

سینتیک اکسایش میکروبی در فرایند فروشویی زیستی اورانیم در یک زیست رآکتور هوا- بالارونده با حلقه جريان داخلي

محمدرضا ذوالعلی'، سیدجابر صفدری'، علی حقیقی اصل'، عباس رشیدی*" ۱. دانشکدهی مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، صندوق پستی: ۱۹۱۱۹۱۱۱، سمنان ـ ایران ۲. پژوهشکدهی چرخهی سوخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸٤۸۲-۱۱۳۲۵، تهران ـ ایران ۳. گروه مهندسی شیمی، دانشکدهی مهندسی، دانشگاه مازندران، کدپستی: ۲۷٤۱۵، بابلسر ـ ایران

چکیدد: با استفاده از یک زیست ر آکتور هوا- بالارونده با حلقه جریان داخلی و با به کار گیری باکتری *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان* و سنگ معدن اورانیم آنومالی ۲ ساغند، اکسایش میکروبی آهن فرو، هنگام استخراج اورانیم بررسی شد. برای پیش بینی سینتیک اکسایش میکروبی، مدلهای مونود و مدلهای اصلاح شده برای بازدارندگی محصول و مادهی اصلی در نرخهای هوادهی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده بیش ترین مقدار استخراج اورانیم با باکتری برابر با ۹۷٬۱٪ و بدون باکتری برابر با ۲۱٪ بود. برازش دادههای تجربی با مدلهای پیش گفته نشان داد که در تمام نرخهای هوادهی در رآکتور، مدل اصلاح شده برای بازدارندگی مادهی اصلی تطابق بیش تری با دادههای تجربی داشت و مقدار ^۲ R در نرخهای هوادهی ۰٫۰۰۶۵، ۰٫۰۰۵۵، ۰٫۰۱۰ و ۰٫۰۱۵ متر بر ثانیه، به ترتیب، برابر با ۰٫۹۸، ۰٫۹۷، ۹۴٫۰۰ و ۰٫۹۴ محاسبه شد.

كليدواژه ها: فروشويي زيستي، اورانيم، رآكتور هوا- بالارونده، اكسايش ميكرويي، سينتيك

Kinetics of Microbial Oxidation in Uranium Bioleaching at an Internal Loop **Air-Lift Bioreactor**

M.R. Zolala¹, S.J. Safdari², A. Haghighi-Asl¹, A. Rashidi^{*3} 1. Department of Chemical Engineering, Semnan University, P.O.Box: 3513119111, Semnan – Iran 2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran 3. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mazandaran, Postcode: 47415, Babolsar - Iran

Abstract: To study microbial oxidation of ferrous ions through the uranium bioleaching process, experiments were carried out in the internal loop air-lift reactor by Acidithiobacillus ferrooxidans. The microbial oxidation kinetics was evaluated with the Monod correlation and modified models for the substrate and product inhibition. The maximum recovery of uranium in the biological and control tests were 97.1% and 21%, respectively. Evaluation of the experimental data with the mentioned models showed that the modified model for the substrate inhibition gave a good fitting for all aeration rates. The R²-values were found to be 0.98, 0.97, 0.94 and 0.94 for the air superficial velocity of 0.0065, 0.0085, 0.01 and 0.015 m/s, respectively.

Keywords: Bioleaching, Uranium, Air-Lift Reactor, Microbial Oxidation, Kinetics

*email: rashidi@umz.ac.ir

تاريخ دريافت مقاله: ٩١/٣/٨ تاريخ پذيرش مقاله: ٩٢/١١/٣٠

۱. مقدمه

هیدرومتالورژی زیستی یکی از روش های مناسب برای استخراج فلزها از سنگ های معدنی است [۱]. در روش های متعارف، اورانیم با استفاده از اسیدهای قوی استخراج می شود که این، با مشکل های زیست محیطی و صرف انرژی زیاد همراه است [۲، ۳]. یکی از روش های مناسب برای استخراج اورانیم از منابع کم عیار، روش فروشویی زیستی، و یکی از مهم ترین ریزجاندارانی که در این فرایند مورد استفاده قرار می گیرد *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان*^(۱) است [۲، ۳، ۴، ۵]. در فرایند فروشویی زیستی با باکتری *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان* اکسایش یون فرو به فریک و در نتیجه استخراج اورانیم چنین انجام می شود [۶]

$$FFe^{r_{+}} + O_{r} + FH^{+} \rightarrow FFe^{r_{+}} + TH_{r}O$$
 (1)

 $\mathrm{UO}_{\mathrm{r}} + \mathrm{r}\mathrm{F}\mathrm{e}^{\mathrm{r}_{+}} + \mathrm{SO}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}_{-}} \rightarrow \mathrm{UO}_{\mathrm{r}}\mathrm{SO}_{\mathrm{r}} + \mathrm{r}\mathrm{F}\mathrm{e}^{\mathrm{r}_{+}} \tag{(1)}$

در واکنش اکسایش آهن فرو به وسیلهی باکتری (رابطهی (۱)) اکسیژن به عنوان الکترون گیرندهی نهایی و یون فرو به عنوان الکترون دهنده عمل میکند. نقش باکتری استمرار اکسایش یون فرو به فریک است [۷، ۸، ۹]. اکسایش میکروبی آهن را می توان در سیستمهای پیوسته و ناپیوسته مورد مطالعه قرار داد [۱۰].

