

## Optimization of lysine production in *Corynebacterium glutamicum* ATCC15032 by Response surface methodology

Mehrnaz Haghi

M.Sc. of Cellular and Molecular Biology, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, mehrnazhaghi@yahoo.com

Mohammad Pazhang\*

Associate Professor of Biochemistry, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, pazhang@azaruniv.ac.ir

Alireza Amani Ghadim

Assistant Professor of Applied Chemistry, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, a\_r\_amani@yahoo.com

### Abstract

**Introduction:** Lysine is an essential amino acid and has importance in food and pharmaceutical industry. Nowadays, there are different methods such as genetic and growth media optimization to enhance the lysine production. One of the useful methods in optimization of growth media is the response surface methodology.

**Materials and methods:** In this study, lysine was produced by wild type of *Corynebacterium glutamicum* ATCC15032 and the production increased by response surface methodology. After selection of M9 culture media as a basic culture media, the effect of different factors such as carbon (glucose), nitrogen (ammonium sulphate) sources and methionine, as an additive, were studied on the lysine production. Then, the culture media and the time of incubation were optimized by response surface methodology for lysine production.

**Results:** The results showed that in M9 culture media, the amount of the produced lysine was 0.7 milligram per liter. In the optimized culture media (by response surface methodology) which has 14% glucose, 5% ammonium sulphate and 5mM methionine, lysine was produced up to 0.98 gram per liter after 2.5 days incubation. Pareto analysis indicated that methionine is the most effective factor in the lysine production. Finally, the results of granulation showed that the optimum condition for granulation of culture media (containing lysine) was achieved by adding starch, ammonium sulphate and sodium chloride in low pH and 100 °C.

**Discussion and conclusion:** According to the results, the proposed culture media by response surface methodology causes 1400 times increase in the lysine production compared with M9 culture media and methionine had an important role in the production of lysine, probably by inhibiting the other metabolic pathway which has common metabolic precursor with lysine production metabolic pathway.

**Key words:** Lysine, *Corynebacterium glutamicum* ATCC15032, M9 culture media, Response surface methodology, Granulation

---

\* Corresponding author

**Received:** January 9, 2016/ **Accepted:** May 10, 2016

فصلنامه علمی- پژوهشی زیست‌شناسی میکروارگانیسم‌ها  
سال ششم، شماره ۲۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۰۷-۱۲۲  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۱

## بهینه‌سازی تولید لیزین در باکتری کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 با روش رویه پاسخ

**مهرناز حق‌ی:** دانشجوی کارشناسی ارشد زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، mehrnazhaghi@yahoo.com  
**محمد پاژنگ\*:** دانشیار بیوشیمی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، pazhang@azaruniv.ac.ir  
**علیرضا امانی قدیم:** استادیار شیمی کاربردی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، a.r\_amani@yahoo.com

### چکیده

**مقدمه:** لیزین یکی از آمینواسیدهای ضروری است و در صنایع غذایی و دارویی اهمیت ویژه‌ای دارد. امروزه از روش‌های مختلفی برای افزایش تولید لیزین استفاده می‌شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مهندسی ژنتیک و بهینه‌سازی محیط کشت اشاره کرد. یکی از روش‌های پرکاربرد در بهینه‌سازی محیط کشت، روش رویه پاسخ است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش از باکتری وحشی کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 جهت تولید لیزین و از روش رویه پاسخ جهت افزایش تولید استفاده شد. پس از انتخاب محیط کشت M9 به عنوان محیط کشت پایه سعی شد تأثیر عامل‌هایی مانند منابع کربنی (گلوکز)، منابع نیتروژنی (آمونیم سولفات) و متیونین بر تولید لیزین بررسی شود؛ سپس با استفاده از روش رویه پاسخ، محیط کشت و زمان گرماگذاری جهت تولید لیزین، بهینه شد.

**نتایج:** بررسی‌ها نشان داد، مقدار تولید لیزین در محیط کشت M9، ۰/۷ میلی گرم در لیتر است. نتایج روش رویه پاسخ نشان داد میزان تولید لیزین با محیط کشت پیشنهادی که حاوی گلوکز ۱۴ درصد، آمونیم سولفات ۵ درصد به همراه متیونین ۵ میلی مولار بود در مدت زمان ۲/۵ روز گرماگذاری به ۰/۹۸ گرم در لیتر رسید. تجزیه پارتو نشان داد از بین متغیرهای مورد استفاده، متیونین بیشترین تأثیر را در تولید لیزین داشت. در نهایت نتایج حاصل از گرانوله کردن نشان داد که شرایط بهینه جهت گرانوله کردن محیط کشت حاوی لیزین، با افزودن نشاسته، سولفات آمونیم و کلرید سدیم در pH پایین و دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد حاصل می‌شود.

**بحث و نتیجه‌گیری:** با توجه به نتایج مشخص شد روش به کاررفته در این پژوهش باعث افزایش ۱۴۰۰ برابری در تولید لیزین شد و متیونین احتمالاً از طریق سوق دادن پیش‌سازهای متابولیسمی به مسیرهای متابولیسمی تولید لیزین، نقش مهمی در تولید لیزین داشت.

**واژه‌های کلیدی:** لیزین، کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032، محیط کشت M9، روش رویه پاسخ، گرانوله کردن.

