



## Paper Type: Original Article



# Determining the Effect of PH, Initial Arsenate on Arsenate Adsorbed by Surface Adsorbent, and Decision-Making Based on Fuzzy Logic

Abbas Ahmadi Sheikhnashin<sup>1,\*</sup> , Ali Tajdin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran; ahmadi\_ab@noor.iust.ac.ir.

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran; ali\_tajdin@ustmb.ac.ir.

## Citation:



Ahmadi Sheikhnashin, A., & Tajdin, A. (2024). Determining the effect of PH, initial arsenate on arsenate adsorbed by surface adsorbent, and decision-making based on fuzzy logic. *Management: modeling, analysis and applications*, 1(1), 30-36.

Received: 19/07/2023

Reviewed: 15/10/2023

Revised: 05/12/2023

Accepted: 10/03/2024

## Abstract

**Purpose:** The present study was conducted to develop an analytical framework based on fuzzy logic that can accurately predict the simultaneous effect of PH and initial arsenate concentration on the amount of arsenate adsorbed by surface adsorbents.

**Methodology:** For this purpose, using experimental data and applying artificial intelligence principles, a fuzzy decision-making system was designed and implemented that can estimate the adsorbed arsenate amounts with appropriate accuracy under different environmental conditions.

**Findings:** The most important advantages of this method include reducing modeling complexity, model development time, and computational costs. Analyzing the outputs of the fuzzy model designed with laboratory data showed that this system could provide accurate responses in a wide range of input values with an average error of about 10%. This acceptable accuracy demonstrates the high capability of the fuzzy method in simulating nonlinear and multivariate-dependent systems.

**Originality/Value:** This research innovates by applying fuzzy logic as an effective and innovative alternative to traditional analytical models in the adsorption process and designing a system capable of predicting the behavior of arsenate adsorption under varying PH and initial concentration conditions. Although this model has been validated only for the arsenate adsorption system, the developed framework can be used to model other adsorption systems in the future.

**Keywords:** Fuzzy logic, PH effect, Surface adsorption, Inlet concentration effect.



Corresponding Author: ahmadi\_ab@noor.iust.ac.ir

<https://doi.org/10.22105/mmaa.v1i1.68>

Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## ۶

## نوع مقاله: پژوهشی

# تعیین اثر PH، آرسنات اولیه بر آرسنات جذب شده با جاذب سطحی و تصمیم گیری براساس منطق فازی

عباس احمدی شیخ نشین<sup>۱</sup>، علی تاج دین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه علوم و فنون مازندران، مازندران، ایران.

## چکیده

هدف: پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر منطق فازی انجام شده است تا بتواند تاثیر همزمان  $PH$  و غلظت اولیه آرسنات بر میزان آرسنات جذب شده توسط جاذب سطحی را با دقت بالا پیش بینی نماید.

روش شناسی پژوهش: به این منظور، با استفاده از داده های تجربی و به کارگیری اصول هوش مصنوعی، یک سیستم تصمیم گیری فازی طراحی و پیاده سازی شد که قادر است در شرایط مختلف محیطی، مقادیر جذب شده آرسنات را با دقت مناسبی برآورد کند.

یافته ها: از مهم ترین مزایای این روش می توان به کاهش پیچیدگی های مدل سازی، کاهش زمان توسعه مدل و کاهش هزینه های محاسباتی اشاره کرد. نتایج حاصل از تحلیل خروجی های مدل فازی طراحی شده با داده های آزمایشگاهی نشان داد که این سیستم با میانگین خطای حدود ۱۰٪ توانسته است پاسخ های دقیقی در گستره وسیعی از مقادیر ورودی ارائه دهد. این دقت قابل قبول، نشان از قابلیت بالای روش فازی در شبیه سازی سیستم های غیر خطی و وابسته به چند متغیر دارد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نوآوری این پژوهش در به کارگیری رویکرد منطق فازی به عنوان جایگزینی موثر و نوآورانه برای مدل های تحلیلی سنتی در فرآیند جذب و همچنین در طراحی سیستمی است که توانایی پیش بینی رفتار جذب آرسنات را در شرایط متغیر  $PH$  و غلظت اولیه دارا است. هرچند در حال حاضر این مدل فقط برای سیستم جذب آرسنات اعتبارسنجی شده، اما چارچوب توسعه یافته می تواند در آینده به عنوان پایه ای برای مدل سازی سایر سیستم های جذب نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: منطق فازی، تاثیر  $PH$ ، جذب سطحی، تاثیر غلظت ورودی.

