

## بررسی و مدل سازی کاهش قند، تولید بیواتانول و دی اکسید کربن در فرآیند تخمیر خرما

مطهره واعظی زاده<sup>۱</sup>، احمد غضنفری مقدم<sup>۲\*</sup> و محمد حسن فولادی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، <sup>۲</sup> دانشیار بخش ماشین‌های کشاورزی <sup>۳</sup> دانشیار بخش صنایع غذایی

دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۷/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۸/۲۵)

## چکیده

خرما یکی از محصولات عمده کشاورزی ایران با مقادیر بالای کربوهیدرات است. در این پژوهش از ضایعات خرما به عنوان ماده اولیه برای تولید بیواتانول استفاده گردید. برای درک و آگاهی بهتر از چگونگی پیشرفت فرآیند تخمیر خرما مقدار کاهش قند، تولید بیواتانول و دی اکسید کربن در طی فرآیند مورد اندازه گیری قرار گرفته و سپس به وسیله روابط متداول ریاضی شبیه سازی گردید. برای انجام فرآیند تخمیر به شیره خرما با بریکس ۷۵ آب اضافه گردید تا بریکس آن به ۲۰ رسید. به شربت به دست آمده مخمر *S. Cereviae* و مواد مغذی مورد نیاز برای رشد مخمر اضافه گردید. تخمیر در دمای  $30 \pm 1$  °C صورت پذیرفت. بررسی روند تغییرات قند، بیواتانول، دی اکسید کربن در حین فرآیند تخمیر نشان داد که میزان تغییرات آنها در ۵ روز اول با سرعت زیادی صورت گرفت و سپس به طور چشمگیری کاهش یافت و تا حدود ۱۵ روز بعد از آن فرآیند تخمیر ادامه یافت و سپس متوقف شد. در پایان فرآیند میزان قند محلول از بریکس ۲۰ به حدود ۸ کاهش یافت. در مجموع میزان تولید بیواتانول از هر کیلوگرم شربت با بریکس ۲۰ حدود ۷۲ گرم بود. مجموع میزان گاز دی اکسید کربن ۷۰ میلی لیتر بر لیتر رسید. مقایسه مدل‌های استفاده شده نشان داد که تمامی مدل‌ها به خوبی با داده های آزمایشگاهی انطباق داشتند. ولی بهترین مدل برای شبیه سازی کاهش قند مدل لگاریتمی کاهش  $(R^2 = 0.99)$  و برای تولید بیواتانول و دی اکسید کربن مدل گمپرتز با  $R^2$  بزرگتر از ۰/۹۸ بود.

واژه‌های کلیدی: خرما، بیواتانول، مدل سازی، تخمیر، کاهش قند، دی اکسید کربن

## مقدمه

درون سوز بوده و در صنایع پتروشیمی از طریق هیدرولیز کردن اتیلن ( $C_2H_4$ ) به مقادیر زیاد تولید می گردد. از تخمیر محصولات کشاورزی که دارای نشاسته یا قند هستند نیز اتانول به دست می آید که به آن بیواتانول گفته می‌شود. در حال حاضر در دو کشور آمریکا و برزیل منابع اصلی تولید بیواتانول ذرت و نیسکر می باشند. در سال‌های اخیر سعی شده است که از ضایعات مختلف محصولات کشاورزی برای تولید بیواتانول استفاده شود. (Hang et al., 1984; Hang et al., 1981; Wang et al., 2004; Kar et al., 2009; et al., 2009)

برای تبدیل محصولات کشاورزی به بیواتانول فرآیندها و واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای صورت می‌گیرد و فاکتورهای مختلفی مانند دما، غلظت قند و نوع مخمر در آن تأثیر دارند. آگاهی از چگونگی تأثیر این فاکتورها و بررسی تأثیر آنها بر روی فرآیند تبدیل کمک زیادی به بهینه سازی این فرآیند و دستگاه‌های مورد نظر می نماید. بر اساس تحقیقات انجام شده مناسب ترین دما برای رشد میکروارگانیسم های مخمر بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس می‌باشد (Serra et al., 2005) و بهترین درجه بریکس شربت برای رشد مخمر بریکس ۲۰ است (Golshan & Foladi, 2007). مخمر ساکارومایسس سرویزیه