\* نویسنده مسئول مکاتبات

## مقدمه

اسید آمینه‌ها از پیش‌سازهای اصلی سازنده پروتئین‌ها هستند و کاربردهای فراوانی در تهیه غذای انسان و دام، لوازم آرایشی، سنتز مواد شیمیایی و تولید داروها دارند. یکی از مهم‌ترین و پراستفاده‌ترین اسید آمینه‌ها در صنایع غذایی و دارویی، لیزین است (۱). سالانه بیش از یک میلیون تن اسید آمینه مثل لیزین و متیونین به‌عنوان افزودنی‌های مواد غذایی تولید می‌شود (۲). از باکتری‌های شاخص در تولید لیزین، کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم است. این باکتری گرم‌مثبت، غیریماری‌زا، غیرمتحرک، هوازی و دارای رشد سریع است که توانایی تولید اسپور را ندارد و معمولاً کلنی زرد کم‌رنگ تولید می‌کند (۳). از مزایای این باکتری نسبت به سایر میکروارگانیسم‌ها در تولید لیزین، می‌توان به این موارد اشاره کرد: استفاده از دو مسیر متابولیکی سوکسینیل‌از و دهیدروژناز (در سایر باکتری‌ها تنها از طریق یکی از دو مسیر ذکر شده تولید لیزین صورت می‌گیرد) (۲ و ۳)، توانایی انتقال لیزین تولیدی به بیرون از باکتری (۳) و توانایی استفاده از محدوده وسیعی از منابع کربنی جهت تولید لیزین (۳). جهت افزایش تولید لیزین در سویه وحشی از روش‌های مختلفی همچون مهندسی ژنتیک و یا بهینه‌سازی محیط کشت استفاده می‌شود. در مهندسی ژنتیک می‌توان با دستکاری ژن مربوط به برخی از آنزیم‌های مهم در سنتز لیزین مانند آنزیم آسپارتوکیناز که به‌صورت مستقیم در تولید لیزین دخیل است، میزان تولید لیزین را افزایش داد (۴). اسید آمینه لیزین بر آنزیم آسپارتوکیناز تأثیر منفی دارد و افزایش غلظت آن باعث مهار این آنزیم می‌شود (۴). ایجاد تغییر ژنتیکی در این آنزیم به گونه‌ای که نسبت به افزایش غلظت لیزین حساس نباشد می‌تواند گام مثبتی در جهت افزایش تولید لیزین باشد (۴). روش دیگر، بهینه

سازی محیط کشت جهت افزایش تولید لیزین است که با ایجاد تغییر در شرایط فیزیکی مانند هوادهی، pH، دما و شرایط محیطی انجام می‌شود. از شرایط محیطی می‌توان به تغییر منابع کربنی و نیتروژنی و افزودن یک سری مواد به محیط کشت مانند متیونین و بیوتین اشاره کرد (۵). امروزه برای بررسی تأثیر هم‌زمان چندین عامل بر یک عامل خاص مانند تولید لیزین و گزینش بهترین شرایط با حداکثر تولید، از روش‌های مدل‌سازی ریاضی مانند روش رویه پاسخ<sup>۱</sup> استفاده می‌شود (۶ و ۷). در روش رویه پاسخ از فنون ریاضی و آماری سودمند جهت یافتن ترکیبی از متغیرهای مستقل برای رسیدن به شرایط بهینه همچنین بررسی تأثیر هم‌زمان این متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. در روش رویه پاسخ ممکن است در مدل و تخمین به کاررفته خطا وجود داشته باشد. با این حال این روش نسبت به روش‌های دیگر دقت بالایی دارد و می‌تواند یک مسئله پیچیده را به یک مسئله ساده‌تر تبدیل کند، حساسیت پاسخ در برابر هر عامل را مشخص کند و با کاهش چشمگیر تعداد آزمایش‌ها باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه شود (۵ و ۶). روش رویه پاسخ معمولاً به دو روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) و باکس-بنکن<sup>۳</sup> انجام می‌پذیرد. در طرح CCD ماتریس پیشنهاد شده جهت انجام آزمایش‌ها از سه بخش مجزا تشکیل شده است:

الف) بخش اول آزمایش‌ها شامل یک طرح فاکتوریل کامل  $2^k$  است که در آن  $k$  تعداد عامل‌های مؤثر بر فرآیند است.

ب) بخش دوم آزمایش‌ها شامل نقاط مرکزی<sup>۴</sup> است که در آن تمام عامل‌ها در سطوح میانی یا صفر خود هستند و معمولاً بیش از یکبار تکرار می‌شوند تا ارتوگونالیتی<sup>۵</sup> ماتریس حفظ شود.

انتقال داده شد. پس از گرماگذاری در دمای ۳۷ درجه به مدت ۱۴ ساعت از آن استوک تهیه شد.

**محیط‌های کشت:** جهت رشد باکتری و تهیه استوک از آن، از محیط کشت LB استفاده شد. محیط کشت M9 نیز به عنوان محیط کشت پایه جهت تولید لیزین استفاده شد. این محیط کشت، حاوی گلوکز (۲ گرم بر لیتر) و نمک‌های کلرید سدیم (۶/۵ گرم بر لیتر)، کلرید پتاسیم (۳ گرم بر لیتر)، کلرید آمونیوم (۱ گرم بر لیتر)، کلرید منیزیم (۰/۵ گرم بر لیتر) و کلرید کلسیم (۰/۰۰۰۵ گرم بر لیتر) است (۱۱).

**کشت باکتری جهت تولید لیزین:** بهترین میزان گزارش شده برای تلقیح کشت باکتری کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 20 درصد است (۵). به همین دلیل از استوک مایع تهیه شده در گلیسرول ۳۰ درصد با نسبت ذکر شده تلقیح صورت گرفت. کشت ها در حجم ۵ میلی لیتری با pH برابر ۷/۴، تهیه و در زمان های معین در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در انکوباتور با شیک ۱۸۰ دور بر دقیقه (RPM) قرار داده شدند.

