

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره نه، آذر ماه ۹۸

## مقایسه عملکرد راکتورهای ایرلیفت جریان داخلی و خارجی جهت تصفیه آب به

### کمک لجن فعال

محمد علی صالحی<sup>۱</sup>

[masalehi@guilan.ac.ir](mailto:masalehi@guilan.ac.ir)

نسرین حکیم قیاسی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۶/۸/۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۱۳

#### چکیده

**زمینه و هدف:** در این تحقیق اثر شرایط عملیاتی و پارامترهای طراحی مانند شدت هوادهی، نسبت سطح ناودان به بالارونده و خصوصیات مایع بر هیدرودینامیک و ضریب حجمی انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت سه فازی بررسی شده است.

**روش بررسی:** آزمایش‌ها در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۰/۱۴ و راکتورهای ایرلیفت داخلی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۰/۳۶ و ۱ انجام شده است. هوا و آب به ترتیب به عنوان فاز گاز و مایع و لجن فعال به عنوان فاز جامد استفاده شده‌اند.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد سرعت چرخش مایع، نگهداشت گاز و ضریب حجمی انتقال جرم با افزایش سرعت حجمی گاز، کاهش غلظت لجن و کاهش نسبت سطح ناودان به بالا رونده، افزایش یافته است. بیشترین مقدار نگهداشت گاز برابر با ۰/۱۷۸ در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی با غلظت ۱٪ وزنی لجن فعال در سرعت حجمی گاز ۰/۲۴ متر بر ثانیه مشاهده شد. مدلی برای پیش بینی اثر غلظت لجن فعال، سرعت حجمی گاز و نسب سطح ناودان به بالارونده بر انتقال جرم راکتورهای ایرلیفت لجن فعال ارائه شده است که با نتایج تجربی تطابق خوبی دارند.

**بحث و نتیجه گیری:** به‌طور کلی بررسی عملکرد راکتورهای ایرلیفت داخلی و راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه خارجی در شرایط مختلف غلظت و سرعت حجمی نشان داد راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی دارای عملکردی بهتر در مقایسه با راکتور ایرلیفت داخلی است.

**واژه‌های کلیدی:** راکتور ایرلیفت، نگهداشت گاز، انتقال جرم، سرعت حجمی گاز.

۱- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران \* (مسئول مکاتبات)

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

## Comparison of the Performance of Internal and External Loop Air-lift Reactors for Water Treatment by Activated Sludge

Mohammad Ali Salehi<sup>1\*</sup>

[masalehi@guilan.ac.ir](mailto:masalehi@guilan.ac.ir)

Nasrin Hakinghiasi<sup>2</sup>

Admission Date: October 25, 2017

Date Received: December 3, 2016

### Abstract

**Background and Objective:** In This study the impacts of operating conditions such as aeration rate, the downcomer-to-riser cross-sectional area ratio ( $A_d/A_r$ ), and liquid phase properties on the hydrodynamics and volumetric mass transfer coefficient in three-phase airlift reactors was investigated.

**Method:** Experiments were conducted in external loop air-lift reactor with downcomer to riser cross-sectional area ratio ( $A_D/A_R=0.14$ ) and internal air-lift reactors with downcomer to riser cross-sectional area ratios 0.36 and 1. Air and Water were used as gas and liquid phases, respectively and activated sludge is used as the solid phase.

**Findings:** The liquid circulation velocity, gas holdup and mass transfer coefficient increased with an increase in the superficial gas velocity, decrease the sludge concentration and decrease downcomer to riser cross-sectional area ratio. The maximum amount of gas hold up, 0.178 in external air-lift reactor with 1%(w/w) activated sludge in superficial gas velocity 0.24(m/s) was observed. A model to predict the effect of activated sludge concentration, the superficial gas velocity and the downcomer-to-riser cross-sectional area ratio on the mass transfer activated sludge airlift reactors provided which with the experimental results are in good agreement.

**Discussion and Conclusion:** The evaluation of internal and external reactors performance at different concentration and superficial gas velocity show that the air-lift reactor with external loop has better performance in comparison with internal airlift reactors.

**Keywords:** Airlift reactor, Gas holdup, Mass transfer, superficial gas velocity

---

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran\*(Corresponding Authours)

2- M.Sc. in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

## مقدمه

هیدرودینامیک بیوراکتورهای ایرلیفت انجام شده این نتیجه بدست آمده است که با افزایش سرعت حجمی گاز، نگهداشت گاز و ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد (۴،۶) در سال ۲۰۰۵ حسین تیک اختری و گوردون، هیدرودینامیک و انتقال جرم را در یک راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی در دو حالت با بستر و بدون بستر بررسی و مقایسه کردند. نتایج نشان داد اگر چه با افزایش سرعت حجمی گاز در هر دو حالت با بستر و بدون بستر نگهداشت گاز، سرعت چرخش مایع و ضریب کلی انتقال جرم افزایش می‌یابد اما افزایش سرعت چرخش مایع در حالت بدون بستر بیش تر می‌باشد در حالی که راکتور با بستر پر شده دارای ماندگی گاز بالاتری در مقایسه با حالت بدون بستر است (۷).