خرما یکی از محصولات کشاورزی است که با داشتن مقادیر زیاد قند، املاح معدنی و ویتامین‌ها به عنوان یک ماده غذایی ارزشمند در جهان به شمار می‌آید (Al-Shahib et al., 2003). میزان تولید خرما در جهان در سال ۲۰۰۷ حدود ۶ میلیون تن بوده که از این میزان حدود ۹۴۰ هزار تن در ایران تولید شده است. استان کرمان در همین سال با تولید بیش از ۲۷۰ هزار تن خرما رتبه اول کشور را به خود اختصاص داده است (Iran Ministry of Agriculture Statistic letters, 2009). حدود ۶۰٪ خرمای تولید شده کشور در داخل مصرف گردیده یا صادر می‌شود و حدود ۴۰٪ آن در مراحل برداشت، حمل و نقل و فرآوری ضایع شده یا از کیفیت خوبی برخوردار نبوده و به مصرف دام می‌رسد (Najafi et al., 2009).

در سال‌های اخیر به علت کاهش منابع انرژی، نگرانی از افزایش آلودگی محیط زیست و افزایش گازهای گلخانه‌ای محققان را به سمت تولید و استفاده از سوخت‌های تجدید پذیر با منشأ زیستی سوق داده است. اتانول سوخت اولیه موتورهای

\* نویسنده مسئول: aghazanfari@mail.uk.ac.ir

آنجا که فعالیت میکروارگانیزم های مخمر در بریکس ۲۰ سریعتر انجام می شود و برای انجام آزمایشات، به ۲۷۰ گرم شیره خرما با بریکس ۷۵ حدود ۷۵۰ گرم آب اضافه گردید تا یک لیتر شربت خرما با بریکس ۲۰ تهیه گردد. برای رشد و فعالیت بهتر و بیشتر میکروارگانیزم ها ترکیبات مغذی شامل پیتون به مقدار ۱ گرم بر لیتر، پتاسیم دی هیدروژن فسفات به مقدار ۰/۳ گرم بر لیتر و منیزیم سولفات به مقدار ۰/۲ گرم بر لیتر به شربت خرما اضافه گردید. مقدار پنج گرم مخمر سایکرومایسسز سرویژه (Adams et al., 2000) برای هر لیتر محلول شربت به هر راکتور اضافه گردید و درب راکتور برای ایجاد شرایط فعالیت غیر هوازی میکروارگانیزم ها بسته گردید. به منظور ثابت نگه داشتن دما از یک حمام آب مجهز به یک ترموستات و المنت گرم کننده ۵۰۰ وات استفاده گردید و تخمیر در دمای  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  انجام شد. برای گرفتن نمونه از محلول در حین فرآیند تخمیر، یک شیر در پایین هر راکتور تعبیه شد. برای اندازه گیری  $\text{CO}_2$  متصاعد شده دو استوانه مرتبطه حاوی آب به قسمت بالای راکتور متصل گردید. طرحواره راکتور مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. برای کاهش خطاها، هر آزمایش تخمیر همزمان در سه راکتور (سه تکرار) انجام گرفت.

#### اندازه گیری الکل، قند و دی اکسید کربن

برای بررسی روند پیشرفت فرآیند تخمیر و تولید بیواتانول، هر روز در یک ساعت مشخص از مایع دورن راکتور نمونه گیری شد و مقدار قند، الکل و دی اکسید کربن مورد اندازه گیری قرار گرفت. در این آزمایشات مقدار قند محلول با استفاده از یک رفراکتومتر (PAL, ATAGO, Japan) انجام گرفت. برای اندازه گیری درصد حجمی الکل از یک الکل سنج شیشه ای استفاده گردید. بدین منظور ۱۰۰ میلی لیتر از مایع تخمیر شده با ۵۰ میلی لیتر آب مخلوط و در داخل یک فلاسک تقطیر حرارت داده شد تا مایع به طور کامل تبخیر و سپس تقطیر گردید. پس از خنک کردن مایع تقطیر شده، از طریق غوطه ور ساختن الکل سنج درصد الکل آن اندازه گیری شد. برای اندازه گیری میزان گاز دی اکسید کربن از روش تغییر ارتفاع ستون مایع در ظروف مرتبط استفاده شد (شکل ۱).

