انتقال اکسیژن و ترکیب مکانیکی با بیوراکتورهای airlift جنبشی

**چکیده**

ترکیب و نگهداری گاز , گردش مایع و انتقال اکسیژن گاز-مایع در بیوراکتور airlift لوله مکشی (~1.5m3) که با پیش برنده هیدروفویل prochem قرار گرفته در لوله مکش حرکت می کند مورد بررسی قرار گرفته شده است. اندازه گیری ها در آب و قالب فیبر سلولزی انجام شده که مشابه با غذای ریزقارچهای میسیلیومی می باشد. کاربرد حرکت مکانیکی عموما باعث پیشبرد کارایی ترکیبی و قابلیت انتقال اکسیژن شده است (نسبت به زمانی که جنبش مکانیکی انجام نشده بود) ؛ با اینحال , کارایی انتقال اکسیژن با حرکت جنبشی مکانیکی کاهش یافته بود. ضریب انتقال جرم گاز-مایع کلی با افزایش غلظت جامدات فیبر سلولزی کاهش یافته است؛ ولی زمان ترکیب در این قالبهای نازک کننده برشی بشدت مستقل از وجود جامدات بوده است (0–4% w/v) . هوادهی (تهویه) سطحی هیچ گاه بیش از 12% انتقال جرم کلی هوا-آب سهیم نبوده است.

**کلیدواژگان :** پیش برنده های هیدروفیلی , بیوراکتورهای airlift , ترکیب , هوادهی , هوادهی سطحی

1. **مقدمه**

بیوراکتورهای airlift و مخازن جنبشی مکانیکی بمیزان زیادی در فرایندهای زیستی مورد استفاده قرار می گیرند [1,2] . بیوراکتورهای airlift برای سیالات دارای چسبندگی کمتر و نیز زمانیکه به حرکت آرام [3] و انتقال جرم اکسیژن ارزان نیاز باشد [4,5] سودمند می باشند. در مقابل , تخمیر کننده های جنبشی معمولی دارای محدوده کاربرد وسیعتری بوده ولی در واسطهای غیر نیوتنی با چسبندگی بالا دارای کارایی ضعیفی می باشند , همچنین الگوی ترکیب ضعیفی نسبت به راکتورهای Airlift دارند و قادر به هوادهی با نرخ بالا نیستند که ناشی از جریان پیش برنده می باشد. بیوراکتور airlift هیبریدی با جنبش مکانیکی و یک یا چند پیش برنده جریان محوری پمپ کننده بسمت پائین که در لوله مکش قرار داده شده است (شکل 1) و هوادهی محدود به منطقه حلقوی , قادر است برخی از محدودیتهای مجراهای airlift و جنبشی مرسوم را از بین ببرد. این بیوراکتور هیبرید دارای الگوی جریان هدایتی بالا مانند ابزار airlift می باشد ولی قادر است تا به نرخهای بالاتر گردش سیال نیز دست یابد.چردش بهبود و جهت دار بالای سیال بمعنای بهبود قابلیت تعلیق جامد و کاهش شیب محوری غلظت مواد مغذی و اکسیژن می باشد. مشخص شده چنین شیبی در راکتورهای airlift بلند وجود داشته و تاثیر منفی بر کارایی دارد [1,6,9] . همچنین , در پیکربندی هیبرید , گاز به منطقه بالابرنده حلقوی منتشر شده و نه به سمت زیرین پیش برنده در نتیجه نیاز به نگرانی در زمینه جریان نیست.

در تخمیر هوازی چسبنده , کارایی راکتور airlift را می توان بطور شاخصی با نصب پیش برنده جریان محوری در پیائین برنده بهبود داد تا گردش سیال افزایش یابد. این روش با تخمیر ریزقارچهای میسلیومی neurospora sitophila نشان داده شده است [10] . همچنین برای مواد مغذی مخمر دارای چسبندگی کمتر نیز مفید بوده است [7,11] . گزارش شده که در غذاهای با چسبندگی بالای غیر نیوتنی *Saccharopolyspora erythraea* استفاده از ملخ (پیشران) دریایی در نزدیکی انتهای لوله مکش منجر به بهبود باز ده 45% در مقایسه با پیکربندی airlift اصلی شده است [6] . برای مواد با چسبندگی مشابه ریزقارچهای N. sitophila در راکنور لوله مکشی با انتشار حلقوی , Moo-young و همکاران [10] گزارش کردند که پیکربندی airlift با پیش برنده جریان محوری کم برشی در لوله مکش بهتر از ابزار airlift خالص می باشد. همچنین , پیش برنده airlift هیبریدی , بیوراکتورهای هوازی موثرتری از نمونه مرسوم rushton تخمیر گر توربینی جنبشی گزارش شده اند[5,10,12] .

