

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

«الف»



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد شاهرود

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد « M.Sc »

گرایش: مهندسی شیمی- مهندسی محیط زیست

عنوان:

مدل سازی بیوراکتور حلقه ای خارجی برای تولید

توده زیستی از گاز طبیعی

استاد راهنما:

دکتر فاطمه یزدیان

استاد مشاور:

دکتر اشرف السادات حاتمیان

نگارش:

سجاد بسحاق

تابستان 1391

«ب»



ISLAMIC AZAD UNIVERSITY

Shahrood Branch

Faculty of Science and Technology

((M.Sc.)) Thesis

On Chemical Engineering- Environment Engineering

Subject:

Modeling of external Loop Bioreactor for Biomass Production from natural gas

Thesis Advisor:

Fatemeh Yazdian Ph.D.

Consulting Advisor:

Ashrafosadat Hatamian Ph.D.

By:

Sajad bos'hagh

Summer 2012

«ج»

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از **خانم دکتر فاطمه یزدیان** به دلیل زحمات و محبت های مادرانه و بی دریغشان و **خانم دکتر زهراسادات آقامیری** و **خانم دکتر اشرف السادات حاتمیان** به دلیل کمک ها و مساعدت هایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به

پدر صبور و فداکار

مادر مهربان و دلسوز

و

دوستان عزیز و مهربان

فهرست

عنوان	صفحه
چکیده.....	1
مقدمه.....	2
فصل اول : مبانی مدل سازی بیوراكتورهاى حلقه اى	
1- ضرورت مدل سازی	5
1-1- مدل سازی سینتیکی	7
1-1-1- سینتیک رشد میکروبی	7
1-1-2- مطالعه ضرایب زیستی سرعت واکنش برای واکنش های هوازی	8
1-1-3- مصرف سوبسترا	9
1-1-4- چند سوبسترایى در محدود سازی شدت رشد.....	11
1-1-5- تولید محصول	12
2- مدل سازی هیدرودینامیکی و مطالعه جریان.....	13
2-1- هیدرودینامیک و رژیم جریان.....	13
2-1-1- انواع رژیم های جریان.....	14
2-1-1-1- رژیم های جریان در خطوط لوله افقی.....	14
2-1-1-2- رژیم های جریان در خطوط لوله قائم.....	17
2-1-1-3- رژیم جریان در بیوراكتورهاى حبابی و هواگرد	19
2-1-2- اهمیت شناخت رژیم جریان.....	20
2-1-3- روش های تعیین رژیم جریان.....	21
2-2- توان ورودی وسایل هوادهی.....	24
2-2-3- سرعت مایع.....	24
2-2-4- سرعت گاز.....	25
2-2-5- نگهداشت گاز.....	25
2-2-6- پراکنندگی اندازه حباب ها در سیستم های گاز - مایع.....	26
2-2-7- ضرایب انتقال جرم در بیوراكتورهاى هواگرد.....	27

- 30 8-2-1- انواع توزیع کننده ها و خصوصیات آنها
- 31 9-2-1- مکان قرار گرفتن توزیع کننده گاز و محل تزریق سوپسترا
- 31 10-2-1- اثر مخلوط کن های ایستا
- 32 11-2-1- زمان ماندگاری و ضرایب توزیع محوری
- 33 1-11-2-1- ضریب توزیع محوری فاز مایع
- 34 2-11-2-1- ضریب توزیع محوری فاز گاز
- 34 3-11-2-1- مدل سازی ریاضی برای توصیف هیدرودینامیک راکتور
- 36 4-11-2-1- مدل سازی ریاضی پراکنندگی زمان ماندگاری
- 37 12-2-1- مدل دینامیکی سیال
- 40 1-12-2-1- پارامتر توزیع c_i
- 41 2-12-2-1- سرعت حد حباب $U_{bt,i}$
- 42 3-12-2-1- ضرایب اصطحاک در بالابر و پایین بر
- 42 4-12-2-1- ضرایب اصطحاک در قسمت های بالایی و پایینی
- 43 13-2-1- مدل سازی هیدرودینامیکی راکتور های حلقه ای سه فازی
- 44 1-13-2-1- نگهداشت گاز
- 44 2-13-2-1- سرعت ویژه مایع
- 46 3-13-2-1- محاسبه افت ناشی از اتصالات در مسیر جریان
- 47 14-2-1- مدل سازی هیدرودینامیکی جریان های چند فازی با توجه به رژیم جریان
- 47 1-14-2-1- مدل رفتار دینامیکی و پایایی یک راکتور ستونی حبابی در رژیم جریان متلاطم دوغابی
- 50 2-14-2-1- مدل سازی راکتور لوله ای افقی در رژیم جریان لخته ای
- 52 3-1-3-1- مدل سازی بیوراکتور حلقه ای برای تولید میکروارگانیزم ها
- 52 1-3-1- تقسیم بندی راکتور های هواگرد
- 54 2-3-1- مدلسازی به روش تانک های سری
- 55 1-2-3-1- معادلات و پارامترها برای مدل سازی بیوراکتور هواگرد به روش تانک های سری
- 57 2-2-3-1- موازنه جرم در قسمت های مختلف بیوراکتور هواگرد
- 62 3-2-3-1- حل مدل تانک های سری
- 62 3-3-1- مدل سازی بیوراکتور هواگرد به روش توزیع محوری
- 63 1-3-3-1- مدل موازنه جرم
- 65 2-3-3-1- حل مدل توزیع محوری
- 66 4-3-1- ارتباط بین دو مدل