#### مدل سازی مصرف قند

میزان قند محلول در ابتدای فرآیند بیشینه می باشد و به تدریج با گذشت زمان و با پیشرفت تخمیر مقدار آن محلول کاهش پیدا می کند. برای شبیه سازی فرآیند کاهش قند از مدل نمایی کاهشی (Exponential decaying) و مدل لگاریتمی کاهشی (Logistic decaying) استفاده گردید. مدل نمایی با رابطه (۱) نشان داده می شود:

$$S = a \cdot \exp(-bt) + c \quad (1)$$

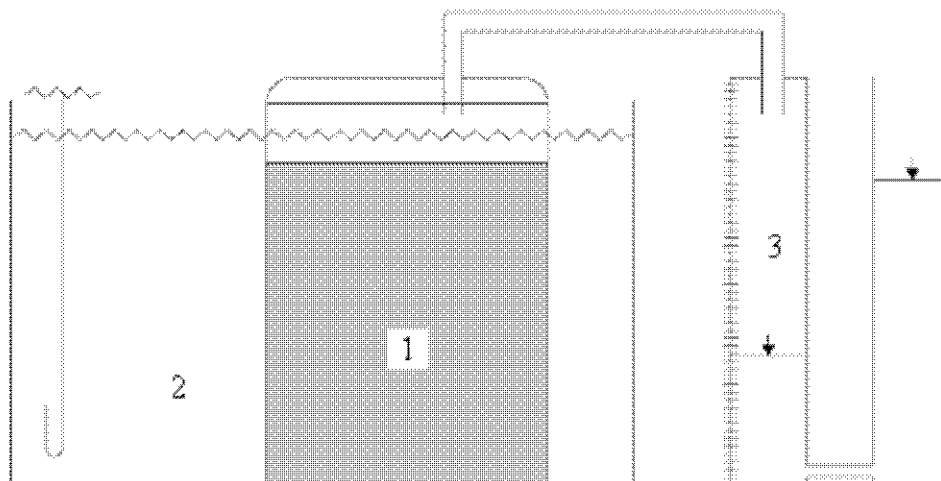
یکی از مخمرهایی است که به طور معمول برای تولید اتانول از گلوکز مورد استفاده قرار می گیرد (Battcock & Azam-Ali, 1998).

یکی از راه های بررسی فرآیندها و تأثیر فاکتورهای مختلف در آنها، مدل سازی آنها به کمک معادلات ریاضی است. به وسیله این مدل ها می توان نقش فاکتورهای مختلف را مورد بررسی قرار داد و از آنها برای پیش بینی نتایج، کنترل فرآیند، طراحی بیوراکتورها و همچنین ارتقاء عملکرد آنها استفاده نمود. محققان زیادی به مدلسازی فرآیند تخمیر پرداخته اند. در تحقیقی پیشرفت فرآیند تخمیر در تهیه نان با اندازه گیری میزان افزایش حجم خمیر به صورت تابعی از زمان مورد بررسی قرار گرفت و این فرآیند با استفاده از مدل گمپرتز (Gompertz) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Romano et al., 2007). در تحقیقی دیگر از مدل لگاریتمی برای تخمین مقدار آنزیم تولید شده تحت تاثیر دما در حین فرآیند تخمیر دانه آفتابگردان استفاده گردید (Muller dos Santos et al., 2004). مدل فوریه انتقال حرارت نیز برای بررسی اثر دمای محیط و سرعت جریان هوا در اطراف بیوراکتور بر روی توزیع دما در عمق های مختلف درون محلول تخمیر مورد استفاده قرار گرفت (Sangsurasak et al., 1998). میزان تولید بیواتانول، کاهش قند و تولید گرما در محیط تخمیر در اثر تخمیر ساقه های سورگوم شیرین به کمک مدل های ریاضی مدل سازی شد (Wang et al., 2009). فرآیند تولید بیواتانول از آرد گندم نیز مورد مطالعه و مدل سازی قرار گرفته است (Montesinos et al., 2000).