در حالی که مشخص شده راکتور airlift هیبریدی جنبشی دارای کارایی خوبی می باشد , چیز کمی در زمینه چنین ابزاری در مقایسه با داشن پایه طراحی نمونه های مرسوم جنبشی [2,13] و بیوراکتورهای airlift [1,5,14,15] در اختیار می باشد. این کار در زمینه مشخصه های انتقال جرم و هیدرودینامیک بیوراکتورهای airlift دارای پیش برنده بزرگ (>1m3) می باشد. پیش برنده های prochem کم قدرت برای پیشبرد گردش سیال استفاده شده است . هیدروفیل prochem قبلا برای استفاده در بیوراکتور ارزیابی شده ولی معمولا در رابطه با پیکربندی مخازن جنبشی مرسوم می باشد [16,20] . مطالعات کمی در زمنیه راکتورهای دارای پروانه دریایی جریان محوری در لوله مکش گزارش شده که مربوط به مجاری نسبتا کوچک (<250l) می باشند [6,11,21,22] .



شکل 1: بیوراکتور airlift با پیش برنده جنبشی هیدروفیلی

واژه نامه

|  |  |
| --- | --- |
|  | مساحت سطحی گاز-مایع در واحد حجم انتشار (m-1) مساحت سطحی گاز-مایع در واحد حجم مایع (m-1) مساحت قطع عرضی پائین برنده (m2) مساحت قطع عرضی بالابرنده (m2) غلظت لحظه ای اکسیژن حل نشده (kmol m-3) غلظت جامدات تعلیق (kgm-3) غلظت اولیه اکسیژن غیر محلول (kmol m-3) غلظت اشباع اکسیژن غیر محلول (kmol m-3) قطر میانه حباب (m) قطر ستون (m) قطر حفره سیستم هوادهی (m) قطر پیش برنده (m)قطر لوله مکش (m) قطر مخزن (m) ضریب پخش انتقال گاز در مایع (m2 s-1) روش کسری برای سکون تعریف شده توسط معادله 5 کارایی انتقال جرمی بر اساس معادله 22عدد جریان پیش برنده شتاب گرانشی (ms-2) فاصله عمودی بین الکترود pH (m) ضریب انتقال جرم گاز-مایع (ms-1) ضریب کل انتقال جرمی مایع-گاز حجمی (s-1) شاخص پایداری (pasn) شاخص رفتار جریان سرعت چرخشی پیش برنده (s-1) ورودی توان کل (W) ورودی توان گازی(w)ورودی توان همزن (w) عدد توان پیش برنده نرخ جریان حجمی گاز (m3s-1) نرخ جریان حجمی مایع (m3s-1) ضریب رینولد پیش برنده زمان (s) فاصله زمانی بین پیکهای پاسخ ردیاب (s) زمان آغاز یا شروع (s) سرعت ویژه گاز(بالابرنده +پائین برنده ) بر قطع عرضی کل (ms-1) سرعت سطحی گاز در منطقه بالابرنده (ms-1) حجم مایع (m3) چسبندگی خطی مایع در پائین برنده (ms-1) توان معادله 13 غلظت جامدات تعلیق (%W/v) توان معادله 13 |

حروف یونانی

|  |  |
| --- | --- |
|  | پارامتر معادله 13 نرخ برش میانگین (s-1) نگهدار کسر کلی نگهداری گاز در لوله مکش چسبندگی ظاهری سیال (Pa s) چسبندگی مایع (Pa s) چگالی مایع (kg m-3) کشش سطحی (N m-1)  |

1. **مواد و روشها**
	1. **راکتورها و سیالات**

اندازه گیری در علظت بیوراکتور لوله مکش انجام شده است (شکل 1)که بوسیله دو پیش برنده هیدروفیلی prochem maxflo پمپی پائین برنده به حرکت در می آید(شکل 2). 5 پیش پرنده پره دار با قطر .32m بر محور با قطر .039 قرار داده شده در مرکز مجرای بیوراکتور نصب شده اند. فاصله عمودی بین پیش برنده ها .68m و پیش برنده پائینی در 1.02m از انتهای مخزن قرار گرفته شده است.



شکل 2: پیش برنده prochem maxflo T

مجرای پیش برنده دارای قطر .755 و ارتفاع کلی آن 3.21m بوده است.قطر داخلی لوله مکش .50m و بلندی آن 2.06m بوده و در .21m بالاتر از انتهای مخزن قرار داده شده است. مجرا در منطقه حلقوی بوسیله لوله سوراخ دار هوادهی (96 حفره ای با قطر .002m قرار داده شده بر دو حلقه سیستم هوادهی هم مرکز با قطر لوله .013) پخش شده است. نسبت ar/ad 1.27 بوده است. حجم کاری و حجم کلی بیوراکتور بترتیب 1.10 و 146m3 بوده است. بیوراکتور از فلز زنگ نزن ساخته شده است؛ دو پنجره شیشه ای عمودی بر دیواره های جانبی مجرا امکان بررسی سطح مایع را ایجاد می کنند. ارتفاع استاتیک مایع در همه آزمایشها 2.46m بوده است. پیش برنده ها با موتور 3hp و جعبه دنده با سرعت متغیر هوادهی شده اند (575V,3phase 3.9A) .