فصل دوم : روش ها و مواد

- 72 1-2- شرح دستگاه ها
- 72 1-1-2- بیوراکتور حلقه ای افقی
- 74 2-1-2- سامانه فلاسک آب بندی شده
- 76 2-2- میکروارگانیزم و محیط کشت
- 77 3-2- آزمایش ها
- 78 1-3-2- شدت جریان گاز و مایع
- 78 2-3-2- میزان توزده سلولی
- 78 3-3-2- اندازه گیری میزان اکسیژن و متان
- 79 4-3-2- نگهداشت گاز
- 79 5-3-2- ضرایب انتقال جرم
- 80 6-3-2- ضرایب توزیع محوری

فصل سوم : معادله های مدل سازی و روش ها

- 81 1-3- معادله های مدل سازی سینتیکی و حل مدل
- 81 1-1-3- مدل های سینتیکی رشد سلولی
- 82 2-1-3- چند سوبسترای
- 83 3-1-3- مصرف سوبسترا
- 84 4-1-3- مقایسه مدل ها
- 86 1-4-1-3- شرایط اولیه
- 56 2-4-1-3- روش حل
- 87 2-3- معادله های مدل سازی ریاضی زمان ماندگاری و حل مدل
- 87 1-2-3- مدل سازی ریاضی زمان ماندگاری
- 89 2-2-3- شرایط اولیه و مرزی
- 89 3-2-3- حل مدل توزیع محوری
- 90 3-3- معادله های مدل سازی ریاضی تولید پروتئین تک یاخته و حل مدل
- 91 1-3-3- معادله استوکیومتری و تعیین سوبسترای محدود کننده
- 93 2-3-3- مدل سینتیکی
- 93 3-3-3- رژیم جریان
- 94 4-3-3- نگهداشت گاز

95	.....3-3-5- ضریب های حجمی انتقال جرم.
98	.....3-3-6- ضریب های توزیع محوری.
98	.....3-3-7- موازنه جرم.
101	.....3-3-8- شرط های اولیه و مرزی.
102	.....3-3-9- حل مدل.
102	.....3-4-4- حل به روش خطی سازی.

فصل چهارم : نتیجه گیری و جمع بندی

106	.....4-1- نتایج مدل سازی سینتیکی.
106	.....4-1-1- رشد میکروبی.
107	.....4-1-2- مصرف سوبستراها.
108	.....4-1-3- مقایسه مدل ها.
109	.....4-2- نتایج مدل سازی پر اکندگی محوری.
110	.....4-2-1- ارزیابی مدل.
111	.....4-2-2- اثر سرعت ویژه گاز و سرعت ویژه مایه در بیوراکتور حلقه ای با پمپ مایع.
114	.....4-3- نتایج مدل سازی بیوراکتور حلقه ای برای تولید توسط میکروارگانیزم.
114	.....4-3-1- تخمین پارامترهای مدل.
115	.....4-3-1-1- رشد میکروبی و پارامترهای سینتیکی.
116	.....4-3-1-2- مصرف سوبسترا.
118	.....4-3-2- ارزیابی مدل.
118	.....4-3-2-1- اثر تغییر درصد متان بر میزان تولید زیست توده و مصرف سوبسترا.
121	.....4-3-2-2- اثر تغییر دبی مایع بر میزان تولید زیست توده و مصرف سوبسترا.
124	.....4-3-3- آنالیز حساسیت مدل (اثر تغییر دبی گاز بر میزان تولید زیست توده و مصرف سوبسترا).
125	.....4-3-4- پیش بینی غلظت توده سلولی و غلظت سوبستراها در طول بیوراکتور.
129	..... جمع بندی فصل چهارم.
130	..... پیشنهاد ها.
131	..... منابع و مأخذ.
136	..... پیوست ها.