معادلهی سینتیکی برحسب رشد سلولی و مصرف مادهی اصلی^(۲) چنین بیان می شود

$$\mathbf{r}_{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{d}\mathbf{x}}{\mathbf{d}\mathbf{t}} = \boldsymbol{\mu}\mathbf{X} \tag{(7)}$$

که در آن، µ نرخ رشد ویژهی باکتری در لحظهی t و X غلظت سلولی است. چنانچه مادهی اصلی محدودکننده در عملیات فروشویی زیستی ^{+۲} Fe باشد، نرخ اکسایش آهن فرو چنین به دست میآید

$$r_{s} = -\frac{ds}{dt} = -\frac{d[Fe^{\prime +}]}{dt} = -\frac{\prime}{Y}\frac{dx}{dt}$$
(F)

که در آن، Y ضریب بهره^(۳) بوده و چنین محاسبه می شود

$$Y = \frac{\Delta x}{\Delta s} = \frac{x_t - x_o}{s_o - s_t}$$
(δ)

براساس مطالعههای انجام شده، سینتیک رشد باکتری در سیستم فروشویی زیستی اورانیم تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است، اما پژوهشهای متعددی بر روی سینتیک اکسایش آهن توسط ریزجانداران اسید دوست در محیط کشت انجام شده است که تعدادی از آنها در جدول ۱ آورده شده است.

بیش تر مطالعههای انجام شده در زمینهی فروشویی در فلاسکهای لرزان یا تانکهای همزندار انجام شده است. تانکهای همزندار معایبی همچون مصرف بالای انرژی و اشغال فضای زیاد دارند [۲۱، ۲۲]. رآکتورهای هوا- بالارونده در مقایسه با تانکهای همزندار مکانیکی دارای سادگی ساختار، ظرفیت انتقال گرمای بالا، نرخ انتقال جرم مناسب، ایجاد اختلاط مناسب برای فازها با مصرف انرژی پایین، عملکرد دو گانهی فاز گاز برای هوادهی و اختلاط فازها هستند. ناچیز بودن تنش اعمالی به ریزجاندار، ایجاد شرایط آسان برای فرایندهای پایین دستی در جداسازی فازها و تأمین اکسیژن مورد نیاز فرایند با صرف هزینهی ثابت و جاری پایین از مزایای دیگر رآکتورهای هوا- بالارونده هستند [٢٣، ٢٢، ٢٥، ٢٤، ٢٧، ٢٨، ٢٩، ٣٠]. پژوهش.های متعددی در زمینهی فروشویی زیستی فلزها در رآکتورهای هوا- بالارونده انجام شده است [۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴]. این مقاله سینتیک اکسایش میکروبی یون فرو به وسیله باکتری اسیدی تیویاسیلوس فرواکسیدان برای استخراج اورانیم از یک نمونه سنگ معدن در یک زیست رآکتور هوا- بالارونده را مورد بررسی قرار میدهد. نتایج تجربی به دست آمده برای نرخ رشد ویژهی باکتری با پیشبینی مدلهای مونود^(۴) و مدلهای اصلاح شده برای بازدارندگی محصول و بازدارندگی مادهی اصلی مقايسه مي شود.

۲. مواد و روش پژوهش ۱.۲ سنگ معدن

سنگ معدن اورانیم مورد استفاده از آنومالی ۲ ساغند یزد در ناحیهی مرکزی ایران تهیه شد. نتایج تجزیهی فلوئورسانی پرتو ایکس (XRF) نمونهی تهیه شده در جدول ۲ داده شده است. اندازهی ذرات سنگ معدن اورانیم در آزمایش ها حدود ۱۰۶µm) بود.

