

مدل سازی فرایند تولید اتانول از ساقه سورگوم جارویی به روش هیدرولیز و تخمیر همزمان

مریم نیکزاد^{۱*}، کامیار موقرنژاد^۲، رضا شعبانیان^۱، امیرمحمد خسروی^۳

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۰۸

پیام‌نگار: m.nikzad@nit.ac.ir

چکیده

در این مقاله، تولید اتانول از ساقه سورگوم جارویی پیش‌تیماری شده، به روش آبکافت و تخمیر همزمان مطالعه و بررسی شد. حداکثر غلظت اتانول حاصل از این ماده ۱۳/۷۰ گرم بر لیتر به دست آمد. مدل ریاضی جدیدی برای مدل‌سازی فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ارائه شد که دربردارنده پنج معادله دیفرانسیل به منظور توصیف تغییرات غلظت گلوکز، اتانول، سلول، گلیسرول و لاکتیک اسید است. به منظور ارتقای اطمینان بخشی مدل، اثر بازدارندگی اتانول و لیگنین بر فعالیت آنزیم معرفی شد. پارامترهای مدل با بهره‌گیری از برنامه نوشته شده در محیط متلب تعیین شدند. مدل ارائه شده با مقایسه نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی حاصل ارزیابی شد. ضریب تعیین زیاد، $R^2 > 0.96$ و مقدار خطای کم، $MSE < 0.171$ نشان از تطبیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج به دست آمده از آزمایشگاه است، نتیجه دیگر از این قرار است که مدل ارائه شده می‌تواند برای بهینه‌سازی و بزرگ‌سازی مقیاس فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان به کار برده شود.

کلیدواژه‌ها: سورگوم جارویی، هیدرولیز و تخمیر همزمان، اتانول، مدل‌سازی، پیش‌تیماری قلیایی.

۱. مقدمه

به منابع انرژی غیرنفتی و تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، زیست‌توده و جز آنهاست. پژوهش‌های پودمانه‌ای در جهت یافتن منابع انرژی جایگزین برای سوخت‌های فسیلی صورت گرفته که یکی از این منابع تجدیدپذیر، بیواتانول است [۳ و ۴]. بیواتانول اساساً از سه نوع منبع: مواد قندی، نشاسته‌ای و لیگنوسلولزی تولید می‌شود که در این میان مواد لیگنوسلولزی به عنوان فراوان‌ترین و ارزان‌ترین منبع، توجه دانشمندان زیادی را در

در حال حاضر جهان با دو چالش زیست‌محیطی شامل بحران انرژی و گسیل گازهای گل‌خانه‌ای روبه‌رو شده است که علل عمده این امر را می‌توان به رشد شتابان صنایع، مصرف سوخت‌های فسیلی و از بین رفتن جنگل‌ها نسبت داد [۱، ۲]. برای مقابله با این مشکلات نیاز

* بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی شیمی، گروه فرایندهای جداسازی

و مخمر، انتقال جرم، آثار جذبی، نافع‌ال شدن آنزیم و خواص رشدمایه را می‌توان به عنوان عوامل تأثیرگذار بر فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان در نظر گرفت. در مدل‌های متفاوت ارائه شده از سوی برخی پژوهشگران، بیش از هفده پارامتر در کارند [۱۶ و ۱۷]. بعضی از این پارامترها، مانند ثابت بازدارندگی آنزیم از آزمایش‌های آنزیمی مستقل که بخشی از آزمایش آبکافت و تخمیر همزمان به‌شمار نمی‌آمدند، تعیین شده‌اند [۴ و ۸]. برای کاربردهای صنعتی، مدل‌های آبکافت و تخمیر همزمان که در بردارنده تعداد پارامترهای کمتری باشند، بسیار مناسب‌تر از آن دسته از مدل‌هایی‌اند که سازوکارها را با جزئیات بیشتری در نظر گرفته‌اند، زیرا پارامترهای موجود در مدل‌های ساده را می‌توان بدون انجام آزمایش‌های زیاد تعیین کرد. جواب این مدل‌ها راحت‌تر به دست می‌آید و زمان کمتری را به خود اختصاص می‌دهد.

در این تحقیق، تلاش شده است با در نظر گرفتن نقطه ضعف‌های موجود در مدل‌های قبلی، یک مدل کاربردی و در عین حال ساده ارائه شود تا ضمن در نظر گرفتن عواملی تأثیرگذار بر فرایند و توصیف پدیده‌های حاکم، قابل حل نیز باشد. در این راستا، از ساقه سورگوم جارویی، یکی از ضایعات کشاورزی شمال کشور ایران، به عنوان ماده اولیه لیگنوسلولزی برای تولید اتانول به روش هیدرولیز و تخمیر همزمان استفاده شد. سورگوم جارویی یک گیاه یک‌ساله زراعی بهاره است که هدف اصلی از کشت این گیاه، استفاده از آن برای تولید جارو و نیز بذر آن به‌عنوان دانه برای مصرف طیور، تغذیه دام است. سورگوم در ایران بیشتر در نواحی جنوبی کشور مانند خوزستان و بلوچستان برای تولید علوفه و در مازندران، زنجان و آذربایجان شرقی نیز انواع جارویی آن برای تهیه جارو و دانه کشت می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این آزمایش‌ها برای تخمین پارامترهای مدل ارائه شده، به کار گرفته شد. اثر غلظت اولیه آنزیم به‌عنوان پارامتر عملیاتی مهم نیز، توسط این مدل مورد آنالیز قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ رشدمایه

در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، از ساقه سورگوم جارویی به عنوان ضایعات لیگنوسلولزی، برای تولید اتانول استفاده شد.

سال‌های اخیر به خود جلب کرده است [۵ و ۶]. این واقعیت تحقیقات زیادی را در زمینه یافتن روش مؤثر برای تبدیل مواد لیگنوسلولزی به تکپارهای قندی و تخمیر آنها به اتانول، برانگیخت. اخیراً فرایند آبکافت و تخمیر همزمان مواد لیگنوسلولزی، به‌علت نیاز به سرمایه‌گذاری کمتر، میزان بهره‌وری بالاتر، زمان عملیاتی کوتاه‌تر و کاهش اثر بازدارندگی محصولات تولید شده بر روی فعالیت آنزیم، نسبت به فرایند آبکافت و تخمیر جداگانه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲].