الکترود اکسیژن محلول و دو پراب ph در پائین برنده قرار داده شدند (شکل 1) . الکترود اکسیژن در فاصله سطحی .24m از مرکز مجرا و 2.15m بالاتر از انتهای مخزن قرار داده شده است. فاصله عمودی بین دو پراب مشابه ph 1.39m می باشد ؛ پراب پائینی .69m بالاتر از تکیه گاه مخزن و مستقیما زیر پراب ph بالایی قرار داده شده است. پرابها در فاصله .15m فاصله شعاعی از مرکز مجرا قرار دارند.

راکتور با هوا یا نیتروژن پر شده است. سیالات بکار رفته tapwater سخت , کلرید سدیم آبی (.15M) درtapwater و 2-4% تعلیق solka floc(SF)  فیبر سلولزی در کلرید سدیم آبی (.15M) می باشند. قبلا مشخص شده که قالب بکار رفته شبیه سازی خوبی از رشد میسیلیمی pulplike از تخمیر نمونه قارچی دارد [1] .فیبرهای SF (grade KS1016; Fiber Sales &Development, Urbana, USA) دارای طول میانگین 290um و چگالی توده 175kgm-3 می باشند. تحلیل استاندارد تیلر بصورت زیر بوده است: 1.4% بر 35 حلقه , 2.0% بر 48 حلقه , 5.2% بر 65حلقه , 12.6% بر 100 حلقه , 78.8% با 100 حلقه , 39.0% بر 200 حلقه و 39.85 با 200 حلقه . قالب SF بصورت سیال قانون توان غیرنیوتنی رفتار کرده وشاخص پایداری (K) و جریان (n) آن را می توان با همبستگی های زیر تخمین زد :



که Cs غلظت جامدات SF بر حسب kg m-3 می باشد. معادلات 1 و 2 بر اساس ویژگی های گزارش شده قبلی می باشند [1,23] ؛ ضرایب همبستگی این معادلات .966 و .998 می باشند. داده های بکار رفته برای بدست آوردن معادلات 1 و2 در دمای 20C در نرخ برش تقریبی 1-80S-1 اندازه گیری شده اند [1] . چگالی سیال در محدوده 998 تا 1020 kgm-3 در دمای 20C می باشد. کشش سطحی همه سیالات 75\*10-3Nm-1 بوده که قبلا گزارش شده اند [1,23] .

مشخص شده که قالب فیبر سلولز SF در محلول نمک بخوبی ویژگی های رئولوژیکی غذا و قارچهای میسیلیومی و باکتریهای رشته ای را شبیه سازی می کند [1,23] که در شکل شناسی pulplike غیر قرصی رشد داده شده است. فیبرهای سلولزی مشابه با میسلیوم و فیلامنت penicillia, aspergilla , neurospora و streptomyces بوده است.

* 1. **اندازه گیری ها**

آزمایشها بصورت دسته ای بر اساس فاز مایع یا محلول آبکی انجام شدند. همه اندازه گیری ها در دمای 22±2C اجرا شده اند. هوای شبکه های ~20MPa بوسیله فیلتر ,تنظیم کننده فشار , شیر کنترل جریان و جریان سنج چرخان وارد راکتور شده اند. آرایش جریان طوری بوده که هوا می توانسته بصورت لحظه ای با نیتروژن سیلندرها جایگزین شود.

نگهداری گاز یا کسر حجمی گاز در انتشار بوسیله روش انبساط حجمی اندازه گیری شد[1] . سرعت درون شبکه ای مایع لوله مکش با استفاده از تکنیک ردیاب اسید اندازه گیری شد[1]. قبل از اندازه گیری ها , مایع بوسیله کاهش ph به کمتر از 4 و حباب بندی با هوا (*U*Gr = 0*.*085ms−1,45 min) عاری از بافرهای کربنات/بی کربنات شد (200rpm) . پس از این کار , مایع دارای هیچ بافری در ph (کممتر از 4) اندازه گیری نبوده است. برای اندازه گیری پاسخ ردیاب , اسید سولفوریک غلیظ (~6M,30ml) در سطح مایع بالاتر از منطقه بالابرنده در فاصله شعاعی .28m از مرکز مجرا ریخته شد. پاسخ ph در دو محل پائین برنده در لوله مکش دنبال شد. سرعت مایع (Vld) از فاصله زمانی (Δt) بین پیکهای پاسخ ردیاب از دو الکترود ph و فاصله مشخص h بین آنها محاسبه شد. بنابراین :



هیدروکسید غلیظ سدیم برای برگشت ph به ~4 پس از هر اندازه گیری استفاده شد. ماکزیمم 28 اندازه گیری طی یک روز انجام شده و باعث افزایش غلظت نمک (سولفات سدیم ) در سیال بمیزان کمتر از .006M شد که بر ویژگی های هیدرودینامیکی آب شیر سخت و قرصها اثری نداشت. زمان ترکیب با روش ردیاب اسید بصورت زمان مورد نیاز برای رسیدن غلظت ردیاب به 95% مقدار حالت پایدار نهایی از فاصله ورودی ردیاب تعیین شد [1].