فهرست شکل ها

- شکل 1-1- فاکتورهای موثر بر هیدرودینامیک محیط برای طراحی یک بیوراکتور 5
- شکل 1-2- مراحل مدل سازی راکتور..... 6
- شکل 1-3- انواع رژیم های جریان در خطوط لوله افقی..... 16
- شکل 1-4- انواع رژیم های جریان در خطوط لوله عمودی..... 18
- شکل 1-5- تعیین رژیم جریان در راکتور ستونی حبابی و هواگرد با کمک ارتباط نگهداشت گاز و سرعت ویژه گاز..... 22
- شکل 1-6- تصویر مدل سازی استفاده شده برای قسمت های مختلف یک راکتور هواگرد یا حلقه داخلی چرخش..... 35
- شکل 1-7- تصویر مدل سازی استفاده شده برای قسمت های مختلف یک راکتور هواگرد با حلقه خارجی چرخش..... 36
- شکل 1-8- جریان هوادهی شده Slug..... 51
- شکل 1-9- مدل سازی به روش تانک های سری در بیوراکتور هواگرد حلقه ای عمودی 55
- شکل 1-10- مدل سازی بیوراکتورهای حلقه ای..... 69
- شکل 1-11- پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی بیوراکتورهای حلقه ای 70
- شکل 1-2- ساختمان بیوراکتور حلقه ای..... 74
- شکل 2-2- کشت در فلاسک درزبندی شده تحت ترکیب گازی مشخص 75
- شکل 2-3- سامانه گازی برای پر شدن فلاسک..... 76
- شکل 1-3- تغییرات توده زیستی با زمان بر اساس مدل موند و داده های تجربی..... 84
- شکل 2-3- تغییرات توده زیستی با زمان بر اساس مدل موسر و داده های تجربی..... 85
- شکل 3-3- تصویری از مدل سازی استفاده شده برای قسمت های مختلف بیوراکتور حلقه ای..... 88
- شکل 3-4- رژیم جریان در بیوراکتور حلقه افقی..... 94
- شکل 3-5- نگهداشت گاز در مقابل سرعت ظاهری گاز در بیوراکتور حلقه عمودی پمپ دار 95
- شکل 3-6- ضریب حجمی انتقال جرم در مقابل سرعت ظاهری گاز در بیوراکتور حلقه عمودی پمپ دار..... 97
- شکل 3-7- ضریب حجمی انتقال جرم در مقابل سرعت ظاهری گاز در بیوراکتور هواگرد (بدون پمپ)..... 97
- شکل 3-8- ضریب حجمی انتقال جرم در مقابل نگهداشت گاز در بیوراکتور حلقه عمودی پمپ دار 98
- شکل 3-9- تصویری از تقسیم بندی بیوراکتور حلقه ای عمودی برای مدل سازی تولید توده سلولی 99
- شکل 1-4- تغییرات غلظت سلول با زمان بر اساس مدل لجستیک و داده های تجربی 106
- شکل 2-4- تغییرات غلظت سلول با زمان بر اساس مدل موند و داده های تجربی 107
- شکل 3-4- تغییرات غلظت متان و اکسیژن با زمان بر اساس مدل لجستیک و داده های تجربی..... 107
- شکل 4-4- تغییرات غلظت متان و اکسیژن محلول با زمان بر اساس مدل موند و داده های تجربی ... 108
- شکل 5-4- تنظیم پاسخ با تزریق ردياب در بیوراکتور حلقه ای..... 109

