

## تولید PHAs از لجن فعال با استفاده از پساب شهری

حسین گنجی دوست\*<sup>+</sup>، نادر مختارانی، بیتا آیتی، مصطفی جعفرپور

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، صندوق پستی ۴۸۳۸ - ۱۴۱۵۵

**چکیده:** از میان پلاستیک های قابل تجزیه که تاکنون تهیه شده، پلی هیدروکسی آلکانوات ها به علت قابلیت تجزیه پذیری کامل، پایین بودن هزینه تولید در مقایسه با سایر پلیمرهای زیست تخریب پذیر و همچنین سادگی نسبی فرایند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مشکلات موجود در دفع پسماندهای پلاستیکی و دفع لجن مازاد تصفیه خانه پساب شهری و همچنین کاهش هزینه تولید، امکان تولید PHAs توسط لجن فعال و تعیین شرایط بهینه برای افزایش تولید PHAs موضوع این پژوهش قرار گرفت. در این پژوهش از یک راکتور SBR هوازی - بی هوازی برای خود دادن میکروارگانیسم ها و از یک راکتور منقطع هوازی برای غنی سازی میکروارگانیسم ها از پلیمر استفاده شده و اثر چهار پارامتر زمان ماند سلولی، زمان هوادهی، غلظت اسیدهای چرب فرار در پساب شهری و منبع کربن برای غنی سازی میکروارگانیسم ها بر میزان تولید پلیمر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا با انجام آزمایش های اولیه میزان مصرف استات و پروپیونات توسط لجن فعال به ترتیب در بازه  $15-17$  و  $30-32$   $mgC.L^{-1}.g^{-1}SS$  و مدت زمان فرایند تولید پلیمر ۲۴ ساعت تعیین شد. سپس طراحی آزمایش با روش تاگوشی انجام شد و برای هر یک از چهار پارامتر سه سطح در نظر گرفته شده و ۹ ترکیب آزمایشی اجرا و نتیجه های آزمایش ها با نرم افزار QUALITEK-4 آنالیز شد. بر اساس نتیجه های به دست آمده زمان ماند سلولی ۱۰ روز، زمان هوادهی ۳ ساعت، پساب شهری همراه با درصدی استات به عنوان افزودنی و استات به عنوان منبع کربن در راکتور تولید پلیمر به عنوان شرایط بهینه تعیین شد. نتیجه های آزمایش ها همچنین نشان می دهد که در شرایط بهینه، با استفاده از لجن مازاد تصفیه خانه پساب شهری، امکان تولید PHAs به میزان ۱۲.۶٪ وزن مواد جامد معلق مایع مخلوط (MLSS) وجود دارد.

**واژه های کلیدی:** لجن فعال، پلی هیدروکسی آلکانوات ها، زمان هوادهی، زمان ماند سلولی، تاگوشی.

**KEY WORDS:** Activated sludge, Polyhydroxyalkanoates (PHA), Aeration time, Cell retention time, Taguchi.

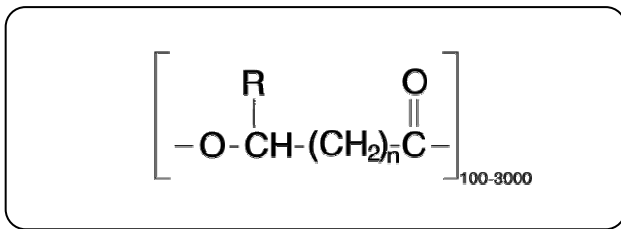
### مقدمه

و به نظر می رسد که علت اصلی آن نا آشنا بودن چنین سوبستراهای پلیمری - پلاستیکی با عملکرد آنزیمی موجودات زنده و عدم امکان شکست زنجیره می باشد. در سال های اخیر، نگرانی عمومی در مورد اثرهای زیان آور پلاستیک های مصنوعی در محیط افزایش یافته و این مسئله پژوهش گران کشورهای گوناگون را برای توسعه پلاستیک های

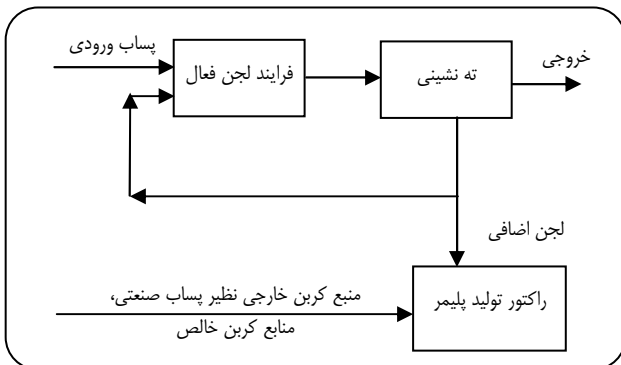
با افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی، مصرف انواع پلاستیک افزایش چشمگیری داشته است. پلاستیک ها به دلیل داشتن ویژگی های خوب نظیر مقاومت، سبکی، دوام و مقاومت در برابر تجزیه، در بسیاری از کالاهای مصرفی و پایدار مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. اما پلاستیک ها در برابر تجزیه میکروبی مقاوم می باشند

\*E-mail: h-ganji@modares.ac.ir

\*عده دار مکاتبات



شکل ۱- ساختار شیمیایی عمومی پلی هیدروکسی آلکانوات تولید شده در باکتری‌ها [۷].