در سال ۲۰۰۹ فی یانگ و همکاران خصوصیات رئولوژی لجن فعال را در راکتورهای ایرلیفت غشائی بررسی نمودند و بیان کردند که گرانیروی لجن فعال نقش مهمی در انتقال اکسیژن و جرم دارد. به طوری که گرانیروی با افزایش غلظت لجن فعال به صورت نمایی افزایش و با افزایش سرعت برشی و دما به صورت نمایی کاهش یافته است آن‌ها همچنین بیان کردند که استفاده از بیوراکتورهای ایرلیفت غشائی دارای مزایایی چون افزایش شدت هوادهی، کاهش گرانیروی و در نتیجه افزایش انتقال جرم در مقایسه با راکتورهای معمولی می‌باشد (۸). در سال ۲۰۱۳ تاویل و همکاران اثر الکترولیت را بر انتقال جرم راکتورهای ایرلیفت با لوله داخلی بررسی نمودند و مشاهده کردند که با افزایش غلظت نمک، بهم پیوستگی حباب‌ها کم تر شده در نتیجه  $K_L a$  افزایش یافته است (۹). به طور کلی نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد خصوصیات فیزیکی مایع و جامد، خصوصیات جریان گاز، شامل سرعت حجمی گاز، اندازه‌ی حباب گاز و همچنین متغیرهای عملیاتی مانند دبی گاز بر عملکرد بیوراکتور ایرلیفت موثر می‌باشند.

در این تحقیق، سه پارامتر اصلی در عملکرد راکتورهای ایرلیفت شامل نگهداشت گاز، ضریب حجمی انتقال جرم و سرعت چرخش مایع اندازه گیری شده و اثر سرعت حجمی گاز و غلظت ذرات جامد بر هر یک از پارامترهای مذکور در دو نوع

یکی از مهم‌ترین تجهیزاتی که در فرآیندهای تولید مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، راکتورها و یا به عبارتی واکنش‌گاه می‌باشند در گذشته معمولاً از انواع راکتورهای هم‌زن‌دار در فرآیندهای مختلف استفاده می‌شد اما وجود عواملی چون مشکل ساخت، هزینه بالای مربوط به انرژی و خنک کردن آب و همچنین تنش برشی بالا، کاربرد راکتورهای هم‌زن‌دار مکانیکی را محدود کرد. به علاوه با توجه به این که در صنعت، افزایش ظرفیت تولید از یک طرف و کاهش هزینه‌ها از طرف دیگر مد نظر می‌باشد لذا به راکتورهایی با حجم بالا نیاز است بنابراین با سیر تکاملی راکتورها، مدل‌های جدیدتر مانند راکتورهای ستونی حبابی، راکتورهای ایرلیفت با حلقه جریان داخلی (IALR) و یا خارجی (EALR) جایگزین مدل‌های ابتدایی شدند (۱). ایرلیفت‌ها مانند ستون‌های حبابی، راکتورهایی هستند که در آن‌ها عمل اختلاط در اثر حرکت حباب‌های هوا درون مایع صورت می‌گیرد که البته در راکتورهای ایرلیفت علاوه بر حرکت حباب درون مایع، حرکت چرخشی جریان برگشتی صورت می‌گیرد که به عمل اختلاط کمک بیشتری می‌کند. راکتورهای ایرلیفت، اصلاح شده ستون‌های حبابی هستند و در دهه اخیر در فرآیندهای بیوتکنولوژی از جمله در تخمیرهای هوازی برای تولید انواع محصولات غذایی، عملیات فاضلاب‌ها و عملیات‌های مشابه دیگر به طور گسترده استفاده شده اند. این نوع راکتورها برای فرآیندهایی که در آن توزیع یکنواخت و سریع اجزای واکنش دهنده لازم و ضروری می‌شود و همچنین برای سیستم‌های چند فاز (مایع-گاز-جامد) که به انتقال جرم و حرارت زیاد نیاز دارد مناسب می‌باشند (۲). در سال ۱۹۸۱ مالفت و همکاران نشان دادند تولید یک نوع باکتری کپک رشته‌ای ۱۸٪ وزنی در یک راکتور ایرلیفت، بیش تر از راکتور هم‌زن‌دار می‌باشد. این افزایش تولید در راکتور ایرلیفت نسبت به راکتور هم‌زن‌دار، در اثر ۵۰٪ کاهش در انرژی ورودی که به ۵۰٪ کاهش هزینه برای تولید بیومس در راکتور ایرلیفت منتهی شد، به دست آمده است (۳). در تحقیقات مختلفی که در زمینه