- شکل 4-6- تنظیم پاسخ با تزریق ردیاب در بیوراکتور حلقه ای عمودی 110
- شکل 4-7- اثر سرعت ویژه گاز و سرعت ویژه مایع بر ضریب پراکندگی محوری با در نظر گرفتن جداکننده گاز- مایع 111
- شکل 4-8- اثر سرعت ویژه گاز و سرعت ویژه مایع بر ضریب پراکندگی محوری با در نظر نگرفتن جداکننده گاز- مایع 112
- شکل 4-9- اثر سرعت ویژه گاز و سرعت ویژه مایع بر عدد بدنتاین با در نظر نگرفتن جداکننده گاز- مایع 114
- شکل 4-10- تطبیق مدل (خط ممتد) با داده های تجربی (مربع ها) برای تولید زیست توده 117
- شکل 4-11- تطبیق مدل با داده های تجربی متان و اکسیژن محلول در تولید زیست توده 117
- شکل 4-12- اثر تغییر درصد متان بر میزان تولید زیست توده 119
- شکل 4-13- اثر تغییر درصد متان بر روند مصرف اکسیژن و متان 121
- شکل 4-14- اثر تغییر درصد دبی مایع بر میزان تولید زیست توده 122
- شکل 4-15- اثر تغییر درصد دبی مایع بر میزان مصرف متان محلول 123
- شکل 4-16- اثر تغییر درصد دبی مایع بر میزان مصرف اکسیژن محلول 123
- شکل 4-17- اثر تغییر درصد دبی گاز بر میزان تولید زیست توده 124
- شکل 4-18- اثر تغییر درصد دبی گاز بر میزان مصرف اکسیژن محلول 125
- شکل 4-19- اثر تغییر درصد دبی گاز بر میزان مصرف متان محلول 125
- شکل 4-20- تغییرات غلظت سلول به طول بیوراکتور در 33 ساعت 126
- شکل 4-21- تغییرات غلظت متان به طول بیوراکتور در 33 ساعت 127
- شکل 4-22- تغییرات غلظت اکسیژن به طول بیوراکتور در 33 ساعت 128

فهرست جداول

10	جدول 1-1- معادله مدل های سینتیکی.....
	جدول 1-2-نگهداشت گاز و ضریب حجمی انتقال جرم برای بیوراکتورهای حلقه ای هواگرد با چرخش خارجی.....
29	جدول 1-3- مقایسه بین دو مدل تانک های سری و مدل توزیع محوری.....
54	جدول 1-2- پارامترهای هندسی بیوراکتور.....
73	جدول 2-2- ترکیبات محیط کشت معدنی.....
77	جدول 2-3- ترکیبات محلول عناصر کم در محیط کشت معدنی.....
77	جدول 1-3- ارزیابی مقادیر محاسبه شده مدل ها بر حسب داده های تجربی.....
85	جدول 2-3- مقدار شرایط اولیه آزمایشگاهی برای مدل سازی سینتیکی در بیوراکتور.....
86	جدول 3-3- حدس اولیه برای تنظیم پارامترهای سینتیکی مدل ها با داده های تجربی.....
87	جدول 3-4- جمع بندی داده های تخمیر پیوسته رشد سلولی باکتری از متان.....
92	جدول 3-5- شرایط اولیه آزمایشگاهی برای مدل سازی تولید توده سلولی.....
101	جدول 1-4- اثر سرعت ویژه گاز بر ضریب پراکندگی محوری با در نظر گرفتن جدا کننده گاز مایع.....
112	جدول 2-4- اثر سرعت ویژه گاز بر ضریب پراکندگی محوری با در نظر نگرفتن جدا کننده گاز - مایع.....
113	جدول 3-4- اثر سرعت ویژه گاز بر عدد بدنتاین با در نظر نگرفتن جدا کننده گاز - مایع.....
114	جدول 4-4- پارامترهای لازم برای مدل سازی تولید توده سلولی.....
115	جدول 4-5- پارامترهای سینتیکی تنظیم شده برای تطبیق مدل با داده های تجربی.....
116	جدول 4-6- ضریب تشخیص تطبیق غلظت توده سلولی، متان و اکسیژن محلول از مدل با داده های تجربی.....
118	جدول 4-7- ضریب تشخیص تطبیق غلظت توده سلولی، متان و اکسیژن محلول.....
121	جدول 4-8- ضریب تشخیص تطبیق غلظت توده سلولی مدل با داده های تجربی در دبی حجمی مایع متفاوت.....
123	.....

فهرست علائم

سرعت تولید یا مصرف (g/(L.day))	r	مساحت برش عرضی (cm ²)	A
غلظت سوبسترا (g/L)	S	عدد بنشتاین	BO
زمان (s)	t	غلظت محلول (g/L)	C
سرعت ویژه مایع (cm/s)	U	غلظت محلول اشباع (g/L)	C*
حجم جدا کننده گاز - مایع (cm ³)	V	ضریب پراکندگی محوری (cm ² /s)	D
فاصله (cm)	x	قطر (cm)	D
جزئی مولی در فاز گاز	y	ثابت هنری (atm/mol)	H
بهره تولید توده سلولی متان (g/g)	Y _{x/M}	ثابت مرگ (1/day)	K _d
بهره تولید توده سلولی اکسیژن (g/g)	Y _{x/o}	ثابت بازدارندگی سوبسترا	K _I
		ضریب حجمی انتقال جرم (1/day)	K _L a
علائم یونانی		ثابت اشباع	K
شدت رشد سلولی (1/day)	μ	طول مسیر جریان (cm)	L
		تعداد تانک های سری در بیوراکتور	N
		زوان مدل تسیر	n
زیرنویس ها		توان ثابت مرگ	N _d
متان	M	فشار (atm)	P
اکسیژن	O	عدد پیکلت	P _e
توده سلولی	X	شدت جریان حجمی	Q