در میان جنبه‌های مختلف تحقیق در زمینه تولید بیواتانول از منابع لیگنوسلولزی، درک سازوکار و سینتیک فرایند تولید بیواتانول و ارائه مدل ریاضی برای آن قابل اهمیت است. این اطلاعات در بهینه‌سازی، طراحی اقتصادی و بزرگ‌سازی مقیاس تولید در حد صنعتی برای فرایند تولید بیواتانول بسیار مفید و کاربردی خواهد بود. در سال‌های اخیر تحقیقات گوناگونی در زمینه مدل‌سازی فرایند آبکافت و تخمیر صورت گرفته است [۱۳-۷]، اما در این میان، تعداد مدل‌های ارائه شده برای فرایند آبکافت و تخمیر همزمان محدود بوده است. یکی از نخستین مدل‌ها را در این زمینه هتزیس و فیلیپیدیز^۱ ارائه کردند که شامل چهار معادله دیفرانسیل برای تعیین تغییرات غلظت سلولز، سلوبیوز، گلوکز و ریزاندامگان نسبت به زمان و یک معادله جبری برحسب غلظت اتانول است [۱۴]. نقطه ضعف اصلی مدل آنها، نیاز به اندازه‌گیری غلظت سلولز نسبت به زمان است که به علت جامد بودن سلولز غالباً اندازه‌گیری آن در یک محیط سوسپانسیون، کاری دشوار است. این نقطه ضعف، مدل را ناکارآمد کرد. در مدل دیگری که شن و آگلبور برای فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ارائه کردند؛ آهنگ تغییرات غلظت سلوبیوز، گلوکز، سلول و اتانول توصیف شده است [۱۵]. یکی از نقایص این مدل در نظر نگرفتن ایجاد محصولات جانبی مانند گلیسرول، استیک اسید و لاکتیک اسید در طول فرایند تولید اتانول است. این محصولات جانبی در نتیجه سوخت‌وساز میکروبی در طی فرایند تولید بیواتانول تولید می‌شوند که باید در موازنه جرم در نظر گرفته شوند.

مدل ریاضی برای توصیف فرایند آبکافت و تخمیر همزمان می‌تواند خیلی ساده یا خیلی پیچیده باشد، که درجه پیچیدگی آن به عوامل منظور شده در طراحی مدل بستگی دارد. عوامل گوناگونی چون اثر بازدارندگی برخی ترکیبات موجود در محیط واکنش بر فعالیت آنزیم

1. Hatzis and Philippidis

در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱۵ psig به مدت ۱۵ دقیقه استریلیزه شد. پس از رسیدن دمای این محیط کشت به دمای محیط آزمایشگاه، به میزان ۷٪ حجمی از مایع محتوی ریزاندامگان با غلظت 10^7 (CFU/mL) تحت شرایط استریل به محیط کشت تلقیح شد. آنگاه نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور (شرکت پارس‌آزما، ایران) با دمای 30°C قرار گرفت تا ریزاندامگانها به خوبی رشد کنند و برای تلقیح به محیط کشت اصلی آماده شوند. پس از سپری شدن مدت زمان ۲۴ ساعت، از این مایع تلقیح برای انجام عملیات تخمیر استفاده شد.

۲-۴ پیش‌تیماری

بهینه‌سازی پیش‌تیماری قلیایی ساقه سورگوم جارویی در مطالعه قبلی بررسی شد [۲۰]. از این‌رو، در این تحقیق ساقه سورگوم جارویی در شرایط بهینه حاصل از مطالعه قبل، تحت پیش‌تیماری قلیائی قرار گرفت. به این ترتیب که میزان $4/2$ گرم از ساقه سورگوم جارویی الک شده به شرحی که قبلاً گفته شد، در یک ارلن‌مایر 250 میلی‌لیتری با افزایش محلول سود $1/7$ ٪ (وزنی/حجمی) به حجم 100 میلی‌لیتر رسانده شد. سپس مخلوط حاصل به مدت زمان 60 دقیقه در اتوکلاو با دمای 121 درجه سلسیوس و فشار 15 psig قرار گرفت. پس از اتمام مرحله اتوکلاو و کاهش دمای مخلوط تا دمای محیط آزمایشگاه، مخلوط مورد نظر تحت خلاء (10^{-7} میلی‌متر جیوه) از صافی گذرانده شد. آنگاه مواد پیش‌تیماری شده تا رسیدن pH مایع حاصل از شستشو به حالت خنثی، چندین بار با آب مقطر شسته شدند. در نهایت، نمونه‌های پیش‌تیماری شده تا زمان انجام آزمایش‌ها و آنالیزهای بعدی در دمای 4°C - درجه سلسیوس، نگهداری شدند.

۲-۵ هیدرولیز و تخمیر همزمان

برای انجام فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان، ابتدا مخلوط 6 ٪ (وزنی/حجمی) از ساقه سورگوم پیش‌تیماری شده و بافر سیترات سدیم $\text{pH}=4/8$ با حجم کل 250 میلی‌لیتر تهیه شد. سپس ظرف حاوی مخلوط در اتوکلاو با دمای 121°C و فشار 15 psig به مدت 15 دقیقه قرار داده شد. پس از خنک شدن دمای مخلوط تا دمای حدود 40°C ، آنزیم سلولاز به میزان 10 FPU و 20 FPU به ازای

ترکیبات این ماده لیگنوسولولزی با استفاده از روش استاندارد ارائه شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر اندازه‌گیری شد [۱۸]. ساقه سورگوم جارویی از ضایعات کارگاه‌های جاروسازی شهر امیرکلا، بابل گردآوری شد. ابتدا ساقه‌ها (به‌علت طویل بودن) در اندازه‌های 3 سانتی‌متری بریده و سپس به کمک خردکن خانگی به اندازه‌های ریزتر قابل عبور از الک با مش شماره 40 خرد شدند. در مرحله بعد ساقه‌های سورگوم خرد شده با استفاده از الک لرزان مش‌بندی شدند.

۲-۲ آنزیم

برای انجام هیدرولیز آنزیمی بر روی ساقه سورگوم، از آنزیم‌های سلولاز^۱ و بتاگلوکوسیداز^۲ استفاده شد. آنزیم سلولاز و بتاگلوکوسیداز، به ترتیب، از شرکت نووو^۳ در کشور دانمارک و سیگمای آمریکا خریداری شدند. حضور آنزیم بتاگلوکوسیداز علاوه بر آنزیم سلولاز، به علت کاهش اثر بازدارندگی سلوبیوز ناشی از هیدرولیز اولیه سلولز بر آنزیم سلولاز و جلوگیری از تجمع سلوبیوز و بلکه تبدیل آن به گلوکز، اثر مطلوبی بر فرایند هیدرولیز دارد. به همین دلیل در این پژوهش علاوه بر آنزیم سلولاز از این آنزیم نیز استفاده شد. فعالیت آنزیم سلولاز بنابر روش استاندارد ارائه شده از جانب آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر اندازه‌گیری و معادل (FPU/mL) 45 به دست آمد [۱۹]. فعالیت آنزیم بتاگلوکوسیداز نیز از سوی کمپانی تولیدکننده معادل (IU/mL) 250 گزارش شده است.