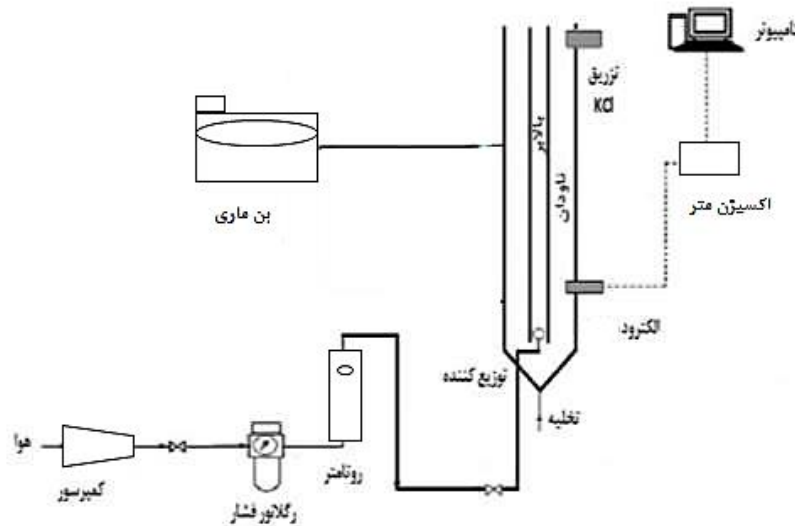
۸۰ و ۳۰ میلی‌متر بود. به منظور جلوگیری از ته نشین شدن مواد انتهایی راکتور تقریباً مخروطی شکل ساخته شده است. در این پژوهش به منظور پراکنده کردن هوا از توزیع کننده آنتنی استفاده شد. در این نوع توزیع کننده سوراخ‌ها در یک سطح تقریباً دایره ای شکل قرار دارند که باعث می‌شود هوا در کل راکتور به طور یکنواخت پخش شده و اختلاط بهتر صورت گیرد. راکتور مورد استفاده به همراه تجهیزات در شکل (۱) نشان داده شده است. اتخاذ تدابیر احتیاطی سازگاری با شرایط اقلیم آینده موثر باشد.

راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی و داخلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

### روش بررسی

### شرح دستگاه

در این تحقیق برای بررسی نگهداشت گاز، سرعت چرخش مایع و ضریب حجمی انتقال جرم در سیستم هوا، آب و لجن فعال (به ترتیب فاز گاز، مایع و جامد) بیوراکتور ایرلیفت با حلقه جریان خارجی استفاده شد. بیوراکتور یک راکتور شیشه‌ای دو جداره با ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر، ارتفاع بالا رونده ۷۴۰ میلی‌متر، ارتفاع ناودان ۵۵۰ میلی‌متر و قطر بالا رونده و ناودان به ترتیب



شکل ۱- شمای راکتور و تجهیزات مورد استفاده

Figure 1. Reactor schematic and equipment

ناودان در داخل راکتور می‌شوند. بخش بالا رونده قسمت بالای هدر بخش کن هوا را گویند که در آن جریان مایع رو به بالا است و بخش ناودان بخش خارجی لوله داخلی است که در آن جریان مایع رو به پایین می‌باشد و در واقع در راکتورهای ایرلیفت داخلی هردو بخش بالا رونده و ناودان در داخل راکتور می‌باشند. در این پژوهش به منظور کاهش خطای اندازه گیری آزمایش‌ها دو بار تکرار شد.

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به راکتور ایرلیفت داخلی، با توجه به در دسترس بودن یک نوع راکتور، بخش خارجی راکتور موجود را مسدود کرده و سپس مطابق شکل (۲) برای بوجود آوردن دو بخش بالا رونده و ناودان داخل راکتور، لوله‌های داخلی با فاصله‌ی ۷۰ میلی‌متر از توزیع‌کننده توسط پایه و گیره‌ی فلزی درون راکتور قرار گرفته و آزمایش‌های لازم انجام شد. لوله‌های داخلی باعث بوجود آمدن دو بخش بالا رونده و

۱۰-۴۰ لیتر بر دقیقه تغییر داده و هیدرودینامیک و انتقال جرم تمامی آزمایش‌ها در این محدوده از دبی، مورد بررسی قرار گرفت. سپس آزمایش‌ها، مربوط به راکتورهای ایرلیفت داخلی لجن فعال با قطرهای ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر و نسبت سطح ناودان به بالارونده ۱ و ۰/۳۶ انجام شدند.

اندازه‌گیری هیدرودینامیک و ضریب حجمی انتقال جرم

### سرعت حجمی گاز

سرعت حجمی گاز بر مبنای سطح توزیع کننده، مطابق رابطه (۱) محاسبه شد (۱۰)

$$U_G = \frac{R_G}{A_G} \quad (1)$$

که در این رابطه  $A_G (m^2)$  سطح مقطع توزیع کننده،  $R_G (\frac{m^3}{s})$  شدت جریان هوا و  $U_G (\frac{m}{s})$  سرعت حجمی گاز می‌باشند.

### نگهداشت گاز

در این آزمایش‌ها، منظور از نگهداشت گاز، نگهداشت کلی گاز می‌باشد که بوسیله روش انبساط حجمی تعیین می‌شود. در واقع نگهداشت گاز به عنوان درصد افزایش حجم مایع هوادهی شده در مقایسه با حجم مایع هوادهی نشده بیان می‌شود. بدین صورت که ابتدا ارتفاع مایع بدون هوادهی توسط متر ثبت می‌شود، سپس زمانی که حباب‌های هوا با دبی مشخص از طریق توزیع کننده وارد راکتور شد، حجم مایع افزایش می‌یابد. در این هنگام با مشاهده افزایش سطح مایع، ارتفاع مایع هوادهی شده را ثبت کرده و با استفاده از رابطه (۲) نگهداشت کلی گاز به دست خواهد آمد (۱۰، ۱۱). در این پژوهش به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری آزمایش‌ها دو بار تکرار شد. در تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع مایع بدون هوادهی ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

$$\varepsilon_g = \frac{H_{LG} - H_L}{H_{LG}} \quad (2)$$

$\varepsilon_g$  نگهداشت کلی گاز،  $H_L$  ارتفاع مایع بدون هوادهی و  $H_{LG}$  ارتفاع مایع هوادهی شده می‌باشند.