مجله علوم و فنون هستهای، ۶۷، ۱۳۹۳		4
ی مختلف	جدول ۱. معادلههای سینتیکی انتخاب شده برای اکسایش یون فرو در پژوهش های	Ũ
مدل مورد استفاده	شرایط آزمایش ها	ن <u>و ي</u> سندگان
$\mu = \frac{\mu_{max}[Fe^{r_{+}}]}{Y_{sx}K_{m} + [Fe^{r_{+}}]}$	r=۲۵−۳۰°C ،pH=۲−۳٫۲، <i>اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان</i> ، ر آکتور همزندار	لسي و لاوسون [١١]
$\mu = \frac{\mu_{\max}[Fe^{Y_{+}}]}{K_{m} + [Fe^{Y_{+}}]}$	T=۲۸°C ،pH=۲٫۲، <i>اسیادی تیوباسیلوس فرواکسیدان</i> ، رآکتور همزندار پیوسته	کلارک و مک دونالد [۱۲]
$\mu = \frac{\mu_{max}[Fe^{r_{+}}]}{K_{s}(1 + K_{i}[Fe]^{r_{+}}) + [Fe^{r_{+}}]}$	۲=۳۰°C ،pH=۱٫۸ <i>اسیدی تیویاسیلوس فرواکسیدان</i> ، ر آکتور همزندار	ليو [١٣]
$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}.S}{K_s + S + K_y.P}$	<i>اسیدی تیویاسیلوس فرواکسیدان</i> ، ر آکتور همزندار پیوسته، pH بین ۳ تا ۶، C°°C (T=۳۰	گومز [۱۴]
$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + \frac{S'}{K_s'}}$	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، فلاسک متحر ک، pH متغیر، T=۳۳°C	موسوی [۱۵]
$\mu = \frac{\mu_{max}[Fe^{t}]}{K_m + [Fe^{t}]}$	T=۳۰°C ،pH=۲، فلاسک متحر ک، <i>اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان</i>	کانترو و کابرا [۱۶]
$\mu = \frac{\mu_{max}[Fe^{t}]}{K_m + [Fe^{t}]}$	pH=1,۰۵-1,۸، لپتوسپیریلیم، زیست رآکتور هوا- بالارونده	پرو و کانبرا [۱۷]
$\mu = \frac{\mu_{max}[Fe^{t}]}{K_m + [Fe^{t}]}$	pH=۱٫۵، <i>سولفوباسیلوس ترموسولفیداکیس</i> ، زیست ر آکتور همزندار	پينا [۱۸]
$\mu = \frac{\mu_{max}([Fe^{t}] - [Fe^{t}]_{t})}{K_{m} + ([Fe^{t}] - [Fe^{t}]_{t})}$	T=۲۲°C، <i>اسیاری تیوباسیلوس فرواکسیدان</i> ، همزندار پیوسته	براداک [۱۹]
	pH بین ۱٫۲۵ و ۲٫۳، فلاسک متحرک، <i>تیوباسیلوس فرواکسیدان</i>	مانول گومز [۲۰]

جدول ۲. نتایج تجزیهی فلوئورسانی پرتو ایکس سنگ معدن آنومالی ۲ ساغند ىز د

			-
مقدار (./)	تر کيب / عنصر	مقدار (./)	تر کيب
٠,٠٢	MnO	۲۴٫۸۳	SiOr
• ,۲۳	$P_{\gamma}O_{\delta}$	1,49	$Al_{y}O_{y}$
• /• %• 1	Cl	49,9V	FerOr
·/VAYV	S	١٬٠٣	CaO
۰,۰۱۵۸	Co	• ، ۱۸	NarO
·,·۳۵۷	Ni	۱٩,٠٣	MgO
· / 404V	V	• ,٣۴	K _γ O
۰,۰۶۵	U	۰ ٬۰ ۸	TiOr

۲.۲ ريز جاندار

ریزجاندار مزوفیل اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان استفاده شده در این کار، بومی معدن گچین بندرعباس بوده و محیط کشت مناسب برای رشد آن شامل ۲ گرم بر لیتر ۲SO_۴، (NH_۴)، ۵، گرم بر لیتر Na_tHPO_f. ۲H_tO، گرم بر لیتر MgSO_f. ۲H_tO، گرم بر ۰٫۱ گرم بر لیتر Ca(NO_r)۲.۴Hr گرم بر لیتر ۲٫۰۱ KCl، و ۲۰ گرم بر لیتر FeSO_F.vH_rO بود [۳۵]. آزمایش ها با غلظت اولیهی سلولی، ۱۰^۹ ×۱/۶ بر لیتر انجام شد.

۳.۲ آزمایشهای فروشویی زیستی

طرحواره ی رآکتور هوا- بالارونده با حلقه جریان داخلی استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. این رآکتور از جنس شیشه به ارتفاع کلی ۶۰cm، شامل جداکنندهی گاز- مایع به قطر داخلی و ارتفاع، به ترتیب، ۲۰ و ۱۰cm، ستون (رآکتور) با قطر داخلی و ارتفاع، به ترتیب، ۱۵ و ۴۰cm، بالابر به ارتفاع و قطر داخلی، به ترتیب، ۴۲ و ۷cm بود. عمل هوادهی از پایین رآکتور به داخل بالابر، از درون يخش كنندهي هوا با ١۶ سوراخ به قطر ۱mm به انجام رسید. حجم کاری راکتور ۸L چگالی پالپ در همهی آزمایش ها ٪۵ وزن به حجم و دما C*۲±۲۵ در نظر گرفته شد. تغییرات pH به طور روزانه کنترل و با استفاده از سولفوریک اسید و سدیم هیدروکسید ۱۰N در مقدار ثابت ۲ نگه داشته مىشد. غلظت باكترى، مقدار پتانسيل اكسايش- كاهش، غلظت آهن فرو و فریک و میزان استخراج اورانیم هر روز مورد اندازه گیری قرار می گرفت. معادل آب از دست رفتهی روزانه از رآکتور، آب مقطر و به ازای هر نمونه گیری روزانه، همان مقدار محبط کشت به ر آکتور اضافه می شد.



