیتی (GFAAS) در محدوده میکروگرم بر لیتر استفاده شد. این کاهش چشمگیر غلظت سرب نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار مؤثر ترکیب جاذب‌های معدنی و نانوذرات در حذف فلزات سنگین از رواناب شهری است. به نظر می‌رسد این عملکرد مثبت ناشی از افزایش سطح واکنش و کاهش خلل و فرج در ساختار بتن متخلخل به واسطه‌ی حضور نانوذرات باشد؛ چرا که این ذرات ریز امکان پر کردن منافذ ریزتر بتن را فراهم کرده و در نتیجه زمان تماس و فرصت واکنش شیمیایی فلزات سنگین با اجزای سیمانی افزایش می‌یابد. این فرآیند موجب تثبیت مؤثرتر سرب در ساختار داخلی بتن و کاهش آن در جریان رواناب می‌گردد.

جدول (۴) نتایج آزمایشگاهی به دست آمده فلز سنگین سرب

شماره نمونه	۲ میلی گرم	۴ میلی گرم	درصد حذف ۲ میلی گرم بر لیتر	درصد حذف ۴ میلی گرم بر لیتر	میانگین درصد حذف
C-0	1.6	3.3	20	17.5	18.8
Z-15-0	0.9	2.2	55	45	50.0
PU-15-0	0.7	1.5	65	62.5	63.8
S-15-0	1.1	3.1	45	22.5	33.8
TE-15-0	1	2.4	50	40	45.0
Z-15-5	0.5	1.2	75	70	72.5
PU-15-5	0.4	1	80	75	77.5
S-15-5	0.7	1.9	65	52.5	58.8
TE-15-5	0.5	1.7	75	57.5	66.3



شکل (۱۰) تغییرات سرب با مقدار اولیه ۲ میلی گرم در نمونه‌های حاوی جاذب همراه با نانوذره



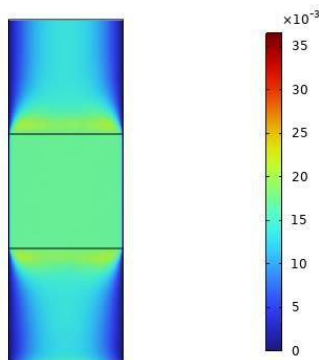
شکل (۱۱) تغییرات سرب با مقدار اولیه ۴ میلی گرم در نمونه‌های حاوی جاذب همراه با نانوذره

### ۳-۲- نتایج به دست آمده از مدل عددی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراحل انجام مدل‌سازی برای فلز سرب با غلظت ۴

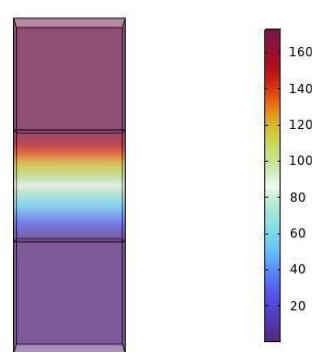
میلی گرم بر لیتر نشان داده شده است که در جهت کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل استفاده شده‌اند. این مراحل شامل تنظیمات اولیه مدل، اعمال شرایط مرزی، و انجام شبیه‌سازی‌های مختلف برای ارزیابی تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در بخش بعدی، به بررسی پارامترهای خروجی از نرم‌افزار پرداخته می‌شود که جهت کالیبراسیون و صحت‌سنجی نتایج به کار می‌روند. همان‌طور که در شکل ۱۲-الف و ب مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار برای سرعت و فشار جریان ارائه شده است. بر اساس این نتایج، سرعت جریان در دیوارهای کانالی قبل از ورود به محیط متخلخل عمود بر دیواره‌هاست. به‌طور خاص، در مرکز کانال بالاترین سرعت مشاهده می‌شود و در دیواره‌ها سرعت صفر است. با ورود جریان به محیط متخلخل، انتظار می‌رود که توزیع سرعت جریان به‌صورت یکنواخت صورت گیرد و سرعت به‌طور قابل توجهی کاهش یابد، زیرا محیط متخلخل دارای ویژگی‌هایی است که موجب اختلال در جریان و کاهش سرعت می‌شود.

