



## کاربرد ژئوپلیمرها در تصفیه فاضلاب

علیرضا اسپرهم<sup>۱\*</sup>، مسعود نبی جاوید<sup>۱</sup>، ناصر مهرداد<sup>۲</sup>، امیر بهادر مرادی<sup>۳</sup> خو

<sup>۱\*</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سیستمهای انرژی، انرژی و محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
(Alireza.esparham@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران – مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶)

### چکیده

توسعه سریع فناوری های پیشرفته در دنیا باعث افزایش تأثیرگذاری در تجمع هر روزه فلزات سنگین در زندگی روزمره از طریق فاضلاب می شود. تماس طولانی مدت بدن انسان با فلزات سنگین منجر به ابتلا به انواع عفونت ها و بیماری ها می شود. از دیدگاه محیط زیستی و اقتصادی، جذب، فرآیند قابل قبولی است که می تواند در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، استفاده از جاذب های پذیرفته شده و پرهزینه کربن فعال باعث شده است تا بدنبال جایگزینی مناسب برای کربن فعال باشند. مطالعات بسیاری در مورد خواص فیزیکی و شیمیایی ژئوپلیمر صورت گرفته است که باعث جلب توجه، جهت جایگزینی با کربن فعال در تصفیه فلزات سنگین شده است. در این مقاله تلاش شده است که براساس شواهد علمی، جذب فلزات سنگین با استفاده از ژئوپلیمر مورد بررسی قرار گیرد.

### کلمات کلیدی

فلزات سنگین، فاضلاب، کربن فعال، ژئوپلیمر.



# Application of Geopolymers in Wastewater treatment as Adsorbent

*Alireza Esparham*<sup>1\*</sup>, *Masoud Nabi Javid*<sup>1</sup>, *Naser Mehrdadi*<sup>2</sup>, *Amir Bahador Moradikhou*<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Ph.D. Candidate, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Alireza.esparham@ut.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. candidate in Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Date of received: 02/03/2021, Date of accepted: 06/05/2021)

## ABSTRACT

*The rapid development of advanced technologies in the world increases the impact on the daily accumulation of heavy metals in daily life through wastewater. Long-term contact of the human body with heavy metals leads to a variety of infections and diseases. From an environmental and economic perspective, adsorption is an acceptable process that can be used in wastewater treatment. . However, the use of accepted and costly activated carbon adsorbents has led them to look for a suitable alternative to activated carbon. Many studies have been conducted on the physical and chemical properties of geopolymers, which have attracted attention to the replacement of activated carbon in the treatment of heavy metals. In this paper, based on scientific evidences, the absorption of heavy metals using geopolymer is investigated.*

## Keywords:

*Heavy metals, Wastewater, Activated carbon, Geopolymer.*

**۱- مقدمه**

امروزه، مدیریت پسماند و کیفیت آب دو مساله مهم در زندگی بشر می باشند. رشد پیوسته فن آوری ها در شهرنشینی و صنعتی شدن منجر به افزایش درصد تجمع زباله در سراسر جهان و آزادسازی فلزات سنگین در جریان های آب شده است. این فلزات سنگین مضر ناشی از فعالیت های مختلفی مانند صنعت، دفع زباله، کشاورزی و غیره است. تجمع فلزات سنگین در جریان های فاضلاب برضد بدن انسان عمل می کند و باعث مرگ می شود. فن آوری های مورد استفاده در تصفیه فاضلاب شامل رسوب شیمیایی، تبادل یونی، جذب، فیلتراسیون غشایی، انعقاد و لخته سازی، شناور سازی و الکتروشیمیایی هستند [۱-۳]. جذب یکی از روش های متداول است که در حذف فلزات سنگین به کار می رود که شامل جاذب های بدون شکی مانند کربن فعال می باشد. با این حال، تولید و بازسازی کربن فعال بسیار پرهزینه است و مردم تمایل به جایگزین دیگری دارند [۴،۵]. اخیراً، مطالعات مربوط به جاذب کم هزینه به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته که معمولاً مواد زائد حاصل از تولیدات صنعتی، کشاورزی و غذایی که به وفور تولید می شوند، می باشد [۶]. در حال حاضر، ژئوپلیمر برای تصفیه فاضلاب مورد توجه قرار دارد و جایگزین جاذب های متداول می باشد که به طور معمول در تولید سیمان استفاده می شود. اولین بار مواد ژئوپلیمری به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند معمولی و کامپوزیت های بتن در سال ۱۹۷۹ مورد شناسایی قرار گرفتند [۷]. ژئوپلیمر را می توان به عنوان یک زئولیت اقتصادی که از واکنش آلومینوسیلیکات جامد با هیدروکسید بسیار قلیایی تولید می شود، مشاهده کرد [۸]. ساختار منحصر به فرد ژئوپلیمر که از نظر مکانیکی، شیمیایی و حرارتی خوب می باشد، آنها را به عنوان جایگزین هایی برای کاربردهای مختلف تبدیل کرده است. هدف از این مقاله مروری، ارزیابی پتانسیل ژئوپلیمر مورد استفاده برای حذف فلزات سنگین خطرناک در تصفیه فاضلاب در مطالعات اخیر است.

