مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

بررسی مدل سینتیکی جذب آفلاتوکسین B_1 توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه تیمار شده با اسید و اولتراسونیک در خمیر نان سنگک

مهران صیادی[۱]، کیانا پورمحمدی[۲*]، شهرزاد مالکی[۳]، الهه عابدی[۲]

۱- استادیار بخش بهداشت و ایمنی مواد غذایی، دانشکده ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی فسا، فسا، ایران.

۲- دانشیار بخش مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۱۲/۰۷

کلمات کلیدی:

ساکارومایسس سرویزیه (*Saccharomyces cerevisiae*)،

آفلاتوکسین B_1،

جذب سطحی،

خمیر نان سنگک،

مدل سینتیکی.

DOI: 10.52547/fsct.19.124.19

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.124.20.7

* مسئول مکاتبات:

kpourmohammadi@yahoo.com

چکیده

از آنجایی که آلودگی غذاها با مایکوتوکسین مشکل جدی محسوب می‌شود، در این تحقیق توانایی اتصال آفلاتوکسین B_1 به دیواره سلولی مخمر ساکارومایسس سرویزیه جهت کاهش سمیت در خمیر نان سنگک مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور آفلاتوکسین B_1 در غلظت ۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم به خمیر حاوی ۰/۲۷ گرم مخمر زنده، مخمر تیمار شده با اسید و مخمر تیمار شده با اولتراسونیک تلقیح گردید. سینتیک جذب سم در دماهای ۲٤، ۲۸ و ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد و زمان‌های ۸، ۱٦ و ۲٤ ساعت بررسی شد. بیشترین میزان کاهش آفلاتوکسین مربوط به تیمار اولتراسونیک، سپس تیمار اسیدی و بعد از آن مخمر زنده بود. با افزایش دما و زمان انکوباسیون، میزان جذب سم توسط مخمر در نمونه‌های تیمار شده با اسید و اولتراسونیک افزایش یافت، درحالیکه نمونه‌های زنده و فعال مخمر بیشترین میزان حذف سم را در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد از خود نشان دادند. نتایج نشان داد که سینتیک جذب توسط مخمر زنده و مخمر تیمار شده با اسید را می‌توان توسط مدل شبه درجه یک توصیف کرد، درصورتیکه برای مخمر تیمار شده با اولتراسونیک، داده‌ها دارای تطابق بهتری با مدل شبه درجه دو می‌باشند. همچنین، جذب سطحی و دیفیوژن درون ذره‌ای، در مراحل نرخ جذب مشارکت دارند. بنابراین مشخص شد که سلول‌های مخمر زنده یا غیرزنده، عوامل بیولوژیکی مناسبی جهت حذف آفلاتوکسین در محیط کشت آلوده هستند، هرچند از بین تیمارهای انجام شده، تیمار اولتراسونیک کارآمدتر بود.

۱- مقدمه

آفلاتوکسین‌ها گروهی از مایکوتوکسین‌ها با خصوصیات جهش‌زایی، سرطان‌زایی و متوقف‌کنندگی سیستم ایمنی هستند که عمدتاً به عنوان متابولیت‌های ثانویه‌ی گونه‌های *Aspergillus parasiticus*، *Aspergillus flavus* و *Aspergillus nomius* ساخته می‌شوند. آفلاتوکسین B_1 سم بسیار قوی و کشنده‌ای است که عمدتاً غلات (ذرت و گندم)، دانه‌های روغنی، آجیل‌ها و محصولات لبنی به این سم آلوده می‌شوند [۱و ۲]. تلاش برای حذف مایکوتوکسین‌ها از فراورده‌های غذایی همواره مورد توجه بوده است. راهکارهای متعددیبرای سم‌زدایی از مواد غذایی آلوده وجود داردکه از جمله می‌توان به جداسازی فیزیکی، غیرفعال کردن گرمایی، تشعشع، تجزیه میکروبی و تیمار با مواد شیمیایی مختلف اشاره نمود. روش‌های بیولوژیکی حذف سموم به دلیل کارایی بالا، قیمت کم و سازگاری با محیط زیست، امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده است. از بین میکروارگانیسم‌های مختلف که قادر به حذف توکسین‌ها هستند، گونه‌های مخمر ساکارومایسس سرویزیه بعنوان "نگهدارنده‌های سبز" به دلیل ویژگی‌های تکنولوژیکی متعدد و همچنین به دلیل داشتن درجه‌ی خوراکی، گزینه‌ی مناسبی برای استفاده از آنها در موادغذایی و به منظور حذف آفلاتوکسین‌ها می‌باشد [۳و ٤].

از آنجایی که پروتئین‌ها و گلوکان‌های موجود در دیواره‌ی سلولی ساکارومایسس سرویزیه جایگاه‌های فعال زیادی برای ایجاد پیوندهای هیدروژنی، یونی یا هیدروفوبیک ایجاد می‌کنند [٤]، لذا شرایط مناسبی برای اتصال به گروه‌های هیدروکسیل موجود در ساختار آفلاتوکسین دارند. در مطالعه‌ای با استفاده از ساکارومایس سرویزیه در نمونه‌های بادام‌زمینی نشان دادند که میزان کاهش این سم بعد از استفاده از این مخمر در طی ۷ روز، ۷٤/٤ درصد بود[٥]. براساس مطالعات دیگری توانایی سویه‌های مختلف ساکارومایسس سرویزیه برای کاهش آفلاتوکسین B_1 مورد بررسی قرار گرفت و گزارش‌ها نشان داد که این مخمر توانسته است ٤۰٪ آفلاتوکسین B_1 را در محلول استاندارد کاهش دهد که علت این کاهش را جذب توسط مخمر اعلام کردند. تحقیقات زیادی نشان داده‌اند که مخمرها به دلیل وجود عوامل باندکننده مانان در دیواره سلولی خود، قادر به اتصال مولکول‌های مختلف مانند سم‌های کشنده و یون‌های فلزی روی سطح دیواره سلولی خود هستند[٤]. مطالعات نشان می‌دهد که حذف مایکوتوکسین‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها بیشتر به دلیل چسبیدن توکسین به ترکیبات دیواره سلولی است تا ایجاد اتصال کووالانسی یامتابولیسم سلولی، به‌طوری که با کشتن میکروارگانیسم‌ها توسط عوامل مختلفی از جمله فراصوت، حرارت و اسید، سلول‌های مرده توانایی اتصال را ازدست نداده و در سم‌زدایی نقش دارند[٥]. بطوریکه El Nezami و همکاران در سال ۱۹۹۸نشان دادند که میکروارگانیسم‌های تیمار شده با اسید و حرارت در مقایسه با سلول‌های زنده، خاصیت سم‌زدایی بیشتری از خود نشان می‌دهند[٦]. بعبارت دیگر، پدیده اتصال آفلاتوکسین پدیده‌ای فیزیکی می‌باشد که در سطح مخمر یعنی در دیواره سلولی آن اتفاق می‌افتد [٤].