Slice: Velocity magnitude (m/s)



شکل (۱۲-الف) توزیع سرعت در محیط متخلخل

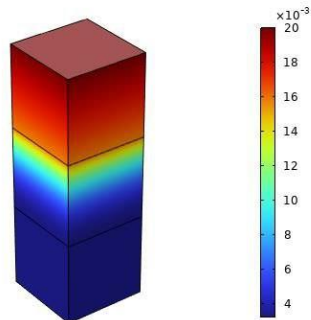
Surface: Pressure (Pa)



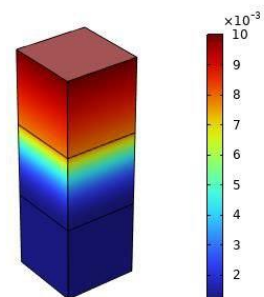
شکل (۱۲-ب) توزیع فشار در محیط متخلخل

### ۳-۲-۱- نتایج نرم‌افزاری کامسول برای پارامتر سرب

در شکل ۱۳-الف، غلظت سرب عبور داده‌شده با غلظت ۴ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده می‌شود که پس از تغییر واحد به  $\text{mol/m}^3$  مقدار آن به ۲۰ می‌رسد. با توجه به این شکل، جذب آلاینده توسط محیط متخلخل به عدد  $4 \text{ mol/m}^3$  می‌رسد که نشان‌دهنده جذب حدود ۸۰ درصد از آلاینده سرب توسط محیط متخلخل است. این نتیجه با نتایج آزمایشگاهی که نشان‌دهنده حذف حدوداً ۶۶ درصد از سرب بود، مقایسه می‌شود. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی خطایی در حدود ۲۰ درصد دارد. این اختلاف ممکن است به دلایل مختلفی نسبت داده شود که از آن جمله می‌توان به خطاهای آزمایشگاهی، دقت پایین اندازه‌گیری در محاسبات دبی، یا عدم معرفی دقیق خصوصیات شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده بتن متخلخل و یا سرب به نرم‌افزار اشاره کرد.

Concentration (mol/m<sup>3</sup>)

شکل (۱۳-الف) غلظت حاصل از عبور محلول حاوی ۴ میلی‌گرم بر لیتر

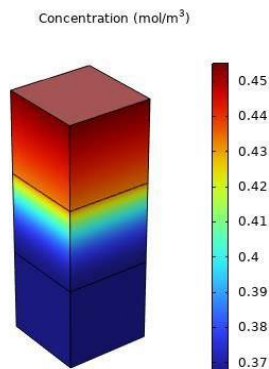
Concentration (mol/m<sup>3</sup>)

شکل (۱۳-ب) غلظت حاصل از عبور محلول حاوی ۲ میلی‌گرم بر لیتر

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش با غلظت اولیه ۲ میلی گرم بر لیتر سرب بررسی می شود. طبق شکل ۱۳-ب، غلظت جذب سرب شبیه سازی شده که مقدار اولیه آن پس از تغییر واحد به  $\text{mol/m}^3$  برابر ۱۰ می رسد. پس از عبور رواناب از بتن متخلخل، حدوداً ۸۰ درصد از سرب توسط بتن متخلخل جذب شده است.

### ۲-۲-۳- نتایج نرم افزار کامسول برای پارامتر TSS

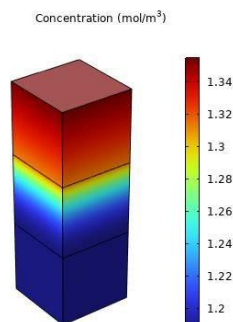
در ادامه، با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پارامتر TSS با غلظت اولیه ۱۸۲ میلی گرم بر لیتر به عنوان ورودی به نرم افزار وارد شد که پس از تبدیل واحد به  $\text{mol/m}^3$  مقدار آن به ۰/۴۵ رسید. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، غلظت جذب پس از عبور از بتن متخلخل در نهایت به  $\text{mol/m}^3$  ۰/۳۷ رسید که نشان دهنده جذب حدوداً ۱۷ درصد است. این میزان جذب با توجه به درصد جذب گزارش شده در نتایج آزمایشگاهی (حدوداً ۳۱ درصد) اختلاف دارد، که به طور تقریبی ۱۴ درصد تفاوت با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود.