شکل ۲-لوله‌های داخلی با پایه فلزی  
Figure 2. Internal pipe with metal leg

### مواد

به منظور بررسی اثر تغییر غلظت لجن فعال (۱٪، ۲٪ و ۳٪) به عنوان فاز جامد، بر هیدرودینامیک و انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت، لجن مورد نیاز از واحد لجن فعال تصفیه خانه رشت (MLSS=2000 mg/l، SVI=75)، تهیه شد. جهت جذب اکسیژن از مایع و ایجاد محیط کاملاً عاری از اکسیژن نیز از سولفیت سدیم با فرمول شیمیایی  $Na_2SO_3$  (تهیه شده از شرکت مرک آلمان) استفاده گردید. به طوری که در هر شدت جریان بعد از رسیدن به حالت پایدار، هوادهی متوقف شده و مایع با استفاده از نمک سولفیت سدیم که اکسیژن موجود را مصرف کرده عاری از اکسیژن شده است و مجدداً برای شدت جریان بعدی، هوادهی شروع می‌شود و این مراحل تا پایان آزمایش‌ها، برای هر شدت جریان انجام شد.

### روش آزمایش

به منظور بررسی پارامترهای مختلف موثر بر هیدرودینامیک و انتقال جرم، آزمایش‌ها در دو دسته‌ی کلی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. ابتدا آزمایش‌ها در یک راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۰/۱۴ و با غلظت‌های مختلف ۱٪، ۲٪ و ۳٪ لجن فعال به عنوان فاز جامد انجام شد. راکتور حاضر، به حجم ۳۲۰۰ میلی‌لیتر از آب مقطر پر شده و هوا از انتهای بخش بالارونده به داخل راکتور توزیع شد. جهت بررسی سرعت حجمی گاز بر هیدرودینامیک و انتقال جرم، با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی، دبی گاز را از

## سرعت چرخش مایع

برای اندازه گیری سرعت مایع در بخش ناودان در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی لجن فعال، از محلول رنگی پرمنگنات پتاسیم ۰/۱ مولار استفاده شده است به طوری که در هر شدت جریان، ۰/۴ میلی لیتر از محلول پرمنگنات از بخش حلقه خارجی به راکتور تزریق شده است. سرعت مایع از طریق مدت زمانی که محلول پرمنگنات فاصله‌ی بین دو نقطه تعیین شده در ناودان به طول ۴۰۰ میلی متر را طی می کند طبق رابطه (۳) اندازه گیری می شود (۷، ۱۲). به منظور به حداقل رساندن خطای مربوط به اندازه گیری آزمایش‌ها با دو بار تکرار انجام شد.

$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (3)$$

در این رابطه  $U_{Ld}$  سرعت چرخش مایع در ناودان،  $L_d$  طول تعیین شده در ناودان و  $t_d$  مدت زمان لازم برای طی کردن محلول رنگی پرمنگنات در طول  $L_d$  می باشد.

ارتباط بین سرعت مایع در بالا رونده و ناودان در رابطه (۴) نشان داده شده است (۱۳).

$$U_{Lr} A_r = U_{Ld} A_d \quad (4)$$

به ترتیب  $U_{Ld}$  و  $U_{Lr}$  سرعت مایع در بالا رونده و ناودان و  $A_d$  و  $A_r$  به ترتیب سطح مقطع بخش بالا رونده و ناودان می باشد.

## ضریب حجمی انتقال جرم

ضریب حجمی انتقال جرم، از طریق روش دینامیکی اندازه گیری شد. به این ترتیب که با استفاده از یک اکسیژن متر لوترون (ساخت تایوان، مدل DO-5510) که بخش الکتروود آن از بالای ستون ۷۰ میلی متر زیر سطح آب قرار داشت و بخش حسگر آن از طریق کابل به کامپیوتر متصل شده بود، با استفاده از نرم افزار، غلظت اکسیژن هر ۵ ثانیه تا زمانیکه به حالت پایدار برسد گزارش گردید (زمان پاسخ الکتروود کم تر از ۱۰ ثانیه بود). سپس از طریق شیب خط حاصل از رسم نمودار  $\ln(C_L^* - C_L)$  بر حسب زمان، در هر شدت جریان ضریب حجمی کلی انتقال جرم بدست آمد (۱۰، ۱۴). مدت زمان هر

آزمایش ۳۰-۱۰ دقیقه بود. به منظور جلوگیری از آسیب رساندن به غشای الکتروود از طرف ذرات جامد مورد استفاده، پرده‌ی غشایی آن، با یک تکه پارچه‌ی توری پوشانده شده و سپس الکتروود زیر سطح آب قرار گرفت. قابل توجه است که قبل از شروع هر آزمایش، ابتدا باید اکسیژن موجود را تخلیه کرد که این عمل با استفاده از نمک سولفیت سدیم صورت گرفت (۱۰، ۱۵) در هر شدت جریان آب را تخلیه کرده و مجدداً بیوراکتور، به حجم ۳۲۰۰ میلی لیتر از آب مقطر پر شد و لجن تازه به راکتور اضافه گردید. بدین صورت تأثیر اضافه نمودن ماده شیمیایی برهیدرودینامیک و انتقال جرم در راکتور محدود گردید (۱۵).