**اندازه گیری غلظت لیزین:** جهت اندازه گیری غلظت لیزین تولیدی از روش چنارد<sup>۷</sup> استفاده شد. در این روش، اول معرفی حاوی ۲۵ میلی گرم نین هیدرین در ۱۰ میلی لیتر محلول حاوی اسیدسولفوریک (۴ میلی لیتر، ۶ مولار) و اسیداستیک (۶ میلی لیتر، گلاسیال) تهیه شد. سپس ۱ میلی لیتر از نمونه های حاوی لیزین به یک میلی لیتر معرف اضافه شد و نمونه ها به مدت یک ساعت در حمام آب جوش قرار داده شدند. بعد از آن به نمونه ها یک میلی لیتر اسیداستیک اضافه شد و در نهایت جذب نمونه ها در ۵۰۰ نانومتر خوانده شد (۱۲). جهت اندازه گیری غلظت لیزین براساس میزان جذب نمونه ها، منحنی استاندارد از میزان جذب لیزین خالص در غلظت های

(ج) بخش سوم شامل نقاط محوری<sup>۸</sup> است که به منظور دوران پذیر کردن طرح آزمایش ها در نظر گرفته می شوند. دوران پذیر بودن بدین معنا است که میزان دقت طرح در تخمین پاسخ در تمام جهات برابر است (۵ و ۸). در سال ۲۰۰۲ از روش رویه پاسخ و با استفاده از عواملی همچون گلوکز (۱۴ درصد)، عصاره ماهی، برخی نمک ها و بیوتین به عنوان افزاینده، سعی در بهینه سازی تولید لیزین کردند (۹). پس از آن در سال ۲۰۰۸ نیز با استفاده از روش رویه پاسخ و گونه جهش یافته کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه AEC-2 در محیط کشت حاوی گلوکز، سولفات آمونیوم و تغییر برخی از فاکتورهای فیزیکی مثل دما و pH، سعی شد در طی دو مرحله تولید لیزین بهینه سازی شود (۱۰).

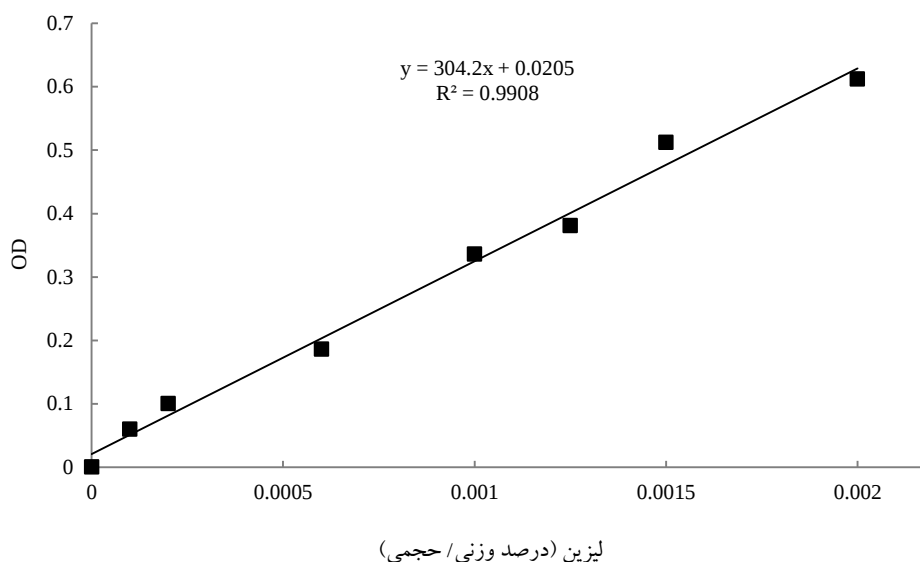
در این پژوهش پس از انتخاب یک محیط کشت پایه براساس محیط M9 سعی شد تا با بررسی فاکتورهای دخیل در تولید لیزین، عامل های مؤثر در تولید لیزین در باکتری مورد نظر شناسایی شود. سپس با استفاده از این فاکتورها تولید لیزین با روش رویه پاسخ، بهینه شود.

## مواد و روش ها

**مواد:** همه مواد به کاررفته در این پژوهش همچون گلوکز، سولفات آمونیوم، متیونین و لیزین (جهت رسم منحنی استاندارد) از شرکت مرک (آلمان) خریداری شد. **میکروارگانیزم:** میکروارگانیزم مورد استفاده یعنی باکتری کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 بود و از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران به صورت کشت داده شده بر روی محیط جامد (فعال سازی شده) تهیه شد. جهت استفاده و همچنین تهیه استوک (محلول ذخیره ای باکتری) از باکتری، یک تک کلونی از محیط کشت جامد برداشته و به محیط کشت LB مایع

مختلف رسم شد. جهت رسم منحنی استاندارد، غلظت های مختلف از لیزین در محدوده غلظتی ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ درصد (درصد وزنی/حجمی) تهیه شد و با استفاده از روش گفته شده، جذب آنها به دست آمد و در نهایت منحنی استاندارد رسم شد (شکل ۱). با استفاده از منحنی حاصل، مقدار لیزین موجود در هر نمونه اندازه گیری شد. در این تست غلظت استاندارد لیزین براساس درصد وزنی به حجمی تهیه شد. بنابراین می‌توان گفت هر ۱ درصد لیزین معادل ۱۰ گرم بر لیتر خواهد بود.

**بهینه‌سازی تولید لیزین:** بهینه‌سازی مقدار لیزین تولیدی با روش رویه پاسخ با کمک نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۸</sup> صورت گرفت. در این روش پس از مشخص کردن فاکتورهای موردبررسی یک بازه از حداقل و حداکثر مقادیر مؤثر هر یک از موارد تعیین شد و با استفاده از نرم‌افزار به روش طراحی ترکیب مرکزی<sup>۹</sup> (CCD) در پنج سطح قرار گرفتند (جدول ۱).



شکل ۱- نمودار استاندارد لیزین. جهت رسم نمودار، غلظت‌های مختلفی از لیزین (درصد‌های مختلف وزنی به حجمی) در آب مقطر تهیه شد سپس با روش چیتارد میزان جذب (OD) نمونه‌ها به دست آمد.