شکل ۱. طرحوارهی سیستم به کار رفته در آزمایش ها.

٤.٢ تجزيه

تعداد باکتری در محلول، مطابق استاندارد ASTM D ۴۴۵۵–۵۵ از طریق شمارش مستقیم تعیین شد. در این روش از یک لام توما به ضخامت ۱۳۳۸ و مساحت ۲۰۰۳/۱۰ همراه با یک میکروسکوپ با بزرگذنمایی (۱۰۰۰) استفاده شد [۳۶]. مقدار اورانیم و گونههای آهن در محلول پس از عبور محلول از صافی استات سلولز با اندازهی حفرههای ۲μ۳/۰، به ترتیب، به وسیلهی

دستگاه پلاسمای جفت شدهی القایی مدل پرکین المر ۲۰۰۰ و طیف نورسنجی اندازه گیری شد. مقدار pH و Eh در دمای اتاق، به وسیلهی pH/Eh متر متراُهم مدل ۸۲۷ اندازه گیری شد. الکترود مرجع در اندازه گیری پتانسیل Ag/AgCl بود.

۳. یافته ها و بحث ۱.۳ درصد بازیابی اورانیم

از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش بررسی معادله ی سینتیکی اکسایش میکروبی بود، لذا ابتدا آزمایش هایی در نرخهای هوادهی ۲۰٬۰۹۵، ۲۰٬۰۰۸۵ (۰٬۰۱۰ متر بر ثانیه، در دو حالت با و بدون باکتری انجام و در هر آزمایش درصد بازیابی اورانیم، پتانسیل اکسایش – کاهش، غلظت باکتری، غلظت آهن فرو و فریک با زمان اندازه گیری شد. شرایط عملیاتی هر آزمایش و مشخصات پارامترهای اندازه گیری شده در هر آزمایش در بعدول های ۳ و ۴ داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با استفاده از رآکتور هوا – بالارونده می توان به بازیابی بیش از ۲۰۰ رسید. درصد بازیابی بیشینه، در نبود باکتری حدود افزایش پتانسیل اکسایش – کاهش محلول به دلیل اکسایش یون فرو به فریک به وسیلهی باکتری *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان* بوده است.

			(r	رخ هوادهي (n/s	;			
•7	• 10	•,•	•,•1•		• ، • • ۸۵		۰,۰۰۶۵	
Eh(mV)	بازيابي (٪)	Eh(mV)	بازيابي (٪)	Eh(mV)	بازيابي (٪)	Eh(mV)	بازيابي (٪)	زمان (روز)
346	٥	378	٥	۳۸۶	٥	۳۸۶	٥	٥
4.4	11,9	F•V/F	١٢	4	۱۱,۰۵	4.1	۱۱/۰۵	١
41.	117,8	04.	21	۵۰۰	17,75	47.	۱۳,۶	۲
43.	14,40	۵۸۰	۲۵,۵	00.	١٩	۵۲۰	١٧	٣
491	10,1	8·1	۳٩	٥٨٠	۳.	۵۸۰	۲٩,٧۵	۴
54.	۱۷,۶	۶۲.	۵۰	811	44	۶۰۵	47,0	۵
52.	۲۱	۶۳.	۶۵	81V	۵۳	817	۵١	6
۶	۲۸	5 4.	٧٢	881	۵۴	۶۲۰	01/18	٧
888	44,4	849,D	٧۵	۶۳۰	66	88V	۵۵٫۲۵	٨
540	۶۵٬۴۵	900	٨٣	940	81	531	۵۹٫۵	٩
۶۵.	٧٣,١	99 .	18/V	9FV	60	۶ ۴.	83,VD	١٠
907	۷۹٬۰۵	۶۷.	٩٠,٩۵	۶۵۰	٧.	541	5F/F))
۶۷.	٩٣٫۵	۶۷۵	٩۶,٩	904	٧۶	9FF	۶۸٫۳	١٢
9 V1	۹۵٫۲	9V9	٩٧/١	99 •	٨٧	۶۵۰	٨٠	۱۳

جدول ۳. نتایج به دست آمده از آزمایشها در نرخهای هوادهی مختلف و در حضور باکتری



شکل ۲. تغییرات پتانسیل اکسایش- کاهش با زمان در شرایط عملیاتی مختلف.

