

# مطالعه سینتیک لیگنین زدایی ساقه گندم در فرایند خمیر کاغذسازی با گلیسرول

الهام صابری خواه، آزاده ابراهیمیان پوربازاری\*<sup>+</sup>

فومن، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده فنی فومن، گروه مهندسی شیمی

جمشید محمدی روشنده

رضوانشهر، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده فنی کاسپین، گروه مهندسی شیمی

**چکیده:** در این مطالعه سینتیک لیگنین زدایی فرایند خمیر کاغذ سازی از ساقه گندم با استفاده از گلیسرول، در شرایط استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون آن، در دمای ۲۰۰°C و در زمان‌های ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه در شرایط رفلاکس انجام شد. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش زمان خمیر کاغذ سازی مقدار لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ، درصد کربو هیدرات و بازده در هر دو حالت استفاده از کاتالیست و بدون آن کاهش می‌یابد. معادله‌های سرعت بر حسب غلظت لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ هر یک از فازهای لیگنین زدایی ارائه شد. بررسی‌ها نشان داد که سرعت لیگنین زدایی در این شرایط از واکنش مرتبه اول پیروی می‌نماید و ثابت سرعت واکنش‌ها در هر فاز لیگنین زدایی به ترتیب برابر  $3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ،  $6 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  و  $4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  تعیین شد.

**واژه‌های کلیدی:** کاه گندم، حلال آلی، گلیسرول، لیگنین زدایی، سینتیک، ثابت سرعت.

**KEY WORDS:** Wheat straw, Organosolv, Glycerol, Delignification, Kinetic, Rate constant.

## مقدمه

تولید شده است [۳] چرا که به سادگی قابل دسترسی است و خمیر به دست آمده از کیفیت بالایی برخوردار می‌باشد [۴]. امروزه کاه و کلش طی فرایندهای متفاوت شیمیایی و یا شیمیایی - مکانیکی، در مقیاس آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی به خمیر و کاغذ تبدیل می‌شوند [۵]. فرایندهای سودا، کرافت و سودای تغییر یافته برای ساخت خمیر کاغذ از انواع کاه مناسب هستند. متداول‌ترین فرایند مورد استفاده در ساخت خمیر کاغذ از کاه فرایند سودا است. این فرایند برای تمام درجه‌های

افزایش چشمگیر جمعیت و نیاز روزافزون به استفاده از کاغذ و فرآورده‌های سلولزی از یک طرف و تخریب شدید جنگل‌ها و منابع تجدید شونده از طرف دیگر، موجب رویکرد گسترده به استفاده از الیاف غیر چوبی شده است [۱]. گیاهان غیر چوبی از راهکارهای مهمی برای تأمین منابع الیاف سلولزی در صنایع خمیر و کاغذ به‌شمار می‌آیند [۲]. در بین منابع الیاف سلولزی غیر چوبی، کاه و کلش جایگاه خاصی دارد. به طوری که بالغ بر ۴۶ درصد کل خمیر کاغذ و کاغذ از منابع غیر چوبی با استفاده از کاه و کلش

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail: aebrahimian@ut.ac.ir

## بخش تجربی

### نمونه برداری و تهیه ساقه گندم

در این پژوهش، ساقه گندم از مزرعه‌های منطقه اردبیل جمع آوری شد. نمونه‌گیری به صورت تصادفی و به مقدار کافی انجام گرفت. قبل از انجام عملیات پخت، جدا کردن کاه، سنبله و گره‌های موجود انجام شد. سپس ساقه‌های گندم توسط قیچی باغبانی به طول ۳-۴ سانتیمتر بریده شدند. ساقه‌های خرد شده به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا به تعادل رطوبتی با محیط برسد. سپس رطوبت ساقه گندم با سه تکرار اندازه‌گیری شد. آنگاه با در نظر گرفتن درصد رطوبت ساقه گندم، نمونه‌های ۲۰۰ گرمی (بر مبنای وزن خشک) آماده شده و در کیسه‌های پلاستیکی بسته بندی شد.