جدول ۱- مقادیر واقعی و کدبندی‌شده متغیرهای مستقل استفاده‌شده در طراحی آزمایش‌ها

| بازه و مقادیر واقعی سطوح کدبندی‌شده فاکتورها |     |     |     |            | متغیر مستقل (فاکتور)          |
|----------------------------------------------|-----|-----|-----|------------|-------------------------------|
| $\alpha^+$                                   | +۱  | صفر | -۱  | $\alpha^-$ |                               |
| ۱۶                                           | ۱۴  | ۱۲  | ۱۰  | ۸          | گلوکز $x_1$ : (g/l%)          |
| ۶                                            | ۵   | ۴   | ۳   | ۲          | سولفات آمونیوم $x_2$ : (g/l%) |
| ۶/۵                                          | ۵   | ۲/۵ | ۲   | ۰/۵        | متیونین $x_3$ : (mM)          |
| ۷                                            | ۵/۵ | ۴   | ۲/۵ | ۱          | زمان $x_4$ : (day)            |

\*  $\alpha=2$

جدول ۲- شرایط آزمایش‌های پیشنهادشده توسط CCD جهت

بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند

| شماره آزمایش | گلوکز (%) | آمونیم سولفات (%) | متیونین (میلی مولار) | زمان (روز) |
|--------------|-----------|-------------------|----------------------|------------|
| ۱            | ۱۰        | ۵                 | ۲                    | ۲/۵        |
| ۲            | ۱۴        | ۳                 | ۵                    | ۵/۵        |
| ۳            | ۱۰        | ۵                 | ۵                    | ۵/۵        |
| ۴            | ۱۰        | ۵                 | ۵                    | ۲/۵        |
| ۵            | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۶            | ۱۰        | ۳                 | ۲                    | ۲/۵        |
| ۷            | ۱۴        | ۵                 | ۵                    | ۲/۵        |
| ۸            | ۱۴        | ۵                 | ۲                    | ۵/۵        |
| ۹            | ۱۰        | ۳                 | ۵                    | ۵/۵        |
| ۱۰           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۱۱           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۶                  | ۴          |
| ۱۲           | ۱۰        | ۵                 | ۲                    | ۵/۵        |
| ۱۳           | ۱۴        | ۳                 | ۵                    | ۲/۵        |
| ۱۴           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۱۵           | ۱۲        | ۶                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۱۶           | ۱۴        | ۳                 | ۲                    | ۵/۵        |
| ۱۷           | ۱۴        | ۵                 | ۲                    | ۲/۵        |
| ۱۸           | ۸         | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۱۹           | ۱۴        | ۵                 | ۵                    | ۵/۵        |
| ۲۰           | ۱۴        | ۳                 | ۲                    | ۲/۵        |
| ۲۱           | ۱۲        | ۲                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۲۲           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۷          |
| ۲۳           | ۱۶        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۲۴           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۱          |
| ۲۵           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۲۶           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۲۷           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۰                  | ۴          |
| ۲۸           | ۱۰        | ۳                 | ۲                    | ۵/۵        |
| ۲۹           | ۱۰        | ۳                 | ۵                    | ۲/۵        |
| ۳۰           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |
| ۳۱           | ۱۲        | ۴                 | ۵/۳                  | ۴          |

سپس توسط نرم‌افزار، به‌طوری که در جدول ۲ دیده می‌شود، ۳۱ ماتریس از مقادیر مختلف هریک از این چهار فاکتور در کنار هم طراحی شد. این آزمایش‌ها شامل ۱۶ آزمایش فاکتوریل در سطوح ۱- و ۱+ عامل‌ها، ۱۳ آزمایش تکرار در سطوح مرکزی (۰) و ۲ آزمایش در نقاط محوری بود.

**گرانوله‌کردن:** برای گرانوله‌کردن محیط کشت حاوی لیزین، pH آن کاهش داده و بر روی هات پلیت با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. با کمک همزن مکانیکی محیط کشت حاوی لیزین همزده شد و در این حین نشاسته، نمک کلرید سدیم (به‌عنوان پرکننده) و سولفات آمونیوم (افزایندهٔ نسبی pH) در بازه‌های زمانی مشخص به آن اضافه شد (۲ و ۱۳).

## نتایج

**بررسی فاکتورهای مؤثر بر تولید لیزین در کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032:** با تغییر شرایط محیطی از جمله شرایط تغذیه‌ای می‌توان تولید لیزین را افزایش داد، از جملهٔ این شرایط می‌توان به تغییر منابع کربنی، نیتروژنی و افزودنی‌های محیط کشت اشاره کرد. در این پژوهش اثر منابع کربنی مختلف (همچون نشاسته، لاکتوز، ساکارز و گلوکز)، منابع نیتروژنی متفاوت (همچون اوره، کلرید آمونیوم و سولفات آمونیوم) و همچنین افزودنی‌های مختلف (همچون بیوتین و متیونین) بر تولید لیزین توسط کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 بررسی شد. نتایج مشخص کرد از بین مواد به‌کاررفته، گلوکز به‌عنوان منبع کربنی، سولفات آمونیوم به‌عنوان منبع نیتروژنی و متیونین به‌عنوان افزودنی در محیط کشت پایه M9 بیشترین تأثیر را بر تولید لیزین داشتند (نتایج نشان داده نشده است). بنابراین گلوکز،