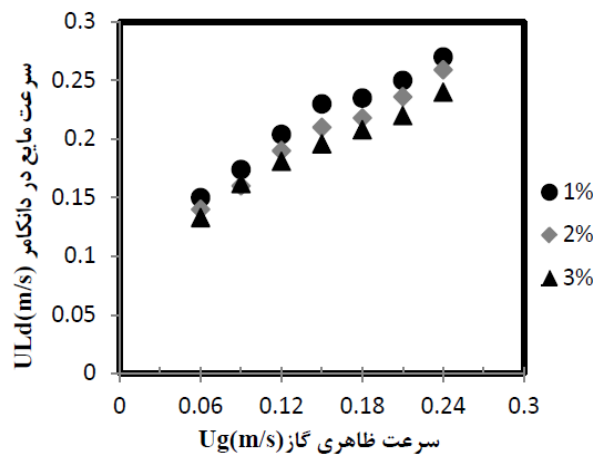
## یافته ها

## بررسی اثر سرعت گاز بر میزان سرعت مایع در راکتور

## ایرلیفت دارای حلقه خارجی

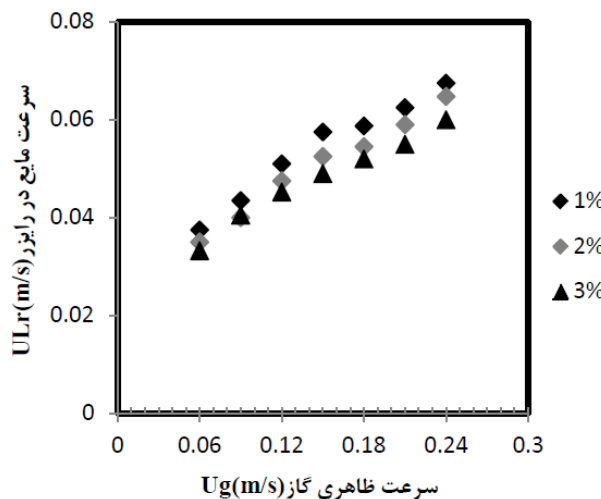
اثر سرعت گاز بر میزان سرعت مایع در سه غلظت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ در دو بخش بالا رونده و ناودان به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) بررسی شده است. نیرو محرکه لازم برای چرخش مایع، توسط اختلاف دانسیته بین بخش بالا رونده و ناودان بوجود می آید که از طریق نگهداشت گاز تعیین می شود بدین صورت که اختلاف نگهداشت گاز نیرو محرکه لازم برای چرخش مایع را ایجاد می نماید (۱۷). همان طور که در هر دو شکل (۳ و ۴) نشان داده شده است با افزایش سرعت حجمی در یک غلظت ثابت، سرعت چرخش مایع افزایش یافته است. با افزایش غلظت لجن نیز، نیروی اصطکاک بین ذرات افزایش یافته در نتیجه سرعت چرخش مایع کاهش می یابد.

مقایسه‌ی سرعت چرخش مایع در دو بخش ناودان و بالا رونده نیز نشان می دهد، با توجه به این که سطح مقطع بالا رونده ۴ برابر سطح مقطع ناودان است بنابراین سرعت حرکت مایع در بالا رونده ۱/۴ سرعت حرکت مایع در ناودان می باشد. در رژیم جریان حبابی، حباب‌های هوا فقط در بخش بالا رونده قرار دارند و با تغییر رژیم جریان، تعدادی از حباب‌ها به بخش ناودان حرکت می کنند و سبب می شود که سرعت چرخش مایع در ناودان با شیب کندتری افزایش یابد.



شکل ۳- بررسی اثر سرعت حجمی گاز بر میزان سرعت مایع در بخش ناودان در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی لجن فعال

Figure3. Study the effect of gas superficial velocity on the liquid velocity circulation in the downcomer of activated sludge external airlift reactor



شکل ۴- بررسی اثر سرعت حجمی گاز بر میزان سرعت مایع در بخش بالا رونده در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی لجن فعال

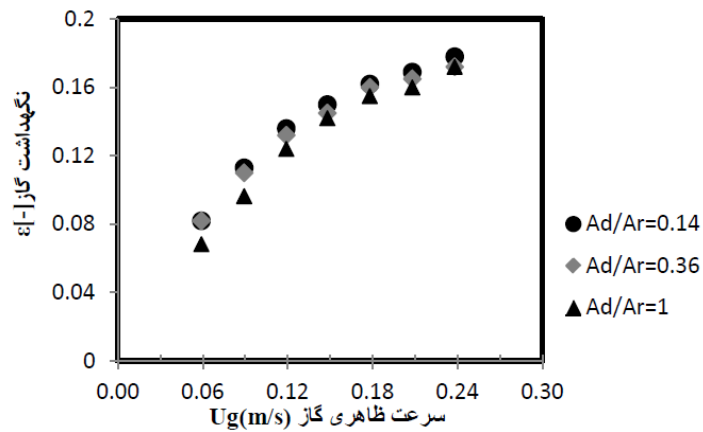
Figure4. Study the effect of gas superficial velocity on the liquid velocity circulation in the riser of activated sludge external airlift reactor

ایرلیفت داخلی (  $\frac{A_d}{A_r} = 0.36$ ,  $\frac{A_d}{A_r} = 1$  ) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان نگهداشت گاز با افزایش سرعت حجمی، کاهش غلظت لجن فعال و کاهش سطح ناودان به بالا رونده، افزایش می‌یابد.