شکل ۲- نمودار سیستم تولید PHA با لجن فعال تصفیه خانه پساب شهری.

مرحله دوم غنی‌سازی میکروارگانیسم‌ها از PHAs مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون بسیاری از مطالعه‌های انجام شده در این زمینه با استفاده از پساب مصنوعی انجام پذیرفته [۲۰ - ۱۵] بنابراین در این پژوهش، پساب شهری برای خو دادن میکروارگانیسم‌ها مورد استفاده قرار گرفته و تمرکز بر تولید لجن در شرایط واقعی تصفیه‌خانه بوده است.

## بخش تجربی

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور انجام آزمایش‌های مورد نیاز از دو راکتور گوناگون استفاده شد. در راکتور اول خودادن میکروارگانیسم‌ها به منظور تولید پلیمر در یک سامانه SBR و در راکتور دوم غنی‌سازی میکروارگانیسم‌ها از پلیمر در یک سامانه ناپیوسته<sup>(۱)</sup> انجام پذیرفت. به منظور آنالیز PHAs، پلیمرهای تولیدی با استفاده از متانول اسیدی به متیل استر تبدیل و پس از جداسازی فاز آلی از فاز آبی به دستگاه GC تزریق شده است [۲۱]. سایر آزمایش‌های انجام شده نیز بر اساس روش‌های مندرج در کتاب استاندارد روش آزمایش‌های آب و پساب انجام پذیرفته است [۲۲].

زیست تخریب‌پذیر به تکاپو انداخته است. تولید پلاستیک‌های سازگار با محیط زیست نظیر بیوپلاستیک‌ها واقعیتی است که می‌تواند به ما در حل مشکل آلودگی حاصل از پلاستیک‌های تجزیه‌ناپذیر کمک کند [۲]. از میان پلاستیک‌های قابل تجزیه که تاکنون تهیه شده، گروهی تحت عنوان پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHAs) و کوپلیمرهای آن که بالغ بر چهل نوع ترکیب می‌باشند به علت قابلیت تجزیه‌پذیری کامل، پایین بودن هزینه تولید و همچنین سادگی فرایند نسبت به سایر پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است [۳].

انواع پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات که ساختار عمومی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده، پلی‌استرهای از هیدروکسی اسیدهای گوناگون هستند که به‌وسیله‌ی تعداد زیادی از میکروارگانیسم‌ها به عنوان مواد ذخیره انرژی تولید می‌شوند [۴، ۵]. بیش از ۳۰۰ نوع میکروارگانیسم مختلف مولد PHAs وجود دارد [۶].

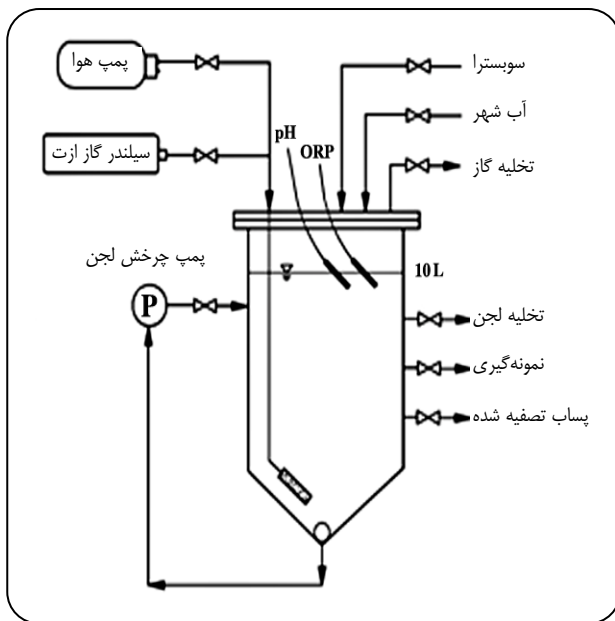
باکتری‌ها، انواع پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات را به عنوان منبع کربن و انرژی در شرایط محدودیت مواد مغذی اصلی نظیر نیتروژن و فسفر در حضور منبع کربن اضافی تولید می‌کنند [۸]. با وجود این که انواع پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات به عنوان بهترین جانشین برای پلیمرهای مشتق از نفت شناخته می‌شوند، لیکن هزینه بالای تولید تجاری آن (که بیش از ۱۰ برابر پلاستیک‌های مصنوعی است) مانع اصلی کاربردشان در صنعت می‌شود. علت اصلی بالا بودن قیمت تمام شده این پلیمرها را می‌توان ناشی از هزینه بالای مواد اولیه مورد نیاز (۴۰٪) و هزینه‌های مربوط به بازیافت و خالص‌سازی پلیمر (۲۶٪) دانست [۹، ۱۰]. مهم‌ترین عامل در افزایش هزینه تولید PHAs قیمت مواد غذایی (به‌طور اساسی منبع کربن) است [۱۱، ۱۲]. به منظور کاهش قیمت PHAs، راهبرد جدید تولید PHAs، استفاده از کشت مخلوط باکتری‌ها است. لذا کشت مخلوط لجن فعال در دو دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته و تلاش‌های بسیار زیاد و قابل توجه‌ای در این راه صورت گرفته است [۱۳، ۱۴]. برتری تولید PHAs با استفاده از لجن فعال در مقایسه با فرایند کشت خالص، کاهش هزینه کشت باکتری‌های تولیدکننده PHAs، سادگی تجهیزات و ساختار و بازیافت مواد از پساب می‌باشد [۱۱].