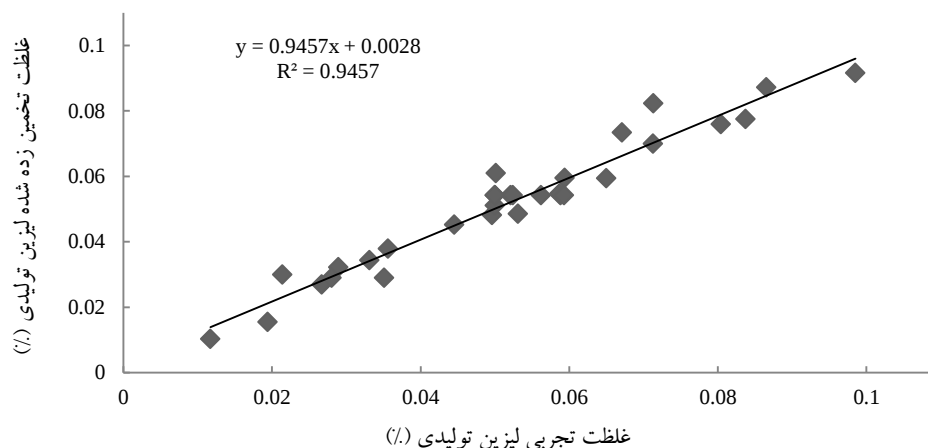
سولفات آمونیوم و متیونین جهت بررسی بیشتر انتخاب شدند. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، با بررسی تأثیر عوامل ذکر شده بر تولید لیزین، نتایج نشان داد که در محیط M9 میزان تولید لیزین ۰/۰۰۰۷ گرم بر لیتر است. با افزودن گلوکز، سولفات آمونیوم و متیونین، میزان تولید به ترتیب به مقدار ۲/۴، ۲/۸ و ۶/۵ برابر افزایش یافته است. در نهایت میزان تولید لیزین در محیط M9، متیونین ۳ درصد (وزنی/حجمی)، سولفات آمونیوم ۳ درصد (وزنی/حجمی) و گلوکز ۳ درصد (وزنی/حجمی) بررسی شد. نتایج نشان داد (جدول ۳) که در این محیط کشت میزان تولید لیزین نسبت به محیط M9 تا ۲۰۰ برابر افزایش یافته است.

**بهینه‌سازی تولید لیزین با روش رویه پاسخ:** با توجه به نتایج حاصل در این پژوهش بر تولید لیزین، جهت بهینه سازی تولید لیزین چهار متغیر غلظت گلوکز، آمونیوم

سولفات، متیونین و همچنین زمان گرماگذاری انتخاب شد. سپس با استفاده از روش رویه پاسخ، ۳۱ محیط کشت با شرایط مختلف پیشنهاد شد (جدول ۳). گفتنی است که محدوده‌های (سطوح) مورد استفاده برای هر کدام از عوامل بررسی شده به‌طوری بود که در این محدوده‌ها این عوامل باعث افزایش و سپس باعث کاهش میزان تولید لیزین می‌شدند (نتایج نشان داده نشده است). براساس شرایط پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، محیط‌های کشت مختلف تهیه شد و بعد از تلقیح باکتری در آنها، در زمان‌های مختلف پیشنهادی (توسط نرم‌افزار) گرماگذاری شد. سپس مقدار لیزین تولیدی اندازه‌گیری شد. گفتنی است که آزمایش‌ها تا ۴ بار تکرار شدند. از مقایسه نتایج تجربی و محاسبه شده مشخص شد  $R^2$  منحنی حاصل، ۰/۹۴ است (شکل ۲ و جدول ۴).

جدول ۳- میزان لیزین تولیدی در محیط کشت M9 و محیط کشت‌های M9 تغییر یافته

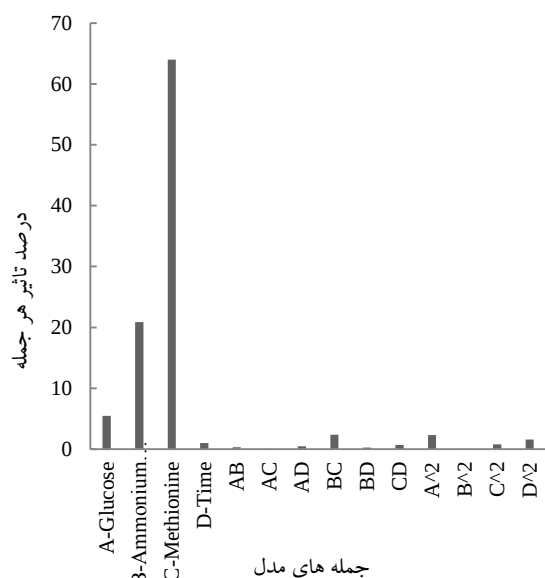
| نام محیط کشت                                               | مقدار لیزین تولیدی خالص<br>(گرم بر لیتر) | مقایسه میزان تولید نسبت به محیط M9<br>(برابر) |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| M9                                                         | ۰/۰۰۰۷                                   | ۱                                             |
| M9 + گلوکز ۳ درصد                                          | ۰/۰۰۱۷                                   | ۲/۴                                           |
| M9 + آمونیوم سولفات ۳ درصد                                 | ۰/۰۰۲                                    | ۲/۸                                           |
| M9 + متیونین ۳ درصد                                        | ۰/۰۰۴۶                                   | ۶/۵                                           |
| M9 + متیونین ۳ درصد + سولفات آمونیوم ۳ درصد + گلوکز ۳ درصد | ۰/۱۴                                     | ۲۰۰                                           |



شکل ۲- مقایسه نتایج تجربی لیزین تولیدی با نتایج تخمین زده شده لیزین تولیدی توسط مدل پیشنهادی RSM