چکیده

در این تحقیق مدل سازی بیوراکتوری با حلقه عمودی برای تولید توده زیستی (پروتئین تک یاخته) از گاز طبیعی (متان) انجام شده است. در ابتدا مراحل و مبانی مدلسازی شامل مدل های سینتیکی، هیدرودینامیکی و پراکندگی محوری تولید از میکروارگانیزم در بیوراکتورهای حلقه ای مورد بررسی قرار گرفته است و مدل سازی سینتیکی با استفاده از روابط پیشنهادی برای رشد سلولی مثل مدل مونود انجام شده است. در مدل سازی هیدرودینامیکی به بررسی عوامل اثر گذار بر جریان و سرعت های مایع و گاز پرداخته شد. در این پروژه عدد بندشتاین با دو فرض مختلف بدست آمده است. در مدل سازی تولید زیست توده از گاز طبیعی، فرآیند تولید توده سلولی محصول در بیوراکتور شبیه سازی شده است. روش های بدست آوردن عوامل لازم برای مدل سازی توضیح داده شده و سپس معادلات مدل برای بدست آوردن پارامترهای مدل سازی استخراج شد، پارامترهای سینتیکی مدل با روش های عددی بدست می آیند. در آخر با کمک مدل بدست آمده و پارامترهای سینتیکی تنظیم شده، بهینه سازی شرایط عملیاتی آزمایش با کمک آنالیز حساسیت مدل برای شرایط مختلف شامل درصد بهینه گاز دهی، سرعت مایع و سرعت گاز انجام شده است.

کلمه های کلیدی : مدل سازی، بیوراکتور حلقه عمودی، زیست توده، ضریب پراکندگی

محوری، پارامتر سینتیکی

مقدمه

بیوراکتور قسمت اصلی هر فرآیند بیوشیمیایی است که برای فراهم کردن یک محیط کنترل شده به منظور رسیدن به رشد بهینه و یا تشکیل محصول در یک سیستم بکار برده می شود. انواع بیوراکتورها شامل بیوراکتورهای همزن دار، ستونی حبابی و حلقه ای هواگرد با حلقه داخلی و خارجی می شود که راکتورهای حلقه ای هواگرد در میان آنها یکی از وسایل پر کاربرد در عملیات مهندسی شیمی، بیوشیمی و مهندسی محیط زیست هستند که میتوان به سنتز متانول یا دی متیل اتر، مایع سازی یا گدازش زغال، سنتز فیشر تروپش، تصفیه نفت [1]، تصفیه فاضلاب [2] و فرآیندهای تخمیری در صنایع بیوتکنولوژی [3] اشاره کرد. کاربرد بیوراکتورهای هواگرد به دلیل مزایای این نوع بیوراکتور از جمله طراحی ساده [2 و 4 و 5]، نیاز نداشتن به قسمت متحرک [4]، فراهم ساختن اختلاط کافی [2 و 4]، تماس عالی بین فازهای مایع و جامد [6]، سدگی حرکت یا جابجایی ذرات [6]، کاهش خطر بلوکه شدن مواد [6]، افت فشار کمتر [6]، سرعت بالای انتقال جرم و حرارت [2 و 5] و [6]، ته نشینی ناچیز ذرات جامد حتی در سرعت های پایین گازدهی [7]، تنش برشی کمتر نسبت به بیوراکتورهای همزن دار [5 و 8]، حداقل بودن توان ورودی [2 و 5]، سادگی نگهداری در مقایسه با بیوراکتورهای همزن دار [5]، انعطاف پذیری بالای عملیاتی [9]، پراکندگی بسیار خوب فاز گاز در فاز مایع [2] و هزینه پایین سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی [2] رو به رشد است. با این حال کاربرد بیوراکتورهای هواگرد به دلیل مسائلی مثل فقدان اطلاعات کافی برای افزایش مقیاس [3]، مشکل بودن توضیح عملکرد این بیوراکتورها [5 و 8] و کمتر بودن سرعت انتقال جرمی اکسیژن نسبت به بیوراکتورهای با اختلاط کامل [4] با محدودیت روبرو است.