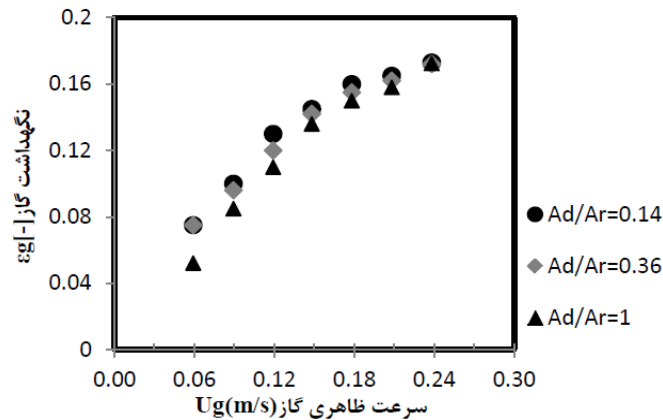
مقایسه اثر سرعت حجمی گاز بر میزان نگهداشت گاز در راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه‌های داخلی و خارجی شکل ۵ (الف تا ج) به ترتیب اثر سرعت حجمی گاز بر میزان نگهداشت گاز را در سه غلظت ۱٪، ۲٪ و ۳٪ در دو راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی (  $\frac{A_d}{A_r} = 0.14$  ) و راکتور

گاز در بالارونده کم تر خواهد شد. با افزایش این پارامتر، سرعت چرخش مایع افزایش می یابد. دلیل این روند صعودی در سرعت مایع ناشی از کاهش مقاومت در مسیر جریان می باشد (۱۸). در هر سه نوع راکتور یک رابطه ی خطی بین سرعت حجمی و نگهداشت گاز در سرعت های گازی بین ۰/۰۶-۰/۱۵ متر بر ثانیه و یک رابطه توانی در سرعت های بالاتر از ۰/۱۵ متر بر ثانیه مشاهده شده است

همان طور که در اشکال ۵-الف تا ۵-ج نشان داده شده است در هر سه غلظت لجن فعال، بالاترین مقدار نگهداشت گاز در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی و کم ترین مقدار در راکتور ایرلیفت داخلی با  $\frac{A_d}{A_r} = 1$  مشاهده شده است. زیرا هرچه سطح مقطع بخش ناودان بیشتر باشد سرعت بالا رفتن مایع به دلیل سطح مقطع کوچک بالارونده بیشتر شده و حباب های هوا را با خود به بخش ناودان می کشاند و در نتیجه زمان اقامت

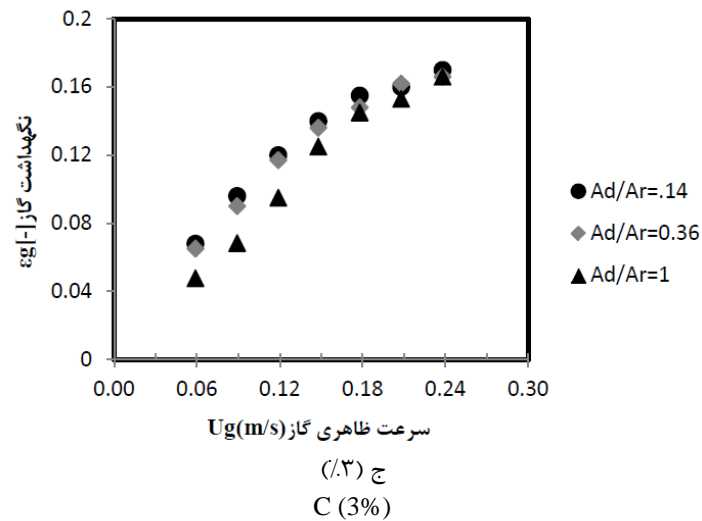


الف (۱)  
A (1%)



ب (۲)  
B (2%)