حجم زیاد تولید خرما، میزان بالای ضایعات و داشتن قند زیاد در این ضایعات زمینه مناسبی را برای تولید بیواتانول از این ضایعات را در کشور فراهم می آورد. اگرچه این ضایعات برای مصرف مناسب نمی باشند ولی می توان از طریق تخمیر، قند آنها را به بیواتانول تبدیل نمود. در این پژوهش از شیره تهیه شده از خرما درجه سه به عنوان ماده اولیه برای تولید بیواتانول استفاده گردید. برای درک و آگاهی بهتر از چگونگی پیشرفت فرآیند تخمیر و در نتیجه کنترل و بهینه سازی فرآیند تخمیر و طراحی بیوراکتورهای مناسب به بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف در فرآیند تبدیل ضایعات خرما به بیواتانول و شبیه سازی این فرآیند از طریق روابط متداول ریاضی پرداخته شد.

#### مواد و روش ها

برای انجام فرآیند تخمیر و تولید بیواتانول شیره خرما با بریکس ۷۵ از یک کارخانه فرآوری خرما واقع در شهر کرمان خریداری گردید. ماده اولیه این شیره خرما درجه سه بوده که به طور مستقیم برای مصرف در بازار قابل فروش نیستند. از



شکل ۱- طرحواره تجهیزات مورد استفاده برای تولید بیواتانول از ضایعات خرما: (۱) رآکتور (۲) حمام آب (۳) مانومتر اندازه گیری دی اکسید کربن

مدل لگاریتمی رشد به صورت معادله زیر تعریف می گردد:

$$P = \frac{A}{\left\{1 + \exp\left[\frac{\mu_{max}}{A}(\lambda - t) + 2\right]\right\}} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴) متغیر P می تواند میزان تولید بیواتانول یا دی اکسید کربن (mL/L) باشد و پارامتر A پتانسیل تولید هر یک از این دو متغیرها به وسیله محلول مورد تخمیر است. پارامتر  $\mu_{max}$  نرخ بیشینه رشد یا به عبارت دیگر سرعت واکنش را نشان می دهد و  $\lambda$  زمان تأخیر بر حسب روز است که بیانگر مدت زمان لازم برای آغاز فرآیند تخمیر می باشد (Zwietering et al., 1990; Fujikawa et al., 2004)

رابطه کلی مدل نمایی رشد به صورت زیر تعریف می گردد:

$$P = -a \cdot \exp(bt) + a \quad (5)$$

در این رابطه نیز متغیر P می تواند میزان تولید بیواتانول یا دی اکسید کربن باشد. در مدل (۵) پارامتر a نشان دهنده حداکثر پتانسیل محلول برای تولید بیواتانول و دی اکسید کربن است که بستگی مقدار کربوهیدرات های موجود در محلول دارد. پارامتر b نشان دهنده نرخ افزایش بیواتانول و دی اکسید کربن است که بستگی به شرایط محیط تخمیر دارد.

#### تعیین پارامترها و مقایسه مدل ها

برای تخمین پارامترهای هر مدل، داده های مربوط به مقادیر متغیر وابسته آن مدل که در زمان های مختلف اندازه گیری شده بودند به جعبه ابزار Curve Fitting نرم افزار MATLAB (MATLAB7.2. R2006a. 2006) داده شدند و پارامترهای هر مدل تخمین زده شدند. پس از تعیین پارامترها، مدل ها با محاسبه RMSE و  $R^2$  بین داده های پیش بینی شده و داده های آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شدند (Norbakhsh et al., 2006). بهترین مدل، مدلی انتخاب گردید که دارای بالاترین  $R^2$  و کوچکترین RMSE بود.

در این رابطه S مقدار قند بر حسب درجه بریکس و t زمان بر حسب روز می باشد. پارامترهای a، b و c بترتیب نشان دهنده حداکثر مقدار کاهش قند محلول، نرخ کاهش قند و مقدار نهایی قند موجود در محلول می باشند.

مدل لگاریتمی کاهشی که اساساً برای اندازه گیری و مدل سازی میزان مرگ و میر باکتری ها در نظر گرفته شد به صورت زیر بیان می گردد (Gibson et al., 1987).

$$S = \exp\left[A + \frac{c}{1 + \exp(-B(t-M))}\right] \quad (2)$$

که در آن S غلظت قند (بریکس) که به صورت تابعی از زمان تعیین می گردد. پارامترهای A, B, C, M شکل منحنی و نرخ تغییرات آن را مشخص می نمایند.