۲-۳ ریزاندامگان

برای انجام مرحله تخمیر و تولید بیواتانول، ریزاندامگان ساکرومایسس سرویسیه PTCC24860 انتخاب شد. این مخمر از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران تهیه شد. محیط کشت مورد استفاده برای رشد ریزاندامگان مورد نظر، شامل گلوکز، عصاره مخمر، پپتون و کلرید آمونیم با غلظت‌های وزنی، به ترتیب، 50 ، 10 ، 20 و $45/0$ گرم بر لیتر بود. محیط کشت اولیه به حجم 100 میلی‌لیتر در یک ارلن مایر 250 میلی‌لیتری تهیه شد. پیش از عمل تلقیح، محیط کشت آماده شده در اتوکلاو (هیرایاما^۴، ژاپن)

1. Celluclast 1.5L
2. Novozyme 188
3. Novo
4. Hyrayama

با کارایی بالا (کناور^۱، آلمان) استفاده شد. این دستگاه مجهز به ستون یوروکت اچ^۲ با طول ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۸ میلی‌متر و آشکارساز ضریب شکست بود که از سولفوریک اسید ۰/۰۱ نرمال به عنوان فاز متحرک با آهنگ جریان ۰/۴ میلی‌لیتر بر دقیقه برای انجام آنالیز استفاده شد. دمای آون نیز روی ۷۵ درجه سلسیوس تنظیم شد. همه نمونه‌ها و استانداردهای ساخته شده قبل از تزریق در ۵۰۰۰ دور بر دقیقه (۵۵۵۹ RCF) به مدت زمان ۵ دقیقه سانتریفیوژ و به کمک صافی سرنگی ۰/۲ میکرومتر از صافی گذرانده شدند. برای ساخت استانداردها از گلوکز، زایلوز، اتانول، استیک اسید، لاکتیک اسید و گلیسرول با درجه خلوص بسیار بالا، محصول شرکت مرک آلمان به کار گرفته شد.

برای تعیین وزن خشک سلولی مقدار ۲ میلی‌لیتر سوسپانسیون میکروبی از محیط کشت برداشته شد. آنگاه از صافی ۰/۲ میکرومتری که به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک و توزین شده بود، عبور داده شد. سپس صافی به همراه نمونه به مدت ۲۰ ساعت در داخل آون و دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا رطوبت آن تبخیر شود. پس از رسیدن به وزن ثابت، وزن خشک سلولی برای هر نمونه از اختلاف وزن ثانویه و اولیه صافی، بر اساس گرم بر لیتر ماده خشک سلولی محاسبه شد.

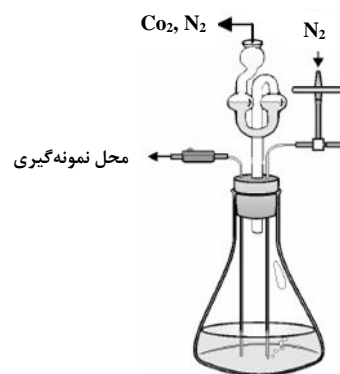
۳. مدل‌سازی ریاضی فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان

در زمینه مدل‌سازی فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان مدل‌های محدودی ارائه شده است که هر یک معایب و محاسن مختص به خود را دارند. در این مطالعه سعی شده است با در نظر گرفتن نواقص مدل‌های موجود، مدلی ساده و کاربردی برای فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان مواد لیگنوسلولزی، ارائه شود. از این‌رو، برای به دست آوردن مدل برای این فرایند، سازوکار زیر در نظر گرفته شد:



بنابر اصول حاکم بر فرایند تولید اتانول از مواد لیگنوسلولزی به روش هیدرولیز و تخمیر همزمان، محصولات واکنش هیدرولیز و تخمیر یعنی گلوکز و اتانول بر روی فعالیت آنزیم اثر بازدارندگی دارند.

هر گرم رشدمایه، ۰/۵ گرم عصاره مخمر و ۰/۵ حجمی از محیط کشت مایع حاوی ریزاندامگان با غلظت ۱۰^۶ (CBU/mL) به صورت همزمان تحت شرایط استریل به ظرف حاوی مخلوط، اضافه شدند. برای جلوگیری از آثار بازدارندگی سلوبیوز بر روی آنزیم سلولاز، آنزیم بتاگلوکسیداز نیز به نسبت ۱/۳ حجمی در مقایسه با آنزیم سلولاز، به مخلوط واکنش اضافه شد. در این تحقیق، برای انجام فرایند تخمیر تحت شرایط بی‌هوازی از یک قطعه شیشه‌ای استفاده شد که شمایی از آن را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید. بنابراین، پس از اضافه کردن مواد یادشده، قطعه مخصوص بر روی دهانه ظرف واکنش قرار گرفت و گاز نیتروژن به مدت ۵ دقیقه به داخل ظرف دمیده شد. سپس فرایند آبکافت و تخمیر به طور همزمان تحت شرایط دمای ۳۷ درجه سلسیوس و ۱۵۰ دور بر دقیقه در لرزانندهٔ انکوباتور آغاز شد. در طول فرایند، نمونه‌گیری در زمان‌های مورد نظر انجام و پس از سانتریفیوژ کردن نمونه‌ها در ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه (۲۲۳۶ RCF) به مدت زمان ۵ دقیقه، مایع شناور روی آنها برای اندازه‌گیری میزان گلوکز، زایلوز، لاکتیک اسید، استیک اسید، گلیسرول و اتانول موجود در آن در دمای ۱۰- درجه سلسیوس نگهداری شد.



شکل ۱. شمایی از قطعه مورد استفاده برای تولید بی‌هوازی اتانول.

۲-۶ روش‌های آنالیز

برای اندازه‌گیری غلظت گلوکز، زایلوز، اتانول، استیک اسید، لاکتیک اسید و گلیسرول تولید شده در طول فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان ساقه سورگوم جارویی، از دستگاه کروماتوگرافی مایع

1. Knauer
2. Eurokat H+

بر سطح رشدمایه جذب می‌شوند و کمپلکس‌های آنزیم- رشدمایه را تولید می‌کنند. این کمپلکس‌ها شامل کمپلکس فعال و نافع‌اند که در ادامه فرایند، سلوبیوز و آنزیم آزاد از کمپلکس فعال، تولید می‌شوند. بخشی از آنزیم که با رشدمایه کمپلکس غیرفعال تشکیل داده نیز سبب نافع‌ال شدن آنزیم می‌شود. آنزیم گلوکوسیداز، تبدیل سلوبیوز به گلوکز را کاتالیز می‌کند که این فرایند در فاز آبی اتفاق می‌افتد. به همین علت، نافع‌ال شدن گلوکوسیداز چشم پوشیدنی است [۲۳]. از این رو سازوکار نافع‌ال شدن آنزیم را می‌توان از این قرار در نظر گرفت:



که در این رابطه، CE_{in}^* کمپلکس نافع‌ال سلولوز و آنزیم، k_3' ثابت سرعت ویژه مربوط به واکنش نافع‌ال شدن آنزیم است. نتایج مطالعات سینتیکی انجام شده در زمینه هیدرولیز آنزیمی مواد لیگنوسلولزی نشان داده است که پدیده نافع‌ال شدن آنزیم را با یک معادله واکنش درجه دوم می‌توان به‌درستی توصیف کرد [۲۴-۲۶]. به همین جهت، در این پژوهش واکنش تشکیل شدن کمپلکس نافع‌ال از سلولوز و آنزیم به‌صورت یک رابطه سینتیکی درجه دوم از این قرار خواهد بود:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{dCE_{in}^*}{dt} = (k_3'E^2) \quad (4)$$

انتگرال گیری از رابطه فوق با در نظر گرفتن شرایط مرزی: $E=E_0$ در لحظه $t=0$ و $E=E$ در لحظه $t=t$ ، به این رابطه می‌رسد:

$$E = \frac{E_0}{1+k_3'E_0t} \quad (5)$$

با نشان دادن E از رابطه (۵) در رابطه (۲) می‌رسیم به:

$$r_1 = \frac{k_1C}{0.9\left(1+\frac{G}{K_{1IG}}+\frac{Et}{K_{1IEt}}\right)}\left(\frac{E_0}{1+k_3'E_0t}\right)(1-K_{1L}(L)) \quad (6)$$

در ادامه، برای مدل‌سازی فرایند تخمیر، از مدل مونود برای توصیف ریاضی فرایند تولید اتانول و رشد سلولی بهره بردیم و سرعت رشد سلولی، r_x و سرعت مصرف گلوکز، r_G به ترتیب، به قرار رابطه‌های (۷) و (۸) تعریف می‌شوند:

اثر بازدارندگی این ترکیبات عمدتاً به صورت رقابتی در نظر گرفته شده است [۷ و ۸ و ۱۶]. اما تاکنون، تنها در یکی از مطالعات انجام شده در این زمینه، اثر بازدارندگی الکل بر هیدرولیز آنزیمی در نظر گرفته شده است [۸]. در کار حاضر اثر بازدارندگی اتانول بر روی سینتیک فرایند هیدرولیز، به علت رقابت اتانول با سلولوز در اشغال جایگاه فعال آنزیم سلولاز، به صورت رقابتی در نظر گرفته شد.

از سوی دیگر، آنزیم سلولاز و β -گلوکوسیداز به طور برگشت‌ناپذیری به لیگنین جذب می‌شوند [۲۱]. این عمل جذب، غلظت آنزیم فعال را کاهش می‌دهد. برای در نظر گرفتن تأثیر لیگنین موجود در مواد لیگنوسلولزی بر فعالیت آنزیم، فرض شده است بین میزان آنزیم جذب شده بر روی لیگنین و غلظت لیگنین رابطه‌ای خطی برقرار است [۲۲]. از این رو، همانطور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود، غلظت آنزیم در عبارت $(1-K_{1L}(L))$ ضرب شد که L بیانگر غلظت لیگنین (گرم بر لیتر) و K_{1L} پارامتر مدل است. با در نظر گرفتن اثر بازدارندگی گلوکز، اتانول و لیگنین بر فعالیت آنزیم سلولاز، سرعت واکنش r_1 (گرم بر لیتر.ساعت) که مربوط به واکنش تبدیل سلولوز موجود در ماده لیگنوسلولزی به گلوکز است، به صورت زیر بیان شد:

$$r_1 = \frac{k_1EC}{0.9\left(1+\frac{G}{K_{1IG}}+\frac{Et}{K_{1IEt}}\right)}(1-K_{1L}(L)) \quad (2)$$

در این رابطه، G غلظت گلوکز (گرم بر لیتر)، C غلظت سلولوز (گرم بر لیتر)، E غلظت آنزیم (گرم بر لیتر)، K_{1IG} و K_{1IEt} ، به ترتیب، ثابت‌های بازدارندگی گلوکز و اتانول بر آنزیم سلولازند. عدد 0.9 در مخرج این رابطه ضریب تبدیل واحد گلوکان موجود در رشدمایه به گلوکز است. اصولاً، نباید جرم یا غلظت کاتالیست را در یک رابطه سینتیکی مربوط به سرعت یک فرایند کاتالیستی در نظر گرفت، زیرا جرم کاتالیست در طول واکنش تغییر نمی‌کند. اما از آنجایی که در طول فرایند هیدرولیز آنزیمی، پدیده نافع‌ال شدن آنزیم رخ می‌دهد، لازم است عامل غلظت آنزیم فعال را در رابطه تأثیر داد. آنزیم سلولاز اساساً شامل ترکیبی از آنزیم‌های ۱،۴-بتا-دی گلوکان گلوکانو هیدرولاز (اندوگلوکاناز)، ۱،۴-بتا-دی گلوکان سلوبیوهیدرولاز (اگزوگلوکاناز) و گلوکوسیداز است. نافع‌ال شدن آنزیم به این صورت رخ می‌دهد که: در ابتدا ۱،۴-بتا-دی گلوکان گلوکانو هیدرولاز (اندوگلوکاناز) و ۱،۴-بتا-دی گلوکان سلوبیوهیدرولاز (اگزوگلوکاناز)

چشم پوشی شد. با نوشتن موازنه جرم برای محصولات واکنش‌ها، معادلات دیفرانسیل زیر به دست آمدند که آهنگ تغییرات غلظت گلوکز، سلول، اتانول، گلیسرول و لاکتیک اسید را بیان می‌کنند:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{k_1 C}{0.9 \left(1 + \frac{G}{K_{11G}} + \frac{Et}{K_{11Et}}\right)} \left(\frac{E_0}{1 + k_3' E_0 t}\right) (1 - K_{1L}(Li)) - \frac{\mu_{max} \cdot G \cdot X}{(K_{2G} + G) Y_{X/G}} - mX \quad (12)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X = \frac{\mu_{max} \cdot G \cdot X}{K_{2G} + G} \quad (13)$$

$$\frac{dEt}{dt} = \frac{k_2 \mu_{max} \cdot G \cdot X}{K_{2G} + G} \quad (14)$$

$$\frac{dGl}{dt} = \frac{k_3 \mu_{max} \cdot G \cdot X}{(K_{2G} + G)} \quad (15)$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{k_4 \mu_{max} \cdot G \cdot X}{(K_{2G} + G)} \quad (16)$$