فراصوت یکی از فناوری‌های نوظهور است که در همژنیزه کردن، تمیزکردن، استریل‌کردن، حرارت دادن، امولسیفیه کردن، مهار فعالیت آنزیم‌ها و میکروب‌ها و متلاشی‌کردن سلول، تشدید واکنش‌های اکسیداسیون، اصلاح گوشت و اصلاح کریستالیزاسیون کاربرد دارد. به کارگیری فراصوت توان پایین در محیط‌های کشت میکروبی، موجب کاهش یا از بین رفتن بقای زیستی نمی‌شود[۷]. میکروارگانیسم‌های مختلف به طور متفاوتی می‌توانند نسبت به شوک فراصوت از خود حساسیت نشان دهند ولی در بسیاری از موارد، امواج اولتراسونیک، باعث افزایش نرخ رشد و تولید میکروارگانیسم‌ها می‌شوند. بنابراین، تیمار با فراصوت می‌تواند بعنوان تکنیک تجاری مناسب در فرآیندهای زیستی مورد استفاده قرار گیرد. تیمار اولتراسونیک با افزایش نفوذپذیری غشای دیواره‌ی سلولی، کاهش انتخاب‌پذیری، محبوس کردن گرما، تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل و نازک کردن غشای دیواره‌ی سلولی بر میکروارگانیسم‌ها تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان داده است که ترموسونیکیشن بعنوان روشی ترکیبی از امواج اولتراسونیک و حرارت، می‌تواند جمعیت میکروارگانیسم ها را بهبود بخشد [۸ و ۹]. تحقیقات نشان داده‌اند لاکتوباسیلوس‌های کشته شده با اسید و حرارت در مقایسه با سلول‌های زنده، مایکوتوکسین‌ها را با کارایی بیشتری از بین می‌برند [۷]. عابدی و همکاران، ۲۰۲۱

نشان دادند که باکتری‌های لاکتوباسیلوس تیمار شده با تیمار همزمان اولتراسونیک وحرارت بیشترین میزان جذب سموم آفلاتوکسین را داشتند [۱۰]. مطالعات زیادی در خصوص تیمار میکروارگانیسم‌ها با اسید و حرارت و تأثیر آن بر جذب سموم انجام شده‌است ولی مطالعات در خصوص بررسی سینتیک جذب سم آفلاتوکسین توسط مخمرهای تیمار شده با اسید و اولتراسونیک در دماها و زمان‌های مختلف در خمیر نان سنگک و همچنین مقایسه‌ی پتانسیل جذب سموم توسط مخمرهای زنده و غیرزنده محدود است.

این مطالعه به منظور بررسی مدل سینتیکی جذب آفلاتوکسین B_1 توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه در دماهای ۲٤، ۲۸ و ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد و زمان‌های ۸، ۱٦ و ۲٤ ساعت و مقایسه توانایی سلول‌های زنده و غیرزنده (تیمار شده با اسید و اولتراسونیک)در کاهش سم در خمیر نان سنگک انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

آرد گندم کامل (مخصوص نان سنگک با درصد استخراج ۹۵٪) که از نانوایی سطح شهر فسا تهیه شد، آب، مخمر ساکارومایسس سرویزیه (PTCC 517) (تهیه شده از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران بخش کلکسیون میکروبی) و سم آفلاتوکسینB_1، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- تهیه‌ی خمیر نان سنگک

به منظور تهیه‌ی ۱۰۰ گرم خمیر نان سنگک، ۷۵ گرم آرد گندم کامل (مخصوص نان سنگک) با ۷۵ میلی‌لیتر آب مخلوط شد. خمیر به منظور تلقیح مخمر زنده، مخمر تیمار شده با اولتراسونیک و مخمر تیمار شده با اسید به قسمت‌های مختلف تقسیم شد و نمونه‌ی بدون مخمر به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل خمیرهای حاوی 10^4 cfu/g مخمر زنده، 10^4 cfu/g مخمر تیمار شده با اولتراسونیک و 10^4 cfu/g مخمر تیمار شده با اسید بودند.

۲-۳- تهیه و آماده‌سازی مخمر

مخمر ساکارومایسس سرویزیه (PTCC 517) از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران بخش کلکسیون میکروبی خریداری و در محیط کشت استریل Yeast Mold Broth مرک فعال شد. سپس ۱ میلی‌لیتر از محیط کشت دارای مخمر در ۷۳۰۰ دور بر دقیقه برای مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ کرده و آنگاه با محلول بافر فسفاته (pH= 6.8) شستشو داده و دوباره سانتریفیوژ شد. سپس جهت رقیق‌سازی توده سلولی مخمر و افزودن به محلول آلژینات سدیم، ۲ میلی لیتر محلول آب نمک ۰/۹٪ به آن افزوده و هموژن شد. سوسپانسیون حاصل در دمای ۳۷ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۲٤ ساعت در اینکوباتور قرار داده شد[۱۱]. سپس ساکارومایسس سرویزیه در تیمارهای مختلف شامل: مخمر زنده و فعال، مخمر تحت تیمار اسیدی، مخمرتحت تیمار اولتراسونیک تهیه و در مقدار 10^4 cfu/g به خمیر نان سنگک اضافه شد.

۲-٤-تیمار اسیدی مخمر ساکارومایسس سرویزیه

به منظور تیمار اسیدی، ۹۱ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک ۲ مولار به سلول‌های مخمر افزوده و به مدت ۹ ساعت در دمای ۵۲ درجه ی سانتیگراد همراه با تکان ملایم نگهداری شد؛ سپس سلول‌ها دو مرتبه با نمک بافری فسفاته استریل شسته و هر مرتبه با سرعت چرخش ۷۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سلول‌های تیمارشده با حجم مشخصی از نمک بافری فسفاته استریل مخلوط و بر اساس استاندارد ۰/۵ مکفارلند سوسپانسیون اصلی تهیه و از آن سوسپانسیون مخمر اسیدی آماده شد[۷].

۲-۵- تیمار اولتراسونیک مخمر ساکارومایسس سرویزیه

به منظور انجام تیمار اولتراسونیک بر روی مخمرها و ایجاد سلول‌های کشته شده، تیمار اولتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه با توان ۲۰۰ وات و ۲٤ کیلوهرتز، با دستگاه UP100H، ساخت آلمان، انجام شد [۹].