ضریب انتقال جرم کلی حجمی گاز-مایع klal با روش گازی دینامیک اندازه گیری شد [1,24,25] . دو اندازه گیری مستقل بطور همزمان با استفاده از دو الکترود اکسیژن محلول همانند شکل 1 انجام شد. در برخی موارد , اندازه گیری های دیگر با اسمبلی دو الکترودی (شکل 1) انجام شد و به نقطه میانی شعاعی منطقه افزاینده و بدون تغییر ارتفاعهای دو الکترود اکسیژن حر کت کرد. برای اندازه گیری , سیالات بوسیله حباب بندی با نیتروژن بدون هوا شدند تا غلظت اکسیژن محلول به سطح پائینتر از 5% اشباع هوا کاهش یابد . سپس جریان نیتروژن متوقف شده , اجازه داده شد حبابها باز شوند , حال جریان از قبل تنظیم شده هوا ایجاد شده و افزایش غلظت اکسیژن محلول تا زمانی که سیال به نزدیکی سطح اشباع اکسیژن برسد , ادامه دارد. KlAl بعنوان شیب معادله خطی زیر محاسبه شد:



که E , روش کسری سکون [1] بصورت زیر می باشد :



در معادله 5 C\* غلظت اشباع اکسیژن محلول , C0 غلظت اولیه اکسیژن محلول در زمان t0 می باشد وقتی که حالت پایدار هیدرودینامیک مجدا بوجود آید (<1min) و C غلظت اکسیژن محلول در هر زمان t می باشد [1,25] . پارامتر E الزاما نسبت نرخ انتقال جرم لحظه ای به ماکزیمم نرخ انتقال اکسیژن می باشد [1] .

ورودی توان ویژه ناشی از هوادهی با استفاده از معادله زیر محاسبه شد [1,14] :



که Pg توان ورودی ناشی از هوادهی می باشد , Vl حجم کشت , g شتاب گرانشی , Ad ناحیه قطع عرضی منظقه پائین برنده و Ar ناحیه قطع عرضی بالابرنده می باشد. سرعت سطحی گاز (Ugr) در معادله 6 بر اساس ناحیه قطع عرضی بالابرنده تعیین شده است. وردی توان جنبش مکانیکی با استفاده از عدد توان بجای عدد رینلد منحنی های پیش برنده prochem تخمین زده شد [17] .

برای تخمین توان مکانیکی عدد رینلد پیش برنده (Re1) بصورت زیر تعیین شد :



که di قطر پیش برنده , N سرعت چرخشی پیش برنده و Uap سرعت ظاهری سیال می باشد. سرعت ظاهری در معادله 7 با معادله قانون توان تخمین زده شد:



که نرخ برش میانگین y بخ سرعت چرخشی پیش برنده [26,27] بستگی دارد:



مقادیر k- و n برای قرصها (قالبها) توسط معادلات 1 و 2 بدست آمدند.

ورودی توان مکانیکی (Pm) عدد توان از منحنی توان [2,17] بصورت زیر محاسبه شد:



که P0 عدد توان می باشد. PM کلی دوبرابر مقدار محاسبه شده برای یک پیش برنده بوده است [27] . توان پیش برنده برای حضور گاز تصحیح نشد زیرا برای هیدروفیلهای prichem , هوادهی سیال مشخص بوده که ناشی از تاثیر حاشیه ای (کمتر از 5% ) منحنی توان نسبت به سیال بدون هوا در حالت کوچک بودن عدد جریان هوا می باشد[17]. همچنین منطقه پائین رونده که پیش برنده در آن قرار دارد مستقیما با گاز پر نشده است.

ورودی توان ویژه کل در سیال بصورت زیر محاسبه شده است:



در معادله 11 , P ورودی توان کل , Vl حجم سیال , Pg ورودی توان ناشی از هوادهی و Pm ورودی توان ناشی از ترکیب مکانیکی می باشد.

1. **نتایج و بحث**
	1. **نگهداری گاز**

نگهداری گاز کسری با افزایش نرخ جنبش و هوادهی زیاد شده است که در شکل 3 آنرا می بینیم , که برای همه سیالات بکار رفته یک نمونه بوده است. در همه موارد ,نگهداری در ابتدا سریعا با افزایش سرعت گاز بالا رفته تا نرخ افزایش تشکیل حباب , باعث کاهش نگهداری شده است (شکل 3) . منظقه جریان حبابی که در آن حبابها با تعامل نسبتا کمی بالا رفته اند ,مقاوم بوده تا زمانی که سرعت گاز کمتر از .05ms-1 بوده است. در نرخ هوادهی بالاتر جریان حباب تشکیل شده (جریان تلاطم بهم زنی ) رخ داده و دوباره شاهد افزایش سریع نگهداری بوده ایم که ناشی از تشکیل حبابهای کره ای بزرگ می باشد (شکل 3) . در سیالات جنبشی مکانیکی برخی از نگهداری های گاز مقاوم بوده اند که ناشی از entrainment سطحی حتی در زمان عدم وجود هوادهی می باشد.