### فرایند لیگنین زدایی

در این پژوهش لیگنین زدایی با استفاده از حلال آلی انجام شد. در تمام موارد ابتدا ۷۰ گرم از ساقه گندم آماده شده را بر اساس وزن خشک، توزین شده و سپس به نسبت ۱ به ۱۰، حلال گلیسرول به آن افزوده شده و داخل بالن رفلاکس قرار داده شده و پس از رسیدن به دمای رفلاکس، دمای  $195^{\circ}\text{C} - 205^{\circ}\text{C}$ ، عملیات پخت، در زمان‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه در دو شرایط با استفاده از کاتالیست هیدروکسید سدیم ۲٪ و بدون آن انجام گرفت. پس از طی شدن زمان لیگنین زدایی برای هر پخت، ساقه‌های گندم پخته شده را پس از خنک شدن از بالن تخلیه کرده و به طور کامل با آب شستشو داده تا مایع پخت از آن جدا شود. آنگاه خمیر کاغذ سازی را در دستگاه جداسازی الیاف مدل LTD ساخت کشور انگلستان ریخته تا به صورت رشته رشته درآید و سپس آبیگری به طور کامل انجام شد.

### تجزیه ترکیب‌های ماده اولیه

تجزیه ترکیب‌های ساقه گندم بر اساس استانداردهای زیر انجام گرفت:

- هولوسولوز [۱۱]، لیگنین کلاسون (TAPPI T222 om-98)  
 [۱۲]، سلولز کروشنر (Kurschner-Hoffner) [۱۳]،  
 مواد استخراجی (TAPPI T 204 cm-97) [۱۲]،  
 میزان خاکستر (TAPPI T211 om-93) [۱۲]

کاغذ متداول است. شایان ذکر است در این فرایند توسعه و استقرار سامانه تخلیه پساب، در واحدهایی که خمیر کاغذ بدون استفاده از سامانه بازیابی مواد شیمیایی بخار تولید می‌شود، لازم بوده و این می‌تواند به عنوان ایراد عمده برای فرایند سودا باشد [۳]. در این راستا فرایندهایی که در آنها از حلال‌های آلی مانند گلیسرول استفاده می‌شود دارای برتری‌هایی نسبت به فرایند سودا می‌باشند، زیرا این فرایندها از نظر زیست محیطی کم ضررتر می‌باشند، بازده خمیرسازی بالایی دارند، به آسانی رنگبری می‌شوند، حلال نیز به آسانی بازیافت می‌شوند، همچنین نیاز به سرمایه گذاری هنگفت برای احداث واحدهای جدید ندارند، لیگنین و قندهای موجود در مایع پخت آنها برای استفاده‌های بعدی قابل بازیافت هستند [۶].

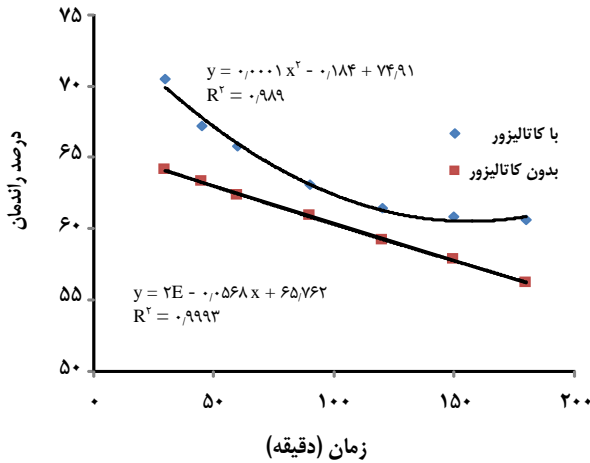
در طراحی و کنترل فرایند تولید خمیر کاغذ سازی، مکانیسم واکنش و سینتیک فازهای لیگنین زدایی از مهم‌ترین عامل‌های کنترل کننده و نشان دهنده تغییر مرحله ای در فرایند تولید خمیر کاغذ است. بنابراین، مطالعه سینتیک لیگنین زدایی از اهمیت زیادی در کارآمدی بیشتر یک فرایند لیگنین زدایی برخوردار است [۷، ۸]. سینتیک شیمیایی شامل مطالعه سرعت واکنش‌های شیمیایی و بررسی مکانیسم واکنش‌هاست. به طوری که با مطالعه سینتیک یک واکنش شیمیایی می‌توان درجه واکنش، تأثیر دما بر سرعت واکنش، برای پیشرفت واکنش و انرژی آزاد شده در یک واکنش را بررسی کرد. با توجه به اینکه درک درست از سینتیک واکنش خمیر کاغذسازی، پایه ای برای اصلاح و بهینه سازی فرایند است، در نتیجه به وسیله ی شناخت جنبه‌های گوناگون سینتیک فرایند، می‌توان امکان بهره برداری و کنترل بهتر تجهیزات را فراهم کرد [۷].