۲-٦- تهیه ی محلول استاندارد آفلاتوکسین B_1

به منظور تهیه‌ی غلظت ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر آفلاتوکسین B_1، پودر سم آفلاتوکسین به همراه استونیتریل/ بنزن (۷:۹۳

حجمی/حجمی) در کروماتوگرافی با کارایی بالا (HPLC) مخلوط شد. با حرارت دادن در حمام آب، بنزن/استونیتریل تبخیر می‌شود و محلول آبی ایجاد می‌شود (۸۰ درجه سانتیگراد/۱۰ دقیقه). محلول استاندارد با حل کردن آب/استونیتریل/متانول (۶:۲:۳، حجمی/حجمی/حجمی) در ۱۰ نانوگرم/میلی لیتر بعنوان غلظت نهایی بدست آمد. حلال آلی در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب (Memmert مدل WNB 14، ساخت کشور آلمان) تبخیر شد [۱۲].

۲-۷-آنالیز HPLC

بررسی اتصال مایکوتوکسین به مخمر بر اساس روش Armandoو همکاران، ۲۰۱۲ [٤] با کمی اصلاحات انجام شد. ۵ گرم نمک NaCl به ۲۵ گرم خمیر اضافه و با ۲۰۰ میلی‌لیتر متانول/آب/هگزان (۸:۲:۱ حجمی/حجمی/حجمی) در Ultra-Turrax به مدت ۱۰ دقیقه هموژن شد. سپس نمونه‌ها در سانتریفیوژ (اپندورف، مدل ۲۲۳۳۱AG، ساخت آلمان) در دور ٦۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌ی بدست آمده در ۵۰ میلی‌لیتر بافر فسفات (PBS، pH 7.4) رقیق شد. نمونه‌های استخراج شده از ستون‌های ایمیونوافینیتی عبور داده شدند (Ochraprep, R-Biopharm). میزان آفلاتوکسین B_1 توسط روش Pakfetrat و همکاران، ۲۰۱۹ [۱] تعیین و ۱۰۰ میکرولیتر از محلول نهایی به دستگاه HPLC تزریق شد. فاز متحرک شامل آب/استونیتریل/متانول (۶۰:۳۰:۱۰، حجمی/حجمی/حجمی) حاوی ۳۵۰ میکرولیتر از ٤ مول بر لیتر اسید نیتریک و ۱۲۰ میلی گرم KBr با جریان ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه و شناسایی توسط فلورسنس در طول موج ٤۳۵/۳٦۵ نانومتر جذب/انتشار انجام شد. LOD ۱ میکروگرم/کیلوگرم و LOQ ۱۰/۳۵ میکروگرم/کیلوگرم و میزان بازیابی ۹۸,۵٪ بود[۹].

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

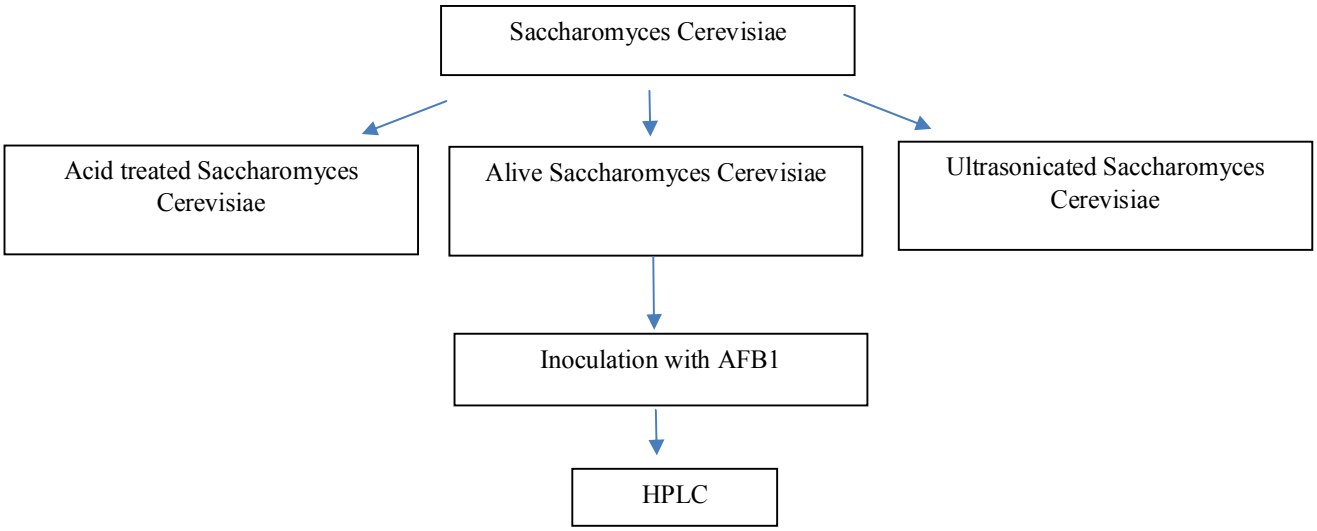

Fig 1 Schematic of the treatments.

۲-۸- آزمون سیرکولاردیکرویزم[1]

به منظور بررسی تأثیر تیمار اسیدی و اولتراسونیک بر تغییرات ساختار درجه‌ی دوم دیواره‌ی سلولی مخمر از روش Abedi و همکاران، ۲۰۲۱و توسط دستگاه اسپکتروسکوپی CD استفاده شد[۱۰]. نتایج اندازه‌گیری در طول موج ۲۰۰-۲٦۰ نانومتر و با استفاده از اسپکتروپولاریمتر AVIV (مدل ۲۱۵، ساخت آمریکا) با طول نمونه (۰/۱ سانتیمتر) ثبت شد. تمام آزمون‌های CD در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد انجام شد. طیف‌ها با فواصل ۱

1. *Circular dichroism (CD)*

نانومتر و با سرعت اسکن ۲۰ نانومتر/دقیقه تعیین شدند. هر طیف میانگین ۲ اسکن بود و نویز داده‌ها توسط نرم افزار AVIV۲۱۵ (cdnn) گرفته شد.

۲-۹-سینتیک جذب آفلاتوکسین B_1

سینتیک جذب توسط مکانیزم‌های مستقل مختلفی کنترل می‌شود. به منظور بررسی مکانیزم کنترل‌کننده جذب سم آفلاتوکسین توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه، و تیمار شده آن با اسید و اولتراسونیک، مدل‌های سینتیک مختلف برای داده‌های آزمایشگاهی بکار گرفته شد.

با در نظر گرفتن مدل شبه درجه یک[1]، نرخ جذب می‌تواند توسط معادله زیر مدل شود[۱۳]:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (۱)$$

q_e و q_t، به ترتیب مقدار ماده جذب شده در واحد جرم جاذب ($\mu g/g$) در زمان تعادل و در هر زمان t، و k_1 (h^{-1}) ثابت نرخ جذب می‌باشد.

معادله نرخ سینتیک شبه درجه دو[2] به صورت زیر می‌باشد[۱۳]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (۲)$$

که k_2 ($g/\mu g\ h$) ثابت نرخ شبه درجه دو می‌باشد.