## ۱- مقدمه

ابتدا چند اصطلاح کلیدی که در این پژوهش به کار رفته اند تعریف می شوند و سپس شرح فرآیند تحقیق ارائه می گردد.

## کمپلکس سازی سطحی<sup>۱</sup>

کمپلکس سازی سطحی به فرآیند تشکیل کمپلکس ها بر روی سطوح مواد اشاره دارد [1]. در شیمی، کمپلکس ها ترکیباتی هستند که از یک اتم فلز مرکزی و لیگاند<sup>۲</sup> هایی تشکیل می شوند که به آن متصل هستند. در کمپلکس سازی سطحی، این لیگاندها می توانند به سطوح مواد متصل شوند و ساختارهای پیچیده ای را ایجاد کنند.

<sup>۱</sup> Surface complexation

<sup>۲</sup> Ligand

## ایزوترم‌های جذب تحلیلی

ایزوترم‌های جذب تحلیلی روابط ریاضی هستند که رفتار جذب سطحی مواد بر روی جاذب‌ها را در دمای ثابت توصیف می‌کنند. این معادلات بر اساس مکانیسم‌های جذب و ویژگی‌های سطح جاذب توسعه یافته‌اند. از مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی عبارتند از: ایزوترم لانگمویر<sup>۲</sup> [2] و ایزوترم فروندلیچ<sup>۳</sup> [3] که در زیر تعریف مختصری از هریک پرداخته شد.

ایزوترم لانگمویر: این مدل برای جذب تک‌لایه‌ای روی سطوح همگن و غیرمتخلخل استفاده می‌شود. معادله آن به صورت زیر است:

$$\frac{Q_{max} \cdot b \cdot C_e}{b \cdot C_e + 1} = Q_e,$$

که پارامترهای آن به شرح زیر است:

$Q_e$ : غلظت تعادلی ماده جذب‌شونده (mg/g)

$Q_{max}$ : ظرفیت حداکثر جذب تک‌لایه

$b$ : ثابت وابستگی به انرژی جذب

$C_e$ : غلظت تعادلی ماده در فاز مایع (mg/l)

ایزوترم فروندلیچ: ایزوترم فروندلیچ یک مدل تجربی برای سطوح ناهمگن و جذب چندلایه‌ای است. این مدل توسط هربرت فروندلیچ در سال ۱۹۲۶ [4] ارائه شد و به طور گسترده‌ای برای توصیف جذب مواد بر روی سطوح ناهمگن استفاده می‌شود، معادله و پارامترهای آن به شرح زیر می‌باشند.

$$C_e^{\frac{1}{n}} \cdot K_f = Q_e,$$

$K_f$ : ثابت ظرفیت جذب

$n$ : ثابت شدت جذب (هرچه  $n$  بزرگتر از یک باشد جذب مطلوب‌تر است)

با در نظر گرفتن محدودیت‌های مدل‌های فعلی در پیش‌بینی اثرات پتانسیل هیدروژن<sup>۴</sup> بر فرآیندهای جذب، به بررسی چالش‌های موجود پرداخته شد و راه‌حل جایگزین ارائه می‌شود.

اثرات تغییر PH بر جذب آلاینده‌های معدنی روی سطوح اکسید فلزی عمدتاً با استفاده از مدل‌های کمپلکس‌سازی سطحی شبیه‌سازی می‌شوند. این رویکرد عددی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی ساده‌تر مانند ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ، پیچیده و از نظر محاسباتی فشرده است. متأسفانه، هیچ‌یک از مدل‌های ایزوترم تحلیلی موجود در حال حاضر قادر به پیش‌بینی اثرات جذب وابسته به PH به شیوه‌ای سازگار نیستند. از این رو، نیاز به توسعه روش‌هایی است که بتواند اثرات جذب وابسته به PH را اندازه‌گیری کند. برای این امر استفاده از هوش مصنوعی<sup>۵</sup> می‌تواند کارآمد باشد.