عبدالکریم و همکاران بررسی سینتیک فرایند کرافت کاه گندم را انجام دادند و نشان دادند که واکنش شیمیایی لیگنین زدایی از مرتبه اول است [۹]. سینچ و همکاران فرایند لیگنین زدایی از کاه گندم را به وسیله محلول سولفیت بافری شده با سدیم هیدروکسید انجام دادند و دریافتند که سینتیک لیگنین زدایی از مرتبه دوم است [۱۰].

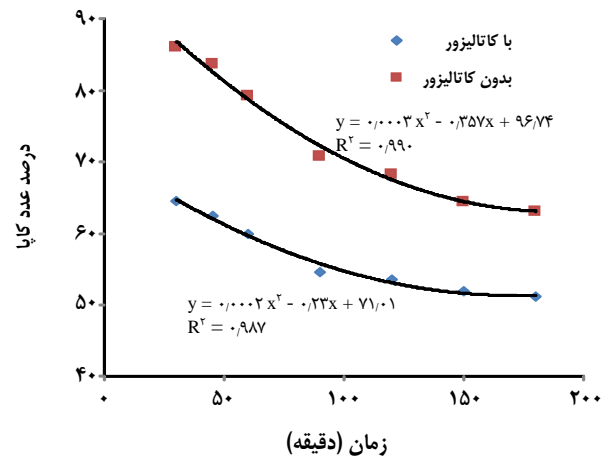
پژوهش حاضر به منظور تعیین معادله‌های سرعت واکنش لیگنین زدایی کاه گندم، تعیین مرتبه واکنش در هر دو حالت با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون آن و بررسی تأثیر دو عامل، زمان پخت و کاتالیست بر غلظت لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ با استفاده از فرایند خمیرسازی با حلال آلی، گلیسرول، انجام شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ساقه گندم.

نوع ترکیب شیمیایی	سلولز	هولوسلولز	لیگنین	مواد استخراجی	خاکستر
مقدار %	۴۳/۱	۷۲/۱۲	۱۹/۳۱	۱/۶۴	۶/۸



شکل ۲- رابطه بین راندمان و زمان خمیر کاغذ سازی در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون استفاده از آن.



شکل ۱- رابطه بین عدد کاپا و زمان خمیر کاغذ سازی در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و با استفاده از کاتالیزور هیدروکسید سدیم ۲٪ و بدون استفاده از آن.

با بررسی نتیجه‌های به دست آمده از فرایند خمیرسازی ساقه گندم با حلال آلی گلیسرول، مشخص شد که با افزایش زمان خمیر کاغذ سازی، عدد کاپا کاهش یافته و این کاهش یک رابطه غیر خطی را نشان می‌دهد. که در شکل ۱ ارایه شده است. کاهش درصد عدد کاپا در خمیر کاغذ سازی با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪، چشمگیری است. به عبارتی، تغییرهای زمان پخت تاثیر زیادی بر لیگنین زدایی از خمیر کاغذ سازی داشته، ضمن اینکه استفاده از کاتالیست اثر مثبتی بر این کاهش اعمال نموده است. با توجه به بررسی ضریب همبستگی ( $R^2$ ) به دست آمده از نتیجه‌های خمیر کاغذ سازی در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  (شکل ۱) لیگنین زدایی با دو شیب متفاوت صورت می‌گیرد که بیانگر این نکته است که لیگنین زدایی در هر دو حالت، استفاده از کاتالیزور هیدروکسید سدیم ۲٪ و بدون آن، دارای دو مرحله می‌باشد.