#### مدلسازی میزان تولید بیواتانول و دی اکسید کربن

فرآیندهای رشد مخمر شامل سه فاز تأخیر، رشد و فاز ثابت هستند. در فاز تأخیر رشد میکروارگانیسم های مخمر بسیار کند است و می توان گفت در این مرحله تعداد این میکروارگانیسم ها تقریباً ثابت است. در فاز رشد تعداد میکروارگانیسم ها با سرعت زیادی شروع به افزایش می کنند و در فاز ثابت تعداد میکروارگانیسم ها تقریباً ثابت می ماند. مقدار بیواتانول و دی اکسید کربن متصاعد شده به صورت مستقیم تابعی از این سه فاز می باشد. برای مدل سازی میزان تولید بیواتانول و دی اکسید کربن از مدل گمپرتز (Gompertz model)، نمایی رشد (Exponential growth) و لگاریتمی رشد (Growth logistic) استفاده گردید. مدل گمپرتز برای محاسبه سرعت مرگ و میر میکروارگانیسم ها ارائه شد و به صورت زیر بیان می گردد. (Zwietering et al., 1990; Romano et al., 2007)

$$P = A \exp\left\{-\exp\left[\frac{\mu_{max}}{A}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (3)$$

## نتایج و بحث

$$S = 11.8 \times \exp(-0.6077t) + 8.469 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9862, \text{RMSE} = 0.2363$$

مقایسه ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) نشان می‌دهد که هر دو مدل به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته‌اند ( $R^2$  بیش از ۰/۹۸). به علت نزدیک بودن دو مدل تنها مدل لگاریتمی کاهش که دارای  $R^2$  بالاتر و RMSE کوچکتری بوده و در داده‌ها بهتر برازش شده است در شکل (۲) نشان داده شده است.

## بررسی مدل سازی روند تولید بیواتانول

شکل (۳) میزان تغییرات بیواتانول در حین فرآیند تخمیر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در روزهای ابتدایی سرعت تولید الکل با افزایش سرعت کاهش میزان قند افزایش می‌یابد به طوری که پس از گذشت ۵ روز به مقدار بیشینه خود یعنی حدود ۷۰ mL/L می‌رسد و سپس سرعت افزایش تولید آن نسبت به زمان کاهش می‌یابد و تقریباً پس از گذشت ۱۵ روز میزان الکل تولید شده حدود ۱۰ mL/L افزایش یافته و پس از آن تقریباً تثبیت می‌شود.

محاسبات نشان دادند که میزان تولید بیواتانول از ضایعات خرما ۷۲ گرم بیواتانول از هر کیلوگرم شربت خرما با بریکس ۲۰ است که این میزان برای سیب ۴۳ گرم (Hang et al., 1981) و برای انگور ۵۳/۳ گرم (Hang et al., 1986) است. میزان تولید بیشتر بیواتانول از ضایعات خرما به دلیل وجود بیشتر کربوهیدرات در خرما می‌باشد.

جدول (۱) مقادیر پارامترهای  $\mu_m$ ,  $\lambda A$  را برای دو مدل گمپرتز و لگاریتمی افزایشی پس از برازش نشان می‌دهد. مدل تابع نمایی رشد برای تولید بیواتانول به شرح زیر است:

$$P = -79.22 \times \exp(-0.4458t) + 79.22 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9810, \text{RMSE} = 0.2463$$

جدول ۱- پارامترهای تخمین زده شده برای تعیین میزان تولید الکل در طی فرآیند تخمیر ضایعات خرما

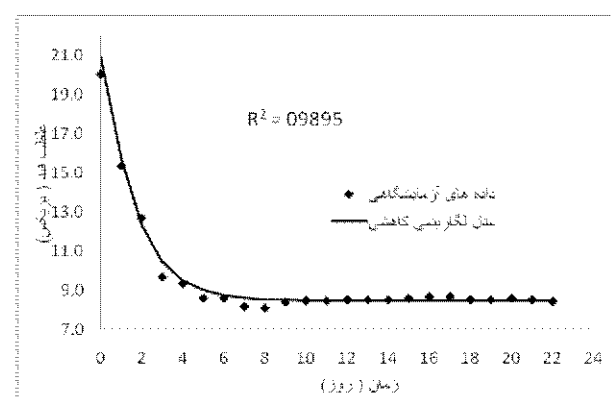
مدل	A(mL/L)	$\mu_m$ (day <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (day)	R2	RMSE
گمپرتز	۸۰	۶۹/۲۹	۰/۵۹۵	۹۸۲۹/۰	۲۰۵۱/۰
لگاریتمی	۸۰	۲/۲۸	۶۳۸/۰	۹۷۸۱/۰	۲۶۲۳/۰