در این رابطه‌ها، فوق Gl و L ، به ترتیب، نمایانگر غلظت گلیسرول و لاکتیک اسید (گرم بر لیتر) هستند. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، اندازه‌گیری سلولز در طول پیشرفت واکنش کاری دشوار است؛ از این رو، در این تحقیق با نوشتن موازنه جرم برای سلولز رابطه زیر به دست آمد:

$$C = C_0 - 0.9G - \frac{0.9Et}{0.511} - 1.137(X - X_0) - \frac{Gl}{1.022} - \frac{L}{1} \quad (17)$$

که C_0 و X_0 ، به ترتیب، غلظت اولیه سلولز و سلول (گرم بر لیتر)، 0.9 ضریب تبدیل یک واحد گلوکان در سلولز به گلوکز، 0.511 ضریب تبدیل گلوکز به اتانول، 1.137 ضریب تبدیل گلوکز به گلیسرول، 1 ضریب تبدیل گلوکز به لاکتیک اسید و 1.022 ضریب تبدیل سلولز مصرفی به مخمر تولید شده (گرم سلولز/گرم سلول خشک) هستند. (فرمول مولکولی مخمر، ساکرومایسس سرویسیه در طول تخمیر گلوکز به صورت غیرهوازی، $CH_{1.74}N_{0.2}O_{0.45}$ ، در نظر گرفته شد) در این تحقیق، از معادلات (۱۲) تا (۱۶) در کنار شرایط اولیه $t=0$ ، $Et=Gl=L=0$ و $G=0$ ، $X=X_0$ ، $E=E_0$ ، $C=C_0$ برای توصیف تغییرات غلظت گلوکز، سلول، اتانول، گلیسرول و لاکتیک اسید به ازای زمان بهره گرفته شد. سایر پارامترها که جزء ثابتهای

$$r_x = \mu X = \frac{\mu_{max} \cdot G \cdot X}{K_{2G} + G} \quad (7)$$

$$r_G = \frac{r_x}{Y_{X/G}} + mX \quad (8)$$

در این رابطه‌ها، μ ثابت سرعت ویژه رشد سلولی (ساعت^{-۱})، μ_{max} بیشینه ثابت سرعت ویژه رشد سلولی (ساعت^{-۱})، m ضریب نگهداری ریزاندامگان (ساعت^{-۱})، K_{2G} ثابت اشباع گلوکز در رشد میکروبی (گرم بر لیتر)، و $Y_{X/G}$ بازده سلولی بر مبنای مصرف رشدمایه (گرم سلول بر گرم گلوکز) اند. در رابطه (۷)، پارامترهای مربوط به مرگ سلولی ریزاندامگان در نظر گرفته نشده است، زیرا از برآزش مدل، وقتی عبارت مربوط به مرگ سلولی در نظر گرفته شد، نتایج رضایت‌بخشی به دست نیاید. سرعت واکنش تشکیل شدن اتانول، r_{Et} نیز از این قرار بیان می‌شود:

$$r_{Et} = k_2 r_x \quad (9)$$

که در رابطه بالا، k_2 ثابت تشکیل محصول (بدون بعد) است. یکی از نقاط قوت مدل ارائه شده در تحقیق حاضر، این است که واکنش محصولات جانبی نیز به موازات واکنش اصلی در نظر گرفته شده است. دو محصول جانبی در نمونه‌های جمع‌آوری شده از آزمایش‌ها مشاهده شد که سرعت واکنش تولید این محصولات، یعنی گلیسرول و لاکتیک اسید با علامت‌های اختصاری r_{Gl} و r_L نیز از این قرار در نظر گرفته شوند:

$$r_{Gl} = k_3 r_x \quad (10)$$

$$r_L = k_4 r_x \quad (11)$$

k_3 و k_4 در این رابطه‌ها، به ترتیب، ثابت‌های سرعت برای تشکیل گلیسرول و لاکتیک اسیدند.

برای ارائه مدل سینتیکی فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان، به علت اختلاط کامل و در نتیجه فقدان گرادیان غلظت بین رشدمایه و فاز مایع حجمی (توده‌ای)، و نیز ریز بودن ذرات سلولز و در نتیجه فقدان گرادیان غلظت در داخل سلولز، از انتقال جرم داخلی سلولز و خارجی بین فاز مایع حجمی و سلولز موجود در رشدمایه

۴-۲ مدل‌سازی فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ساقه

سورگوم جارویی

از مدل جدید ارائه شده برای فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان، برای مدل‌سازی فرایند تولید بیواتانول از ساقه سورگوم جارویی پیش‌تیماری شده، استفاده شد. برای تعیین پارامترهای مدل از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان این ماده، بهره گرفتیم، که نتایج به دست آمده برای پارامترهای مدل در جدول (۲) درج شده است. این آزمایش‌ها که تحت شرایط غلظت اولیه سوبسترا، ۶۰ (گرم بر لیتر) و غلظت‌های اولیه از آنزیم ۵/۷۵ و ۱۱/۵۰ گرم بر لیتر انجام شدند، به مدت ۵۴ ساعت به طول انجامید. حداکثر میزان اتانول تولید شده از طریق این فرایند به ازای غلظت‌های اولیه از آنزیم ۵/۷۵ و ۱۱/۵۰ (گرم بر لیتر)، به ترتیب، ۱۱/۳۷ و ۱۳/۷۰ (گرم بر لیتر) به دست آمد. غلظت لاکتیک اسید و گلیسرول تولید شده در طول فرایند بسیار اندک و تقریباً ثابت بود. البته گلیسرول با غلظت حدود ۰/۸۵ (گرم بر لیتر) در مقایسه با لاکتیک اسید با غلظت ۰/۱۲ (گرم بر لیتر) به میزان بیشتری تولید شد.

جدول ۲. مقادیر ثابتها و پارامترهای مدل فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان ساقه سورگوم.

پارامتر	غلظت اولیه آنزیم ۵/۷۵ (گرم بر لیتر)	غلظت اولیه آنزیم ۱۱/۵۰ (گرم بر لیتر)
k_1	۰/۲۴۸۹	۰/۳۳۹۴
K'	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۰
K_{IL}	۰/۱۵۶۹	۰/۱۵۸۵
$K_{II G}$	۱/۵۴۱۹	۱/۴۳۱۵
$K_{III Et}$	۱۴/۵۱۰	۹/۹۱۷۹
μ_{max}	۰/۳۵۱۲	۰/۴۰۰۳
K_{2G}	۴/۵۴۴۴	۹/۰۶۷۲
m	۰/۰۲۲۷	۰/۰۱۲۴
k_2	۱/۲۴۳۸	۱/۴۵۱۶
k_3	۰/۱۶۱۲	۰/۱۸۸
k_4	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۷۳

مدل به‌شمار می‌آیند، از طریق برنامه نوشته شده در محیط متلب تعیین شدند. در این تحقیق، برای حل معادلات دیفرانسیل ارائه شده در مدل‌ها از روش حداقل مربعات خطا با استفاده از دستور ode، و برای بهینه‌سازی از دستور lsqnonlin در متلب (b-۲۰۱۳) استفاده شد.