در این مطالعه به منظور تولید PHAs از یک سیستم دو مرحله‌ای استفاده شده است (شکل ۲). در مرحله اول، بهینه‌سازی فرایند تصفیه پساب با افزایش توانایی لجن در تولید پلیمر مد نظر بوده و در

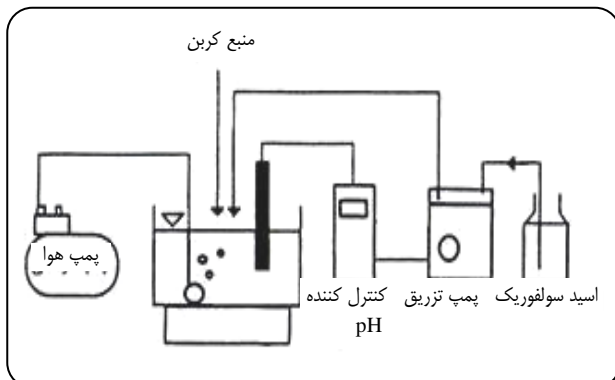
(۱) Batch

جدول ۱- مشخصات پساب شهری مورد استفاده (mg/L به جز pH).

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
pH	۶٫۶۷ - ۷٫۷۲	مواد معلق	۴۴ - ۶۵
BOD <sub>5</sub>	۹۰ - ۱۹۰	فسفات	۷٫۷ - ۱۲٫۴
COD	۱۳۵ - ۲۴۴	آمونیاک	۱۳٫۹ - ۲۰٫۸
مواد جامد	۴۱۸ - ۶۳۱	ازت آلی	۵٫۵ - ۹٫۸
مواد محلول	۳۷۴ - ۵۶۶		



شکل ۳- راکتور SBR.



شکل ۴- راکتور تولید پلیمر.

در این پژوهش از تری هیدروکسی بوتیریک اسید (Sigma-USA) برای اندازه گیری کمی ۳HB و از کوپلیمر PHAs (Sigma-USA) که شامل ۸۸ درصد وزنی ۳HB و ۱۲ درصد وزنی ۳HV بوده برای اندازه گیری کمی ۲HV استفاده شد. سدیم پروپیونات مورد استفاده با خلوص آزمایشگاهی محصول شرکت Spectrum آمریکا و سایر مواد شیمیایی مورد استفاده نیز با خلوص آزمایشگاهی و محصول شرکت Merck آلمان بودند.

### خودادن میکروارگانیسم‌ها

به منظور خودادن میکروارگانیسم‌ها جهت تولید پلیمر از یک سامانه راکتورهای متوالی با جریان منقطع<sup>(۱)</sup> با حجم ده لیتر که شمایی از آن در شکل ۳ آورده شده استفاده گردید. در این راکتور که به صورت بی‌هوای - هوای عمل می‌کرد کلیه مراحل توسط یک سامانه الکتریکی به صورت دقیق کنترل می‌شد. در سامانه مورد نظر که در دمای ۲۵-۲۳°C مورد استفاده قرار گرفت در هر سیکل ۲۰ دقیقه ۲، ۳ و یا ۴ ساعت برای مرحله هوای، یک ساعت برای مرحله بی‌هوای، و ۲۰ دقیقه به منظور تخلیه پساب تصفیه شده پیش‌بینی شد. در این راکتور از پساب شهری که از تصفیه‌خانه پساب شهرک قدس تهران تهیه می‌شد به عنوان خوراک استفاده شده است. کیفیت خوراک ورودی به سامانه در جدول ۱ نشان داده شده است.

### تولید پلیمر

به منظور غنی سازی میکروارگانیسم‌ها از پلیمر از یک سامانه ناپیوسته با حجم ۱٫۵ لیتر استفاده شد. این سامانه به صورت کاملاً هوای و در دمایی مشابه دمای سامانه SBR مورد استفاده قرار گرفت. در این سامانه که شمایی از آن در شکل ۴ نشان داده شده، مقداری از لجن مازاد سامانه SBR با مقدار مشخصی از منبع کربن ناشی از اسیدهای چرب فرار (VFAs) مخلوط و سپس به مدت ۲۴ ساعت هوادهی شد.

در این پژوهش از سدیم استات و سدیم پروپیونات به عنوان منابع کربن استفاده شد. از آنجایی که یون استات و پروپیونات باعث افزایش pH سامانه می‌شد از محلول رقیق سولفوریک اسید به منظور تثبیت pH در محدوده خنثی استفاده شد.