## بررسی و مدلسازی روند تولید دی اکسید کربن

شکل (۴) میزان گاز دی اکسید کربن تولید شده در طی فرآیند تخمیر را نشان می‌دهد. همانطور که نمودار نشان می‌دهد گاز تولید شده پس از فاز تأخیر با نرخ زیادی افزایش می‌یابد و پس از گذشت حدود ۷ روز به حداکثر میزان خود می‌رسد و سپس مقدار آن ثابت می‌ماند. همان طور که در

## بررسی و مدلسازی روند کاهش قند

تغییرات غلظت قند محلول در طی فرآیند تخمیر با گذشت زمان در شکل ۲ نشان داده شده است. میزان قند موجود در محیط تخمیر از میزان اولیه با بریکس ۲۰ در روزهای اول با نرخ زیادی کاهش یافته است؛ به طوری که تنها با گذشت تقریباً ۵ روز به کمترین میزان خود یعنی به بریکس کمتر از ۹ رسیده و بعد از آن میزان قند موجود در محیط تخمیر با نرخ کمتری کاهش یافته و تقریباً پس از گذشت ۳۰ روز به بریکس حدود ۸ رسیده است.



شکل ۲- تغییرات غلظت قند در حین فرآیند تخمیر ضایعات خرما و شبیه سازی آن با استفاده از مدل لگاریتمی کاهش

مدل به دست آمده برای روند کاهش قند با استفاده از فرمول لگاریتمی به صورت زیر است:

$$S = \exp \left[ 3.87 + \frac{-1.733}{1 + \exp(-0.6884(t-0.13))} \right] \quad (6)$$

$$R^2 = 0.9895, \text{RMSE} = 0.2071$$

مدل نمایی کاهش برای شبیه سازی روند کاهش قند به صورت زیر به دست آمد:

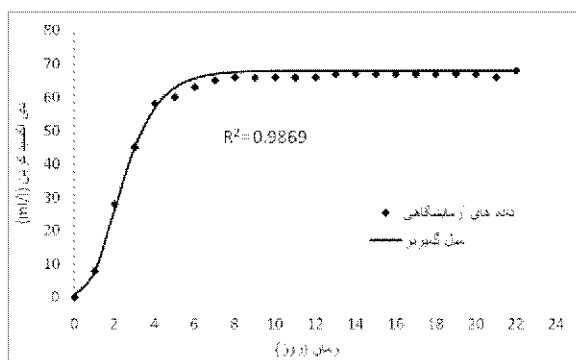
مقایسه  $R^2$  و RMSE به دست آمده برای سه مدل ارائه شده نشان می‌دهد که تمامی مدل‌ها به خوبی توانستند داده های آزمایشگاهی را توجیه کنند و توافق خوبی با آنها دارند ( $R^2 \geq 0.97$ ) با این وجود مدل گمپرتز تطابق بهتری با داده های آزمایشگاهی داشت. به دلیل نزدیک بودن منحنی مدلها به یکدیگر، از نمایش همه آنها بر روی نمودارها خودداری شده و تنها مدل گمپرتز در شکل (۳) نشان داده شده است.