شکل 3: تاثیر سرعت حرکت پیش برنده و سرعت هوادهی بر نگهداری کلی گاز در قالب 2% SF



شکل 4: تاثیر سرعت جنبش(حرکت) پیش برنده , سرعت هوادهی و غلظت جامدات بر نگهداری گاز



شکل 5 : تاثیر موقعیت الکترودهای محلول اکسیژن بر klal اندازه گیری شده برای شدت های مختلف هوادهی و حرکت مکانیکی

در سرعتهای هوادهی و نرخ جنبش مشخص , نگهداری با افزایش غلظت جامدات فیبر سلولز در قرص کاهش یافته است (شکل 4) . کاهش ماکزیمم نگهداری نسبت به مقدار عاری از جامدات 60% بوده است. اثر کاهنده نگهداری جامدات با اثر تعدیلی تلاطم آنها مرتبط بوده است. خطای میانگین اندازه گیری نگهداری گاز کمتر از 3% بوده است.

* 1. **انتقال جرم گاز-مایع**

در اندازه گیری دینامیک klal , فرضیه وضعیت آمیختگی راکتور می تواند بر مقدار محاسبه شده klal اثر بگذارد.فرض این است که یک فاز مایع خوب ترکیب شده باید وجود داشته که با دانش قبلی سیستم های مشابه مطابق باشد [1] . با وجود حجم بزرگ سیال (1.1m3) , وضعیت ترکیب شده خوب مفروض بطور دقیق بدست آمده که در شکل 6 هم این موضوع تایید شده است و برای جنبش های داده شده , مقادیر بدست آمده با پراب اکسیژن محلول قرار داده شده در مناطق وسیع راکتور (چه در بالابرنده یا پائین برنده ) نشان دهنده تطابق دوطرفه خوبی می باشند عموما با 6% مقدار میانه برای دو موقعیت. داده های شکل 5 برای سیستم هوادهی تحت وضعیتهای بینهایت هوادهی و جنبش مکانیکی می باشند. ترکیب بطور قابل توجهی در همه نرخ جریانهای گاز در حالت airlift بکار رفته در مقایسه با وضعیت استفاده از تکان دهنده ضعیف تر بوده است(یعنی N=rpm) . این امر در شکل 5 مشخص است که تفاوت بین مقادیر بالا و پائین klal پائین برنده عموما در زمان عدم حضور ترکیب مکانیکی بزرگتر بوده اند. چون موقعیت پرابها دارای اثر فرعی نسبی بر klal محاسبه شده می باشند , اندازه گیری بعدی فقط برای موقعیت بالا در پائین برنده انجام شد. زمان ترکیب سیال (بخش 3.3) 30-55s همیشه کمتر از 1/klal بوده است. همچنین زمان پاسخ الکترودهای اکسیژن محلول (~10s برای پ63% از پاسخ تمام مقیاس) همیشه کمتر از 1/klal بوده و در نتیجه می توان از تاخیرهای پاسخ الکترود در محاسبات klal چشم پوشی نمود [1,28] . خطای میانگین در اندازه گیری klal کمتر از 6% بوده است.

وابستگی نمونه klal به دو متغیر عملیاتی اصلی (یعنی سرعت حرکت , نرخ هوادهی) در شکل 6 برای قرض 2% SF نشان داده شده است. رفتار نشان داده شده (شکل 6) عموما با نمونه مربوط به نگهداری (شکل 3) پایدار است زیرا نگهداری عامل اصلی است که بر مساحت سطحی مایع-گاز اثر می گذارد. مقدار Klal با افزایش هوادهی و نرخ جنبش بهبود یافته است (شکل 6) . افزای غلظت فیبر سلولز تعلیق باعث کاهش klal airlift (n=0rpm) و جنبشی (n=200rpm) شده است (شکل 7) . رفتار مشابهی در بسیاری از قارچهای میلسیومی دیده شده است [1,5] .

بر اساس بررسی های قبلی نظری [1,23] , انتظار می رود ترسیم klal بر حسب نسبت نگهداری گاز  در هر بیوراکتور انتشاری خطی باشد, بدون توجه به سیال بکار رفته و منطقه جریان مسلط.[1] . در گذشته این موضوع برای ستونهای حباب و بیوراکتورهای airlift مشخص شده است [1,29] . در راکتورهای هیبریدی جنبشی نیز وابستگی نسبی klal و نسبت نگهداری برای محدوده کامل نرخ های هوادهی و سرعتهای پیش برنده مشاهده شده است(شکل 8). این رفتار در همه سیالات تست شده دیده شده است.

همانطور که انتظار می رفت ,نسبت kl/db (db بمعنای قطر میانه حباب ) محاسبه شده از مقادیر klal و نگهداری گاز با پروسه های مشخص شده قبلی در [1,23] مطابق بوده اند بدون توجه به سرعت جنبشی و نرخ هوادهی بکار رفته (شکل 9) . الگوی شکل 9 نمایشی از همه سیالات تست شده می باشد , اگر چه مقادیر ویژه kl/db به غلظت فیبرهای سلولزی وابسته بوده اند. مقدار میانه آزمایش kl/db در 2%sf بمیزان .0261s-1 یا 47% مقدار محاسبه شده با آزمایشات مستقل [1,14,23] بوده است یعنی با روابط زیر



که xs غلظت جامدات تعلیق در %w/v , Dl انتشار اکسیژن در سیال تعلیق , al کشش سطحی , ul سرعت فاز مایع و pl چگالی مایع تعلیق بوده است. دقت کنید که معادله 12 برای ستونهای حباب و راکتورهای airlift با اندازه های کاملا متفاوت از پیکربندی هیبرید ی مطالعه جاری توسعه داده شده اند [1,14,23] .