معادله الوویچ[3] نیز برای توصیف سینتیک مرتبه دو با فرض اینکه سطوح جامد واقعی از نظر انرژی ناهمگن هستند استفاده می‌شود. شکل خطی این معادله بصورت زیر است[۱۳]:

$$q_t = \frac{1}{\beta}\ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta}\ln t \quad (۳)$$

که α و β به عنوان ثابت‌های الوویچ شناخته شده‌اند که نشان دهنده نرخ جذب اولیه و ثابت واجذب می‌باشند.

اگر احتمال نفوذ ماده جذب شونده به درون حفرات جاذب وجود داشته باشد، مدل دیفیوژن درون ذره‌ای[4] می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد[۱۳]:

$$q_t = k_{id} t^{0.5} + C \quad (٤)$$

که k_{id} ثابت نرخ دیفیوژن درون ذره‌ای و C مقدار ثابت می‌باشد. زمانیکه نفوذ درون ذره‌ای نقش مهمی در کنترل سینتیک جذب داشته باشد، نمودار شامل خط صافی می‌باشد که از مبدأ مختصات عبور می‌کند.

1. *Pseudo first-order model*
2. *Pseudo second-order model*
3. *Elovich model*
4. *Intra-particle diffusion model*

۲-۱۰- آنالیز آماری

این پژوهش بر پایه‌ی طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای لحاظ شده شامل زمان‌ها و دماهای مختلف انکوباسیون مخمر زنده، مخمر تیمار شده با اولتراسونیک و اسید در خمیر نان انجام شد. داده‌ها با استفاده از نرم افزار MSTAT مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفتند و بر اساس آن، نمودارها بوسیله نرم افزار EXCEL رسم گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر نوع پیش تیمار بر جذب آفلاتوکسین

در این تحقیق، تیمار اسیدی و اولتراسونیک به منظور کشتن مخمر مورد استفاده قرار گرفت. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اضافه کردن مخمر (زنده، تیمار شده با اسید و اولتراسونیک) به خمیر آلوده به آفلاتوکسین باعث کاهش میزان آفلاتوکسین آزاد شده است. همچنین بین کاهش میزان توکسین در خمیرهای تیمارشده با سوسپانسیون مخمر اسیدی، اولتراسونیک، مخمر زنده و نمونه کنترل (فاقد مخمر) تفاوت معنی‌داری وجود دارد ($p<0.05$). همانطور که در جدول مشاهده می‌شود،بطور کلی میزان کاهش سم توسط تیمارهای مختلف به قرار زیر است: مخمرهای تیمارشده با اولتراسونیک> مخمرهای تیمارشده با اسید>مخمرهای زنده> نمونه‌ی کنترل. تحقیقات همچنین نشان دادند که مخمرها در بین همه‌ی میکروارگانیسم‌ها بیشترین تأثیر را در کاهش سموم آفلاتوکسین داشتند و این پدیده را به بیشتر بودن جایگاه‌های اتصال به دیواره‌ی سلولی و ثابت تعادل[5] نسبت دادند[۱٤].

بر اساس تحقیق Shetty و همکاران (۲۰۰۷، در سلول‌های تیمار شده با اسیدکلریدریک ۲ مولار به مدت یک ساعت بیش از ۲ برابر افزایش در اتصال توکسین مشاهده شد[۷]. در مطالعه Rahaei و همکاران، ۲۰۱۱مشاهده شد که تیمارگونه‌های مخمر با اسیدکلریدریک ۲ مولار برای۹۰ دقیقه در دمای اتاق، قدرت اتصال آفلاتوکسین را به حدود٦۰درصد می‌رساند[۱٥].

5. *Equilibrium constant*

Table 1 The amount of released aflatoxin in samples at different times and temperatures.

Treatments	Temperature	Aflatoxin (µg/kg) Incubation period 8 h		16 h		24 h	
Control (without Saccharomyces)	24 °C	8.83	±0.09aA	8.52	±0.14aB	7.79	±0.11aC
	28 °C	7.85	±0.12bcA	7.64	±0.10bA	7.24	±0.04bB
	32 °C	7.52	±0.22cA	7.16	±0.09cB	7.08	±0.15bB
Viable Saccharomyces	24 °C	7.90	±0.13bA	7.39	±0.17cB	6.49	±0.26cC
	28 °C	6.48	±0.09fA	5.61	±0.14fB	4.44	±0.31hC
	32 °C	7.26	±0.07dA	6.76	±0.09dB	5.53	±0.25eC
Acid treated Saccharomyces	24 °C	7.92	±0.20bA	6.89	±0.15dB	5.90	±0.13dC
	28 °C	6.89	±0.14eA	5.63	±0.19fB	4.89	±0.14gC
	32 °C	5.03	±0.11gA	4.05	±0.07hB	2.86	±0.11jC
Ultrasound treated Saccharomyces	24 °C	6.98	±0.09eA	6.36	±0.09eB	5.16	±0.10fC
	28 °C	4.90	±0.12gA	4.49	±0.15gB	3.89	±0.13iC
	32 °C	2.77	±0.12hA	2.36	±0.20iB	1.62	±0.22kC

Within the same column, mean values with different small letters are significantly different ($p < 0.05$).
Within the same row, mean values with different capital letters are significantly different ($p < 0.05$).

این محققان نشان دادند که شرایط اسیدی از طریق تأثیر بر روی پلی ساکاریدها وتبدیل آن‌ها به منومرها و شکسته‌شدن به آلدهیدها باعث تأثیر بر عملکرد مخمرها می‌شوند، بطوریکه آلدهیدهای آزادشده باعث افزایش جایگاه‌های جذب توکسین در سطح سلول مخمر می‌شود. مقایسه‌ی تأثیر مخمر زنده و تیمار شده با اسید و حرارت در کاهش سیترینین در تحقیق Davoodi Moghadam و همکاران، ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که هر دو تیمار به طور قابل توجهی توانستند میزان سیترینین در محیط را کاهش دهند، به طوریکه میزان سیترینین از ٤/٤٩ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه‌ی کنترل (بدون افزودن مخمر) به ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار حرارتی و ۰/۰۷میلی‌گرم بر لیتر در تیمار اسیدی از سوسپانسیون مخمری کاهش یافت[١٦]. نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر مخمر زنده در کاهش سیترینین تولیدشده توسط کپک موناسکوس نشان داد، مخمر زنده به طور معنی‌داری قادر به حذف سیترینین بود، اما تأثیر آن بسیار کمتر از حالت تیمارشده بود. [۸]. براساس مطالعه‌های انجام شده مشخص شده است که حذف مایکوتوکسین از طریق اتصال به دیواره‌ی سلولی است، به همین دلیل مرگ سلول مخمر نه تنها قابلیت توانایی آن در جذب توکسین را کاهش نمی‌دهد، بلکه تیمارهای اسیدی و حرارتی باعث افزایش جذب مایکوتوکسین‌ها توسط این مخمر می‌شود.براساس پژوهش‌های پیشین، احتمال می‌رود که در شرایط اسیدی مقداری از اتصالات بین توکسین و مخمر، درون سلولی باشد [۱۱و ۱۵].