جدول ۴- شرایط آزمایش‌های پیشنهادشده توسط CCD جهت بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند

| شماره<br>آزمایش | گلوکز<br>(درصد وزنی<br>به حجمی) | آمونیم سولفات<br>(درصد وزنی به<br>حجمی) | متیونین<br>(میلی‌مولار) | زمان<br>(روز) | مقدار لیزین تولید شده به<br>لحاظ تجربی<br>(درصد وزنی به حجمی) | مقدار لیزین تولیدشده تخمین‌زده<br>شده توسط مدل<br>(درصد وزنی به حجمی) |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| ۱               | ۱۰                              | ۵                                       | ۲                       | ۲/۵           | $0.0351 \pm 0.0017$                                           | ۰/۰۲۸۹                                                                |
| ۲               | ۱۴                              | ۳                                       | ۵                       | ۵/۵           | $0.05940 \pm 0.0022$                                          | ۰/۰۵۹۴                                                                |
| ۳               | ۱۰                              | ۵                                       | ۵                       | ۵/۵           | $0.0837 \pm 0.0031$                                           | ۰/۰۷۷۴                                                                |
| ۴               | ۱۰                              | ۵                                       | ۵                       | ۲/۵           | $0.0804 \pm 0.0030$                                           | ۰/۰۷۵۸                                                                |
| ۵               | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0588 \pm 0.0022$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۶               | ۱۰                              | ۳                                       | ۲                       | ۲/۵           | $0.0194 \pm 0.0007$                                           | ۰/۰۱۵۴                                                                |
| ۷               | ۱۴                              | ۵                                       | ۵                       | ۲/۵           | $0.0985 \pm 0.0034$                                           | ۰/۰۹۱۵                                                                |
| ۸               | ۱۴                              | ۵                                       | ۲                       | ۵/۵           | $0.0496 \pm 0.0017$                                           | ۰/۰۴۸۰                                                                |
| ۹               | ۱۰                              | ۳                                       | ۵                       | ۵/۵           | $0.0587 \pm 0.0020$                                           | ۰/۰۵۴۶                                                                |
| ۱۰              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0562 \pm 0.0020$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۱۱              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۶                     | ۴             | $0.0713 \pm 0.0025$                                           | ۰/۰۸۲۲                                                                |
| ۱۲              | ۱۰                              | ۵                                       | ۲                       | ۵/۵           | $0.0356 \pm 0.0015$                                           | ۰/۰۳۷۸                                                                |
| ۱۳              | ۱۴                              | ۳                                       | ۵                       | ۲/۵           | $0.0650 \pm 0.0022$                                           | ۰/۰۵۹۳                                                                |
| ۱۴              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0521 \pm 0.0020$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۱۵              | ۱۲                              | ۶                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0671 \pm 0.0022$                                           | ۰/۰۷۳۳                                                                |
| ۱۶              | ۱۴                              | ۳                                       | ۲                       | ۵/۵           | $0.0331 \pm 0.0014$                                           | ۰/۰۳۴۲                                                                |
| ۱۷              | ۱۴                              | ۵                                       | ۲                       | ۲/۵           | $0.0445 \pm 0.0016$                                           | ۰/۰۴۵۱                                                                |
| ۱۸              | ۸                               | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0214 \pm 0.0008$                                           | ۰/۰۲۹۸                                                                |
| ۱۹              | ۱۴                              | ۵                                       | ۵                       | ۵/۵           | $0.0865 \pm 0.0029$                                           | ۰/۰۸۷۰                                                                |
| ۲۰              | ۱۴                              | ۳                                       | ۲                       | ۲/۵           | $0.0267 \pm 0.0008$                                           | ۰/۰۲۶۸                                                                |
| ۲۱              | ۱۲                              | ۲                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0289 \pm 0.0009$                                           | ۰/۰۳۲۱                                                                |
| ۲۲              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۷             | $0.0712 \pm 0.0023$                                           | ۰/۰۶۹۹                                                                |
| ۲۳              | ۱۶                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0500 \pm 0.0018$                                           | ۰/۰۵۰۹                                                                |
| ۲۴              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۱             | $0.0501 \pm 0.0017$                                           | ۰/۰۶۰۹                                                                |
| ۲۵              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0500 \pm 0.0017$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۲۶              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0524 \pm 0.0020$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۲۷              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۰                     | ۴             | $0.0117 \pm 0.0004$                                           | ۰/۰۱۰۱                                                                |
| ۲۸              | ۱۰                              | ۳                                       | ۲                       | ۵/۵           | $0.0280 \pm 0.0008$                                           | ۰/۰۲۸۸                                                                |
| ۲۹              | ۱۰                              | ۳                                       | ۵                       | ۲/۵           | $0.0531 \pm 0.0019$                                           | ۰/۰۴۸۵                                                                |
| ۳۰              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0531 \pm 0.0021$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |
| ۳۱              | ۱۲                              | ۴                                       | ۵/۳                     | ۴             | $0.0500 \pm 0.0016$                                           | ۰/۰۵۴۱                                                                |



شکل ۳- نتایج حاصل از تحلیل پارتو

جدول ۵- ضرایب محاسبه شده برای مدل توصیف کننده فرآیند

تولید لیزین

| جمله مدل          | ضریب محاسبه شده | P-value |
|-------------------|-----------------|---------|
| $b_0$             | ۰/۰۵۴           | ۰/۰۰۱۳  |
| A- گلوکز          | ۰۰۳E-۵/۲۷۱      | ۰/۰۰۰۱< |
| B- سولفات آمونیوم | ۰/۰۱۰           | ۰/۰۰۰۱< |
| C- متیونین        | ۰/۰۱۸           | ۰/۱۱۴۰  |
| D- زمان           | ۰۰۳E-۲/۲۵۷      | ۰/۴۷۶   |
| AB                | ۰۰۳E-۱/۲۰۶      | ۰/۹۳۱۸  |
| AC                | ۰۰۴E-۴۳۷/۱-     | ۰/۳۷۵۸  |
| AD                | ۰۰۳E-۱/۵۰۶-     | ۰/۰۵۲۹  |
| BC                | ۰۰۳E-۳/۴۵۶      | ۰/۵۰۳۷  |
| BD                | ۰۰۳E-۱/۱۳۱-     | ۰/۲۸۴۴  |
| CD                | ۰۰۳E-۱/۸۳۱-     | ۰/۰۱۳۸  |
| $2A^{\wedge}$     | ۰۰۳E-۳/۴۱۹-     | ۰/۷۸۴۷  |
| $2B^{\wedge}$     | ۰۰۴E-۳/۴۳۶-     | ۰/۱۳۱۰  |
| $2C^{\wedge}$     | ۰۰۳E-۱/۹۶۹-     | ۰/۰۳۶۲  |
| $2D^{\wedge}$     | ۰۰۳E-۲/۸۲۸      | ۰/۰۰۱۳  |