**۲- فناوری های موجود برای روش های تصفیه فلزات سنگین**

فناوری های مختلفی در تصفیه فاضلاب از نظر حذف فلزات وجود دارد که شامل فرآیند فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مانند رسوب فلز، فرا فیلتراسیون، سیستم های بیولوژیکی، اکسیداسیون، فرآیندهای الکترولیتی استخراج حلال، تبادل یونی، فیلتراسیون غشایی و جذب می باشند. تصفیه فیزیکی و شیمیایی در مقایسه با تصفیه بیولوژیکی در حذف فلز هزینه بیشتری دارد، با این حال تصفیه بیولوژیکی فاقد اثربخشی است و زمان بر می باشد. مزایا و معایب تصفیه متداول فیزیکی و شیمیایی به صورت ساده در جدول (۱) آورده شده است.



جدول ۱: مزایا و معایب فن آوری های متداول تصفیه فلزات سنگین شامل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی [۱۰].

معایب	مزایا	روش ها
هزینه های بالای انرژی و تولید محصولات جانبی	فرآیند سریع برای حذف آلاینده های سمی	اکسیداسیون
جاذب ها نیاز به بازسازی یا دفع دارند	حذف مناسب طیف وسیعی از فلزات سنگین	تبادل یون
تولید لجن غلیظ و گران قیمت	حذف مناسب فلزات سنگین	فناوری های فیلتراسیون غشایی
جاذب ها نیاز به بازسازی دارند	انعطاف پذیری و سادگی طراحی، سهولت کار و عدم حساسیت به آلاینده های سمی	جذب
تولید بالای لجن و تشکیل ذرات بزرگ	از نظر اقتصادی امکان پذیر است	انعقاد/ لخته سازی
هزینه های بالای انرژی و تشکیل ذرات بزرگ	فرآیند سریع و موثر برای یونهای فلزی خاص	تصفیه الکتروشیمیایی
نیمه عمر کوتاه	اعمال شده در حالت گازی؛ تغییر حجم	اوزون زنی
تولید محصولات جانبی	عدم تولید لجن	فوتوشیمیایی
نیاز به مقدار زیاد اکسیژن محلول	موثر در مقیاس آزمایشگاهی	تابش
تولید بالای لجن	از نظر اقتصادی امکان پذیر است	انعقاد الکتروسینتیکی
تولید لجن	موثر و قادر به تصفیه انواع زباله ها و بدون نیاز به انرژی ورودی لازم برای فعال سازی هیدروژن پراکسید	معرف های فنتون
این فناوری هنوز تاسیس و تجاری سازی نشده است	امکان پذیر در حذف برخی از فلزات	تصفیه بیولوژیکی