با دقت در مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2$ )، رابطه بین زمان خمیر کاغذ سازی و درصد بازده خمیر (شکل ۲) در دو حالت، با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون استفاده از آن،

### اندازه‌گیری ویژگی‌های خمیر کاغذ

بازده خمیر کاغذ با تعیین درصد خشکی خمیر، اندازه‌گیری شد. محاسبه لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ (عدد کاپا) بر طبق آیین نامه شماره ۹۹ - om ۲۳۶ T استاندارد TAPPI [۱۲] انجام شد. درصد لیگنین خمیر کاغذ بر اساس وزن خشک کاه که بر اساس معادله زیر محاسبه شد [۱۴]:

بازده خمیر کاغذ  $\times 0/153 \times$  درصد لیگنین خمیر بر اساس

وزن خشک خمیر کاغذ = درصد لیگنین خمیر کاغذ

و درصد کربوهیدرات‌های خمیر (LFY)<sup>(۱)</sup> بر اساس معادله زیر

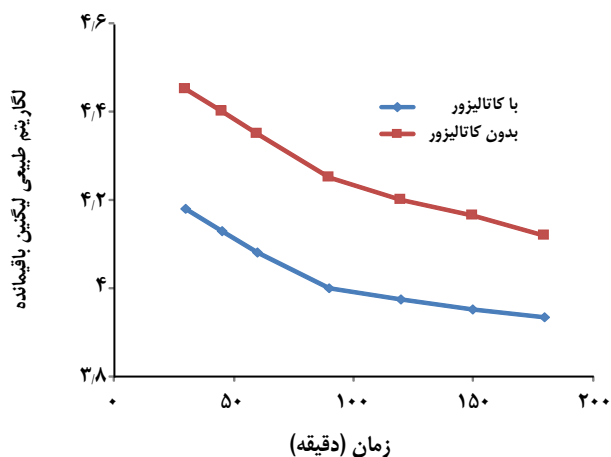
محاسبه شد [۱۵]:

درصد لیگنین خمیر - بازده کل خمیر = LFY

### نتیجه‌ها و بحث

با استفاده از استانداردهای یاد شده، تجزیه شیمیایی ساقه گندم به منظور تعیین میزان ترکیب شیمیایی آن، شامل سلولز، هولوسلولز، لیگنین، مواد استخراجی و خاکستر انجام گرفت، که نتیجه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

(۱) Lignin Free Yield



شکل ۴- رابطه بین لگاریتم طبیعی لیگنین باقیمانده در خمیر و زمان پخت در شرایط استفاده از کاتالیست و بدون استفاده از آن در دمای  $200^{\circ}\text{C}$ .

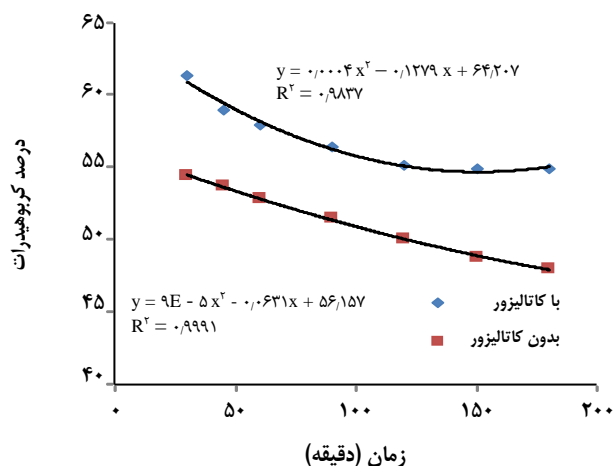
به ترتیب  $54/59$  و  $70/1$  درصد می‌باشد. این بدین معنی است که در یک سامانه مشخص، درصد لیگنین موجود در خمیر در نقطه‌های تلاقی، می‌تواند تابعی از کاتالیست در شرایط دمایی یکسان باشد. به این ترتیب که با افزایش  $2\%$  محلول سدیم هیدروکسید به‌عنوان کاتالیست، مقدار لیگنین موجود در خمیر در نقطه‌های تلاقی کاهش می‌یابد.

برای تعیین مرتبه واکنش خمیر کاغذ سازی کاه گندم با حلال آلی گلیسرول، از روش ترسیمی استفاده شد. در واقع از این روش موقعی می‌توان استفاده نمود که غلظت واکنش دهنده‌ها در زمان‌های گوناگون معلوم باشد. با معلوم بودن غلظت واکنش دهنده و رسم منحنی‌های خطی مربوط به مرتبه‌های گوناگون واکنش و بررسی ضریب همبستگی خطی می‌توان مرتبه واکنش را تعیین کرد [۱۶]. در این پژوهش، بررسی‌ها نشان داد که اطلاعات به‌دست آمده از سینتیک مرتبه اول تبعیت می‌کند.