همبستگی های منتشر شده برای klal در مخازن جنبشی مکانیکی مرسوم معمولا بفرم زیر می باشد :



که a,x,z ثابتهای ترکیب داده شده سیال و اندازه راکتور می باشند [25,28] . مثالی در این زمینه, معادلات زیر برای سیستم آب-هوا می باشد :



که dt قطر مخزن و qg حاصلضرب ug و ناحیه قطع عرضی راکتور می باشد. روش همبستگی مشابهی نیز در کار جاری استفاده شده است.



شکل 6 : اثر سرعت جنبش و نرخ هوادهی بر klal د ر2% sf قالب



شکل 7 : اثر غلظت جامدات بر klal در (a) airlift و (b) مد هیبرید عملیات راکتور



شکل 8: ضریب انتقال جرم klal بر حسب  برای 2%sf تحت شرایط مختلف جنبش . خط نشان داده شد ه دارای شیب واحد می باشد.

داده های Klal برای آب در منطقه جریان حباب (Ugr<=.05ms-1) با معادله زیر همبستگی دارد



هم برای airlift و هم برای حالت جنبشی-airlift (شکل 10). پیش بینی معادله د15 با مقادیر اندازه گیری شده انحراف میانگین ±9.6% یا ماکزیمم انحراف ±15% مطابقت داشته است (شکل 10) . داده های آب در تلاطم چرخشی یا منطقه تشکیل حباب با معادله زیر همبستگی دارند 



برای هر دو حالت عملیاتی راکتور (شکل 11) . پیش بینی معادله 16 با میانگین انحراف ±5.6% یا ماکزیمم انحراف ±15% مطابقت داشته است.



شکل 6: اثر سرعت هوادهی و سرعت جنبش بر نسبت kl/db در قالب 2% sf . خط افقی میانگین همه داده ها می باشد.



شکل 10 : klal پیش بینی شده(معادله 15) بر حسب مقدار اندازه گیری شده در سیستم آب-هوا (جریان هوا) .

در توسعه معادله 15 و 16 , داده های حالات airlift (بدون جنبش) ابتدا بفرم klal=auzgr همبسته شدند . در مرحله بعدی سرعت هوادهی سطحی در حالت airlift حلقوی تغییر داده شد(برای مختلف ورودی توان ویژه مکانیکی P,/Vl) تا اندازه گیری های مختلف klal بدست آید. داده های بدست آنده برای تولید مجموعه ای از مقادیر a,zبکار رفتند (یک مجموعه برای هر pm/vl) , با استفاده از رگرسیون خطی . مشاهده شد مقادیر Z با سرعت جنبش N وابسته بوده و در نتیجه بهترین تناسب همبستگی بین z و N با رگرسیون برای دو منطقه جریان بدست آمده است. مقدار aنیز با pm/vl بستگی داشته : ازاینرو رگرسیون برای تعیین همبستگی بین a و pm/vl دو منطقه جریان استفاده گردید.

یک همبستگی برای ضریب کل انتقال جرم گاز-مایع حجمی در مجرای airlift لوله –غلظت انتشار در [13] گزارش شده است :



که ضریب انتقال جرمی کل (klad) به عواملی مانند نگهداری گاز ϵg , شتاب گرانشی g , کشش سطحی l , سرعت ul فاز مایع , چگالی pl فاز مایع , ضریب پخش dl اکسیژن در مایع ؛ قطر dc ستون راکتور و قطر dh حفره های انتشار بستگی دارد . معادله 17 نحدوده زیر از متغیرها توسعه داده شده است:



نسبت دید = 6-15 و ad/ar=.52-1.23. خطای میانگین در تخمین klad با معادله 17 برای 175 اندازه گیری 12% بوده است [13] . همانطور که در شکل 12 می بینیم معادله 15 و 16 استثنائا با معادله 17 از kolide و همکاران [31] تطابق خوبی دارندو این امر داده های مارا تایید می کند. البته معادله 17 به قرصها و راکتورهای airlift هیبریدی قابل اعمال نبوده و در نتیجه مقایسه شکل 12 اکیدا به عملیات airlift خالص با سیستم آب-هوا مرتبط می باشد (یعنی N=0rpm) .



شکل 11. مقدار پیش بینی شده (معادله 16) بر حسب klal اندازه گیری شده در سیستم آب و هوا (جریان حباب تشکیل شده)



شکل 12 مقایسه معادلات 15 تا 17 برای پیش بینی klal در حالت airlift

دقت کنید که ضریب انتقال جرم کلی در معادله 17 بر حسب حجم انتشار گاز-مایع داده شده است و نه بر حسب حجم مایع. برای مقایسه در شکل 12 , مقادیر klad که بر اساس معادله 17 محاسبه شده بر حسب klal با استفاده از رابطه دقیق زیر [1] بیان شده اند :



داده های نگهداری گاز اندازه گیری شده (بخش 3.1) برای تصحیح بکار رفته اند.