۲- منطق فازی<sup>۶</sup>

MLF یک رویکرد محاسباتی است که به جای استفاده از منطق دودویی (صفر و یک) که در آن عبارات یا درست هستند یا غلط، از درجات مختلف درستی استفاده می‌کند. MLF توسط زاده در سال ۱۹۶۵ [5] معرفی و بر اساس نظریه مجموعه‌های فازی بنا نهاده شد، این منطق به جای این‌که فقط

<sup>1</sup> Isotherm

<sup>2</sup> Langmuir isotherm

<sup>3</sup> Freundlich isotherm

<sup>4</sup> Potential of Hydrogen (PH)

<sup>5</sup> Artificial Intelligence (AI)

<sup>6</sup> Model Logic Fuzzy (MLF)

دو حالت درست یا نادرست را در نظر بگیرد، مقادیر درستی بین ۰ و ۱ را نیز در نظر می‌گیرد. این رویکرد به تقلید از نحوه تصمیم‌گیری انسان، جایی که شرایط اغلب مبهم و غیرقطعی هستند، کمک می‌کند. *MLF*، امروزه به حل بسیاری از مسایل مربوط به تصمیم‌گیری کمک کرده است، به طوری که در بیشتر مواقع، تصمیمی منطقی با خطای کم بر اساس ورودی‌ها را تولید می‌کند. *MLF* بر مبنای تصمیم‌گیری‌های انسانی پایه‌ریزی شده است و به صورتی می‌توان آن را توسعه منطق ارسطویی یا منطق بولی دانست و دارای متغیرهای ورودی و خروجی، توابع عضویت و قوانینی است که اثر ورودی‌ها را به خروجی مرتبط می‌سازد. در *MLF* قوانین از نوع *If-then* است که به تبیین رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی در یک سیستم فازی کمک می‌کنند. در این تحقیق از *MLF* برای پیش‌بینی میزان جذب آرسنات<sup>۱</sup> در شرایط مختلف استفاده شد. و اثرات *PH* و غلظت آرسنات اولیه بر جذب آرسنات بررسی گردید.

در این تحقیق انتظار می‌رود نتایج حاصل از *MLF* با نتایج حاصل از حل عددی و ایزوترم دارای خطای جزئی باشد. البته این کار نیاز به بهینه‌سازی و تنظیم دقیق تابع‌های عضویت و متغیرهای ورودی و خروجی دارد.

### ۳- طرح مساله

مساله اصلی در تحقیق حاضر این است که مدل‌های ایزوترم تحلیلی مانند لانگمویر و فروندلیچ برای شبیه‌سازی اثرات *PH* بر جذب مواد کارآمد نیستند و هدف، توسعه یک چارچوب تحلیلی با استفاده از *MLF* برای پیش‌بینی جذب آرسنات در شرایط مختلف *PH* و غلظت می‌باشد [6]. سیستم طراحی شده شامل دو متغیر زبانی ورودی *PH* و غلظت بوده و یک متغیر زبانی خروجی که میزان جذب را نشان می‌دهد است، برای هر کدام از آن‌ها پنج مقدار با نام‌های بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد در نظر گرفته شد. مقادیر بازه متغیر *PH*، غلظت و همچنین بازه‌ی خروجی در جدول ۱ تنظیم گردید. این فواصل با تنظیم بازه هر تابع عضویت، پوشش داده شده است.

جدول ۱- مقادیر بازه متغیر *PH*، غلظت و بازه‌ی خروجی.

Table 1- Variable range values of PH, concentration and output range.

| بازه     | مقادیرها                              | متغیر     |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 3.5-11   | بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد | PH        |
| 0.75-7.5 | بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد | غلظت      |
| 1.4-10   | بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد | میزان جذب |

#### ۳-۱- راه حل

یک سیستم فازی با استفاده از داده‌های تجربی طراحی شد تا جذب آرسنات را در شرایط مختلف پیش‌بینی کند. سیستم طراحی شده شامل متغیرهای ورودی (*PH*)، غلظت و یک متغیر خروجی (میزان جذب) است. ۱۵ قانون فازی *If-then* برای تبیین رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد شد. در شکل ۳ تا شکل ۵ نمودارهای متغیرهای ورودی و خروجی نشان داده شده است.