مدل سازی بیوراکتورها برای طراحی، عملیات و کنترل سرعت تجمع در راکتور لازم است. مدل باید شامل انتقال جرم، سینتیک واکنش، ویژگی های جریان و هیدرودینامیک باشد. مدل سازی می تواند تحت تاثیر شرایط عملیاتی، هندسه بیوراکتور و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فازها (بویژه رفتار غیر چسبنده بودن) قرار گیرد. ترکیب کردن هیدرودینامیک با انتقال جرم و سینتیک واکنش و شکل جریان مدل کاملی را می دهد که می تواند عملکرد یک بیوراکتور هواگرد را به خوبی توصیف کند [10]. ویژگی های اختلاطی راکتورهای دوفازی گاز مایع اغلب در حدی بین دو جریان لوله ای و اختلاط کامل است. این پدیده با دو روش پرکنندگی محوری [1 و 2 و 4 و 6 و 7 و 11-14] و مدل تانک های سری [3 و 10] مدل سازی می شود.

مدل سازی بیوراکتورها گاه برای راکتورهای دوفازی با کشت میکروب [5 و 8] انجام یافته و گاه بدون کشت میکروب با حذف شبیه سازی انتقال جرم فاز گازی مثل اکسیژن و یا برای شبیه سازی پراکندگی زمان ماندگاری [3 و 5 و 8 و 9 و 13 و 15] انجام شده است. حالت های چند فازی نیز برای حالت های گاز- مایع [1 و 2 و 11 و 14 و 16] و گاز- مایع - جامد [16] در مقاله های متعدد دیده شده است.

مدل سازی برای بیوراکتورهای حلقه ای چند فازی با دو شکل مختلف بیوراکتور حلقه ای هواگرد با چرخش داخلی [2 و 3 و 5 و 7-9 و 13] و بیوراکتورهای حلقه ای هواگرد با چرخش خارجی [1 و 6 و 14-16] انجام شده است.

زمان اختلاط برای راکتورهایی با هندسه های مختلف و ترکیب های متفاوت با همزن یا بدون همزن استاتیک و چرخش با نیروی محرکه حاصل از اختلاف چگالی مایع و یا چرخش با نیروی محرکه خارجی را بررسی نموده است [18]. وجود همزن استاتیک در مسیر جریان دو فازی باعث بهبود رفتار هیدرودینامیکی و افزایش انتقال جرم جریان دو فازی گزارش شده است [4 و 6 و 19].

در این مقاله ها نشان داده شده که وجود صفحه هایی در مسیر جریان دو فازی افقی باعث هیدرودینامیک یکنواخت و ایجاد رژیم جریان حبابی پراکنده می شود. میزان نگهداشت کم در قسمت پایین بر (هوازدایی شده) راکتورهای هواگرد و زمان اندک ماندگاری جریان باعث کاهش میزان انتقال جرم در این بخش از بیوراکتور می شود [1]. بنابراین، افزایش مسیر بالابر می تواند باعث بهبود انتقال جرم در بیوراکتور شود.

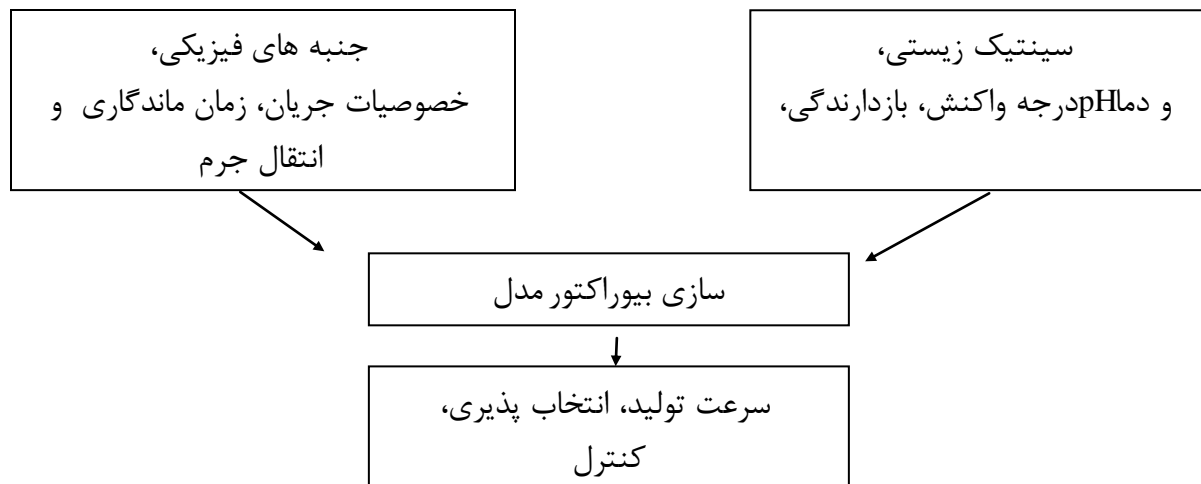
هیدرودینامیک راکتورهای هواگرد با توجه به الگوهای مختلف جریان بسته به شدت جریان گاز مشخص می شود. معمولاً دو رژیم جریان بحث می شوند: رژیم های همگن و ناهمگن. متغیرهای هیدرودینامیکی و نیز متغیرهای اختلاط فازی و انتقال جرم به شدت وابسته به رژیم جریان هستند. برای مدل سازی مناسب تعیین رژیم جریان ضروری است [10].