(۱) Sequencing batch reactor

جدول ۲- متغیرهای مورد مطالعه و سطوح آن‌ها.

سطح	متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
	خوراک SBR	پساب شهری	پساب شهری با استات	پساب شهری با پروبیونات
	زمان هوادهی (ساعت)	۲	۳	۴
	زمان ماند سلولی (روز)	۳	۵	۱۰
	منبع کربن در راکتور تولید پلیمر	استات	استات - پروبیونات	پروبیونات

جدول ۳ - شرایط آزمایش‌ها در آرایه متعامد L<sub>9</sub> و نتیجه‌های حاصل.

آزمایش	خوراک SBR	زمان هوادهی (ساعت)	زمان ماند سلولی (روز)	منبع کربن	میزان تولید (% MLSS)
اول	پساب شهری	۲	۳	استات	۴,۹۴۴
دوم	پساب شهری	۳	۵	استات - پروبیونات	۹,۱۴۱
سوم	پساب شهری	۴	۱۰	پروبیونات	۳,۲۲۸
چهارم	پساب شهری با استات	۲	۵	پروبیونات	۴,۲۴۱
پنجم	پساب شهری با استات	۳	۱۰	استات	۱۲,۵۷۹
ششم	پساب شهری با استات	۴	۳	استات - پروبیونات	۶,۴۹۵
هفتم	پساب شهری با پروبیونات	۲	۱۰	استات - پروبیونات	۸,۹۲۶
هشتم	پساب شهری با پروبیونات	۳	۳	پروبیونات	۳,۸۲
نهم	پساب شهری با پروبیونات	۴	۵	استات	۹,۲۸۷

### طراحی آزمایش

در این پژوهش از روش آماری تاگوچی، به منظور طراحی آزمایش، استفاده شد. جهت تجزیه و تحلیل نتیجه‌ها نیز از نرم‌افزار آماری QUALITEK-4 که به‌طور اختصاصی برای تحلیل آماری پاسخ‌ها به روش تاگوچی طراحی شده، استفاده گردید. پارامترهایی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت شامل غلظت اسیدهای چرب فرار در پساب شهری، زمان هوادهی، زمان ماند سلولی و منبع کربن مورد استفاده در راکتور تولید پلیمر بوده است. براساس مطالعه‌های انجام شده [۳] هر عامل در سه سطح مطابق جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفته و بنابراین با توجه به روش تاگوچی آرایه متعامد L<sub>9</sub> در این خصوص مورد استفاده قرار گرفته است. در آرایه L<sub>9</sub> ۹ ترکیب آزمایشی مستقل وجود داشته که شرایط هر یک از این آزمایش در جدول ۳ مشخص شده است.

### نتیجه‌ها و بحث

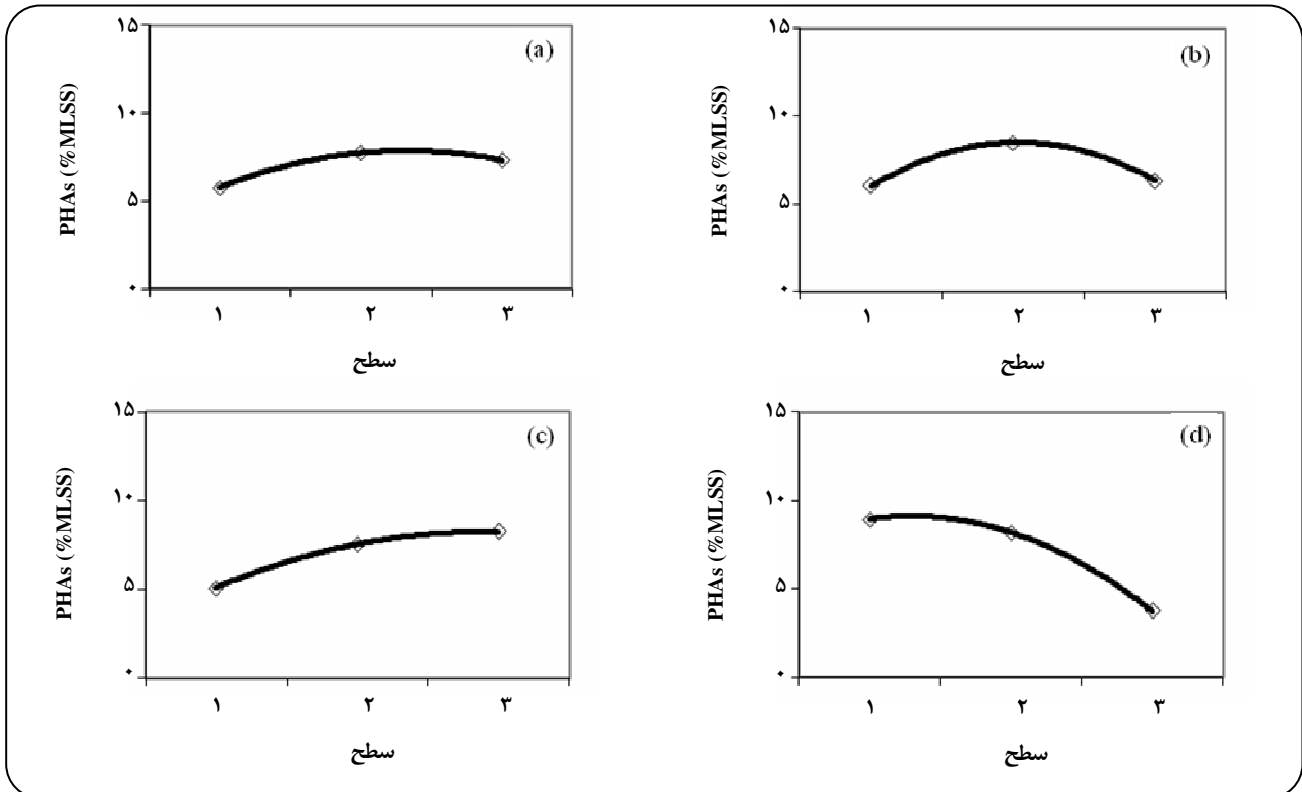
ابتدا با انجام آزمایش‌های اولیه (جزئیات در این مقاله ذکر نشده)، میزان مصرف استات و پروبیونات توسط لجن فعال به ترتیب