### ۳- جذب

فرآیند جذب به دست آمده یک روش امیدوار کننده برای یک تصفیه طولانی مدت است و از نظر اقتصادی اثبات شده است. در این فرآیند، فلزات سنگین حتی در غلظت های پایین می توانند حذف و به حداقل رسانده شوند، که کاربرد جذب به عنوان یک روش تصفیه عملی را افزایش می دهد [۱۱]. علاوه بر این، فرآیند جذب برای تولید پساب تصفیه شده با کیفیت بالا پیشنهاد می شود و انعطاف پذیری در طراحی و بهره برداری را ارائه می دهد. جاذب های استفاده شده می توانند با فرآیند واجذب مناسب به دلیل ویژگی برگشت پذیری آن دوباره بازسازی شوند [۱]. مقدار ماده جذب شونده که می تواند توسط ماده جاذب جذب سطحی شود تابعی از مشخصات ماده جذب شونده، غلظت آن در محلول و همچنین تابعی از دما و PH می باشد. عمده مشخصات ماده جذب شونده که در این مورد حائز اهمیت است شامل حلالیت (Solubility)، ساختار مولکولی، وزن مولکولی، قطبیت (Polarity) و اشباع هیدروکربنی (Hydrocarbon-Saturation) می باشند. برای بدست آوردن ایزوترم های جذب سطحی برای یک ماده جذب شونده بایستی مقدار مشخصی از ماده جذب شونده را در یک حجم ثابت از محلول نگه داشته و آنچه که تغییر می دهیم مقادیر کربن فعال باشد. بطور معمول در این حالت بیش از ۱۰ ظرف لازم خواهد بود و زمانی که از کربن فعال پودری استفاده می شود، حداقل زمانی که مجاز است تا نمونه به تعادل برسد ۷ روز می باشد. زمانی که از کربن فعال گرانوله استفاده می شود می باید آنرا پودر کنیم تا زمان های جذب سطحی را به حداقل برسانیم. در پایان تست مقدار ماده جذب شونده که در داخل فاز محلول باقیمانده است اندازه گیری می شود [۲]. هیچ مکانیسم خاصی در فرآیند جذب وجود ندارد، اما از ایزوترمهای جذبی برای توضیح مکانیسم رخ داده در نحوه برهمکنش یونهای جذب شده روی سطح جاذب استفاده می شود. جدول زیر برای اثبات واکنش بین ماده جذب شده و جاذب می باشد.



جدول ۲: مدل‌های جذب سیستم تک جزئی [۱۰، ۱۱].

انواع مکانیسم	معادلات	نامگذاری
(a) ایزوترم های جذب (i) ایزوترم های لانگمویر	$q_e = \frac{q_{max} b C_a}{1 + b C_a}$	$q_e$ : ظرفیت تعادلی جذب فلز ، $C_e$ : غلظت تعادلی ماده حل شده در محلول ، $q_{max}$ : ثابت لانگمویر مربوط به حداکثر ظرفیت جذب (ظرفیت تک لایه) ، $b$ : انرژی پیوند جذب
(ii) ایزوترم های فروندلیچ	$q_e = K_f C_e^{1/n}$	$q_e$ : جرم جذب شده از ماده جذب شونده به واحد جرم ماده جاذبدر نقطه تعادل $K_f$ : فاکتور ظرفیت فروندلیچ $C_e$ : غلظت تعادلی ماده جذب شونده در فاز محلول بعد از جذب سطحی(غلظت در فاز محلول در حالت تعادل)(mg/lit) $n^{-1}$ : پارامتر شدت فروندلیچ
(b) سینتیک جذب	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t)$	$q_t$ و $q_e$ ظرفیت جذب در تعادل ، در زمان $t$ ، $k_1$ ثابت تعادل واکنش جذب
(c) پارامترهای ترمودینامیکی	$K_c = \frac{C_A}{C_e}$ $\Delta G^\circ = R T \ln K_c$ $\ln k_e = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{-\Delta H^\circ}{RT}$	$K_c$ : ثابت تعادل ، $C_A$ : غلظت فاز جامد در تعادل ، $C_e$ : غلظت تعادل ، $T$ (K): دمای جذب ، $R$ : ثابت گاز (۸/۳۱۴ J/mol.K) ، $\Delta G^\circ$ : انرژی آزاد گیبس $\Delta H^\circ$ : تغییر آنتالپی ، $\Delta S^\circ$ : تغییر آنتروپی

#### ۴- فلزات سنگین

فلزات سنگین به دلیل ویژگی هایی که دارند، تاثیرات جدی بر روی محیط زیست می گذارند، که در اندام های موجودات زنده تجمع می یابند و باعث بیماری و اختلالات مختلفی می شود که در جدول ۳ آورده شده است [۱۲]. فلزات سنگینی که در شیرابه زباله یافت می شوند شامل آهن، آلومینیوم، آرسنیک، کادمیوم، مس، منگنز، جیوه، نیکل، نقره و روی هستند. تجزیه فلزات سنگین و غنی سازی آنها در شرایط محیطی مختلف آسان نیست. ثابت شده است که فلز سنگین موجود در شیرابه ممکن است منجر به آلودگی ثانویه شود [۱۳].



جدول ۳: منابع و اثرات فلزات سنگین.