در روش رویه پاسخ از تحلیل پارتو جهت تعیین عوامل مؤثر استفاده می‌شود (۱۴) در این روش تأثیر هر عامل از طریق محاسبه درصد تأثیر هر جمله در پاسخ پیش‌بینی شده، توسط رابطه زیر به دست می‌آید (۱۵) و (۱۶). معادله ۱:

$$P_i = \left( \frac{b_i^2}{\sum_{i=1}^n b_i^2} \right) \times 100$$

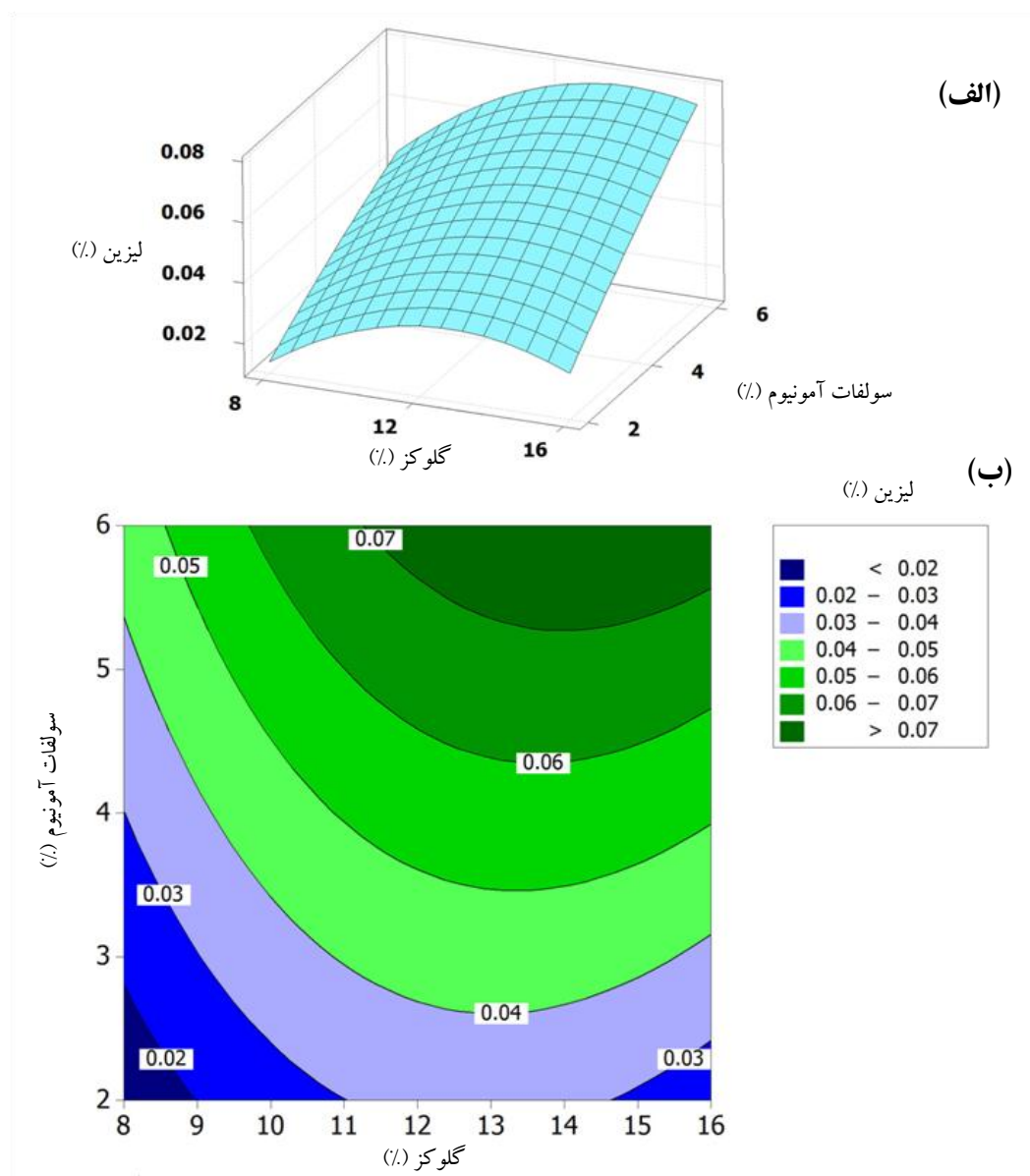
در این رابطه  $P_i$  درصد تأثیر هر جمله و  $b_i$  معرف ضریب هر جمله است. همچنین در این معادله  $i$  نمی‌تواند صفر باشد ( $i \neq 0$ ). نتایج حاصل از تحلیل پارتو در شکل ۳ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل، غلظت متیونین مهم‌ترین عامل مؤثر در فرآیند است ( $P_1 = 71/23\%$ ). پس از آن درصد گلوکز، مقدار سولفات آمونیوم و زمان گرماگذاری به ترتیب بیشترین تأثیر را دارند. گفتنی است براساس آنالیز واریانس انجام گرفته و همچنین آنالیز پارتو (شکل ۳) جمله به توان یک زمان، تأثیری در فرآیند ندارد؛ اما با توجه به نتایج جدول ۵ که حاصل از آنالیز واریانس و محاسبه شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب است هرچند مقدار P-Value مربوط به زمان بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است که مؤید عدم تأثیر معنادار زمان است. با این حال همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، جمله به توان دو زمان ( $D^2$ ) و همچنین برهم‌کنش زمان با غلظت متیونین (CD) معنی‌دار است. مقادیر P-Value جمله‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۳ و ۰/۰۱۳۸ است که کمتر از ۰/۰۵ هستند؛ بنابراین جمله عامل زمان باید در مدل حفظ شود تا تأثیر جمله‌های توان دو زمان ( $D^2$ ) و برهم‌کنش زمان با غلظت متیونین (CD) در نظر گرفته شود. در غیر این صورت کلیه فاکتورهای مربوط به زمان بایستی از مدل حذف می‌شدند.