در بازه‌ی  $30-32 \text{ mg C.L}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ss}$  و  $15-17$  و زمان فرایند تولید پلیمر به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. بنابراین در آزمایش‌هایی که استات و پروبیونات به عنوان تنها منبع کربن راکتور تولید پلیمر استفاده شد، حداکثر غلظت سدیم استات  $1800 \text{ mg C.L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$  و حداکثر غلظت سدیم پروبیونات  $(30-32 \text{ mg C.L}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ss})$  و  $(15-17 \text{ mg C.L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ss})$  در نظر گرفته شد. در آزمایش‌هایی که منبع کربن آن‌ها ترکیبی از استات و پروبیونات بود، با توجه به نرخ مصرف استات و پروبیونات بیشترین غلظت  $1400 \text{ mg C.L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$  در نظر گرفته شد که استات و پروبیونات هر کدام ۵۰ درصد کربن مورد استفاده را تشکیل می‌دادند. نتیجه‌های ۹ آزمایش آرایه شده در آرایه متعامد تاگوچی، در ستون آخر جدول ۳ آورده شده است.

پس از انجام آزمایش‌های مورد نظر اثرات اصلی و برهم‌کنشی متغیرها مورد بررسی قرار گرفته و با محاسبه عملکرد میانگین متغیرها، میانگین اثر هر سه سطح همه متغیرها مطابق شکل ۵ تعیین شد. تفاوت میان اثر میانگین سطوح همه متغیرها در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود زمان ماند سلولی،

جدول ۴- میانگین پاسخ سطوح متغیرها.

متغیر	سطح ۱ (L <sub>۱</sub> )	سطح ۲ (L <sub>۲</sub> )	سطح ۳ (L <sub>۳</sub> )	L <sub>۱</sub> -L <sub>۲</sub>	L <sub>۱</sub> -L <sub>۳</sub>	L <sub>۲</sub> -L <sub>۳</sub>
خوراک SBR	۵,۷۷۴	۷,۷۷۱	۷,۳۴۴	-۱,۹۹۷	-۱,۵۷۰	۰,۴۲۷
زمان هوادهی	۶,۰۳۷	۸,۵۱۳	۶,۳۴	-۲,۴۷۶	-۰,۳۰۳	۲,۱۷۳
زمان ماند سلولی	۵,۰۸۶	۷,۵۵۶	۸,۲۴۷	-۲,۴۷	-۳,۱۶۱	-۰,۶۹۱
خوراک راکتور تولید پلیمر	۸,۹۳۶	۸,۱۸۷	۳,۷۶۶	۰,۷۴۹	۵,۱۷	۴,۴۲۱



شکل ۵- اثر متغیرها بر بازدهی تولید PHA، (a) خوراک SBR (b) زمان هوادهی (c) زمان ماند سلولی (d) خوراک راکتور تولید پلیمر.

جدول ۵ مقادیرهای به دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری به روش آنالیز واریانس جهت تعیین سهم هر یک از پارامترها را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است متغیر خوراک راکتور تولید پلیمر بیشترین و خوراک راکتور SBR کمترین سهم را بر نتیجه آزمایش داشته‌اند.

سطوح بهینه متغیرها و مقدار مطلوب آن‌ها و سهم هر یک در بهبود کیفیت (مازاد بر مقدار متوسط کل پاسخ‌ها) که منجر به پیدا شدن و پیش‌بینی پاسخ (میزان تولید PHAs) در شرایط بهینه می‌شود در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پساب همراه با درصدی استات، زمان هوادهی ۳ ساعت،

خوراک سیستم SBR، زمان هوادهی و خوراک راکتور تولید پلیمر به ترتیب بیشترین اثر را بر تولید پلیمر دارا بوده‌اند.