تنها همبستگی دیگر گزارش شده برای klal در راکتورهای حلقوی مکانیکی مربوط به bang و همکاران می باشد [21] , برای سیستم های آب-هوا , که معادله زیر را بدست آورده اند :



در مقایسه با معادلات 15 و 16 که توسط ما ارائه شد , معادله 19 مقادیر بینهایت بالایی از klal را بدست می آورد. همچنین معادله 19 با معادله 17 از koide و همکاران مطابقت ندارد [31] . دلایل این اختلاف ظاهرا با تفاوتهای مهم بین راکتور بکار رفته در ارتباط است[21]. زیرا در آن معادله از استثنائا از مجرای خارجی (~101) استفاده شده که لوله مکش قرار گرفته شده است. نسبت Ar/ad در مقایسه با مقدار 1.27 ما , .69 بوده است و از پیش برنده دریایی پمپ کننده بسمت بالا در لوله مکش استفاده شده که ما از پیش برنده های هیدروفیلی پمپ کننده به سمت پائین استفاده کردیم .

داده های Klal برای همه قرصهای sf در جریان حبابی با معادله زیر همبستگی دارند 



برای هر دو مد عملیاتی airlift و جنبشی (شکل 13) .در منطقه تلاطمی چرخشی

 داده های قرصها با معادله زیر همبستگی دارند



برای هر دو مد عملیاتی (شکل 14). پیش بینی معادله 21 با داده های اندازه گیری شده با انحراف میانگین ±19% مطابقت دارند. اثر محو کننده klal جامدات غالبا ناشی از کاهش نگهداری گاز بوده که بوسیله جامدات ایجاد شده و مساحت سطحی گاز-مایع را برای انتقال جرم کاهش می دهد. همچنین مشخص شده افزایش غلظت جامدات فیبر سلولزی باعث کاهش kl برای قطر حباب میانگین داده شده می شود [1,14] .



شکل 13: مقدار klal پیش بینی شده (معادله 20) بر حسب مقدار اندازه گیری شده (جریان حباب)



شکل 15: کارایی انتقال جرم بر حسب ورودی توان کل تحت شرایط مختلف جنبش

مشخص شده که جنبش مکانیکی مرسوم باعث پیشبرد klal نسبت به مقادیر دست آمده در زمان عدم وجود جنبش می شود ولی پشبرد alkl باعث جبران افزایش توان مورد نیاز جنبش مکانیکی را نکرده و کارایی انتقال جرم نیز کاهش می یابد [1] . این امر همچنین در جنبش با توان پائین در پیش برنده های هیدروفیلی رخ می دهد؛ در نتیجه مطابق شکل 15 , برای سیستم آب-هوا و 3% sf , کارایی انتقال جرم Em بت جنبش مکانیکی کمتر از airlift خالص می شود(N=0rpm) . کارایی Em بصورت زیر تعریف می شود :



با ضرب مقدار Em در نیروی محرکه حالت پایدار برای انتقال اکسیژن (یعنی C\*-cl) می توان مقدار اکسیژن انتقال یافته را در واحد انرژی بدست آوریم.



شکل 14: مقدار klal پیش بینی شده (معادله 21) بر حسب مقدار اندازه گیری شده در قرض SF (جریان حباب تشکیل شده )



شکل 16 اثر سرعت جنبشی پیش برنده بر klal برای هوادهی سطحی در آب

* + 1. **هوادهی سطحی**

در گذشته , تحقیقات زیادی انتقال جرم گاز-مایع را در بیوراکتورهای نسبتا کوچک مشخص کرده اند[22,30] که در آن جذب سطحی سهم شاحصی در انتقال جرم کلی دارد. عموما هیچ تلاشی برای تمایز بین سهم سطح و هوادهی مستعرغ انجام نشده است . klal برای هوادهی سطحی (آب-هوا) (شکل 16) با سرعت پیش برنده بصورت زیر همبستگی دارد



ضریب همبستگی معادله 23 بزرگتر از .999 است. وابستگی نشان داده در معادله 23 ناشی از اثر ترکیبی N بر تلاطم و نرخ تجدید سیال می باشد. در پائینترین نرخ هوادهی بکار رفته (Ugr=.0156m s-1) سهم هوادهی سطحی به انتقال اکسیژن از 1.5 تا 11.6% تغییر کرده است که به سرعت پیش برنده بستگی داشته است. در این حالت , نسبت سطحی مایع به حجم کل فقط .41 بوده است , سطح می تواند بمیزان بیشتری در انتقال جرم راکتورهای کم عمق نقش داشته باشد مانند آنهایی که برای کشت سلولی حیوانات استفاده می شود [25] .