شکل (۱۴) نتایج غلظت TSS حاصل از نرم افزار

### ۳-۲-۳- نتایج نرم افزار کامسول برای پارامتر COD

در ادامه، به بررسی پارامتر COD پرداخته می شود که نتایج آزمایشگاهی آن قبلاً انجام شده است. غلظت اولیه COD مقدار ۵۴۲ میلی گرم بر لیتر بوده که پس از تبدیل واحد به  $\text{mol/m}^3$  معادل ۱ در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، غلظت COD پس از عبور از بتن متخلخل به مقدار  $\text{mol/m}^3$  ۱/۲۲ می رسد، که حدوداً ۹ درصد اختلاف با مقدار اولیه دارد. با توجه به میزان جذب COD در آزمایشگاه که حدوداً ۲۳ درصد جذب COD در آن مشاهده شده است، در مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، اختلافی حدوداً ۱۵ درصد مشاهده می شود. در جدول ۴ به طور خلاصه نتایج به دست آمده از تحقیق آورده شده است.



شکل (۱۵) نتایج غلظت COD حاصل از نرم افزار

جدول (۴) خلاصه تحقیق

ردیف	عنوان	جزئیات
۱	اثر ترکیبی	- نانوذرات با کاهش اندازه منافذ، زمان تماس آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند. - جاذب‌های معدنی (پومیس، زئولیت، تراورتن) در حضور نانوذرات حذف مؤثر سرب، TSS و COD را بهبود می‌بخشند. - حذف ۷۵٪ سرب با ۱۵٪ پومیس + ۵٪ نانوذره.
۲	نتایج آزمایشگاهی	- کاهش ۳۲ درصد TSS با ۱۰٪ زئولیت + ۵٪ نانوذره. - کاهش ۲۳ درصد COD با ۱۵٪ زئولیت + ۲٪ نانوذره. - حذف سرب: ۸۰٪ در مدل (خطای ~۲۰٪ نسبت به ۶۶٪ آزمایش).
۳	دقت مدل عددی	- حذف TSS و COD: اختلاف ۱۴٪-۱۵٪ با نتایج تجربی. - منابع خطا: تقریب‌های فیزیکی مدل، خطاهای اندازه‌گیری دبی، عدم معرفی کامل ویژگی‌های شیمیایی.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر بتن متخلخل حاوی جاذب جهت حذف آلاینده‌های آب پرداخته شد. جهت انجام بر روی کیفیت رواناب آب پارامترهای TSS، COD، و فلز سنگین سرب قبل و بعد از عبور از رواناب در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نتایج بر روی پارامترهای کیفی آب نشان داد، با افزودن جاذب همراه با نانوذره باعث جذب آلاینده‌های آب می‌شوند و این مهم در پارامترهای سرب و TSS به خوبی مشهود می‌باشد، به طوری که نمونه شامل افزودنی پومیس حاوی ۱۵ درصد جایگزین سنگدانه و ۵ درصد نانوذره، ۷۵٪ از میزان سرب اولیه کاهش داده است. همچنین افزودنی حاوی ۱۵ درصد زئولیت و ۲ درصد نانوذره حدوداً ۱۴ درصد COD رواناب را کاهش دهد. در این تحقیق از نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول جهت شبیه‌سازی عددی بتن متخلخل و حذف پارامترهای کیفی رواناب انجام شد. سرب، COD و TDS پارامترهای منتخب جهت بررسی و انجام مقایسه می‌باشند. با توجه به مقایسه با اطلاعات آزمایشگاهی با شبیه‌سازی نرم‌افزاری نتایج نشان داد شبیه‌سازی با خطای بین ۱۵ تا ۲۰ درصد همراه بوده است. این درصد خطاها دلایل مختلفی می‌تواند داشته باشد، مثلاً اندازه‌گیری پارامترهای جذب در زمان‌های مختلف در مدت‌زمان عبوری رواناب، اندازه‌گیری مقدار دقیق وزن مولکولی پارامترهای رواناب، خطاهای ناشی از دقت اندازه‌گیری و خطاهای ناشی از انجام آزمایش دانست.