برای پیاده‌سازی و شبیه‌سازی سیستم فازی از نرم‌افزار *MATLAB* استفاده گردید. قوانین و متغیرها در محیط نرم‌افزار *MATLAB* به صورت شکل ۱ زیر کدنویسی گردید.

<sup>۱</sup> آرسنات یک ترکیب شیمیایی است که از گروه آنیون آرسنات ( $AsO_4^{3-}$ ) تشکیل شده است.

```

clc
clear
a = mamfis("Name","Adsorber","DefuzzificationMethod","lom");
a = addInput(a,[3.5 11],"Name","ph");
a=addMF(a,"ph","trapmf",[0.1696 1.481 4.771 5.121],"Name","VeryLow");
a=addMF(a,"ph","trimf",[4.84 6.11 6.823],"Name","Low");
a=addMF(a,"ph","trimf",[6.407 7.63 8.63],"Name","Med");
a=addMF(a,"ph","trimf",[7.29 8.669 10.1],"Name","High");
a=addMF(a,"ph","trimf",[9.74 11.2 13.4],"Name","VeryHigh");

for x = 1:10


$$e^{pi} + 1 = 0$$


for x = 1:10
    disp(x)
end
disp(x)
end

a = addInput(a,[0.75 7.5],"Name","Concentration");
a=addMF(a,"Concentration","trapmf",[-1.16 0.652 1.56 2.12],"Name","VeryLow");
a=addMF(a,"Concentration","trimf",[1.63 2.58 3.94],"Name","Low");
a=addMF(a,"Concentration","trimf",[3.21 4.23 5.491],"Name","Med");
a=addMF(a,"Concentration","trimf",[5.19 5.25 6.01],"Name","High");
a=addMF(a,"Concentration","trimf",[5.58 7.6 10.2],"Name","VeryHigh");
a = addOutput(a,[1.42 10],"Name","As(V) Adsorbed");
a=addMF(a,"As(V) Adsorbed","trapmf",[-1.59 1.1 1.86 3.29],"Name","VLOW");
a=addMF(a,"As(V) Adsorbed","gaussmf",[0.438 4.06],"Name","LOW");
a=addMF(a,"As(V) Adsorbed","trimf",[4.258 5.432 6.694],"Name","MED");
a=addMF(a,"As(V) Adsorbed","trimf",[6.624 7.595 9.209],"Name","HIGH");
a=addMF(a,"As(V) Adsorbed","trapmf",[8.791 9.66 10.52 14],"Name","VHIGH");

Ruleslist = [5 0 1 1 1
4 -2 2 0.85 1
-5 3 2 0.85 1
4 5 4 0.8 1
4 4 3 1 1
3 5 4 1 1
3 4 4 0.8 1
2 5 5 0.8 1
1 5 5 1 1
2 4 4 1 1
1 4 3 0.5 1
0 2 1 0.4 1
1 3 4 0.85 1
1 4 4 1 1
0 1 1 1 1];

a = addRule(a,Ruleslist);
mfedit(a)
% open a;
% fis = readfis('a');
% x=input('enter ph:');
% y=input('enter C:');
% As_adsorbed=evalfis(a,[x y])

```

شکل ۱- کد نویسی سیستم فازی طراحی شده در محیط MATLAB.

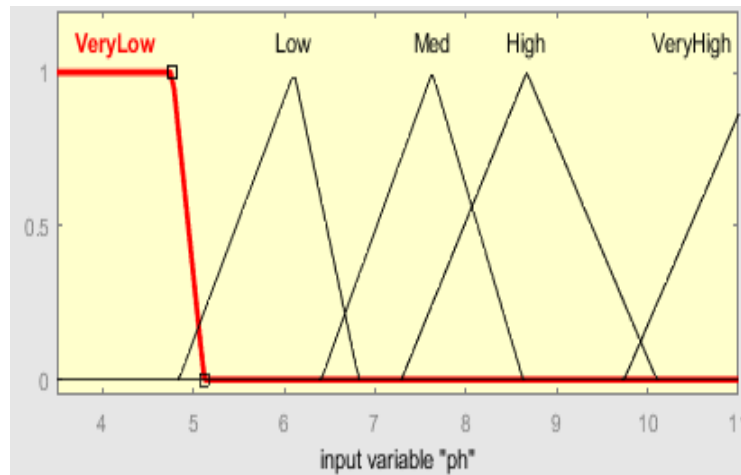
Figure 1- Coding of the designed fuzzy system in MATLAB environment.