اثرات	منابع	فلزات سنگین
اختلالات روانی، کم خونی، آرتروز، فشار خون بالا، حالت تهوع / استفراغ، بیش فعالی، اسکیزوفرنی، بی خوابی، اوتیسم، لکنت زبان، روان پریشی پس از زایمان، التهاب و بزرگ شدن کبد، مشکل قلبی، فیبروز کیستیک.	لوله های آب، بخاری های آبی مسی، سبزیجات منجمد و سبزیجات کنسرو شده با استفاده از مس برای تولید رنگ فوق العاده سبز، نوشیدنی های الکلی از تجهیزات مسی آبجوسازی، بخاری آب گرم با گاز فوری، قرص های هورمونی، آفت کش ها، حشره کش ها، قارچ کش ها ، ظروف مسی آشپزی	مس
درماتیت (آماس پوست)، میوکاردیت (آماس ماهیچه قلب)، انسفالوپاتی (آسیب مغزی)، فیبروز ریوی، سرطان ریه ها، بینی و استخوان، سردرد، سرگیجه، حالت تهوع و استفراغ، درد قفسه سینه، تنفس سریع.	پساب تصفیه خانه های نقره، آبکاری، ریخته گری بر پایه روی و صنایع باتری های ذخیره سازی.	نیکل
جوش های پوستی، مشکلات تنفسی، همولیز (تخریب گویچه های قرمز)، نارسایی حاد و کلیوی، ضعف سیستم ایمنی بدن، آسیب کلیه و کبد، تغییر ماده ژنتیکی، سرطان ریه، فیبروز ریوی.	صنعت فولاد و نساجی	کروم
حالت تهوع، انسفالوپاتی (آسیب مغزی)، سردرد و استفراغ، مشکلات یادگیری، عقب ماندگی ذهنی، بیش فعالی، سرگیجه، آسیب کلیه، نقص مادرزادی، ضعف عضلانی، بی اشتها، سیروز کبدی، اختلال عملکرد تیروئید، بی خوابی، خستگی، تحلیل رفتن نورون های حرکتی، رفتار شبه اسکیزوفرنی (جنون جوانی).	صنایعی مانند معدن، فولاد، اتومبیل، باتری و رنگ. آلاینده های ناشی از افزایش صنعتی شدن.	سرب
لرزش، نقص هنگام تولد، آسیب کلیه، حالت تهوع، از دست دادن شنوایی یا بینایی، التهاب لثه، آسیب کروموزومی، عقب ماندگی ذهنی، از دست دادن دندان، تشنج، فلج مغزی، نابینایی و ناشنوایی، هیپرتونی-سفتی عضله، بیماری میناماتا (بیماری جیوه).	صنایعی مانند کلرو-قلیایی، رنگ، کاغذ و خمیر کاغذ، تصفیه روغن، فراوری لاستیک و کود، باتری ها، چسب پر کننده دندان، نرم کننده های پارچه، داروها، دماسنج ها، لامپ فلورسنت و لامپ خیابانی پر شدت، آفت کش ها، مواد آرایشی و دارویی.	جیوه