با توجه به مرتبه اول بودن سینتیک خمیرسازی، ثابت سرعت لیگنین زدایی به وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\ln(L_0/L) = kt \quad (1)$$

که در آن  $L_0$ ، درصد لیگنین اولیه (بر اساس وزن خشک ساقه گندم)،  $L$ ، درصد لیگنین باقیمانده در خمیر کاغذ (بر اساس



شکل ۳- رابطه بین درصد کربوهیدرات و زمان خمیر کاغذسازی در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید  $2\%$  و بدون استفاده از آن.

که به ترتیب برابر  $0/999$  و  $0/989$  می‌باشد، نشان می‌دهد که در حالت اول به تقریب از یک رابطه خطی و در حالت دوم از یک رابطه غیر خطی پیروی می‌کند.

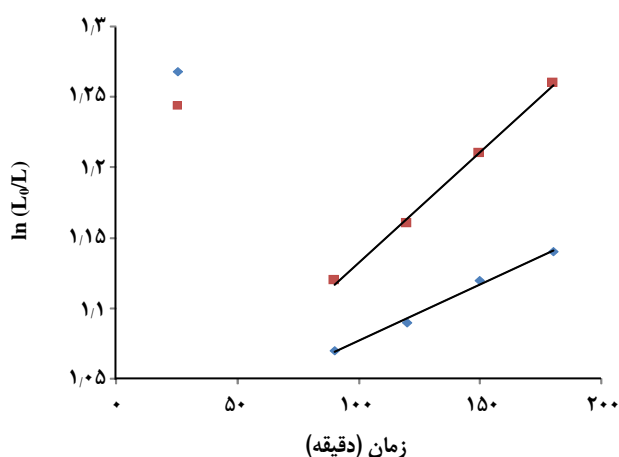
با دقت در شکل ۳ مشاهده می‌شود که رابطه بین زمان خمیر کاغذ سازی و درصد کربوهیدرات در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید  $2\%$  و بدون استفاده از آن نیز همانند عدد کاپا و بازده با افزایش دما کاهش می‌یابد.

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده از خمیر کاغذ سازی در زمان‌های گوناگون و در دو حالت با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید  $2\%$  و بدون استفاده از آن،  $\ln$  لیگنین باقیمانده در خمیر (بر اساس وزن خشک کاه گندم) در مقابل زمان پخت ترسیم شد که بر این اساس می‌توان فاز یا فازهای لیگنین زدایی و نقاط انتقالی بین آنها را تعیین نمود. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، دو خط با دوشیب متفاوت به‌دست آمده که نشان دهنده دو فاز گوناگون لیگنین زدایی است.

در جدول ۲، معادله‌های فازهای به دست آمده در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و در زمان‌های گوناگون خمیر کاغذ سازی در دو شرایط استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید  $2\%$  و بدون استفاده از آن ارائه شده است. برای هر یک از دو حالت نشان داده شده در جدول ۲، معادله‌های دو فاز به دست آمده است. همانگونه که دیده می‌شود مقدار لیگنین باقی مانده در خمیر (بر اساس وزن خشک کاه گندم) در نقاط تلاقی دو فاز با شرایط یاد شده

جدول ۲- مختصات فازهای لیگنین زدایی و مختصات نقطه‌های تلاقی در دمای ۲۰۰°C و با استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون استفاده از آن.

مختصات نقطه تلاقی (x,y)	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	معادله	شرایط آزمایش
(۴,۹۰)	۰/۹۹۶ ۰/۹۹۵	$y = -0.003X + 4.265$ $y = -0.001X + 4.068$	با کاتالیست
(۴/۲۵, ۹۰)	۰/۹۹۹ ۰/۹۹۵	$y = -0.003X + 4.551$ $y = -0.0014X + 4.375$	بدون کاتالیست

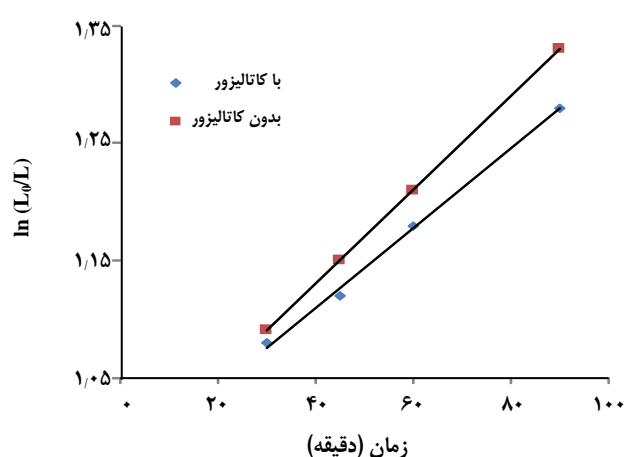


شکل ۶ - رابطه بین  $\ln(L_0/L)$  و زمان پخت در دمای ۲۰۰°C در شرایط استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون آن.