و همچنین رابطه‌های میان ورودی‌ها و خروجی با ۱۵ قانون ایجاد گردید که به صورت شکل ۲ می‌باشد.

1. If (ph is VeryHigh) then (As(V) Adsorbed is VLOW) (1)
2. If (ph is High) and (Concentration is not Low) then (As(V) Adsorbed is LOW) (0.85)
3. If (ph is not VeryHigh) and (Concentration is Med) then (As(V) Adsorbed is LOW) (0.85)
4. If (ph is High) and (Concentration is VeryHigh) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (0.8)
5. If (ph is High) and (Concentration is High) then (As(V) Adsorbed is MED) (1)
6. If (ph is Med) and (Concentration is VeryHigh) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (1)
7. If (ph is Med) and (Concentration is High) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (0.8)
8. If (ph is Low) and (Concentration is VeryHigh) then (As(V) Adsorbed is VHIG) (0.8)
9. If (ph is VeryLow) and (Concentration is VeryHigh) then (As(V) Adsorbed is VHIG) (1)
10. If (ph is Low) and (Concentration is High) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (1)
11. If (ph is VeryLow) and (Concentration is High) then (As(V) Adsorbed is MED) (0.5)
12. If (Concentration is Low) then (As(V) Adsorbed is VLOW) (0.4)
13. If (ph is VeryLow) and (Concentration is Med) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (0.85)
14. If (ph is VeryLow) and (Concentration is High) then (As(V) Adsorbed is HIGH) (1)
15. If (Concentration is VeryLow) then (As(V) Adsorbed is VLOW) (1)

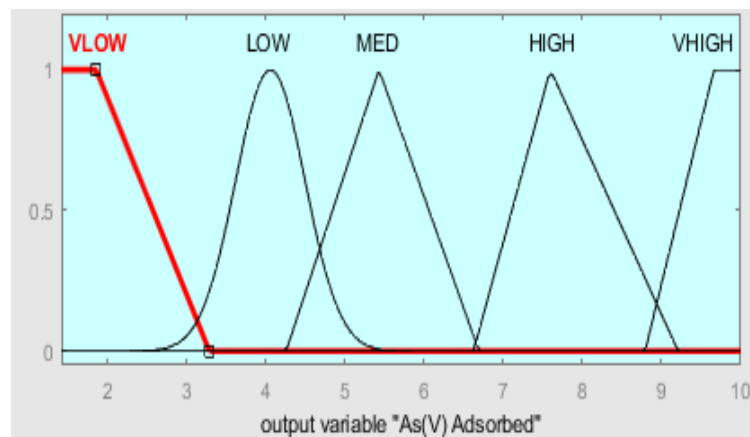
شکل ۲- قوانین منطق فازی برای مساله مورد بررسی.

Figure 2- Fuzzy logic rules for the problem under consideration.



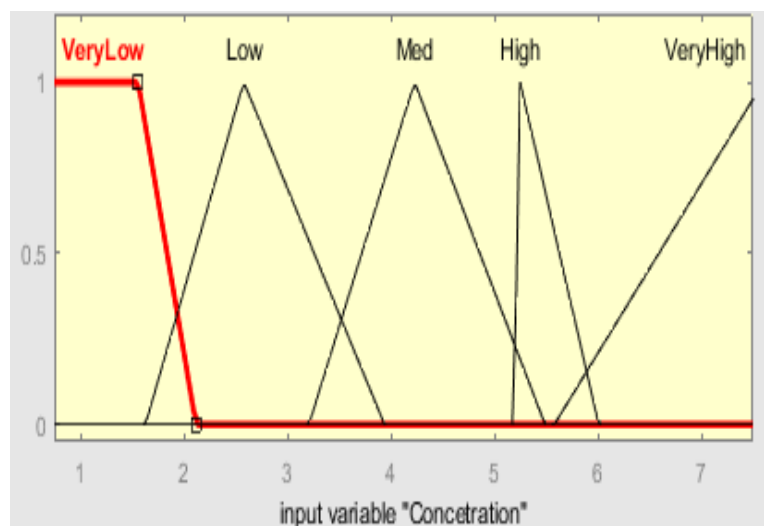
شکل ۳- نمودار متغیر زبانی PH.