بطور کلی، دیواره سلولی ساکارومایس سرویزیه که شامل شبکه‌ای از 1,3 glucanβ-با زنجیره‌ی جانبی 1,6-glucanβاست و به منوپروتئین‌های گلیکوزیلات شده متصل شده‌هاست، به همراه مانان و گلوکان در دیواره‌ی سلولی مخمر، سطح فعال و وسیعی را برای جذب مواد ایجاد می‌کند[۳-٦]. پروتئین‌ها و گلوکان‌ها تعداد زیادی سایت فعال برای ایجاد پیوندهای هیدروژنی، یونی یا هیدروفوبیک ایجاد می‌کنند. همچنین با افزایش غلظت سوسپانسیون مخمر، تعداد سلول‌ها و جایگاه‌های گیرنده توکسین بیشتر شده و در نتیجه قابلیت جذب توکسین از محیط بیشتر می‌شود[١٤]. تحقیقات دیگر نشان داد که گلوکومانان‌های استریفیه شده‌ی موجود در دیواره‌ی سلولی مخمر محل اتصال به سموم آفلاتوکسین و اکراتوکسین می‌باشد[١٥]. برخی تحقیقات نشان دادند که کاهش آفلاتوکسین می‌تواند در اثر تبدیل آفلاتوکسین به ترکیبات با سمیت کمتر باشد که در اثر آزادشدن آنزیم‌های تجزیه کننده، اسید لاکتیک، اتانول و دی اکسید کربن باشد[١٤].

امواج اولتراسونیک باعث انفجار حباب‌های حفره‌ای و ایجاد اغتشاش، اعمال نیروی برشی بالا و افزایش چشمگیر دما می‌شود. این پدیده‌ها منجر به تخریب ساختار پپتیدوگلیکان‌ها و پلی‌ساکاریدهای دیواره‌ی سلولی و دناتوره شدن پروتئین‌ها

می‌شود [۱۱]. در اثر اعمال اولتراسونیک، دیواره‌ی ضخیم سلولی در مخمر، نازک می‌شود و اتصالات عرضی در دیواره کاهش می‌یابد و قطر منافذ دیواره‌ی سلولی افزایش می‌یابد. تخریب ساختار دیواره‌ی سلولی مخمر باعث باز شدن بیشتر ساختار پروتئین‌ها می‌شود و با ایجاد تعداد زیادی مناطق هیدروفوبیک، می‌تواند به سم آفلاتوکسین فرصت بیشتری برای اتصال به دیواره‌ی سلولی بدهد[۱۰].

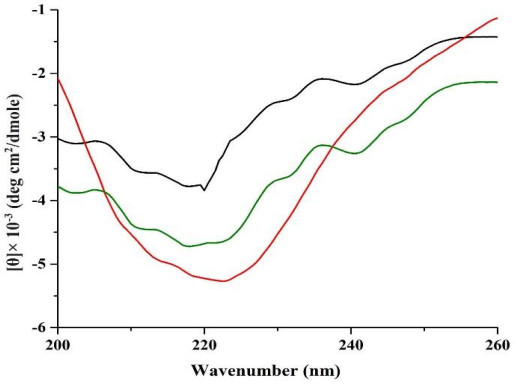

Fig 2 Circular dichroism (CD) of (a) viable *Saccharomyces*, (b) acid treated *Saccharomyces*, (c) ultrasonicated *Saccharomyces*.

همچنین در اثر ایجاد کاویتاسیون در تیمار اولتراسونیک رادیکال‌های آزاد OH و H ایجاد می‌شوند که منجر به انجام واکنش‌های شیمیایی در دیواره‌ی سلولی میکروارگانیسم می‌شود و اتصال سم به دیواره‌ی سلولی را تسهیل می‌کند [۹]. همانگونه که در شکل ۲مشاهده می‌شود، ساختار آلفاهلیکس، بتاترن و بتاشیت در مخمرهای زنده، تیمارشده با اولتراسونیک و اسید با یکدیگر متفاوت هستند که نشان‌دهنده‌ی تأثیر تیمارهای اسیدی و اولتراسونیک بر ساختار پروتئینی دیواره‌ی سلولی مخمر می‌باشد. Abedi و همکاران، ۲۰۲۱نشان دادند که با اعمال تیمار حرارت-اولتراسونیک بر لاکتوباسیلوس‌ها، ساختار آلفاهلیکس و بتاترن افزایش و ساختار بتاشیت کاهش می‌یابد که همین امر منجر به تغییر هیدروفوبیسیتی سطح دیواره‌ی سلولی باکتری و افزایش جذب سم می‌شود[۱۰].

۳-۲- تأثیر دما و زمان بر جذب آفلاتوکسین

با در نظر گرفتن مقدار آفلاتوکسین جذب شده توسط نمونه کنترل فاقد مخمر، میزان جذب آفلاتوکسین توسط مخمر زنده، مخمر تیمار شده با اسید و مخمر تیمار شده با اولتراسونیک در دماها و زمانهای مختلف محاسبه شد.نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل۳-الف، مخمر زنده، در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد که دمای بهینه‌ی رشد مخمر است، بیشترین میزان سم را بعد از ۲٤ ساعت به خود جذب کردهاست (10.37 µg/g)، در حالیکه در مخمرهای تیمار شده با اسید (شکل ۳-ب) و تیمار شده با اولتراسونیک (شکل ۳-ج)، با افزایش دما از ۲٤ به۳۲ درجه‌ی سانتیگراد، میزان جذب سم نیز افزایش یافته است و بیشترین جذب در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد و بعد از ۲٤ ساعت اتفاق افتاده است (به ترتیب 15.65µg/g و 20.22µg/g). از طرفی، همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان از ۸ تا ۲٤ ساعت، میزان جذب سم آفلاتوکسین توسط نمونه‌های مختلف، در دماهای مختلف افزایش یافته است،به گونه‌ای که بیشترین میزان جذب سم مربوط به مخمر تیمارشده با اولتراسونیک درمدت ۲٤ ساعت بود (20.22µg/g). بنابراین افزایش زمان اینکوباسیون از نظرآماری باعث افزایشمعنی‌داری در میزان آفلاتوکسین جذب شده نسبت به زمان شروع اینکوباسیون (صفر ساعت) شد. به استثنای نمونه مخمر زنده در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد، جذبسم توسط همه‌ی نمونه‌ها، پدیده‌ی سریعی بوده است، بدلیل اینکه تنها با گذشت ۸ ساعت از زمان انکوباسیون، افزایش در میزان سموم جذب شده در نمونه‌ها مشاهده شد. Shetty و همکاران، ۲۰۰۷نشان دادند که اتصال آفلاتوکسین پدیده سریعی بوده بطوریکه در ۳۰ دقیقه‌ی ابتدایی انکوباسیون، مخمر، ۳۲درصد از آفلاتوکسین B_1 را باند کرد[۷]. همچنین در تحقیق Rahaei و همکاران، ۲۰۱۰ براساس اندازه‌گیری آفلاتوکسین نمونه‌های پسته در زمان‌های مختلف پس از تثبیت سلول‌های مخمر برآن، مشاهده شد که متصل شدن آفلاتوکسین به دیواره سلولی مخمر فرآیند نسبتاً سریعی است که در زمان اندکی (حدود ۳ ساعت) بعد ازتثبیت مخمر بر پسته آلوده حداکثر سم آفلاتوکسین جذب شد[۱۵]. یافته های این قسمت با نتایج Shetty و همکاران، ۲۰۰۷و Rahaei و همکاران، ۲۰۱۰مطابقت دارد[۷و ۱۵].