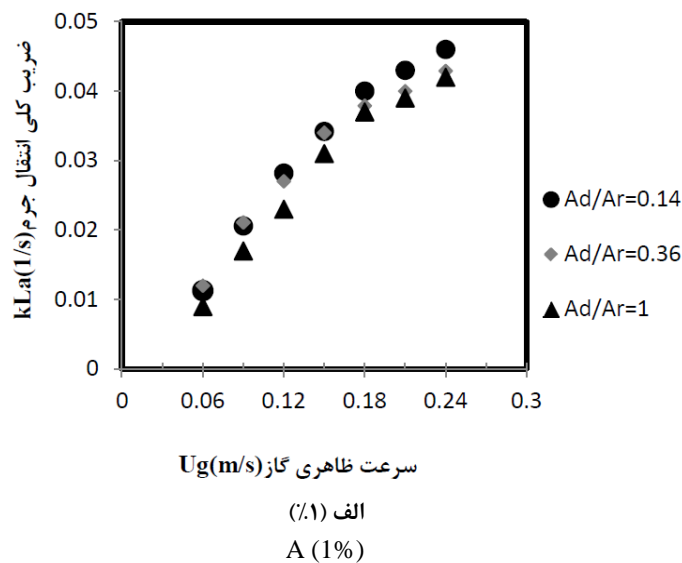
شکل ۵- اثر سرعت حجمی گاز بر میزان نگهداشت گاز در راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه خارجی و داخلی در غلظت‌های

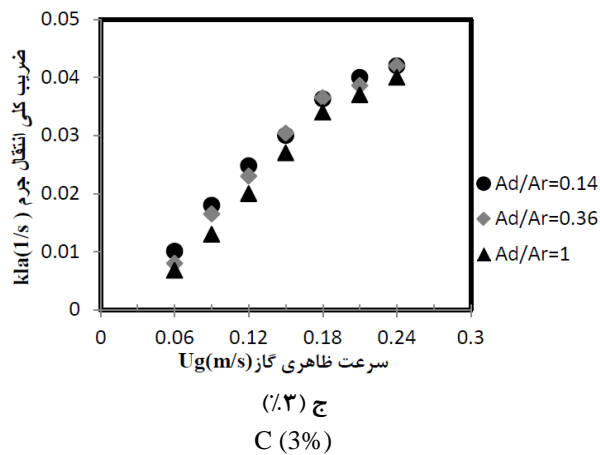
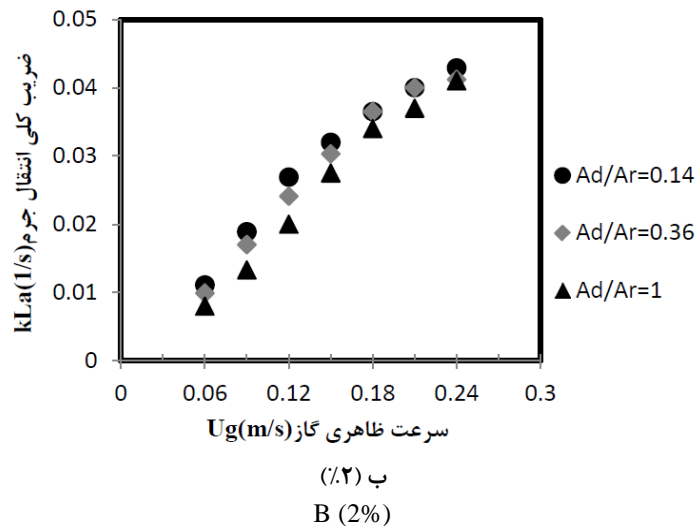
الف: ۱٪، ب: ۲٪، ج: ۳٪

Figure 5. The effect of superficial gas velocity on the gas holdup in internal and external airlift reactors at concentration of A: 1%, B; 2%, C: 3%

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت حجمی گاز و کاهش غلظت لجن در هر سه راکتور، مقدار  $k_L a$  افزایش یافته است. مقایسه‌ی دو راکتور داخلی و خارجی نشان می‌دهد که میزان ضریب حجمی کلی انتقال جرم در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی به دلیل کوچک‌تر بودن سطح ناودان به بالا رونده و همچنین میزان اختلاط بهتر، بیش‌تر است.

مقایسه اثر سرعت گاز بر میزان ضریب کلی انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه‌های داخلی و خارجی شکل ۶ (الف تا ج) اثر سرعت حجمی گاز بر میزان ضریب کلی انتقال جرم را در سه غلظت ۱٪، ۲٪، و ۳٪ لجن فعال در دو راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی ( $\frac{A_d}{A_r} = 0.14$ ) و راکتور ایرلیفت داخلی ( $\frac{A_d}{A_r} = 1$  و  $\frac{A_d}{A_r} = 0.36$ ) نشان می‌دهد.





شکل ۶- اثر سرعت حجمی گاز بر میزان ضریب کلی انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه خارجی و داخلی در غلظت‌های الف: ۱٪، ب: ۲٪، ج: ۳٪

Figure 6. The effect of superficial gas velocity on mass transfer coefficient in internal and external airlift reactors at concentration of A: 1%, B: 2%, C: 3%

### نتیجه گیری

داخلی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۱ و ۰/۳۶ ارزیابی شد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت حجمی، در تمامی غلظت‌ها میزان نگهداشت گاز و ضریب حجمی کلی انتقال جرم افزایش یافته است. شدت تغییرات در سرعت‌های پایین به علت رژیم جریان یکنواخت با شیب تندتری صورت می‌گیرد. مقایسه‌ی نگهداشت گاز و ضریب حجمی کلی انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت داخلی و راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی نشان می‌دهد بیش‌ترین میزان نگهداشت گاز و ضریب حجمی کلی انتقال جرم در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی در سرعت حجمی ۰/۲۴ و با غلظت ۱٪ و زنی لجن فعال، و کم‌ترین میزان،