۴. نتایج

۴-۱ ترکیبات شیمیایی ساقه سورگوم جارویی

ساقه سورگوم جارویی یکی از پسماندهای کشاورزی در سرزمین ایران است که در طبقه بندی مواد لیگنوسلولزی قرار می‌گیرد و از آن به عنوان رشدمایه در این تحقیق استفاده شد. ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده این ماده اندازه‌گیری و مقادیر آنها در جدول (۱) درج شده است. مقادیر محاسبه شده برای سلولز، همی سلولز و لیگنین برای ساقه سورگوم در این محقق، با مقادیر ترکیبات گزارش شده برای گونه‌های متفاوت از سورگوم در دیگر مقالات و تحقیقات قابل مقایسه است [۲۷،۲۸].

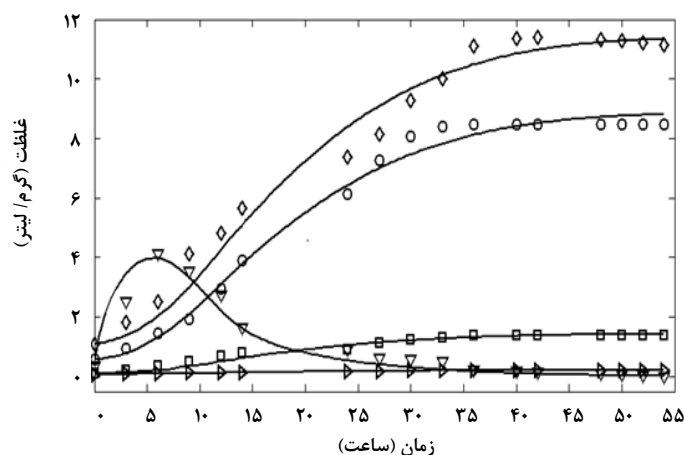
جدول ۱. ترکیبات تشکیل‌دهنده ساقه سورگوم جارویی قبل و بعد از پیش‌تیماری.

ماده	سلولز (%)	همی سلولز (%)	لیگنین (%)	سایر ترکیبات (%)
ساقه سورگوم	۴۷/۵۸	۲۴/۶۶	۲۲/۹۸	۴/۷۸
ساقه سورگوم پیش‌تیماری شده	۶۷/۲۴	۲۰/۳۱	۱۰/۴۱	۲/۰۴

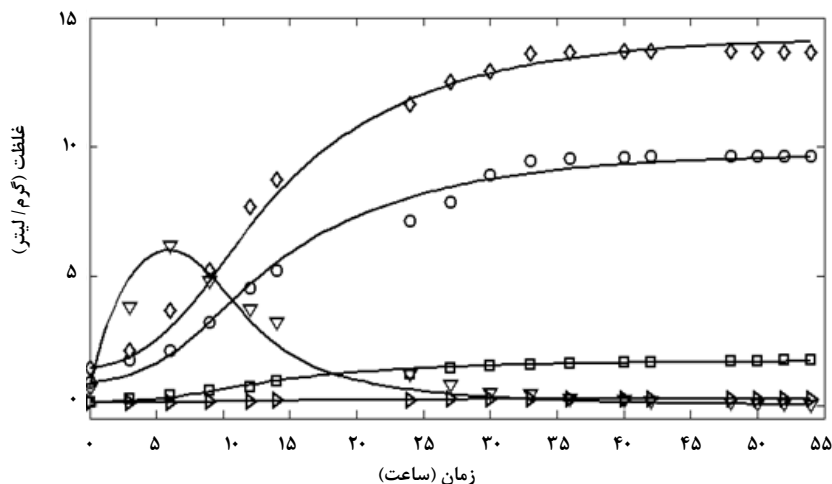
میزان سلولز در ساقه سورگوم از ۴۷/۵۸٪ به ۶۷/۲۴٪ پس از پیش‌تیماری افزایش یافت که قابل مقایسه با پژوهش‌های مشابه است و حتی نسبت به نتایج گزارش شده در برخی موارد، بیشتر است [۲۷]. با توجه به کاهش میزان همی سلولز و لیگنین موجود در ساقه سورگوم پیش‌تیماری شده که مقادیر آنها در جدول (۱) درج شده است، افزایش میزان سلولز پس از پیش‌تیماری را می‌توان به انحلال همی سلولز و حذف لیگنین مربوط دانست.

نشان می‌دهد. مقدار این ثابت برای غلظت‌های اولیه متفاوت آنزیم تقریباً یکسان است زیرا در آزمایش‌های انجام شده برای هر دو غلظت آنزیم، از رشدمایه‌ای با مقدار اولیه یکسان که در بردارنده مقدار یکسانی لیگنین بود، استفاده شده است. در غلظت اولیه آنزیم $11/50$ (گرم بر لیتر)، ثابت مونود (K_{2G}) $9/0672$ بوده که از مقدار این ثابت برای غلظت اولیه آنزیم $5/75$ (گرم بر لیتر)، یعنی $4/5444$ بیشتر است. زیرا مقدار گلوکز بیشتری از فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان با غلظت اولیه آنزیم $11/50$ (گرم بر لیتر) حاصل شد. با توجه به نزدیک بودن مقادیر به دست آمده برای ثابت‌های مدل تحت شرایط متفاوت، از غلظت اولیه آنزیم، از این ثابت‌ها می‌توان برای پیشگویی و تخمین غلظت اجزای گوناگون در طول فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ساقه سورگوم و شلتوک، تحت شرایط آزمایشگاهی دیگر نیز سود جست. این مزیت مدل، وقتی امکان انجام آزمایش روی این ماده وجود ندارد، بسیار قابل توجه خواهد بود. با قرار دادن مقادیر به دست آمده برای پارامترها در معادلات دیفرانسیل مربوط، غلظت گلوکز، سلول، اتانول، لاکتیک اسید و گلیسرول در طول زمان فرایند آبکافت و تخمیر همزمان، برای ساقه سورگوم به دست آمد. تغییرات غلظت گلوکز، سلول، اتانول، لاکتیک اسید و گلیسرول و مقادیر پیشگویی شده به کمک مدل در طول فرایند آبکافت و تخمیر همزمان، به ترتیب، برای غلظت آنزیم $5/75$ و $11/50$ (گرم بر لیتر) برای سورگوم را در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌کنید.

در هر دو آزمایش انجام شده، مقادیر حاصل برای K_{IIEt} ، ثابت بازدارندگی اتانول، بسیار بزرگتر از مقادیر K_{IIG} ، ثابت بازدارندگی گلوکز، بر آنزیم است. یعنی اثر بازدارندگی اتانول بر فعالیت آنزیم سلولاز در برابر اثر بازدارندگی گلوکز بسیار کمتر است. مقدار پارامتر K_{IIEt} برای فرایند آبکافت و تخمیر همزمانی که در غلظت اولیه $5/75$ (گرم بر لیتر) از آنزیم انجام شد، بیشتر از میزان این پارامتر برای حالتی است که این فرایند با غلظت اولیه $11/50$ (گرم بر لیتر) آنزیم صورت گرفت. یعنی اثر بازدارندگی اتانول وقتی فرایند با غلظت اولیه آنزیم $11/50$ (گرم بر لیتر) اتفاق افتاد، بر آنزیم بیشتر است. علت آن است که غلظت اتانول تولید شده از سورگوم طی فرایند آبکافت و تخمیر همزمان با غلظت اولیه $11/50$ (گرم بر لیتر) آنزیم، برابر $13/70$ (گرم بر لیتر) و بیشتر از غلظت اتانول تولید شده با استفاده از آنزیم با غلظت اولیه $5/75$ (گرم بر لیتر)، یعنی $11/37$ (گرم بر لیتر) بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت اتانول، اثر بازدارندگی آن بر آنزیم نیز افزایش می‌یابد. مقادیر K ثابت نافع‌ال شدن آنزیم در جدول (۲)، به ازای غلظت‌های اولیه متفاوت آنزیم با یکدیگر فرق می‌کنند. با افزایش غلظت اولیه آنزیم مقدار K از $0/014$ به $0/001$ کاهش یافت که این رفتار در مطالعه انجام شده توسط شن و همکارانش، در زمینه مدل سینتیکی آنزیمی بر اساس نافع‌ال شدن آنزیم، نیز مشاهده شده است [۷]. آنان نشان دادند که افزایش غلظت اولیه آنزیم از میزان $0/593$ به $4/73$ (گرم بر لیتر) سبب کاهش ثابت نافع‌ال شدن آنزیم از $8/77$ به $5/28$ شد. K_{IL} ثابت دیگری است که اثر لیگنین را بر نافع‌ال شدن آنزیم



شکل ۲. تغییرات غلظت □ گلیسرول، ▽ گلوکز، ○ سلول، ◇ اتانول و ▷ لاکتیک اسید برحسب زمان در طول فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ساقه سورگوم با غلظت آنزیم $5/75$ (گرم بر لیتر): خطوط (شبه‌سازی شده توسط مدل).



شکل ۳. تغییرات غلظت گلیسرول، گلوکز، سلول، اتانول و لاکتیک اسید بر حسب زمان در طول فرایند آبکافت و تخمیر همزمان ساقه سورگوم با غلظت آنزیم ۱۱/۵۰ (گرم بر لیتر): خطوط (شبیه‌سازی شده توسط مدل).

جدول ۳. مقادیر ضریب تعیین و میانگین مربع خطا برای نتایج مدل‌سازی فرایند هیدرولیز و تخمیر همزمان.

میانگین مربع خطا (MSE)	ضریب تعیین (R^2)	
۰/۱۷۰۷	۰/۹۸۰۲	گلوکز
۰/۱۳۱۲	۰/۹۹۷۹	اتانول
۰/۱۲۸۸	۰/۹۹۳۶	سلول
۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۲۷	لاکتیک اسید
۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۲۸	گلیسرول

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، مدل جدیدی برای فرایند تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی به روش آبکافت و تخمیر همزمان ارائه شد. یکی از نقص‌های موجود در اکثر مدل‌های ارائه شده، وجود غلظت سلولز (به عنوان غلظت رشد‌مایه) بود که در این پژوهش با نوشتن موازنه جرم برای سلولز، رابطه‌ای برای غلظت آن بر مبنای غلظت محصولات اصلی و جانبی به دست آمد که با جایگذاری این رابطه در مدل ارائه شده، آن را کاربردی‌تر کرد. همچنین، تأثیر میزان لیگنین بر نافع شدن آنزیم نیز به صورت یک رابطه خطی در مدل در نظر گرفته شد، که با اعمال این عبارت در مدل ارائه شده، اثر غلظت لیگنین به عنوان بخشی از ساختار شیمیایی ماده لیگنوسلولزی نیز

در هر یک از شکل‌های بالا، غلظت گلوکز ابتدا با گذشت زمان افزایش می‌یابد زیرا در ساعات اولیه فرایند غلظت سلول و آهنگ تولید اتانول کم است. در حالی که غلظت آنزیم در این بازه زمانی زیاد است و به تجمع گلوکز در طول ۱۰ ساعت اولیه فرایند منجر می‌شود. در هر دو آزمایش، غلظت گلوکز پس از ۳۶ ساعت تقریباً به صفر رسید. علت این امر رشد نمایی ریزاندامگان، مصرف شتابان گلوکز به عنوان رشد‌مایه و کاهش غلظت آنزیم فعال است. در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که غلظت اتانول و سلول با گذشت زمان افزایش می‌یابد و پس از ۳۶ ساعت تقریباً ثابت می‌شود. زیرا با گذشت زمان، سلول‌ها با مصرف گلوکز تکثیر می‌شوند و در نتیجه آهنگ تولید اتانول افزایش می‌یابد. اما، پس از ۳۶ ساعت و رو به پایان نهادن منبع گلوکز، رشد سلول و تولید اتانول متوقف می‌شود. برای بررسی دقت مدل ارائه شده، مقدار ضریب تعیین و میانگین مربع خطا برای هر یک از اجزا محاسبه شد که مقادیر این پارامترها در جدول (۳) درج شده‌اند.

بنابر نتایج مندرج در جدول (۳)، مقادیر کم میانگین مربع خطا کمتر از ۰/۱۸ دقت بالای مدل ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر ضریب تعیین نزدیک به عدد ۱/۰۰ حاکی از تطابق داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌گوئی شده از طریق مدل است.