میزان بازده، کربوهیدرات و لیگنین در حالت استفاده از کاتالیست کاهش بیشتری نسبت به شرایط بدون استفاده از کاتالیست داشته است. بررسی‌ها نشان داد که حتی افزایش ۶ برابری زمان پخت نیز تأثیر چشمگیری بر مقدارهای موارد یاد شده نداشت.

با توجه به ویژگی‌های نقطه‌های تلاقی در می‌بایم که مقدار لیگنین خمیر در شرایط استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ برابر ۵۴/۵۹٪ و بدون استفاده از آن ۷۰/۱٪ می‌باشد که نشان می‌دهد میزان لیگنین زدایی ساقه گندم با استفاده از حلال آلی گلیسرول در شرایط دمایی و زمانی یکسان، با استفاده از کاتالیست افزایش می‌یابد.

سرعت لیگنین زدایی در هر دو حالت پخت از واکنش مرتبه اول پیروی می‌نماید. ثابت سرعت واکنش‌ها در هر فاز لیگنین زدایی در شرایط با استفاده از کاتالیست و بدون استفاده از آن



شکل ۵ - رابطه بین  $\ln(L_0/L)$  و زمان پخت در دمای ۲۰۰°C در شرایط استفاده از کاتالیزور سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون آن.

وزن خشک ساقه گندم)،  $k$ ، ثابت سرعت لیگنین زدایی و  $t$  زمان (دقیقه) می‌باشد.

برای محاسبه ثابت سرعت هر فاز، باید مقدار درصد لیگنین در ابتدای هر مرحله از لیگنین زدایی در دو شرایط پخت (عرض از میدا معادله  $\ln L$  بر حسب زمان) را به دست آورد. نمودارهای خطی رابطه بین  $\ln(L_0/L)$  و زمان پخت رسم شد (شکل‌های ۵ و ۶) و با محاسبه شیب نمودار به دست آمده، ثابت‌های سرعت لیگنین زدایی در دو فاز گوناگون خمیرسازی محاسبه شد که نتیجه‌های آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

### نتیجه‌گیری

با بررسی فرایند خمیر کاغذ سازی از ساقه گندم با استفاده از حلال آلی گلیسرول در شرایط رفلاکس و استفاده از کاتالیست سدیم هیدروکسید ۲٪ و بدون آن، با افزایش زمان پخت،

جدول ۳- معادله و ثابت های سرعت دو مرحله لیگنین زدایی، در شرایط استفاده از کاتالیست و بدون استفاده از آن در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس.

شرایط پخت	معادله	ضریب همبستگی ( $R^2$ )	ثابت سرعت ( $\text{min}^{-1}$ )
با کاتالیست	$y = 0.003x + 0.971$ $y = 0.0006x + 0.997$	۰/۹۸۷ ۰/۹۹۷	$3 \times 10^{-3}$ $6 \times 10^{-4}$
بدون کاتالیست	$y = 0.004x + 0.958$ $y = 0.001x + 0.975$	۰/۹۹۱ ۰/۹۹۷	$4 \times 10^{-3}$ $1 \times 10^{-3}$

### قدردانی

نویسندگان مقاله بدینوسیله تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های مالی دانشگاه تهران در تأمین هزینه‌های اجرایی این پژوهش اعلام می‌دارند.