جدول ٤. نتایج به دست آمده از آزمایشها در نرخهای هوادهی مختلف در

نبود باكترى

	(1	سوادهی (m/s	نرخ ہ	
۰٬۰۱۵	٠,٠١٠	۰,۰۰۸۵	۰,۰ <i>۰۶</i> ۵	
R (%)	R (%)	R (%)	R (%)	زمان (روز)
0	o	ō	ō	0
۵	۵	۵	۵	١
٧	9,V	۶,۵	۶٫۳	۲
۱.	٩٫۵	٩	٨,۵	٣
۱۳,۰۸۴	17,49	١٢	۱۱٫۵	۴
10,14	10/1	14,1	14	۵
١٧/٠٢	١٧,٨	١٧,٢	١٧	9
14,01	۱۸/۱	١٧/٩	۱۷٫۵	v
19/1	19/1	11/9	۱۸,۲	٨
19,99	۱٩٫٣	19	19	٩
۲.	19,0	19,5	19,8	۱۰
۲۳	۲۰	19,0	19,0	11
۲۰,۹	Y+,F	۲.	۱۹	١٢
۲۱	۲۰,۵	۲۰,۸۰	۱۹٫۳	١٣

۲.۳ تغییرات پتانسیل اکسایش- کاهش

در شکل ۲ تغییرات زمانی پتانسیل اکسایش – کاهش در نرخهای هوادهی مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل مقدار يتانسيل اكسايش – كاهش با گذشت زمان افزايش مي يابد؛ دليل این افزایش می تواند افزایش یون فریک در محلول باشد، چرا که نرخ توليد يون فريک در اثر اکسايش ميکروبي يون فرو از نرخ کاهش آن به وسیلهی اورانیم چهار ظرفیتی بیش تر است. همچنین نتایج به دست آمده نشان میدهد که منحنی تغییرات پتانسیل اکسایش– کاهش با زمان را می توان به سه ناحیهی I، II و III تقسیم نمود. شیب منحنی تغییرات در ناحیهی I نسبت به ناحیهی μ، به دلیل پایین بودن نرخ تولید یون فریک و فعالیت کم و غلظت پایین باکتری کم است. در ناحیهی 🎚 شیب منحنی تغییرات Eh نسبت به نواحی I و III بیش تر است که می تواند ناشی از بالا بودن نرخ تولید یون فریک به دلیل فعالیت و غلظت بالای باکتری باشد. در ناحیهی III شیب منحنی تغییرات Eh تقريباً صفر است که می تواند ناشی از اکسایش کامل یون فرو به فريک به وسيلهي باکتريها و کاهش شديد مصرف يون فريک در واکنش کاهش باشد.



۳.۳ تغییرات مقدار باکتری

در شکل ۳ تغییرات زمانی مقدار باکتری نشان داده شده است. در این شکل مقدار اولیهی باکتری (cells/m^T) ^۲ ۲۰۲× ۱/۶ است. از این شکل مشاهده می شود که با گذشت زمان مقدار باکتری افزایش می یابد. منحنی تغییرات زمانی مقدار باکتری را می توان به سه ناحیهی I، JI و III تقسیم نمود. در ناحیهی I باکتری در حال سازگار شدن با محیط بوده، و در نتیجه فعالیت و تکثیر کمی دارد؛ نرخ رشد این ناحیه نسبت به ناحیهی JI کم تر است. در ناحیهی JI رشد و فعالیت باکتری، با سازگار شدن آن با محیط، به شدت افزایش می یابد. در ناحیهی III با کاهش شدید منبع انرژی (یون فرو)، باکتری وارد فاز سکون می شود. دلیل کاهش یون فرو در نواحی I، JI و III، اکسایش آن در طول فرایند است.

٤.٣ تغييرات غلظت آهن فرو و فريك

در شکل ۴ تغییرات غلظت محلول آهن فرو و فریک با زمان نشان داده شده است. مقدار آهن فرو با گذشت زمان کاهش یافته و پس از چند روز در تمام نرخهای هوادهی به صفر میل کرده است. دلیل این کاهش افزایش سرعت واکنش اکسایش یون فرو به وسیلهی باکتری در مقایسه با سرعت واکنش کاهش یون فریک به وسیلهی ایرانیم چهار ظرفیتی است. همچنین مقدار یون فریک در روزهای ابتدایی افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه رسیده و با گذشت زمان کاهش یافته است. دلیل این افزایش در روزهای اولیه می تواند افزایش فعالیت باکتری و در نتیجه اکسایش یونهای فرو موجود در محلول باشد. کاهش مقدار یون فریک

٥.٣ سينتيك اكسايش ميكروبي

از میان مدلهای پیشنهاد شده برای بررسی سینتیک اکسایش یون فرو به وسیلهی باکتری *اسیادی تیوباسیلوس فرواکسیادان* در حضور سنگ معدن اورانیم، مدل مونود و مدل اصلاح شده برای بازدارندگی یون فریک و فرو استفاده شد. بیان ریاضی مدل مونود این است

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} \tag{9}$$





شکل ٤. تغییرات همزمان مقدار یونهای فریک و فرو با زمان در شرایط عملیاتی مختلف (-آهن فریک، ... آهن فرو).