## ۵- فلزات سنگین

ژئوپلیمر یا آلومینوسیلیکات فعال کننده قلیایی، یک گروه متنوعی از مواد شبه سرامیک می باشد که از واکنش ژئوسنتزی مواد آلومینوسیلیکات در حضور محلول قلیایی در دمای پایین (کمتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد) تولید می شود [۱۴-۱۶]. این شامل یک چارچوب پلیمری سیلیس-اکسیژن-آلومینیوم با سیلیس متناوب و آلومینیوم چهار وجهی متصل شده به یکدیگر در سه جهت است که تمام اتم های اکسیژن را به اشتراک می گذارند. خاکستر بادی، دولومیت، خاک رس منبسط شده، ژئولیت طبیعی، کائولینیت و بسیاری دیگر نمونه هایی از ژئوپلیمرها هستند. ژئوپلیمرها به دلیل ویژگی های جالبی که دارند، منجر به بررسی و توسعه آن ها شده است. ماهیت اصلی ژئوپلیمرها شامل تمایل به کاهش شدید تحرک اکثر یونهای فلزات سنگین موجود در ساختار ژئوپلیمر، رشد سریع مقاومت فشاری، مقاومت در برابر اسید و آتش، تنظیم چربی، نفوذ پذیری کم و مقاومت خوب در برابر چرخه های انجماد و ذوب است [۱۸-۲۰]. از نظر تئوری، هر نوع قلیایی را می توان در واکنش های ژئوپلیمریزاسیون استفاده کرد. با این حال بیشتر مطالعات بر روی تأثیر یون های سدیم ( $Na^+$ ) و پتاسیم ( $K^+$ ) متمرکز شده اند. از هر دو  $NaOH$  و  $KOH$  می توان در فرآیند فعال سازی استفاده کرد، اما وقتی از  $NaOH$  استفاده می شد، میزان انحلال بیشتر بود؛ این به دلیل اندازه کوچکتر  $Na^+$  است که می تواند باعث تثبیت بهتر مونومرها و دیمرها سیلیکات موجود در محلول شود و میزان انحلال مواد معدنی را افزایش دهد [۸].  $Rios$  به این نتیجه رسید که ژئوپلیمر عمل آوری شده با  $NaOH$  بهتر از ژئوپلیمر عمل آوری شده با  $KOH$  است [۲۱]. ژئوپلیمرها با مخلوط کردن یک ماده اولیه پودر شده با محلولهای قلیایی ( $NaOH$  یا  $KOH$ ) و سیلیکات سدیم تولید می شوند. بعنوان مثال، زمانیکه سرباره فرونیکل به عنوان ماده خام استفاده میشود، ترکیب سرباره ۸۲٪،  $H_2O$  ۶٪،  $KOH$  ۳٪ و  $Na_2SiO_3$  ۹٪ برای تولید ملات همگن پیشنهاد میشود. سپس خمیر همگن بدست آمده را در قالب ریخته می شود. در بیشتر موارد نمونه ها را مدت کوتاهی در دمای اتاق قبل از کیورینگ قرار میدهند و در صورت لزوم، تا دمای حداکثر ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ یا ۲ روز کیورینگ می شوند. سپس نمونه ها به مدت ۷ یا ۲۸ روز در قالب می مانند، تا شاهد توسعه و افزایش پیوندهای ساختاری باشیم. ژئوپلیمرها به سرعت سخت می شوند و مقاومت اولیه بالایی دارند در حالی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نهایی ممکن است به ۱۰۰ مگاپاسکال برسد یا از آن فراتر رود. تخلخل آنها می تواند از سیمان ها یا ملات ها کمتر باشد و بنابراین خصوصیات مکانیکی برتری رادارا میباشند. ساختار نهایی و خصوصیات فیزیکی آنها به چندین پارامتر، مانند محتوای آب، اندازه ذرات، تاریخچه حرارتی، محتوای فلزات قلیایی و درجه شکل گیری بستگی دارد. ژئوپلیمرها نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند  $10^{-9}$  سانتی متر بر ثانیه، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت عالی در برابر اسیدها، سولفاتها، خوردگی و سیکل های ذوب و یخ زدگی را نشان می دهند [۲۲-۲۹].

**خاکستر بادی:** خاکستر بادی ماده آشنایی است که به عنوان جاذب های ژئوپلیمریزه شده استفاده می شود. این یک ماده پیچیده فراوان است که توسط انسان از طریق احتراق زغال سنگ در نیروگاه های حرارتی به عنوان محصول جانبی تولید می شود [۳۰]. خاکستر بادی ماده ای زائد است که به راحتی یافت می شود و گزارش شده است که می تواند برای حذف فلزات سنگین موثر باشد. با این حال، خاکستر بادی ظرفیت جذب کمتری را نشان می دهد مگر اینکه عمل آوری یا فعال شود که در این صورت به آن ژئوپلیمر می گویند. ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی به دلیل قیمت ارزان و در دسترس بودن آسان خاکستر بادی به عنوان ماده اولیه اصلی از نظر تجاری در حال رشد است. تمایل قابل توجهی در بازیافت مواد زائد و تبدیل آنها به مواد قابل استفاده و با ارزش وجود دارد [۳۱]. یکی از این مواد، خاکستر بادی ذغال سنگ است. دفع مقدار زیاد خاکستر بادی به یک مشکل جدی زیست محیطی و اقتصادی تبدیل شده است [۸]. یک روش برای مقابله با خاکستر بادی، تبدیل آن به ژئوپلیمر است که نه تنها برای حذف فلزات سنگین موثر است بلکه به کاهش تجمع زباله نیز کمک می کند.