هدف در این پژوهش تولید بیشتر پلیمر بوده بنابراین پاسخ در هر یک از سطوح متغیر که بزرگتر باشد، به عنوان سطح بهینه متغیر معرفی می‌شود. در نتیجه با در نظر گرفتن شکل ۵ و اطلاعات اریه شده در جدول ۴ سطح ۲ برای متغیر خوراک SBR، سطح ۲ برای متغیر زمان هوادهی، سطح ۳ برای متغیر زمان ماند سلولی و سطح ۱ برای متغیر خوراک PPR به عنوان سطوح بهینه متغیرها انتخاب شدند که احتمالاً بهترین پاسخ را در این شرایط ارایه خواهند داد.

جدول ۵ - تجزیه و تحلیل آماری آرایه متعامد L<sub>۹</sub> به روش آنالیز واریانس.

متغیر	درجه آزادی (DOF)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت واریانس (F)	مجموع مربعات خالص (S')	درصد سهم (P%)
خوراک SBR	۲	۶۶۳۶	۳۳۱۸	---	۶۶۳۶	۸,۱۹۳
زمان هوادهی	۲	۱۰۹۴۷	۵۴۷۳	---	۱۰۹۴۷	۱۳,۵۱۵
زمان ماند سلولی	۲	۱۶,۵۷۲	۸,۲۸۶	---	۱۶,۵۷۲	۲۰,۴۶۱
خوراک PPR	۲	۴۶,۸۳۹	۲۳,۴۱۹	---	۴۶,۸۳۹	۵۷,۸۲۸
مجموع	۸	۸۰,۹۹۶				۱۰۰,۰۰%

جدول ۶ - شرایط بهینه تولید PHA

متغیر	مقدار	سطح بهینه	سهم
خوراک SBR	فا ضلاب شهری با استات	۲	۰,۸۰۸
زمان هوادهی	۳ ساعت	۲	۱,۵۴۹
زمان ماند سلولی	۱۰ روز	۳	۱,۲۸۴
خوراک PPR	استات	۱	۱,۹۷۳
سهم کل متغیرها			۵,۶۱۳
متوسط کل پاسخ ها			۶,۹۶۳
پاسخ در شرایط بهینه			۱۲,۵۷۷

میکروارگانیسیمها با محدودیت مواد غذایی مواجه نشده و شرایط برای تولید پلیمر آماده نیست. با افزایش زمان هوادهی به بیش از ۳ ساعت میکروارگانیسیمها به مرحله‌ی خود خوری وارد شده و جمعیت میکروبی دستخوش تغییرات خواهد شد. بنابراین بهترین حالت برای تولید پلیمر قرار گرفتن در فاز Stationary می‌باشد. به عبارت دیگر لجن فعالی که در این فاز قرار دارد در مقایسه با لجنی که در فاز خود خوری قرار می‌گیرد توانایی تولید پلیمر بیشتری را دارا می‌باشد. این نتیجه با نتیجه‌های پژوهش‌های پیشین نیز مطابقت دارد [۳].

زمان ماند سلولی به عنوان عامل دیگر موثر در تولید فراورده تعیین شده است. حدود ۲۰/۵ درصد عامل تولید پلیمر، زمان ماند سلولی ۱۰ روز می‌باشد. علت بالا رفتن توانایی لجن در تولید پلیمر با افزایش زمان ماند سلولی را می‌توان بدین شرح برشمرد:  
الف) افزایش عمر لجن باعث ایجاد جمعیتی از میکروارگانیسیمها می‌شود که توانایی بالاتری برای تولید پلیمر دارا می‌باشند.

عمر لجن ۱۰ روز و استات به عنوان منبع کربن در راکتور تولید پلیمر شرایط بهینه می‌باشد که با نتیجه‌های به دست آمده از مطالعه آثار اصلی با این ویژگی که هرچه کیفیت هدف بالاتر باشد بهتر است، مطابقت دارد.

اگر چه در روش تاگوچی در بیشتر اوقات، شرایط بهینه، یکی از شرایط آزمایشی اجرا شده نیست (زیرا در این روش تعداد کمی از ترکیب‌های ممکن بین متغیرها آزمایش می‌شود)، اما در این پژوهش شرایط بهینه، همان شرایط آزمایش پنجم آرایه متعامد بوده است. با در نظر گرفتن موارد مندرج در جدول های ۵ و ۶ و شکل ۵ می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

از سطح‌های مطالعه شده جهت خوراک راکتور SBR، سطح دوم (پساب شهری همراه با استات) به عنوان سطح بهینه انتخاب شده است. این عامل دارای ۸,۲ درصد نقش در تولید محصول است. سطح دوم متغیر زمان هوادهی بهترین بازده را داشته است. زمان هوادهی ۳ ساعت در حدود ۱۳/۵ درصد در تولید پلیمر نقش داشته است. در زمان هوادهی کمتر از ۳ ساعت هنوز