- production from wasted crops and crop residues", *Biomass and Bioenergy*, 26(4): 361-37, (2004).
- [6] Dalgaard, T., Jørgensen, U., Olesen, J. E., Jensen, E. S., Kristensen, E. S., "Looking at biofuels and bioenergy", *Science*, 312(5781): 1743-1744, (2006).
- [7] Shen, J., Agblevor, F. A., "Ethanol production of semi-simultaneous saccharification and fermentation from mixture of cotton gin waste and recycled paper sludge", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 34(1): 33-4, (2011).
- [8] Morales-Rodriguez, R., Gernaey, K. V., Meyer, A. S., Sin, G., "A mathematical model for simultaneous saccharification and co-fermentation (SSCF) of C6 and C5 sugars", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(2): 185-191, (2011).
- [9] Bansal, P., Hall, M., Realff, M. J., Lee, J. H., Bommarius, A. S., "Modeling cellulase kinetics on lignocellulosic substrates", *Biotechnology Advances*, 27(6): 833-848, (2009).
- [10] Converti, A., Arni, S., Sato, S., De Carvalho, J. C. M., Aquarone, E., "Simplified modeling of fed-batch alcoholic fermentation of sugarcane blackstrap molasses", *Biotechnology and Bioengineering*, 84(1): 88-95, (2003).
- [11] Ting, C. L., Makarov, D. E., Wang, Z. G., "A kinetic model for the enzymatic action of cellulase", *The Journal of Physical Chemistry. B*, 113(14): 497, (2009).
- [12] Raposo, S., Pardão, J. M., Diaz, I., Lima-Costa, M. E., "Kinetic modelling of bioethanol production using agro-industrial by-products", *International Journal of Energy and Environment*, 3(1): 8, (2009).
- [13] Arellano-Plaza, M., Herrera-López, E., Díaz-Montaña, D., Moran, A., "Unstructured kinetic model for tequila batch fermentation", *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 1 (1), (2007).
- [14] Hatzis, C., Riley, C., Philippidis, G. P., "Detailed material balance and ethanol yield calculations for the biomass-to-ethanol conversion process", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 57(1): 443-45, (1996).
- [15] Shen, J., Agblevor, F. A., "Modeling semi-simultaneous saccharification and fermentation of ethanol production from cellulose", *Biomass and Bioenergy*, 34(8): 1098-1107, (2010).
- [16] Ko, J., Su, W. J., Chien, I. L., Chang, D. M., Chou, S. H., Zhan, R. Y., "Dynamic modeling and analyses of simultaneous saccharification and fermentation process to produce bio-ethanol from rice straw", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 33(2): 195-205, (2010).
- [17] Shao, X., Lynd, L., Wyman, C., Bakker, A., "Kinetic modeling of cellulosic biomass to ethanol via simultaneous saccharification and fermentation: Part I. Accommodation of intermittent feeding and analysis of staged reactors", *Biotechnology and Bioengineering*, 102(1): 59-65, (2009).

در مدل در نظر گرفته شد. یکی از امتیازهای بزرگ مدل ارائه شده، عدم نیاز آن به آزمایش‌های جانبی برای اندازه‌گیری پارامترهای مدل است. همچنین، در کنار اثر بازدارندگی گلوکز بر آنزیم سلولاز، اثر بازدارندگی اتانول نیز بر سلولاز در نظر گرفته شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، فرایند آبکافت و تخمیر همزمان بر ساقه سورگوم جارویی پیش‌تیماری شده در دو غلظت اولیه متفاوت آنزیم انجام شد. سرانجام، با استفاده از برنامه کامپیوتری و داده‌های آزمایشگاهی، پارامترهای مدل ارائه شده تعیین شدند. نتایج حاصل از مدل ارائه شده با یافته‌های آزمایشگاهی به خوبی همخوانی می‌کردند که حاکی از دقت مدل است. در این تحقیق با ارائه مدل ریاضی برای فرایند آبکافت و تخمیر همزمان، مبنایی برای بزرگ‌سازی مقیاس و بهینه‌سازی فرایند تولید بیواتانول فراهم آید.

۶. کتوته نوشتتها

میانگین مربع خطا	Mean Square Error	MSE
واحدی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم	Filter Paper Unit	FPU
واحدی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم	International Unit	IU
واحد تشکیل کلونی	Colony Forming Unit	CFU
نیروی نسبی سانتریفیوژ	Relative Centrifugal Force	RCF

مراجع

- [1] Asaithambi, P., Matheswaran, M., "Electrochemical treatment of simulated sugar industrial effluent, optimization and modeling using a response surface methodology", *Arabian Journal of Chemistry*, 9: 981-987, (2016).
- [2] Lin, J. Q., Lee, S. M., Koo, Y. M., "Modeling and simulation of lactic acid fermentation with inhibition effects of lactic acid and glucose", *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 9(1): 52-58, (2004).
- [3] Talebnia, F., Karakashev, D., Angelidaki, I., "Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation", *Bioresource Technology*, 101(13): 4744-4753, (2010).
- [4] Taherzadeh, M. J., Karimi, K., "Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review", *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9): 1621-1651, (2008).
- [5] Kim, S., Dale, B. E., "Global potential bioethanol

- [18] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D., "Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytic Procedure (LAP) of the National Renewable Energy Laboratory (NREL): NREL/TP-510-42618 ", Colorado, USA, (2008).
- [19] Adney, B., Baker, J., "Measurement of cellulase activities. Laboratory Analytical Procedure (LAP) of the National Renewable Energy Laboratory (NREL): NREL/TP-510-42628 ", Colorado, USA, (1996).
- [20] Nikzad, M., Movagharnjad, K., Talebnia, F., Najafpour, G., Ghorban Farahi, A. H., "A study on alkali pretreatment conditions of sorghum stem for maximum sugar recovery using statistical approach", *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 20(2): 261-271, (2014).
- [21] Philippidis, G. P., Spindler, D. D., Wyman, C. E., "Mathematical modeling of cellulose conversion to ethanol by the simultaneous saccharification and fermentation process", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 34(1): 543-556, (1992).
- [22] Philippidis, G. P., Wyman, C. E., "Production of alternative fuels: modeling of cellulosic biomass conversion to ethanol", *Recent Advances in Biotechnology*. 405-411, (1992)..
- [23] Lin, J. Q., Lee, S. M., Koo, Y. M., "Modeling and simulation of simultaneous saccharification and fermentation of paper mill sludge to lactic acid", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 15(1): 40-47, (2005).
- [24] Shen, J., Agblevor, F. A., "Kinetics of enzymatic hydrolysis of steam-exploded cotton gin waste", *Chemical Engineering Communications*, 195(9): 1107-1121, (2008).
- [25] Zhang, Y., Xu, J. L., Xu, H. J., Yuan, Z. H., Guo, Y., "Cellulase deactivation based kinetic modeling of enzymatic hydrolysis of steam-exploded wheat straw", *Bioresource Technology*, 101(21): 8261-8266, (2010).
- [26] Zhu, L., O'Dwyer, J. P., Chang, V. S., Granda, C. B., Holtzapfle, M. T., "Multiple linear regression model for predicting biomass digestibility from structural features", *Bioresource Technology*, 101(13): 4971-4979, (2010).
- [27] Mehmood, S., Gulfranz, M., Rana, N. F., Ahmad, A., Ahring, B. K., Minhas, N., Malik, M. F., "Ethanol production from Sorghum bicolor using both separate and simultaneous saccharification and fermentation in batch and fed batch systems", *African Journal of Biotechnology*, 8 (12), (2009).
- [28] Massoud, M. I., El-Razek, A. M. A., "Suitability of Sorghum bicolor L. stalks and grains for bioproduction of ethanol", *Annals of Agricultural Sciences*, 56(2): 83-87, (2011).