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_s + S + K_v P}$$
(V)

مدل اصلاح شده برای بازدارندگی یون فرو (معادله اندروز) این است [۱۴]

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_s + S + \frac{S'}{K_s}}$$

در مطالعه ی حاضر، کار آیی این مدل ها با استفاده از معادله ی (۳) و داده های تجربی به دست آمده برای X و [+Fe^T] = P و [Fe^T] و با کمک نسخه ی ۷.۸۰۰٬۳۴۷ (۲۰۰۹) Matlab و (+ استفاده از روش تفاضل محدود داده ها بررسی شد. نتایج به دست آمده از برازش داده های تجربی با معادله ی (۳) در جدول ۵ داده شده است. مقادیر ^۲ R به دست آمده برای معادله های (۶) تا (۸) نشان می دهد که پیش بینی مدل اصلاح شده برای بازدارندگی یون فرو (معادله اندروز) از دو مدل دیگر بهتر است و پیش بینی مدل مونود به نوبه ی خود از پیش بینی مدل بازدارندگی یون

در شکل ۵ دادههای به دست آمده از آزمایش ها با نتایج معادلهی (۸) مقایسه شده است.



 (Λ)

	0.0					
R	$K_{1}^{*}(mg lit^{-1})$	K1(-)	K_s (mg lit ⁻¹)	$\mu_{max}(day^{-1})$	نرخ هوادهی ۰٬۰۰۶۵ متر بر ثانیه	
•/94	_	-	45.,14	۲٫۴۸	معادلهي مونود	
• ,AY	-	۲/۷×۱۰ ^{-۱۲}	۵۲٬۹۷	٣/٩٥	بازدارندگی یون فریک (معادلهی گومز)	
•,٩٨	۱۷۰۸٫۴	-	9.4	۴٫۸	بازدارندگی یون فرو (معادلهی اندروز)	
R	K_{λ}^{*} (mg lit ⁻¹)	K ₁ (-)	K _s (mg lit ^{-'})	$\mu_{max}(day^{-1})$	نرخ هوادهی ۰٬۰۰۸۵ متر بر ثانیه	
• ,97	-	-	٩١,٢٣	1,84	معادلهي مونو د	
• (9)	_	1,TV×111	٩١,٢٣	1,844	باز دارندگې بون فريک (معادله) گوم:)	
•,9٧	1898	-	٢٧٥/١٩	۴,۸	بازدارندگی یون فرو (معادلهی اندروز)	
B,	w*/)	K ()	$K (mg lit^{-1})$	(dav^{-1})	 	
K	K_{γ} (mg lit)	R ₁ (-)	$\mathbf{K}_{s}(\text{ling lift})$	$\mu_{max}(uay)$	ترج هوادهی ۲۰٬۰ متر بر کالیه	
۰ <u>,</u> ۸۹	-	1*	179,40	٣,٠٢٩	معادلهی مونود	
• _/ AV	-	Y×1.	179,4.9	٣,• ٢٩٢	بازدارندگی یون فریک (معادلهی گومز) 	
•,94	YOAV	-	۲۰۴٫۳	۴,۸	بازدارندگی یون فرو (معادلهی اندروز)	
R	K_{1}^{*} (mg lit ⁻¹)	K ₁ (-)	$K_s (mg lit^{-1})$	$\mu_{max}(day^{-1})$	نرخ هوادهی ۱۵ ۰٫۰۰ متر بر ثانیه	
٠٫٨٩	-	-	۵۵٫۵۶	1,1441	معادلهي مونود	
۰,۸۶	-	4/32×118	30,098	1,1441	بازدارندگی یون فریک (معادلهی گومز)	
•,94	1977	-	100,4	۴۸	بازدارندگی یون فرو (معادلهی اندروز)	
ربی +10 ⁷³ 4.5	تج نرخ هوادهی ۱۵			میر میر میر میر مسلول بر میر می ع	تجربی تجربی مدل نرخ هوادهی ۱٬۰۱ متر بر ثانیه	/•
2- 	ب الم	10 12	- - - 14 (2)	2 1.5 1.5 0.5 0 0	رمان (روز)	
5 × 10 ¹³ 4.5 4.5 4.5 4.5 5 5 5 2.5 5 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	نرخ هوادهی ۲۰۱۹	· / · ·		⁵ ×10 ¹³ 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 7 2.5 1.5 1.5	تجربی مدل نرخ هوادهی ۰٬۰۰۸۵ متر بر ثانیه	/.
	4 6 B	10 12	14	0.5	2 4 6 8 10 12 زمان (روز)	