به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- میزان تولید PHAs بیشینه از لجن فعال در راکتور تولید پلیمر در ۶ ساعت اول مشاهده شد و پس از آن تا ۱۸ ساعت تغییر قابل توجهی در میزان پلیمر تولیدی مشاهده نشد. با این وجود به منظور اطمینان بیشترین زمان فرایند در راکتور تولید پلیمر به میزان ۲۴-۱۸ ساعت تعیین شد.
- ۲- وجود مقداری اسیدهای چرب فرار در ورودی پساب شهری باعث افزایش قابل توجه راندمان تولید پلیمر می‌شود. در این مورد اثر استات بیشتر از پروپیونات بوده است.
- ۳- زمان هوادهی بر میزان تولید پلیمر تأثیر اندکی داشته و براساس آزمایش‌های انجام شده زمان هوادهی ۳ ساعت به عنوان شرایط بهینه انتخاب شده است. همچنین این نتیجه به دست آمد که لجن فعالی که در فاز Stationary قرار می‌گیرد در مقایسه با لجنی که در فاز خود خوری قرار می‌گیرد توانایی تولید پلیمر بیشتری را داراست.
- ۴- بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، بیشترین تولید پلیمر در زمان ماند سلولی ۱۰ روز به دست آمد.
- ۵- خوراک راکتور تولید پلیمر بیشتر از سایر متغیرها در تولید فرآورده نقش داشته و تغییر ترکیبات خوراک این راکتور بر مقدار پلیمر تولیدی مؤثر بوده است. در این مورد بیشترین میزان PHAs در شرایطی به دست آمده که سدیم استات به تنهایی به عنوان منبع تامین کربن مورد استفاده قرار گرفته است.
- ۶- بر طبق نتیجه‌های به دست آمده از روش آماری تاگوچی پساب شهری با درصدی استات، زمان هوادهی ۳ ساعت، زمان ماند سلولی ۱۰ روز و استات به عنوان خوراک راکتور تولید پلیمر به عنوان شرایط بهینه جهت تولید پلیمر تعیین شد.
- ۷- براساس نتیجه‌های به دست آمده بیشترین بازدهی پیش‌بینی شده در این روش در شرایط بهینه با استفاده از لجن مازاد تصفیه خانه پساب شهری در حدود ۱۲٫۶ درصد مواد جامد معلق مایع مخلوط (MLSS) می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان گیلان به خاطر حمایت مادی و معنوی از این پژوهش نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۵/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۳۱

ب) علت دیگر بالا رفتن توانایی لجن در تولید پلیمر با افزایش زمان ماند سلولی را می‌توان به نسبت بار آلی به توده میکروبی ارتباط داد.

براساس مطالعه‌های انجام شده [۲۳] بیشترین میزان ذخیره PHAs در یک سیستم غیر مداوم در متوسط بار آلی به دست آمده است. لذا این امکان وجود دارد که با افزایش عمر لجن و در راستای آن افزایش توده میکروبی، نسبت بار آلی به توده میکروبی به حد ایده‌آل نزدیک و در نتیجه میزان تولید پلیمر افزایش یافته است.

خوراک راکتور تولید پلیمر در تولید محصول بیشترین نقش را دارد. بهترین منبع کربن مورد استفاده در راکتور تولید پلیمر (PPR) برای غنی سازی میکروارگانیسم‌ها، استات با حدود ۵۷٫۸ درصد سهم در تولید محصول می‌باشد. ترکیب استات با پروپیونات باعث کاهش تولید پلیمر شده و استفاده از پروپیونات به عنوان منبع کربن نیز تولید کم PHAs را به دنبال دارد. از آنجا که در راکتور تولید پلیمر از سدیم استات به عنوان منبع کربن استفاده شده است علت این امر را می‌توان با تطبیق میکروارگانیسم‌ها در مصرف اسیدهای چرب قبل از انتقال به راکتور تولید پلیمر مرتبط دانست. لازم به ذکر است که این بخش از نتیجه‌ها با نتیجه مطالعه‌های انجام شده با استفاده از پساب مصنوعی به طور کامل تطابق دارد [۱۶]. بنابراین به منظور بالا بردن میزان تولید پلیمر افزودن مقداری اسید چرب فرار به پساب جهت تطبیق لجن بسیار مطلوب می‌باشد. از بهترین منابع تامین اسیدهای چرب فرار در صنایع می‌توان به پساب صنایع غذایی، صنایع لبنی، صنایع دارویی و همچنین خروجی واحدهای هضم بی‌هوازی لجن اشاره نمود.

براساس نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش در شرایط بهینه با استفاده از لجن مازاد تصفیه خانه پساب شهری می‌توان تا حداکثر ۱۲٫۶ درصد مواد جامد معلق مایع مخلوط (MLSS) پلیمر تولید نمود که این میزان ۲۰ درصد کمتر از میزان پلیمر تولیدی با استفاده از پساب مصنوعی در مطالعه مشابه می‌باشد [۳].