**دولومیت:** بیش از شش دهه است که دولومیت مورد توجه قرار گرفته است. ماده دولومیت بسیار ارزان و به وفور در سراسر جهان در دسترس است (غالباً در هند، اندونزی، ترکیه و چین یافت می شود). دولومیت که دارای خصوصیتی مشابه سنگ آهک است، در صنعت بعضاً به عنوان سنگ آهک منیزیم شناخته می شود. ساختار بلوری آن از لایه های پی در پی کربنات منیزیم و کلسیم تشکیل شده است [۳۲]. بنابراین، دولومیت ویژگی های موثری برای حذف فلزات سنگین همانند سنگ آهک دارد.

#### ۶- فاکتور تاثیرگذار بر جذب فلزات سنگین توسط جاذب های ژئوپلیمری

برخی از فاکتورهای موثر در فرآیند جذب فلزات سنگین به جاذب ها شامل PH، مقدار جاذب، غلظت اولیه، زمان تماس و دما می باشند [۳۳]. کارایی حذف فلزات سنگین را می توان به صورت معادله زیر توصیف کرد [۱۹]:

$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این فرمول  $C_0$  (mg/L) غلظت اولیه و  $C_t$  (mg/L) غلظت در زمان  $t$  (دقیقه) است. مقدار جذب در زمان  $t$  (mg/g)  $qt$  و در حالت تعادل،  $q_e$  (mg/g) با استفاده از معادلات زیر تعیین می شود:

$$qt = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (3)$$

**اثر pH:** pH محلول بر روی بار سطحی محلول، درجه یونیزاسیون و گونه های جذب شونده تأثیر می گذارد. جذب بیشتر فلزات با افزایش pH محلول تا نقطه معین افزایش می یابند و در ادامه با افزایش بیشتر PH کاهش می یابند. معادله pH را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{pH} = \text{pKa} - \log \frac{[AH]}{[A-]} \quad (4)$$

که در آن،  $[A-]$  و  $[AH]$  نمایانگر غلظت گروه های سطحی پروتون زدا و پروتون دار شده و ثابت های تعادل  $\text{pKa}$  بیانگر گروه های کربونیل است. مطالعات al-Zboon نشان می دهد که کارایی جذب از ۱٪ تا ۹۰/۶۶٪ افزایش می یابد وقتی که PH محلول از ۱ به ۵ افزایش یابد و در  $\text{PH}=6$  اندکی کاهش می یابد [۱۶]. بنابراین،  $\text{pH}=5$  به عنوان بار نقطه صفر نشان داده می شود.

**اثر مقدار (دوز) جاذب:** مقدار جاذب نیز یکی از نکات اصلی تعیین ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط جاذب ها است. معمولاً با افزایش مقدار جاذب ها، ظرفیت جذب شده تا رسیدن به حد مجاز افزایش می یابد. در صورت افزایش بیشتر مقدار جاذب، ظرفیت جذب ثابت خواهد بود. Wang در مطالعات خود، مقدار جاذب را از ۰.۵ گرم تا ۲.۰ گرم بررسی کرد و مشاهده کرد که حذف مس با افزایش مقدار جاذب افزایش می یابد [۱۵].

**اثر غلظت اولیه:** غلظت اولیه فلزات سنگین تأثیر زیادی بر مقدار جذب دارد. به طور کلی، با افزایش غلظت اولیه فلزات سنگین، ظرفیت جذب افزایش می یابد. تأثیر غلظت اولیه بر غلبه بر تمام مقاومت های انتقال جرم بین فازهای جامد و آبی، به عنوان نیروی





محركه مهم عمل می کند. مطالعات بسیاری نشان داده اند که کارایی حذف فلزات سنگین وابسته به غلظت است و در صورت افزایش بیشتر غلظت اولیه، روند کاهش وجود دارد [۳۴].

**اثر زمان تماس:** برهمکنش گروه عاملی بین محلول و سطح جاذب در صورت جذب در جاذب باعث ظرفیت جذب می شود. زمان خاصی برای حفظ تعادل مورد نیاز است، بنابراین فرآیند جذب رو به اتمام خواهد بود. حذف کادمیوم با استفاده از ژئوپلیمر مبتنی بر زئولیت، زمان تماس تعادل را در ۷ ساعت بدست می آورد [۳]. با این حال، ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی برای حذف سرب زمان تماس تعادل را در ۱۲۰ دقیقه به دست می آورد و پس از آن، ثابت می ماند [۱۸].