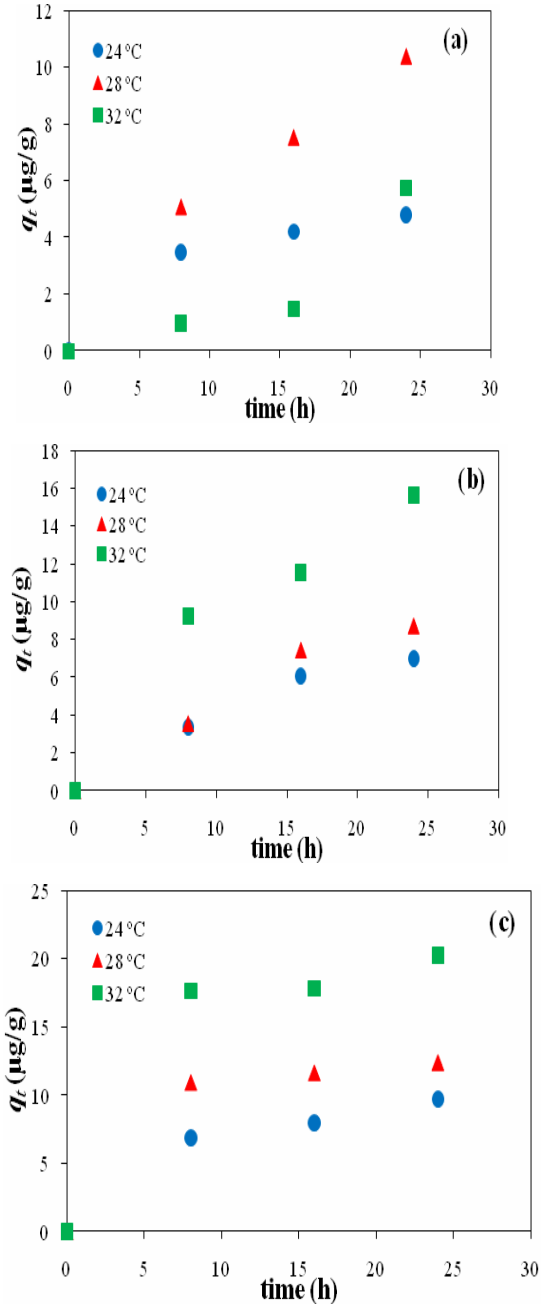

Fig 3 Effect of temperature and time on aflatoxin adsorbed by (a) viable*Saccharomyces*, (b) acid treated *Saccharomyces*, and (c) ultrasonicated *Saccharomyces*.

۳-۳- سینتیک جذب آفلاتوکسین B_1

سینتیک مکانیزم جذب آفلاتوکسین توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه، و تیمار شده آن با اسید و اولتراسونیک با استفاده از مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی نرخ واقعی جذب توسط عوامل فوق، نمونه کنترل (فاقد مخمر) نیز در زمان‌ها و دماهای مختلف، مشابه نمونه‌های حاوی مخمر و تیمارشده آن مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای محاسبه شده برای مدل‌های مختلف برای نمونه‌های آزمایش شده، در جدول ۲ ارائه شده‌است. با توجه به جدول، در مورد مخمر زنده و مخمر تیمارشده با اسید، مقدار R^2 برای مدل شبه درجه یک، در بیشتر دماها بزرگتر از مدل شبه درجه دو است، از طرفی مقدار محاسبه شده q_e دارای تطابق بیشتری با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که جذب آفلاتوکسین توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه، و تیمار شده آن با اسید توسط مدل شبه درجه یک تخمین زده می‌شود. ولی در مورد مخمر تیمارشده با اولتراسونیک، مقادیر R^2 برای مدل شبه درجه دو بزرگتر از مدل شبه درجه یک می‌باشد، همچنین مقادیر آزمایشگاهی q_e دارای تطابق بهتری با داده‌های محاسبه شده از مدل درجه دو می‌باشد. بنابراین جذب آفلاتوکسین توسط مخمر تیمارشده با اولتراسونیک توسط مدل شبه درجه دو می‌تواند پیش‌بینی شود. در مورد مخمر زنده، بیشترین مقدار q_e مربوط به دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد، درصورتیکه در دو حالت مخمر تیمارشده با اسید و اولتراسونیک، با افزایش دما، qe افزایش می‌یابد. در نتیجه، بیشترین ظرفیت جذب در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد مشاهده شد.

مدل الوویچ نیز دارای تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد، به غیر از دو مورد جذب توسط مخمر زنده و مخمر تیمارشده با اولتراسونیک در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد، در بقیه موارد R^2 بزرگتر از ۰/۹۰ می‌باشد.

معمولترین روش مورد استفاده برای پیش‌بینی مرحله کنترل‌کننده نرخ جذب، مدل دیفیوژن درون ذره‌ای است. شکل ٤-الف نمودار q_t بر حسب $t^{0.5}$ برای جذب آفلاتوکسین توسط مخمر زنده در دمای ٢٤ درجه‌ی سانتیگراد را نشان می‌دهد. دو ناحیه مشخص نرخ در نمودار نشان دهنده حداقل دو مرحله در فرآیند جذب سم آفلاتوکسین می‌باشد. احتمالاً در مرحله اول، مولکول‌های آفلاتوکسین به سایت‌های جذب فعال در سطح جاذب متصل می‌شوند، در حالیکه مرحله دوم توسط نرخ نفوذ درون ذره ای کنترل می‌شود. با اینحال، دیفیوژن درون ذره‌ای تنها

مکانیزم محدود کننده نرخ جذب نمی‌باشد زیرا خط مستقیم دوم از مبدأ مختصات عبور نکرده‌است. با توجه به مقدار C در جدول ۲، جذب سم در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد نیز دارای دو مرحله مشخص می‌باشد. در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد، نمودار تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی ندارد.