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر چهار متغیر گوناگون بر تولید PHAs با استفاده از لجن فعال مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از روش آماری تاگوچی و نرم افزار QUALITEK-4 و به کار گیری آرایه متعامد توصیه شده، شرایط بهینه برای تولید PHAs تعیین و میزان تأثیر هر یک از متغیرها مشخص شد. مهمترین نتیجه‌های

## مراجع

- [1] Ueno T., Satoh H., Mino T., Matsuo T., Production of Biodegradable Plastics, *Polymer Preprint*, **42**, p. 981 (1993).
- [2] Reddy C.S.K., Ghai R., Rashmi Kalia V.C., Polyhydroxyalkanoates: an Overview, *Bioresource Technology*, **87**, p.137 (2003).
- [3] Mokhtarani N., Determination of Effective Factors on the Production of Poly-Hydroxyalkanoates by Activated Sludge, Ph.D.Thesis, Tarbiat Modares University, (2005).
- [4] Lee S.Y., Choi J.I., Production and Degradation of Polyhydroxyalkanoates in Waste Environment, *Waste Management*, **19**, p. 133 (1999).
- [5] Liu W.T., Mino T., Matsuo T., Nakamura K. Isolation, Characterization and Identification of Polyhydroxyalkanoate-Accumulating Bacteria from Activated Sludge, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **90** (5), p. 494 (2000).
- [6] Chua Adeline S.M., Takabatake H., Satoh H., Mino T., Production of Polyhydroxyalkanoates (PHA) by Activated Sludge Treating Municipal Wastewater: Effect of pH, Sludge Retention Time (SRT), and Acetate Concentration in Influent, *Water Research*, **37**, p. 3602 (2003).
- [7] Wu H.A., Sheu D.S., Lee C.Y., "Rapid Differentiation between Short-Chain-Length and Medium-Chain-Length Polyhydroxyalkanoate-Accumulating Bacteria with Spectrofluorometry, *Journal of Microbiological Methods*, **53**, p. 131 (2003).
- [8] De-Bashan L.E., Bashan Y., Recent Advances in Removing Phosphorus from Wastewater and its Future Use as Fertilizer (1997–2003), *Water Research*, **38**, pp. 4222-4246 (2004).
- [9] Tsuge T., Metabolic Improvements and Use of Inexpensive Carbon Sources in Microbial Production of Polyhydroxyalkanoates, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **94**(6), p. 579 (2002).
- [10] Yan Q., Du Guocheng Chen Jian., Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) with Continuous Feeding of Mixed Organic Acids as Carbon Sources by *Ralstonia Eutropha*, *Process Biochemistry*, **39**, p. 387 (2003).
- [11] Khanna Shilpi a, Srivastava Ashok K., Recent Advances in Microbial Polyhydroxyalkanoates, *Process Biochemistry*, **40**, p. 607 (2005).
- [12] Taguchi S., Nakamura H., Kichise T., Tsuge T., Yamato I., Doi Y., Production of Polyhydroxyalkanoate (PHA) from Renewable Carbon Sources in Recombinant *Ralstonia Eutropha* using Mutants of Original PHA Synthase, *Biochemical Engineering Journal*, **16**, p. 107 (2003).
- [13] Satoh H., Iwamoto Y., Mino T., Matsuo T., Activated Sludge as a Possible Source of Biodegradable Plastic, *Water Sci. Technol.*, **38**, p. 103 (1998).
- [14] Satoh H., Mino T., Matsuo T., PHA Production by Activated Sludge, *International Journal of Biological Macromolecules*, **25**, p. 105 (1999).



- [15] Ganjidust H., Vasheghani Farahani E., Borghee M. and Mokhtarani N., Investigation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) Production in Activated Sludge Reactor, *Iranian Journal of Polymer Science & Technology*, **17** (6), 353 (2005).
- [16] Mokhtarani N., Ganjidust H., Vasheghani Farahani E., Khaleghi Sarnamy M., Effect of VFAs in the production of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) by activated sludge, *Iranian Journal of Polymer Science & Technology*, **21** (1), p. 83 (2008).
- [17] Lemos P.C., Serafim L.S., Reis M.A.M., Polyhydroxyalkanoates Production by Activated Sludge in a SBR Using Acetate and Propionate as Carbon Sources, *Water Science & Technology*, **50**(10), p. 189 (2004).
- [18] Saito Y., Soejima T., Tomozawa T., Doi Y., Kiya F., Production of Biodegradable Plastics from Volatile Acids using Activated Sludge, *Environ Systems Eng.*, **52**, p. 145 (1995).
- [19] Salehizadeh H., Van Loosdrecht M.C.M., Production of Polyhydroxyalkanoates by Mixed Culture: Recent Trends and Biotechnological Importance, *Biotechnology Advances*, **22**, p. 261 (2004).
- [20] Sudesh K., Abe H., Doi Y., Synthesis, Structure and Properties of Polyhydroxyalkanoates: Biological Polyesters Progress, *Polymer Science*, **25**, p.1503 (2000).
- [21] Braunegg G., Sonnleitner B., Lafferty R.M., A Rapid Gas Chromatographic Method for the Determination of Poly- $\beta$ -hydroxybutyric Acid in Microbial Biomass, *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol*, **6**, p. 29 (1978).
- [22] "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th edition. APHA, AWWA, Water Environment Federation, Washington D.C., USA (1998).
- [23] Braunegg G., Lefebvre G., Genser K.F., Polyhydroxyalkanoates, Biopolyesters from Renewable Resources: Physiological and Engineering Aspects, *Journal of Biotechnology*, **65**, p. 127 (1998).