**اثر دما:** ماهیت فرآیندهای گرماده یا گرماگیر به تعادل جذب بستگی دارد که تحت تأثیر درجه حرارت استفاده شده می باشد. ظرفیت جذب جذب شونده ها با افزایش دما افزایش می یابد. این به دلیل بزرگ شدن منافذ و فعال شدن سطح جاذب اتفاق می افتد. تحقیقات جوادیان نشان داد که حذف کادمیوم با تغییر محدوده دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به ۴۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته است [۳].

#### ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

نقش ژئوپلیمرها در تصفیه فاضلاب تنها در چند سال اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. در میان جاذب های ژئوپلیمری دیگر، خاکستر بادی بیشترین توجه را در حذف فلزات سنگین به خود اختصاص داده است، زیرا آنها مربوط به زباله های ارزان قیمت و در دسترس هستند. ظرفیت جذب فلزات سنگین جذب شده معمولاً توسط ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ مدل سازی می شوند. عواملی که بر ظرفیت جذب تأثیر می گذارند عبارتند از pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه، زمان تماس و دما. به طور معمول، افزایش مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه باعث افزایش ظرفیت جذب تا یک نقطه خاص قبل از ثابت شدن می شود. با این حال، برخی از مواد و جذب ممکن است متفاوت باشد. از بررسی ها می توان نتیجه گرفت که استفاده از جاذب ژئوپلیمری به عنوان جایگزین کربن فعال گران قیمت برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب موثر است. بیشتر تحقیقات به جای بهبود در تصفیه شیرابه، روی فاضلاب صنعتی متمرکز هستند. علاوه بر این، تحقیقات محدودی در مورد مخلوط جاذب های ژئوپلیمری انجام شده است.

#### ۸- مراجع

- [1]- Fu, F., and Wang, Q., 2011, **Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review**, Journal of environmental management, 92, 3, 407-418.
- [2]- Metcalf and Eddy, Inc., 2003, **Wastewater Engineering**, Treatment and Reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.
- [3]- Javadian, H., Ghorbani, F., Tayebi, H. A., and Asl, S. H., 2015, **Study of the adsorption of Cd (II) from aqueous solution using zeolite-based geopolymer, synthesized from coal fly ash; kinetic, isotherm and thermodynamic studies**, Arabian Journal of Chemistry, 8, 6, 837-849.
- [4]- Salam, O. E. A., Reiad, N. A., and ElShafei, M. M., 2011, **A study of the removal characteristics of heavy metals from wastewater by low-cost adsorbents**, Journal of Advanced Research, 2, 4, 297-303.
- [5]- Wang, S., Li, L., and Zhu, Z. H., 2007, **Solid-state conversion of fly ash to effective adsorbents for Cu removal from wastewater**, Journal of hazardous materials, 139, 2, 254-259.



- [6]- Lee, C. G., Song, M. K., Ryu, J. C., Park, C., Choi, J. W., & Lee, S. H., 2016, **Application of carbon foam for heavy metal removal from industrial plating wastewater and toxicity evaluation of the adsorbent**, Chemosphere, 153, 1-9.
- [7]- Minju, J., Linoshka, S., Marleisa, A., Juliana, S. J., and Sangchul, H., 2015, **Optimum mix design of fly ash geopolymer paste and its use in pervious concrete for removal of fecal coliforms and phosphorus in water**, Construction and Building Materials, 93, 1097-1104
- [8]- Mohammad, S., Al-Harashseh, K., A., Leema, A., Muhammad, H., and Mehaysen, M., 2015, **Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper removal**, Journal of Environmental Chemical Engineering, 3, 1669-1677.
- [9]- Gharzouni, A., Vidal, L., Essaidi, N., Joussein, E., and Rossignol, S., 2016, **Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties**, Materials & Design. 94. 10.1016/j.matdes.2016.01.043.
- [10]-Ahmaruzzaman, M., 2011, **Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals**, Advances in Colloid and Interface Science, 166, 36-59.
- [11]- Abas, S. N. A., Ismail, M. H. S., Kamal, M. L. and Izhar, S., 2013, **Adsorption process of heavy metals by low-cost adsorbent: A review**, World Application Science Journal, 28, 1518–1530.
- [12]- Motsi, T., Rowson, N. A. and Simmons, M. J. H., 2009, **Adsorption of Heavy Metals from Acid Mine Drainage by Natural Zeolite**, International Journal of Mineral Processing, 92, 42-48.
- [13]- Liu, H. H., Sang, S. H., 2010, **Study on the law of heavy metal leaching in municipal solid waste landfill**, Environment Monitoring Assessment, 165, 349–363.
- [14]- Phair, J. W., Van Deventer, J. S. J., and Smith, J. D., 2004, **Effect of Al source and alkali activation on Pb and Cu immobilisation in fly-ash based “geopolymers”**. Applied Geochemistry, 19(3), 423-434.
- [15]- Waijarean, N., Asavapisit, S., and Sombatsompop, K., 2014, **Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals**, Construction and Building Materials, 50, 486-491.
- [16]- Nikolić, V., Komljenović, M., Bašćarević, Z., Marjanović, N., Miladinović, Z., and Petrović, R., 2015, **The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers**, Construction and Building materials, 94, 361-370.
- [17]- Ge, Y., Yuan, Y., Wang, K., He, Y., and Cui, X., 2015, **Preparation of geopolymer-based inorganic membrane for removing Ni<sup>2+</sup> from wastewater**, Journal of hazardous materials, 299, 711-718.
- [18]- Al-Zboon, K., Al-Harashseh, M. S., and Hani, F. B., 2011, **Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution**, Journal of Hazardous Materials, 188, (1-3), 414-421.
- [19]- Luukkonen, T., Sarkkinen, M., Kemppainen, K., Rämö, J., and Lassi, U., 2016, **Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate**, Applied Clay Science, 119, 266-276.
- [20]- Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., da Silva, E. F., and Rocha, F., 2016, **The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers**, Applied Clay Science, 126, 141-152.