فصل اول:

مبانی مدل سازی
بیوراكتورهاى حلقه اى

1 - ضرورت مدل سازی

مطالعه تجربی و مدل سازی در بیوراکتورهای حلقه ای می تواند شناخت کامل تری از مباحث واکنش، هیدرودینامیک و انتقال جرم و حرارت را در دسترس قرار دهد. در شکل زیر فاکتورهای مؤثر بر هیدرودینامیک محیط برای طراحی یک بیوراکتور نشان داده شده است [20].

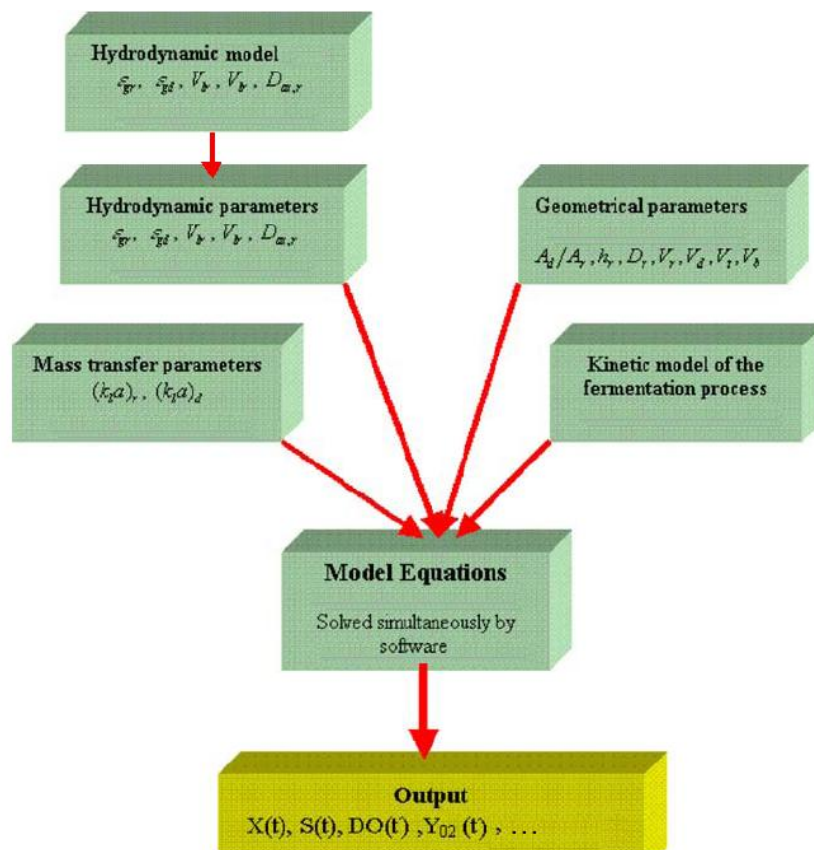


شکل 1-1- فاکتورهای مؤثر بر هیدرودینامیک محیط برای طراحی یک بیوراکتور [20]

چنانچه در شکل 1-1 آمده است، تعامل زیادی بین شرایط هیدرودینامیکی بیوراکتور و سینتیک زیستی، مورفولوژی و فیزیولوژی سلول و رشد آن وجود دارد. در بیوراکتوری با مقیاس بزرگ برخی از سلول ها ممکن است به دلیل زمان چرخش طولانی مایع و یک سرعت نامناسب در اثر اختلاط نامناسب یا انتقال جرم نامؤثر به صورت منطقه ای با کمبود مواد غذایی مواجه شوند و از فراهم نشدن مواد غذایی به اندازه کافی آسیب ببینند. همزدن و خوراک دهی می تواند بر روی مورفولوژی سلولی و نیز ویسکوزیته که همراه با تغییر دانسیته سلولی است، اثرگذار باشد. یعنی فرآیند رشد سلولی به شکل پیچیده ای تحت تاثیر هیدرودینامیک بیوراکتور است [20 و 21].