#### ۵- منابع

1. Kahrizi, E., Rajaei, T., & Sedghi, M. (2024). Probabilistic and Experimental Investigation of the Effect of Mineral Adsorbents on Porous Concrete Using Kriging, PRSM, and RBF Methods. *Journal of Architectural Engineering*, 30(1), 04023010. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001258>
2. Mousavi, S.-F., et al., Effects of adding mineral adsorbents to porous concrete for enhancing the quality performance of urban runoff systems. 2018. **15**(4): p. 489-497. <https://doi.org/10.1108/WJE-10-2017-0314>
3. Salari, M., E. Teymouri, and Z.J.J.o.E.T.T. Nassaj, Application of an artificial neural network model for estimating of water quality parameters in the karun river, Iran. 2021. **9**(4): p. 720-727. [https://doi.org/10.47277/JETT/9\(4\)727](https://doi.org/10.47277/JETT/9(4)727)
۴. طهرانی، م.ج، و دیگران، بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن متخلخل به منظور کاهش رواناب معابر شهری. ۲۰۲۰. **۲۴**(۲) <https://doi.org/10.47176/jwss.24.2.1011>
۵. خسروی، و دیگران، حذف فلزات سنگین دو ظرفیتی (کادمیم، کبالت، روی و سرب) و آمونیوم از پساب‌ها با استفاده از زئولیت طبیعی استان آذربایجان غربی. ۲۰۱۱. **۲۰**(۶):ص ۶۱-۷۴. <https://doi.org/10.22075/chem.2017.586>
6. Committee, A. Guide for selecting proportions for no-slump concrete reported by ACI committee 211. in American Concrete Institute. 2002.

7. Sonebi, M. and M. Bassuoni, Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. *Construction and Building Materials*, 2013. **38**: p. 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044>
8. Xu, F., et al., Influence of aggregate reinforcement treatment on the performance of geopolymer recycled aggregate permeable concrete: From experimental studies to PFC 3D simulations. *Construction and Building Materials*, 2022. **354**: p. 129222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129222>
9. Zhao, H., Q. Geng, and X. Liu, Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of pervious concrete: From experimental studies to discrete element simulations. *Construction and Building Materials*, 2023. **409**: p. 133988. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133988>
10. Li, J., et al., Performance Simulation of Permeable Concrete Materials Combined with Nanotechnology in Rainwater Management. *Processes*, 2023. **11**(3): p. 768. <https://doi.org/10.3390/pr11030768>
11. Wen, F., et al., A simplified numerical simulation of uniaxial compression for polyacrylonitrile fiber reinforced permeable concrete based on CT images. *Construction and Building Materials*, 2024. **411**: p. 134319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134319>
12. Ahmad, S.A., et al., Mathematical modeling techniques to predict the compressive strength of pervious concrete modified with waste glass powders. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2024. **25**(1): p. 773-785. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00811-1>
13. Jackson, P.J., P.J.L.s.c.o.c. Hewlett, and concrete, Portland cement: classification and manufacture. 1998. **4**: p. 25-94.
14. Concrete, A.J.A.I., Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete. 2017. [10.1520/C0330\\_C0330M-17A](https://doi.org/10.1520/C0330_C0330M-17A)
15. ASTM, Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. 2014, ASTM international West Conshohocken, PA. [10.1520/C1754-14](https://doi.org/10.1520/C1754-14)
16. Institutions, B.S., method for Making Test Cubes from Fresh Concrete. 1881, BS.
17. Concrete, A.C.J.G.o.S.P.f.N.-S., Committee 211–ACI 211.3 R-97. 1977. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/5094>
18. 522, A.C. ACI Committee 522. (2006), "Pervious Concrete", ACI 522R-06 Report. 2006. American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/15614>
19. Ani, E.-C., et al., Dynamic Simulation of Some<sup>o</sup> River Pollution Using MATLAB and COMSOL Models. 2010. [https://www.researchgate.net/publication/228417660\\_Dynamic\\_Simulation\\_of\\_Some\\_River\\_Pollution\\_Using\\_MATLAB\\_and\\_COMSOL\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/228417660_Dynamic_Simulation_of_Some_River_Pollution_Using_MATLAB_and_COMSOL_Models)
20. Multiphysics, C.J.C.M., Burlington, MA, accessed Feb, Introduction to COMSOL multiphysics®. 1998. **9**(2018): p. 32. <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>