* 1. **سرعت مایع و ترکیب**

تنوع نمونه زمان ترکیب با هوادهی و نرخ جنبش در شکل 17 مشخص شده است . در همه موارد ترکیب با , افزایش نرخ هوادهی و حرکت مکانیکی بهبود می یابد (شکل 17) . با اینحال , تاثیر نرخ هوادهی بر زمان ترکیب فقط تحت شرایط اندک یا بدون جنبش مکانیکی پررنگ بوده است. در سرعتهای هوادهی کافی  , زمانهای ترکیب بدست آمده در عدم حضور جنبش مکانیکی و حالت با جنبش قابل مقایسه بوده است. زمان ترکیب به غلظت جامدات در محدوده 0-4% حساس نبوده است. خطای میانگین در اندازه گیری زمان ترکیب 9.4% بوده است.

سرعت خطی مایع در پائین برنده , با افزایش سرعت جنبش زیاد شده است ولی به نرخ هوادهی حساس نبوده است (شکل 18) , به استثنای حالت airlift (N=0rpm) . این حقیقت که سرعت مایع با نرخ هوادهی در عملیات دارای جنبش مکانیکی دارای تغییر کمی بوده (شکل 18) ولی در سرعت جنبش ثابت , زمان ترکیب با افزایش هوادهی ,کاهش یافته است (شکل 17) پیشنهاد می کند که تحت شرایط ترکیب مکانیکی , حبابهای گاز بالارونده بوسیله سیال دلیل مهم ترکیب بوده اند. میزان تکرار حباب بندی با افزایش نرخ هوادهی زیاد شده و حبابهای بالارونده نسبت به مایع , مقدار خاصی از سیال را در خود حمل کرده اند. همانطور که قبلا ذکر شد , اثر جنبش مکانیکی بر زمان ترکیب فقط در نرخ هوادهی کم پررنگ بوده است(شکل 17) . در سرعت های هوادهی بالاتر  , بنظر می رسد , حبابهای بالارونده دلیل اصلی ترکیب باشند (شکل 17) .



شکل 17 : اثر سرعت چرخش پیش برنده و سرعت هوادهی بر زمان ترکیب در قرص 2% SF



شکل 18 : اثر سرعت جنبش پیش برنده و سرعت هوادهی بر سرعت میانگین مایع در پائین برنده (هوا-آب)

در سیستم آب –هوا ] جریان همیشه در زمان استفاده از جنبش مکانیکی در منطقه تلاطم بوده (N>=10) و عدد رینلد پیش برنده متجاوز از 2\*10^4 بوده است. در این منطقه عدد جراین پیش برنده (F1= ) ثابت و مقدار .82 برای عدد جریان کم پیش برنده prochem maxflo T گزارش شده است [2] . بخاطر عدد ثابت جریان , نرخ پمپ (Ql) پیش برنده باید بصورت خطی با سرعت جنبش بصورت زیر تغییر کند :



داده های شکل 18 پیشنهاد رابطه غیر خطی بین سرعت پیش برنده و سرعت میانگین مایع لوله در مکش (Vld) را می کنند . چونکه Ql و Vld دقیق بصورت زیر با هم مرتبطند:



اختلاف بین معادله 24 و رفتار شکل 18 بر اساس وابستگی غیر خطی بین N و نگهداری گاز در پائین برنده یعنی ϵgd توصیف می شود. خطای میانگین در اندازه گیری سرعت مایع 7.7% می باشد. بر خلاف سیستم آب-هوا , منطقه جریان بای ترکیب SF گذری بوده است  که ناشی از سرعت ظاهری بالای قرص می باشد.

1. **ملاحظات نهایی و نتیجه گیری**

بر اساس مشاهدات بالا , نتیجه گیری کلی بصورت زیر است :

1. کاربرد پیش برنده جریان محوری کم توان در پائین برنده بیوراکتور airlift می تواند باعث پیشبرد شاخصی در نرخ گردش مایع , ترکیب و انتقال جرم گاز-مایع نسبت به عملیات بدون جنبش گر باشد, با اینحال , پیشبرد کارایی به هزینه افزایش عدم تناسب مصرف توان می شود.
2. افزایش غلظت نسبتا بالای جامدات فیبری سبک بمیزان زیادی منجر به کاهش انتقال ضریب جرمی گاز-مایع می شود.
3. هوادهی سطحی در انتقال جرم گاز-مایع در بیوراکتورهای بزرگ سهیم بوده ولی بمیزان کم.
4. در راکتورهای لوله مکشی جنبشی , انتشار هوای منطقه بالابرنده می تواند منجر به بهبود کارایی ترکیب شده و یا نشود که به شدت جنبش مکانیکی بستگی دارد. در نرخ بالای هوادهی (Ugr>=.04m s-1) در هر دو حالت وجود یا عدم وجودد جنبش مکانیکی , اثر کمی بر ویژگی های ترکیب راکتور دیده می شود.

بطور خلاصه , راکتورهای airlift هیبرید جنبشی در مقایسه با راکتورهایairlift معمولی , برای استفاده در تخمیر حساس به برش که نیازمند انتقال اکسیژن خوب و ترکیب می باشند بخوبی مناسب می باشند.