تطابق مدل دیفیوژن درون ذره‌ای با داده‌های آزمایشگاهی جذب توسط مخمر تیمارشده با اسید و اولتراسونیک نیز نشان‌دهنده دو ناحیه مجزا می‌باشد (مقادیر C در جدول ۲). در این حالت نیز منحنی دوم از مبدأ مختصات عبور نمی‌کند، در نتیجه دیفیوژن درون ذره‌ای تنها مرحله محدود کننده جذب نمی‌باشد و مکانیزم‌های دیگر نیز در نرخ جذب مشارکت دارند. نمودار حاصل برای مخمر تیمار شده با اولتراسونیک در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراددر شکل-ب نشان داده شده است. برای مخمر تیمارشده با اولتراسونیک نیز در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد، نمودار تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی ندارد.

Table 2 Parameters of the different kinetic models for aflatoxin adsorption.

Kinetic models	Parameters	Viable Saccharomyces			Acid treated Saccharomyces			Ultrasound treated Saccharomyces		
		Incubation temperature			Incubation temperature			Incubation temperature		
		24 ºC	28 ºC	32 ºC	24 ºC	28 ºC	32 ºC	24 ºC	28 ºC	32 ºC
Pseudo first-order	k_1 (h^{-1})	0.129	0.081	0.0189	0.126	0.120	0.084	0.107	0.175	0.132
	q_e Cal. (µg/g)	4.416	10.280	5.669	7.820	10.048	14.524	8.612	9.692	14.581
	q_e Exp. (µg/g)	4.790	10.370	5.741	6.975	8.691	15.654	9.728	12.407	20.222
	R^2	0.982	0.999	0.979	0.963	0.936	0.964	0.943	0.915	0.778
Pseudo second-order	k_2(g/(µg h))	0.0278	0.0017	0.0052	0.0025	0.0005	0.0029	0.0114	0.0398	0.0183
	q_e Cal. (µg/g)	5.935	21.692	4.082	14.993	31.250	23.981	12.300	13.298	21.834
	q_eExp. (µg/g)	4.790	10.370	5.741	6.975	8.691	15.654	9.728	12.407	20.222
	R^2	0.995	0.925	0.356	0.928	0.617	0.905	0.972	0.999	0.985
Elovich model	α(µg/g)	2.630	13.267	28.557	9.483	17.560	9.097	4.555	741.72	774.11
	β(g h/µg)	0.836	0.213	0.254	0.299	0.210	0.180	0.400	0.774	0.462
	R^2	0.991	0.963	0.703	0.986	0.982	0.906	0.924	0.972	0.675
Intra-particle diffusion	k_{id}(µg/(g $h^{1/2}$))	0.643	2.535	2.204	1.768	2.521	3.039	1.362	0.698	1.216
	C(µg/g)	1.631	2.254	5.873	1.448	3.299	0.27	2.866	8.940	13.783
	R^2	0.999	0.986	0.768	0.963	0.958	0.944	0.959	0.991	0.743

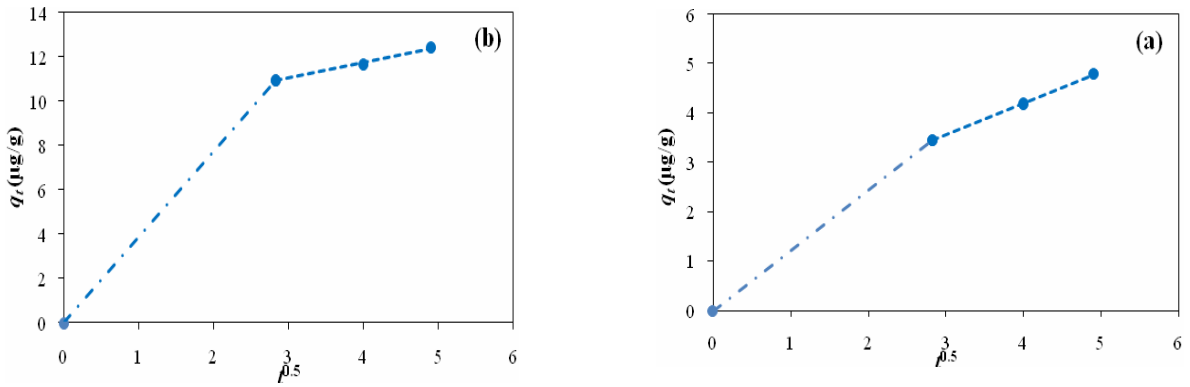

Fig 4 Plot of the intra-particle diffusion model for aflatoxin adsorption by (a) viable*Saccharomyces* at 24 °C, and (b) ultrasonicated *Saccharomyces*at 28 °C.

٤- نتیجه‌گیری

اضافه‌کردن مخمر ساکارومایسس سرویزیه به خمیر نان آلوده به سم آفلاتوکسین، باعث کاهش قابل توجهی در میزان آفلاتوکسین B_1 شد و مخمرهای تیمار شده با اولتراسونیک و اسید در مقایسه با مخمر زنده، کاهش بیشتری در میزان آفلاتوکسین در خمیر ایجادکردند. به عبارت دیگر، بیشترین میزان جذب سم آفلاتوکسین B_1 مربوط به مخمرهای تیمارشده با امواج اولتراسونیک و کمترین میزان جذب مربوط به نمونه‌های مخمر زنده بود. در مخمرهای زنده، بیشترین میزان جذب سم در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد و بعد از گذشت ٢٤ ساعت حاصل شد، در حالیکه مخمرهای کشته شده با اولتراسونیک و اسید، بیشترین میزان اتصال به سم را در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتیگراد و زمان ٢٤ ساعت ازخود نشان دادند. بعلاوه فرآیند اتصال آفلاتوکسین به مخمر نسبتاً سریع بود و با گذشت تنها ۸ ساعت از زمان انکوباسیون کاهش سم مشاهده شد. با بکاربردن مدل‌های سینتیک جذب برای داده‌های آزمایشگاهی، مشاهده شد که جذب آفلاتوکسین توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه زنده و مخمر تیمار شده با اسید، از نرخ واکنش شبه درجه یک پیروی می‌کنند، در حالیکه داده‌های جذب توسط مخمر تیمار شده با اولتراسونیک دارای تطابق بهتری با مدل شبه درجه دو می‌باشد. علاوه بر این، مکانیزم‌های دیفیوژن درون ذره‌ای و دیفیوژن سطحی نیز دارای نقش مهمی در جذب سم توسط مخمر زنده و تیمارشده آن با اسید و اولتراسونیک می‌باشند. پیشنهاد می‌شود، به منظور محافظت مواد غذایی از آلوده‌شدن به سموم کشنده‌ای مانند آفلاتوکسین، مخمرهای تیمارشده با اولتراسونیک را بصورت انکپسوله شده با مواد خوراکی، به فرآورده‌های غذایی اضافه نمود.