Figure 3- PH linguistic variable diagram.



شکل ۴- نمودار متغیر زبانی غلظت.

Figure 4- Concentration linguistic variable graph.

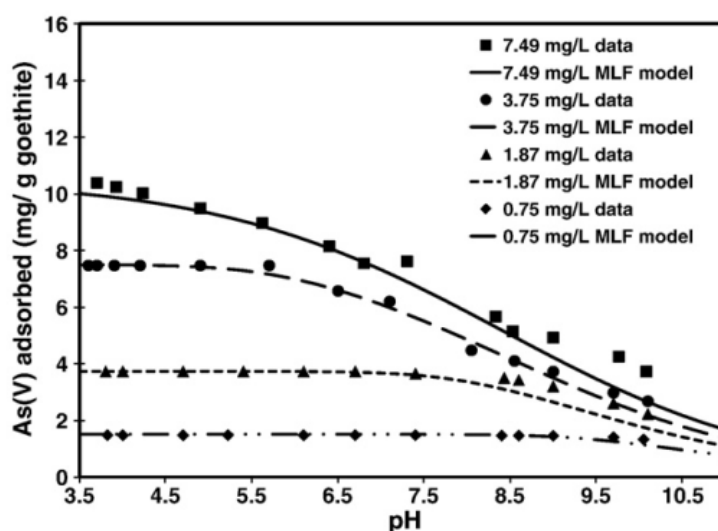


شکل ۵- نمودار متغیر زبانی خروجی.

Figure 5- Output linguistic variable diagram.

## ۳-۲- نتایج پژوهش

نتایج تحقیق در شکل ۶ نشان‌دهنده تاثیر تغییرات PH بر میزان جذب آرسنات  $As(V)$  بر روی سطح گوتیت<sup>۱</sup> است. داده‌های تجربی و مدل‌سازی با استفاده از MLF برای غلظت‌های مختلف آرسنات اولیه (۰/۷۵، ۱/۸۷، ۳/۷۵ و ۷/۴۹) ارایه شده‌اند. خطوط نشان‌دهنده نتایج مدل‌سازی هستند، در حالی که نقاط و نمادها داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. این نمودار بیانگر کاهش میزان جذب آرسنات با افزایش PH در تمامی غلظت‌ها است که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و مدل‌سازی مشاهده می‌شود.



شکل ۶- اثر PH و آرسنات اولیه بر آرسنات جذب‌شده.

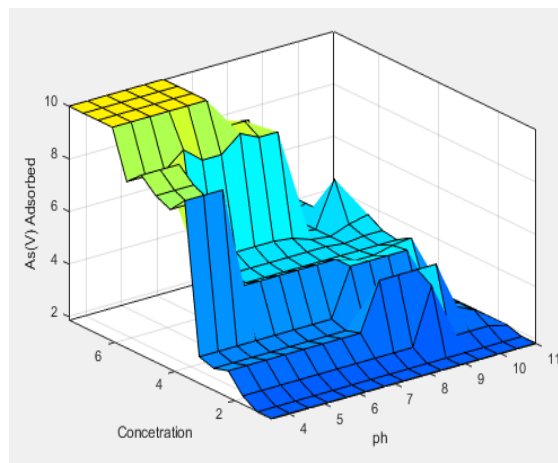
Figure 6- Effect of PH and initial arsenate on adsorbed arsenate.

شکل ۷ تصویر سطوح سه بعدی از آرسنات جذب‌شده، PH و غلظت را نشان می‌دهد.