به ترتیب برابر  $3 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$ ،  $6 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$  و  $4 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$  تعیین شد. که بر این اساس ارتباط معنی داری بین ثابت سرعت واکنش لیگنین زدایی و استفاده از کاتالیست وجود ندارد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۷

### مراجع

- [1] Gosselink R.J.A., Abacherli A., Semke H., Malherbe R., Kauper P., Nadif A., Van Dam J. E. G., Analytical for Characterisation of Sulfur-Free Lignin, *Industrial Crops & Products*, **19**: 271-281 (2004).
- [2] Shatalov A.A., Pereira, H., Polysaccharide Degradation During Ozone-Based TCF Bleaching of Non-Wood Organosolv Pulps, *Carbohydrate Polymers*, **67** (3): 275-281(2007).
- [۳] مرادیان، محمد هادی؛ جهان لتیباری، احمد؛ رسالتی، حسین؛ فخریان، عباس؛ بررسی تولید خمیر کاغذ CMP از کاه گندم، *مجله منابع طبیعی ایران*، (۴) ۵۶ : ۴۷۹ تا ۴۸۰ (۱۳۸۲).
- [4] Sun R., Wang X.Y., Sun X.F., Sun J.X., Physicochemical and Thermal Characterization of Residual Hemicelluloses Isolated by TAED Activated Peroxide from Ultrasonic Irradiated and Alkali Organosolv Pre-Treated, *Polymer Degradation and Stability*, **78**: 295-303 (2000).
- [۵] ابراهیمی، زهرا؛ کرمانیان؛ حسین؛ مید رضانی، امید؛ ذبیح زاده، سید مجید؛ مقایسه ویژگی‌های کاغذ حاصل از کاه برنج با فرایندهای خمیر کاغذسازی شیمیایی - مکانیکی بر پایه سدیم و پتاسیم، *فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*، (۳) ۲۸ : ۵۴۴ (۱۳۹۲).
- [6] Saberikah E., Mohammadi-Rovshandeh J., Rezayati-Charani P., Organosolv Pulping of Wheat Straw by Glycerol, *Cellulose Chemistry Technology*, **45**: (1-2), 67-75 (2011).
- [۷] میرحسینی، سید ابراهیم؛ جهان لتیباری، احمد؛ کریمی، علی نقی؛ میرشکرائی، سید احمد؛ بررسی تأثیر ضخامت خرده چوب بر سینتیک لیگنین زدایی فرایند کرافت سه چوب پهن برگ ایران، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۳) ۲۷ : ۱۰۷ تا ۱۱۴ (۱۳۸۷).

- [۸] دهقانی فیروزآبادی، محمد رضا؛ روشناسان، جلیل؛ بررسی سرعت های واکنش لیگنین زدایی در مرحله نهایی خمیرسازی کرافت از باگاس، *مجله پژوهش های علوم و فناوری چوب و جنگل*، (۳) ۱۸: ۱ تا ۱۴ (۱۳۹۰).
- [9] Abdul-Karim L. A., Rab A., Polyánszky É., Rusznák I., Kinetics of Delignification in Kraft Pulping of Wheat Straw and Hemp, *Tappi J.*, **78** (8): 161-164 (1995) .
- [10] Singh S., Rai A., Saxena R., Kinetics and Mechanism of Reactions of the Lignins of Wheat Straw, Rice Straw and Bagasse with Sulfite Ions, *IPPTA*, **10** (3): 75-80 (1998).
- [11] Wise L.E., Murphy M.A., Chlorite Holocellulose, Its Fractionation and Bearing on Summative Wood Analysis and Studies on the Hemicellulose, *Paper Trade Journal*, **122**(2): 35-43 (1946).
- [12] TAPPI Committee, "TAPPI Test Methods", TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, (2000-2002).
- [13] Rowell R., The Chemistry of Solid Wood: Based on Short course and Symposium Sponsored by the Division of Cellulose, Paper, and Textile Chemistry, at the "185 th Meeting of the American Chemical Society", Seattle, Washington, March 20-25, 70-72, (1984).
- [۱۴] برازنده، محمد مهدی؛ فخریان، عباس؛ تعیین معادلات سرعت واکنش لیگنین زدایی باگاس در فرایند سودا، *فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*، (۱) ۲۶: ۷۲ تا ۸۲ (۱۳۹۰).
- [۱۵] روشناسان، جلیل؛ دهقانی فیروز آبادی، محمدرضا؛ دهمرده قلعه نو، محمد؛ شریفی، سعیده؛ بررسی انحلال لیگنین در خمیرسازی کرافت از کاه گندم، *دو فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*، (۲) ۲۵: ۳۰۲ تا ۳۰۸ (۱۳۸۹).
- [16] Turnay T., Tomlin A.S., *Analysis of Kinetic Reaction Mechanism*, ISBN: 978-3-662-44561-7