مدل به دست آمده برای تولید گاز دی اکسید کربن با استفاده از مدل نمایی رشد به شرح زیر است:

$$P = -67.86 \times \exp(-0.3473t) + 67.86 \quad (9)$$

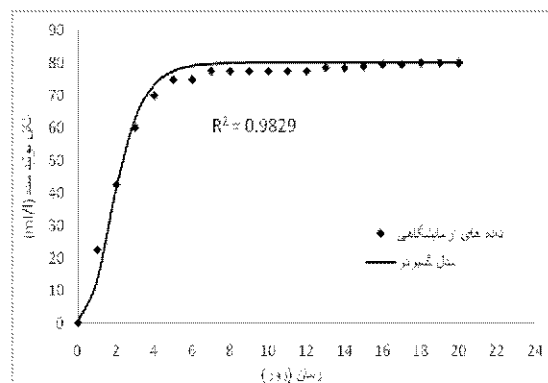
$R^2 = 0.9784$  ,  $RMSE = 13.603$

مقادیر  $R^2$  و  $RMSE$  برای مدل های ارائه شده نشان داد که همه مدل ها به خوبی با داده های آزمایشگاهی توافقی دارند ( $R^2$  بیش از ۰/۹۷) ولی مدل گمپرتز با بالاترین  $R^2$  و کوچکترین  $RMSE$  توافقی بهتری نسبت به سایر مدلها با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. تطابق این مدل با داده های آزمایشگاهی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات حجم گاز دی اکسید کربن در حین فرآیند تخمیر ضایعات خرما و شبیه سازی با مدل گمپرتز

شکل (۴) نشان داده شده است میزان حداکثر گاز متصاعد شده حدود ۷۰ mL/L است و پس از آن نرخ تولید گاز با گذشت زمان کاهش می یابد؛ به طوریکه حجم گاز در روزهای بعدی فقط حدود ۲ تا ۳ میلی لیتر بر لیتر افزایش می یابد و پس از مدتی میزان حجم گاز تولید شده ثابت می ماند.



شکل ۳- تغییرات میزان الکل تولید شده در حین فرآیند تخمیر ضایعات خرما و شبیه سازی آن با مدل گمپرتز

در جدول (۲) مقادیر پارامترهای  $\mu_m$ ,  $\lambda$ ,  $A$  برای دو مدل گمپرتز و لگاریتمی افزایشی که از عبور دادن مدلها از مجموعه داده ها برای توجیه میزان دی اکسید کربن تولید شده در طی فرآیند تخمیر ضایعات خرما حاصل شده نمایش داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای تخمین زده شده برای تعیین میزان تولید گاز دی اکسید کربن در طی فرآیند تخمیر

مدل	A(mL/L)	$\mu_m$ (day <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (day)	$R^2$	RMSE
گمپرتز	۶۸	۷۲/۲۰	۷۲۴/۰	۹۹۶۷/۰	۸۴۰۶/۵
لگاریتمی	۶۸	۸۴۵/۲۱	۹۳۴/۰	۹۹۲۵/۰	۲۴۶۱/۸

مدل های لگاریتمی و نمایی کاهش یافته برای میزان مصرف قند نشان داد که مدلها به خوبی با داده های آزمایشگاهی تطابق داشتند ( $R^2 > 0.98$ ). ولی از بین دو مدل ارائه شده مدل لگاریتمی کاهش یافته با بالاترین  $R^2$  و کوچکترین  $RMSE$  بهتر از مدل نمایی کاهش یافته بود. مدل های لگاریتمی، نمایی، گمپرتز برای تولید بیواتانول به خوبی با داده های آزمایشگاهی تطابق داشتند ( $R^2 > 0.97$ ) ولی مدل گمپرتز با بالاترین  $R^2$  و کوچکترین  $RMSE$  بهتر از سایر مدلها بود. مدل سازی میزان تولید گاز دی اکسید کربن با استفاده از سه مدل لگاریتمی، نمایی، گمپرتز نشان داد که این مدلها با ضریب تبیین بیش از ۰/۹۷ به خوبی با داده های آزمایشگاهی تطابق داشتند ولی مدل گمپرتز با  $R^2$  بیش از ۰/۹۹ بهتر از دو مدل دیگر با داده های آزمایشگاهی توافقی داشت.

## REFERENCES

Adams, M. R., & Moss, M. O. (2000). Food microbiology. *The Royal Society of Chemistry*.