جدول ۵. مقدارهای ثابت به دست آمده از معادلههای (۶) تا (۸) و دادههای آزمایشگاه



مرجعها

- 1. A. Rubio, F.J. Garcia Frutos, Bioleaching capacity of an extremely thermophile culture for chalcopyritic materials, Minerals Engineering, 15 (2002) 689-694.
- 2. A.D. Agate, Recent advances in microbial mining, World Journal of Microbiology and Biotechnology, 12 (1996) 487-495.
- K. Bosecker, Bioleaching: metal solubilization by microorganisms, FEMS Microbiology Reviews, 20 (1997) 591-604.
- 4. D.E. Rawlings, S. Silver, Mining with microbes, Nat Biotechnol. 13 (1995) 773-778.
- 5. W. Krebs, C. Brombacher, P. Bosshard, Microbial recovery of metals from solids, FEMS Microbiology Reviews, 20 (1997) 605-617.
- 6. J.A. Munoz, F. Gonzalez, M.L. Blazquez, Study of the bioleaching of a Spanish uranium ore, Part I: a review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores, Hydrometallurgy, 38 (1995) 39-57.
- J. Hadaddin, C. Dagot, M. Fick, Models of bacterial leaching, Enzyme Microbial Technology, 17 (1995) 290-305.
- S.R. Shrihari, R. Kumar, K. Gandhi, Modelling of Fe²⁺ oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*, Applied Microbiology and Biotechnology, 33 (1990) 524-528.
- 9. F. Crundwell, The kinetics of the chemiosmotic proton circuit of the iron-oxiding bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*, Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 43 (1997) 115-122.
- 10.M. Nemati, S. Harrison, C. Hansford, Biological oxidation of ferrous sulphate by *Thiobacillus ferrooxidans*: a review of kinetic aspects, Biochem. Eng. J. 11 (1998) 71-90.
- 11.D.T. Lacey, F. Lawson, Kinetics of the liquidphase oxidation of acid ferrous sulfate by the bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*, Biotechnol. Bioeng, 12 (1970) 29-50.
- 12.D.G. MacDonald, R.H. Clark, The oxidation of aqueous ferrous sulphate by *Thiobacillus ferrooxidans*, Can. J. Chem. Eng. 48 (1970) 669-676.

٤. نتیجه گیری

سینتیک اکسایش یون فرو در رآکتور هوا- بالارونده با حلقهی جریان داخلی در فرایند فروشویی زیستی اورانیم با باکتری *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان* در نرخهای هوادهی ۲۰،۰۶۵ نتایج نشان داد که بیش ترین میزان بازیابی اورانیم با باکتری، ۹۷/۱/ و بدون باکتری ٪۲۱، و کم ترین میزان بازیابی اورانیم با باکتری ٪۸۰ و بدون باکتری ٪۲۱، و کم ترین میزان بازیابی اورانیم با باکتری ٪۸۰ و بدون باکتری ٪۲۱، او در نتایج برازش دادههای تجربی با معادلهی مونود و معادلههای بازدارندگی محصول نشان داد که پیش بینی مدل اصلاح شده برای بازدارندگی یون فرو تطابق بیش تری با دادههای تجربی دارد و پیش بینی مدل مونود از مدل بازدارندگی محصول بهتر است. مقادیر ^۲ R برای مدل بازدارندگی یون فرو در نرخهای هوادهی ۲۰٬۰۰۵، ۹۸، ۱۹، ۱۰٫۰۰ و ۲۰٬۰۰۸ ، متر بر ثانیه، به تر تیب، برابر با ۹۸، ۱۹٬۰۰۰

نشانهها

نشانه	توضيحات
μ	نرخ رشد ویژهی باکتری
μ^{max}	بیش ترین نرخ رشد ویژهی باکتری
$\mathbf{K}_{\mathbf{v}}^{*}$ $\mathbf{K}_{\mathbf{v}}$ $\mathbf{K}_{\mathbf{s}}$ $\mathbf{K}_{\mathbf{m}}$	ضریبهای به کار رفته در مدلها
Х	غلظت سلولى
[Fe ^{*+}]	غلظت يون فرو
[Fe ^{*+}]	غلظت يون فريك
Y	ضريب بهره
r _x	نرخ غلظت سلولي
r _s	نرخ مادہی اصلی
Y _{sx}	ضریب بهرهی باکتری در مادهی اصلی
R	بازيابي اورانيم
Eh	پتانسیل اکسایش – کاهش