- [21]- Williams, C. D., and Roberts, C. L., 2009, **A comparative study of two methods for the synthesis of fly ash-based sodium and potassium type zeolites**, Fuel, 88(8), 1403-1416.
- [22]-Esparham, A., Moradikhou, A. B., & Jamshidi Avanaki, M., 2020, **Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**, Journal of civil Engineering and Materials Application, 4(2), 115-123.
- [23]- Esparham, A., Moradikhou, A. B., Andalib, F. K., & Avanaki, M. J., 2021, **Strength characteristics of granulated ground blast furnace slag-based geopolymer concrete**, Advances in concrete construction, 11, 3, 219-229.
- [24]- Esparham, A., and Moradikhou, A. B., 2021, **A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Class C Fly Ash**, Advance Researches in Civil Engineering, 3, 1, 1-13.
- [25]- Esparham, A., 2020, **Factors Influencing Compressive Strength of Metakaolin-based Geopolymer Concrete**, Modares Civil Engineering journal, 20, 1, 6-15.
- [26]- Moradikhou, A. B., Esparham, A., and Avanaki, M. J., 2019, **Effect of Hybrid Fibers on Water absorption and Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete based on Blast Furnace Slag**, Journal of civil Engineering and Materials Application, 3, 4, 195-211.
- [27]- Esparham, A., and Moradikhou, A. B., 2021, **Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete**, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53, 3, 21-31.
- [28]- Esparham, A., Hosseini, M. H., Mousavi Kashi, A., Emami, F., and Moradikhou, A. B., 2020, **Impact of Replacing Kaolinite with Slag, Fly Ash and Zeolite on the Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete Based on Kaolinite**, Building Engineering & Housing Science, 13, 24, 9-15.
- [29]- Moradikhou, A. B., Hosseini, M. H., Mousavi Kashi, A., Emami, F., and Esparham, A., 2020, **Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete**, IQBQ, 20, 2, 147-161
- [30]- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., and Xi, Y. Q., 2015, **A comprehensive review on the applications of coal fly ash**, Earth-Science Reviews, 141, 105-121.
- [31]- Li, L., Wang, S., and Zhu, Z., 2006, **Geopolymeric adsorbents from fly ash for dye removal from aqueous solution**, Journal of colloid and interface science, 300, 1, 52-59.
- [32]- Albadarin, A. B., Mangwandi, C., Ala'a, H., Walker, G. M., Allen, S. J., and Ahmad, M. N., 2012, **Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent**, Chemical Engineering Journal, 179, 193-202.
- [33]- Lim, A. P., and Aris, A. Z., 2014, **A review on economically adsorbents on heavy metals removal in water and wastewater**, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 13, 2, 163-181.
- [34]- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S., and Lukey, G. C., 2002, **The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers**, Chemical Engineering Journal, 89, 1-3, 63-73.