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، یک مدل MLF طراحی شد که شامل متغیرهای ورودی PH، غلظت و متغیر خروجی (میزان جذب) است. برای هر متغیر، توابع عضویت مناسب تعریف گردید که نشان‌دهنده درجات مختلف عضویت هر مقدار در هر متغیر هستند. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و مدل فازی، شبیه‌سازی انجام گردید تا میزان جذب آرسنات در شرایط مختلف پیش‌بینی شود.

این نمودار سه بعدی، اثر توأمان PH و غلظت آرسنات بر میزان جذب آرسنات  $As(V)$  را نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های تجربی و مدل‌سازی MLF ایجاد شد، با افزایش PH و کاهش غلظت، میزان جذب نیز کاهش می‌یابد [7]. سطح رنگی نشان‌دهنده میزان جذب است و بیانگر رابطه پیچیده بین PH، غلظت و جذب آرسنات می‌باشد.

<sup>۱</sup> یک ماده معدنی اکسید آهن یا فرمول شیمیایی  $FeO(OH)$  است که در گروه هیدروکسیدها قرار دارد. این ماده معدنی به دلیل حضور گسترده در طبیعت و نقش مهم آن در چرخه آهن و فرایندهای زیست‌محیطی شناخته شده است.



شکل ۷- نمایش اثر PH و غلظت ورودی بر آرسنات جذب شده.

Figure 7- Showing the effect of PH and inlet concentration on adsorbed arsenate.

#### ۴- نتیجه و جمع بندی

با استفاده از داده‌های موجود در مرجع [8] و نمودارهایی که در شکل‌های ۱ تا ۷ آورده شده‌اند، سیستم فازی برای پیش‌بینی میزان جذب ساخته شد. پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب تحلیلی بر پایه *MLF* برای پیش‌بینی اثرات *PH* و غلظت اولیه آرسنات بر میزان جذب آرسنات بر روی سطح گوتیت انجام گردید. نتایج نشان داد که سیستم فازی طراحی شده با استفاده از داده‌های تجربی، قادر به پیش‌بینی میزان جذب با دقت قابل قبولی است. خطای پیش‌بینی مدل در حدود ۱۰٪ بوده و تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی در تمامی غلظت‌های اولیه آرسنات مشاهده شد. این روش می‌تواند به کاهش پیچیدگی مدل‌سازی و تلاش‌های محاسباتی در مقایسه با روش‌های عددی مانند مدل‌های کمپلکس‌سازی سطحی کمک کند. اگرچه این سیستم در حال حاضر فقط برای جذب آرسنات معتبر است، اما می‌توان آن را به عنوان یک چارچوب تحلیلی برای بررسی اثرات جذب وابسته به *PH* در سایر سیستم‌ها نیز توسعه داد.

#### منابع

- [1] Lutzenkirchen, J. (2006). *Surface complexation modelling*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/interface-science-and-technology/vol/11/suppl/C>
- [2] Liu, Y. (2006). Some consideration on the Langmuir isotherm equation. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 274(1-3), 34-36. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.08.029>
- [3] Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., Tsygankova, L., & Tanygina, E. (2021). Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework. *Applied sciences*, 11(17), 8078. <http://dx.doi.org/10.3390/app11178078>
- [4] Freundlich, H. (1926). New conceptions in colloidal chemistry. In *Colloid and capillary chemistry*. ACS publications.
- [5] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [6] Al-Degs, Y. S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H., & Walker, G. M. (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and pigments*, 77(1), 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2007.03.001>
- [7] Yang, S., Li, J., Shao, D., Hu, J., & Wang, X. (2009). Adsorption of Ni(II) on oxidized multi-walled carbon nanotubes: Effect of contact time, pH, foreign ions and PAA. *Journal of hazardous materials*, 166(1), 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.003>
- [8] Javadian, H., Asadollahpour, S., Ruiz, M., Sastre, A. M., Ghasemi, M., Asl, S. M. H., & Masomi, M. (2018). Using fuzzy inference system to predict Pb (II) removal from aqueous solutions by magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-activated Myrtus Communis leaves carbon nanocomposite. *Journal of the taiwan institute of chemical engineers*, 91, 186-199. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.06.021>