پینوشتھا

****. Acidithiobacillus ferrooxidans

- ۲. Substrate
- ۳. Yield
- ۴. Monod

Ð

- 13.M.S. Liu, R.M.R. Branion, D.W. Duncan, The effects of ferrous iron, dissolved oxygen, and inert solids concentrations on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans*, Can. J. Chem. Eng. 66 (1988) 445-451.
- 14.J.M. Gomez, I. Caro, Kinetic equation for growth of *Thiobacillus ferrooxidans* in submerged culture over aqueous ferrous sulphate solutions, J. Biotechnol, 48 (1996) 147-52.
- 15.S.M. Mousavi, S. Yaghmaei, A. Jafari, Influence of process variables on biooxidation of ferrous sulfate by an indigenous *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Part I: Flask experiments, Fuel, 85 (2006) 2555-2560.
- 16.G. Cabrera, J.M. Gomez, D. Cantero, Kinetic study of ferrous sulphate oxidation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the presence of heavy metal ions, Enzyme and Microbial Technology, 36 (2004) 301-306.
- 17.P. Kalin, K. Dimitre, Batch kinetics of ferrous iron oxidation by Leptospirillum ferriphilum at moderate to high total iron concentration, Biochemical Engineering Journal, 50 (2010) 54-62.
- 18.S. Pablo, A. Victor, Kinetics of ferrous iron oxidation by Sulfobacillus thermosulfidooxidans, Biochemical Engineering Journal, 51 (2010) 194-197.
- 19.J.F. Braddock, H.V. Luong, E.J. Brown, Growth kinetics of *Thiobacillus ferrooxidans* isolated from arsenic mine drainage, Appl. Environ. Microbiol, 48 (1984) 48-55.
- 20.J. Manuel Gomez, D. Cantero, Modelling of Ferrous Sulphate Oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* in Discontinuous Culture: Influence of Temperature, pH and Agitation Rate, Journal of fermentation and bio engineering, 86 (1998) 79-83.
- 21.Y. Chisti, U.J. Jauregui-Haza, Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors, Biochem. Eng. J. 10 (2002) 143-153.
- 22.P. Zhou, J. He, Y. Qian, Biofilm airlift suspension reactor treatment of domestic wastewater, Water Air Soil Pollute, 144 (2003) 81-100.
- 23.C. Vial, S. Poncin, G. Wild, Experimental and theoretical analysis of the hydrodynamics in the riser of an external loop airlift reactor, Chem. Eng. Sci. 57 (2002) 4745-4762.
- 24.J.C. Merchuk, M. Gluz, Bioreactors, Airlift Reactors, In the Encyclopedia of Bioprocess Technology (Flickinger. M.C. and S.W. Drew, editors). 1, John Wiley & Sons Inc., USA (1999) 320-353.

- 25.Y. Chisti, Airlift Bioreactors, Elsevier Applied Science, London (1989).
- 26.Y. Chisti, M. Moo-Young, Airlift Reactors: Characteristics, Applications and Design, Chem. Eng. Commun, 60 (1989) 195-242.
- 27.M. Moo-Young, Y. Chisti, Bioreactor Design for Aeration of Shear Sensitive Fermentation Cultures, Proceeding of 8 Int. Biotechnol Symp, (1988) 454-466.
- 28.Y. Chisti, M. Moo-Young, Improve the Performance of Airlift Reactors, Chem. Eng. Progress, 89 (1993) 38-45.
- 29.F. Benyahia, L. Jones, Scale Effects on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics of External Loop Airlift Reactors, J. Chem. Technol. Biotechnol, 69 (1997) 301-308.
- 30.M. Tobajas, M.H. Siegel, Influence of Geometry and Solid Concentration on the Hydrodynamics and Mass Transfer of a Rectangular Airlift Reactor for Marine Sediment and Soil Bioremediation, Can. J. Chem. Eng. 77 (1999) 660-669.
- 31.S.M. Mousavi, S. Yaghmaei, M. Vossoughi, A. Jafari, Comparison of bioleaching ability of two native *mesophilic* and *thermophilic* bacteria on copper recovery from chalcopyrite concentrate in an Air-lift bioreactor, Hydrometallurgy, 80 (2005) 139-144.
- 32.S. Shaoyuan, Z. Fang, Bioleaching of marmatite flotation concentrate by adapted mixed *mesoacidophilic* cultures in an Air-lift reactor, Int. J. Miner. Process, 76 (2004) 3-12.
- 33.D. Fang, L. Zhou, Enhanced Cr bioleaching efficiency from tannery sludge with co inoculation of *Acidithiobacillus thiooxidans* TS6 and *Brettanomyces* B65 in an Air-lift reactor, Chemosphere, 69 (2007) 303-310.
- 34.S. Chen, J. Lin, Bioleaching of heavy metals from contaminated sediment by indigenous sulfur-oxidizing bacteria in an air-lift bioreactor: effects of sulfur concentration, Water Research, 38 (2004) 3205-3214.
- 35.R.M. Atlas, Handbook of media for environmental microbiology, second edition, Taylor and Francis (2005).
- 36.ASTM, D4454 Standard test method for simulataneous enumeration of total and respiring in aquatic systems by microscopy annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, 11.02 (2009).