به هر حال برای شبیه سازی کامپیوتری روابط و پارامترهای زیادی شامل پارامترهای هندسی، مدل سینتیکی، انتقال جرم و هیدرودینامیکی مورد نیاز است. این مقادیر با استفاده از روابط مناسب برای راکتور تحت شرایط خاص بدست می آیند. شکل 1-2 ارتباط بین این معادله ها و پارامترها را نشان می دهد. پارامترهای سینتیکی با استفاده از تطبیق مدل سینتیکی با داده های آزمایشگاهی در

بیوراکتوری کوچک با شرایط اختلاطی ایده آل بدست می آید. پارامترهای هیدرودینامیکی شامل تعداد تانک ها، نگهداشت گاز، سرعت های چرخش و ضرایب انتقال جرم حجمی هستند. این پارامترها با استفاده از روابط نیمه تجربی موجود در مقاله ها تخمین زده می شوند. برای برخی از این روابط ممکن است از مدل سازی نیز استفاده شود. این مدل ها می توانند برای محیط آب- هوا و یا برای یک محیط واقعی تخمیر باشند [8].



شکل 1-2- مراحل مدل سازی راکتور [8]

1-1- مدل سازی سینتیکی

بویا داشتن عملیاتی موثر و کارا در فرآیند، تعیین مشخصه های رشد سلولی و تولید ضروری است. مدل سازی سینتیکی شامل مرحله هایی از جمله تعیین سوبسترای محدود کننده، انتخاب مدل سینتیکی و در نظر گرفتن شرایط خاص (مثل محدودیت های سرعت انتقال جرم) است. مدل سازی سینتیکی بر اساس دو نوع ساختاری و غیر ساختاری انجام می شود: مدل های ساختاری در برگزیده برخی از مفاهیم اساسی از ساختمان سلول و ترکیبات آن هستند، در صورتی که مدل های غیر ساختاری تنها

گویای تغییر جرم سلولی برای بیان سامانه بیولوژیکی اند [22]. مدل سازی های بحث شده در این تحقیق از نوع غیر ساختاری هستند.

فعالیت میکروارگانیسم ها به مقدار زیادی به شرایط محیطی مانند دما، pH و ترکیب مواد در محیط کشت وابسته است [23-25]. همچنین از آنجایی که میکروارگانیسم های متانوتروف، سوبسترا را به صورت محلول مصرف می کنند، در شرایطی که سوبسترا در فاز گاز باشد رشد سلولی به شرایط هیدرودینامیکی سامانه از جمله ضریب انتقال جرم و فشار نیز ارتباط دارد [25-27].

1-1-1- سینتیک رشد میکروبی

در فرآیند تخمیر سلول های میکروبی، اندازه میکروب در ابتدا و قبل از تقسیم شدن بزرگ می شود. زمان لازم برای اینکه سلول رشد کند و به دو قسمت تقسیم شود را زمان تولید می گویند که بستگی به مشخصه های میکروارگانیسم و شرایط محیطی که میکروب در آن زندگی می کند، دارد. به هر حال رشد میکروارگانیسم ها عموماً در ترم هایی از افزایش در جمعیت میکروبی (یعنی تعداد سلول های زنده) اندازه گیری می شود. رشد بهینه به نگهداری بهینه، انتقال مواد غذایی در محیط کشت به درون سلول و پارامترهای محیطی وابسته است [28].

در سیستم بسته¹ رشد میکروارگانیسم معمولاً در چهار فاز اصلی قرار می گیرد: فاز تاخیر، فاز رشد توانی، فاز ایستایی و مرگ. فاز رشد به صورت توانی می تواند با معادله درجه اول زیر دنبال شود:

$$(1-1) \frac{dC_X}{dt} = \mu C_X$$

در حالی که dC_X/dt سرعت رشد ($g.L^{-1}.hr^{-1}$) و C_X غلظت متغیر از سلول های زنده (g/L) و μ سرعت ویژه رشد (h^{-1}) است. ارتباط بین سرعت ویژه رشد و غلظت سوبسترای محدود کننده به طور گسترده ای مطالعه شده اند؛ مانند مدل مونود و موسر. معادله مونود به شکل زیر توضیح داده می شود:

$$(2-1) \mu = \frac{\mu_m C_S}{K_S + C_S}$$

¹ batch