در این تحقیق در ابتدا، اثر سرعت حجمی گاز بر میزان چرخش مایع در راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی با غلظت‌های ۱٪، ۲٪ و ۳٪ لجن فعال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش سرعت حجمی، میزان چرخش مایع افزایش یافته است در حالی‌که با افزایش غلظت لجن فعال، نیروی اصطکاک بین ذرات بیش‌تر شده و در نتیجه سرعت چرخش مایع کاهش می‌یابد. در مرحله بعد، اثر سرعت حجمی گاز به ازای غلظت‌های مختلف لجن فعال، بر میزان نگهداشت گاز و ضریب حجمی انتقال جرم در راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه خارجی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۰/۱۴ و راکتور ایرلیفت

6. Jin, J. V. L. B., Doelle, H., and Yu., Q., 1999, The influence of geometry on hydrodynamic and mass transfer characteristics in an external airlift reactor for the cultivation of filamentous fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 15(1): p. 73-79.
7. Nikakhtari, H., and Hill, G. A., 2005, Hydrodynamic and oxygen mass transfer in an external loop airlift bioreactor with a packed bed. *Biochemical Engineering Journal*, 27: p. 138-145.
8. Yang, F., Bick, A., Shandalov, S., Brenner, A., and Oron, G., 2009, Yield stress and rheological characteristics of activated sludge in an airlift membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 334: p. 83-90. Persian
9. Al Taweel, A., Idhbeaa, A., and Ghanem, A., 2013, Effect of electrolytes on interphase mass transfer in microbubble-sparged airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, 100: p. 474-485.
10. Jin, B., Yin, P., and Lant, P., 2006, Hydrodynamics and mass transfer coefficient in three-phase air-lift reactors containing activated sludge. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45: p. 608-617.
11. Kilonzo, P. M., Margaritis, A., Bergougnou, M., Yu, J., and Ye, Q., 2007, Effects of geometrical design on hydrodynamic and mass transfer characteristics of a rectangular-column airlift bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 34: p. 279-288.
12. Krichnavaruk, S., and Pavasant, P., 2002, Analysis of gas-liquid mass transfer in an airlift contactor with

در راکتور ایرلیفت داخلی با نسبت سطح ناودان به بالارونده ۱ در سرعت حجمی  $0.06 \text{ m/s}$  و با غلظت ۳٪ وزنی لجن فعال است. به طور کلی بررسی عملکرد راکتورهای ایرلیفت داخلی و راکتورهای ایرلیفت دارای حلقه خارجی در شرایط مختلف غلظت و سرعت حجمی نشان داد راکتور ایرلیفت دارای حلقه خارجی دارای عملکردی بهتر در مقایسه با راکتور ایرلیفت داخلی است.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های مالی و خدماتی دانشکده فنی دانشگاه گیلان جهت انجام این پروژه قدردانی می‌گردد.

#### Reference

1. Chisti, M., & Moo-Young, M., 1987, Airlift reactors: characteristics , applications and design considerations. *Chemical Engineering Communication*,. 60: p. 195-242.
2. Bentifraouine, C., Xuereb, C., and Riba, J. P., 1997, An experimental study of the hydrodynamic characteristics of external loop airlift contactors. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 69: p. 345-349.
3. Malfait, J., Wilcox, D., Mercer, D., and Barker, L., 1981, Cultivation of a filamentous mold in a glass pilot-scale airlift fermentor. *Biotechnology and Bioengineering*, 23: p. 863-877.
4. Schlüter, S., Steiff, A., and Weinspach, P.M., 1995, Heat transfer in two-and three-phase bubble column reactors with internals. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 34: p. 157-172.
5. Merchuk, J. C., and Gluz, M., 1996, Airlift Reactors, in the encyclopedia of bioprocess technology, 38-54.

- cylindrical tanks. *Journal of Chemical Engineering*, 243: p. 51-59.
16. Yang, F., Bick, A., Shandalov, S., Brenner, A., and Oron, G., 2009, Yield stress and rheological characteristics of activated sludge in an airlift membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 334: p. 83-90.
  17. Petersen, E. E., and Margaritis, A., 2001, Hydrodynamic and mass transfer characteristics of three-phase gaslift bioreactor systems. *Critical Reviews in Biotechnology*, 21: p. 233-294.
  18. Siegel, M. H. H., Herskowitz, M., and Merchuk, M., 1989, Hydrodynamics and mass transfer in a three-phase air lift reactor. *Advances in Biotechnology Process*. p. 337-351.
  - perforated plates. *Chemical Engineering Journal*, 89: p. 203-211.
  13. Lu, W. J., Hwang, S. J., and Chang, C. M., 1995, Liquid velocity and gas holdup in three-phase internal loop airlift reactors with low-density particles. *Chemical Engineering Science*, 50: p. 1301-1310.
  14. Benyahia, F., and Jones, L., 1997, Scale effects on hydrodynamic and mass transfer characteristics of external loop airlift reactors. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, 69: p. 301-308.
  15. Pittoors, E., Guo, Y., and Van Hulle, S. W., 2014, Oxygen transfer model development based on activated sludge and clean water in diffused aerated