**نتیجه گیری**  
بررسی روند تغییرات قند، بیواتانول و دی اکسید کربن در حین فرآیند تخمیر نشان داد که در مجموع میزان تغییرات در ۵ روز اول با سرعت زیادی صورت گرفت و سپس با سرعت کمتری تا حدود ۱۵ روز بعد ادامه یافت. میزان قند در روز پنجم به بریکس کمتر از ۹ کاهش یافت و در پایان روز بیستم میزان بریکس به حدود ۸ رسید. میزان الکل نیز در ۵ روز اول به حدود ۷۰ میلی لیتر بر لیتر رسید و در طی ۱۵ روز بعدی این میزان فقط ۱۰ میلی لیتر بر لیتر افزایش تولید را نشان داد. در مجموع میزان تولید بیواتانول از هر کیلوگرم شربت با بریکس ۲۰ حدود ۷۲ گرم بود. مجموع دی اکسید کربن تولید شده در طی فرآیند به ۷۰ میلی لیتر بر لیتر رسید که ۹۵٪ آن در پنج روز اول تولید شد.

Al-Shahib, W., & Marshall, R. J. (2003). The fruit of the date palm: its possible use as the best food for the future. *International Journal of Food Science*

- and *Nutrition*, 54(4), 247 – 259.
- Battcock, M., & Azam- Ali, S. (1998). Fermented fruits and vegetables: A global perspective. *FAO Agricultural Services Bulletin*, No.134.
- Fujikawa, H., Kai, A., & Morozumi, S. (2004). A new logistic model for *Escherichia coli* growth at constant and dynamic temperatures. *Food Microbiology*, 21, 501 – 509.
- Gibson, A. M., Bratchell, N., & Roberts, T. A. (1987). The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. *Journal Applied Bacteriol.*, 62, 479 – 490.
- Golshan, A., & Foladi, M. H. (2007). Optimization of alcoholic fermentation process of palm date wastes. In: *Proceedings of 3th National Conference on Agriculture waste*, 21 Nov., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 161-167. (In Farsi)
- Hang, Y. D., Lee, C. Y., & Woodams, E. E. (1986). Solid- State fermentation of grape pomace for ethanol production. *Biotechnology lett*, 8, 53 – 56.
- Hang, Y. D., Lee, C. Y., Woodams, E. E., & Cooley, H. J. (1981). Production of alcohol from apple pomace. *Applied and Environmental Microbiology*, 42, 1128 – 1129.
- Iran Ministry of Agriculture Statistical letters, (2009): <http://www.demo.parsianportal.com/khorma/> (In Farsi)
- Kar, S., Chaudhury, P., & Ray, R. C. (2004). Comparative study of bioethanol production from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) and cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) by acid enzyme hydrolysis. In: *Proceeding of the symposium nutrition, food security and sustainable environment* 29 – 31 Oct, Regional Centre of Central Tuber Crops Research Institute. India. pp. 276 – 281.
- Montesinos, T., & Navarro, J. M. (2000). Production of alcohol from raw wheat flour Amyloglucosidase and *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme and Microbial Technology*. 27, 362 – 370.
- Muller dos Santos, M., Souza da Rosa, A., Dal'Boit, S., Mitchell, D. A., & Krieger, N. (2004). Thermal denaturation: is solid – state fermentation really a good technology for the production of enzymes. *Bioresource Technology*, 93, 261 – 268.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Tavakoli, T., & Yusaf, T. (2009). Potential of bioethanol production from agricultural wastes in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, 1418 – 1427.
- Noorbakhsh, S., Tabil Jr, L., & Ghazanfari, A. (2006). Analysis and modeling of water absorption by yellow dent corn kernels before and during gelatinization process. *Asian Journal of plant sciences*, 5(5), 805 – 810.
- Romano, A., Toraldo, G., Cavella, S., & Masi, P. (2007). Description of leavening of bread dough with mathematical modeling. *Journal of Food Engineering*, 83, 142 – 148.
- Sangsurasak, P., & Mitchell, D. A. (1998). Validation of a model describing 2-dimensional heat transfer during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. *Biotechnology Bioenerg.* 60, 739 – 749.
- Serra, A., Strehaiano, P., & Taillandier, P. (2005). Influence of temperature and pH on *Saccharomyces bayanus* Var. *uvarum* growth: impact of a wine yeast interspecific hybridization on these parameters. *International Journal of Food Microbiology*, 104, 257 – 265.
- Wang, E. Q., Li, S. Z., Tao, L., Geng, K., & Li, T. C. (2009). Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid – state fermentation. *Applied Energy*, 87, 2839 – 2845.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 1875-1881.