٥-منابع

[1] Pakfetrat, S., Amiri, S., Radi, M., Abedi, E., & Torri, L. (2019). Reduction of phytic acid, aflatoxins and other mycotoxins in wheat during germination. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99(10), 4695–4701.

[2] Duarte, S. C., Pena, A., & Lino, C. M. (2010). A review on ochratoxin A occurrence and effects of processing of cereal and cereal derived food products. Food Microbiology, 27(2), 187–198.

[3] Shetty, P., Jespersen, L. (2006). Saccharomyces cerevisiae and lactic acid bacteria as potential mycotoxin decontaminating agents. Trends in Food Science and Technology, 17:48–55.

[4] Armando, M. R., Pizzolitto, R. P., Dogi, C. A., Cristofolini, A., Merkis, C., Poloni, V., Dalcero, A. M., &Cavaglieri, L. R. (2012). Adsorption of ochratoxin A and zearalenone by potential probiotic Saccharomyces cerevisiae strains and its relation with cell wall thickness. Journal of Applied Microbiology, 113(2), 256–264.

[5] Prado G, Madeira JE, Morais VA, et al (2011).Reduction of aflatoxin B1 in stored peanuts(Arachis hypogaea L.) using Saccharomycescerevisiae. Journal of Food Protection; 74:1003-6.

[6] EL-Nezami, H., Kankaanpau, P. Salminen, S. And Ahokas, J. (1998a). Ability of dairy strains of lactic acid bacteria to bind a common food carcinogen, aflatoxin B1. Food and Chemical Toxicology. 36:321-326.

[7] Shetty, P.H., Hald, H., Jespersen, L. (2007). Surface binding of aflatoxin B1 by Saccharomyces cerevisiae strains with potential decontaminating abilities in indigenous fermented foods. International Journal of Food Microbiology. 113: 41–46.

[8] Ojha, K. S., Mason, T. J., O'Donnell, C. P., Kerry, J. P., & Tiwari, B. K. (2017). Ultrasound technology for food fermentation applications. Ultrasonics Sonochemistry, 34, 410–417.

[9] Majid, I., Nayik, G. A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. Cogent Food & Agriculture, 1(1), Article 1071022.

[10] Abedi, E., Pourmohammadi, K., Mousavi Fard, M., Sayadi, M. (2021). Comparison between surface hydrophobicity of heated and thermosonicated cells to detoxify aflatoxin B1 by co-culture Lactobacillus plantarum and Lactobacillus rhamnosus in sourdough: Modeling studies. LWT,(154), 112616.

[11] Karazhiyan, H., MehrabanSangatash, M., Karazhyan, R., Mehrzad, A., &Haghighi, E. (2016). Ability of different treatments of Saccharomyces cerevisiae to surface bind

aflatoxin M1 in yoghurt. Journal of Agricultural Science and Technology, 18(6), 1489-1498.

[12] Fazeli, M. R., Hajimohammadali, M., Moshkani, A., Samadi, N., Jamalifar, H., Khoshayand, M. R., Vaghari, E., &Pouragahi, S. (2009). Aflatoxin B1 binding capacity of autochthonous strains of lactic acid bacteria. Journal of Food Protection, 72(1), 189–192.

[13] Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. Journal of Hazardous Materials, 390, 122156.

[14] Bueno, D. J., Casale, C. H., Pizzolitto, R. P., Salvano, M. A., & Oliver, G. (2007). Physical adsorption of aflatoxin B1 by lactic acid bacteria and Saccharomyces cerevisiae: A theoretical model. Journal of Food Protection, 70(9), 2148–2154.

[15] Rahaie, S., Razvi, S.H. and Jomeh, E.Z. (2010). The ability of Saccharomyces cerevisiae strain in aflatoxin reduction in pistachio nuts. Journal of Food Science and Technology, 7: 81-88. [In Persian].

[16] Davoodi Moghadam, H., Shahidi, F., TabatabaeeYazdi, F., Sarabi, M., Eshaghi, Z. (2021). Investigation of the effect of live and acid-treated Saccharomyces cerevisiae on citrinin and pigments of Monascuspurpureus. Journal of Research and Innovation in Food Science and Industry, Volume 1, Number 9, Pages 522-562.

Iranian Journal of Food Science and Technology

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Evaluation of kinetic model of aflatoxin B_1 adsorption by Saccharomyces cerevisiae treated with acid and ultrasonic in Sangak bread dough

Sayadi, M. [1], Pourmohammadi, K. [2*], Maleki, Sh. [3], Abedi, E.[2]

1. Department of Food Safety and Hygiene, Faculty of Health, Fasa University of Medical Sciences, Fasa, Iran.
2. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Fasa University Fasa, Iran.
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fasa University, Fasa, Iran.

ABSTRACT

Because food contamination with mycotoxins is a serious problem, in this study, the ability of aflatoxin $B_1$to bind to the Saccharomyces cerevisiae cell wall was investigated to reduce Sangak bread dough toxicity. For this purpose, aflatoxin B_1 at a concentration of 10 µg/kg inoculated to the dough containing 0.27 g of viable saccharomyces cerevisiae, acid treated saccharomyces cerevisiae, and ultrasonicated saccharomyces cerevisiae. Toxin adsorption kinetics were investigated at 24, 28 and 32 °C and 8, 16 and 24 h incubation. The trend for toxin adsorption was as follows: ultrasonicated yeast > acidic yeast > viable yeast. With increasing the incubation temperature and time, toxin adsorption increased in acid treated and ultrasonicated Saccharomyces cerevisiae, while active yeast samples showed the highest toxin removal at 28 °C. The results showed that the adsorption kinetics by active yeast and acid treated yeast could be explained by means of pseudo first order model, while for the ultrasonicated yeast, the data are more consistent with the pseudo secondorder model. Also, both surface adsorption and intra-particle diffusion contributedto the adsorption rate steps. Therefore, live or non-living yeast cells are suitable biological agents for aflatoxin removal in a contaminated culture medium, however, ultrasonic treatment is more effective.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2021/ 12/ 31
Accepted 2022/ 02/ 26

Keywords:

Saccharomyces cerevisiae,
Aflatoxin B_1,
Adsorption,
Bread dough,
Kinetic model

DOI: 10.52547/fsct.19.124.19

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.124.20.7

*Corresponding Author E-Mail:
kpourmohammadi@yahoo.com