### تأثیر متقابل عامل‌های مورد بررسی بر تولید لیزین:

از طریق نمودارهای سه‌بعدی و کانتور حاصل از تجزیه و تحلیل نرم‌افزار می‌توان تأثیر هم‌زمان دو عامل را بر تولید لیزین بررسی کرد.

شکل ۴ رابطه بین تولید لیزین با افزایش میزان گلوکز و آمونیوم سولفات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در بررسی تأثیر متقابل گلوکز

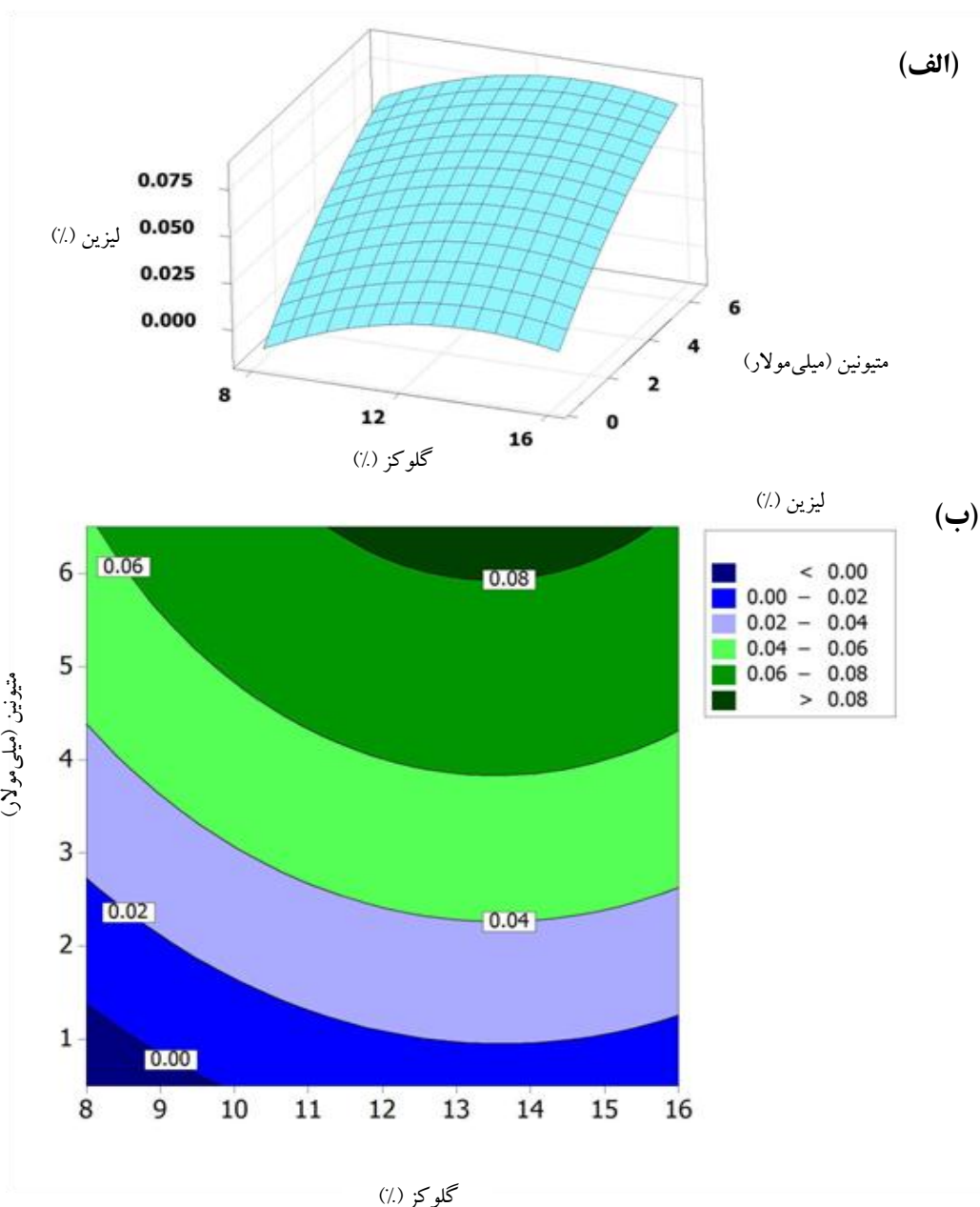
و سولفات آمونیوم، غلظت متیونین و زمان گرماگذاری تأثیر در نظر گرفته شده‌اند. با افزودن گلوکز به محیط تولید لیزین تا یک حد خاص (غلظت ۱۲ درصد) افزایش تولید لیزین مشاهده می‌شود؛ اما بعد از آن غلظت، افزایش گلوکز باعث کاهش تولید لیزین می‌شود. آمونیوم سولفات نیز تا غلظت ۵ درصد باعث افزایش تولید لیزین می‌شود.



شکل ۴- اثر هم‌زمان گلوکز و سولفات آمونیوم بر تولید لیزین در غلظت ۳/۵ میلی‌مولار متیونین طی ۴ روز گرماگذاری. (الف) تأثیر متقابل گلوکز و سولفات آمونیوم بر تولید لیزین (ب) نمودار کانتور تولید لیزین در غلظت‌های مختلف از گلوکز و سولفات آمونیوم

۱۴ درصد باعث افزایش و سپس باعث کاهش تولید می‌شود. در این بررسی غلظت آمونیوم سولفات و زمان گرماگذاری ثابت فرض شد.

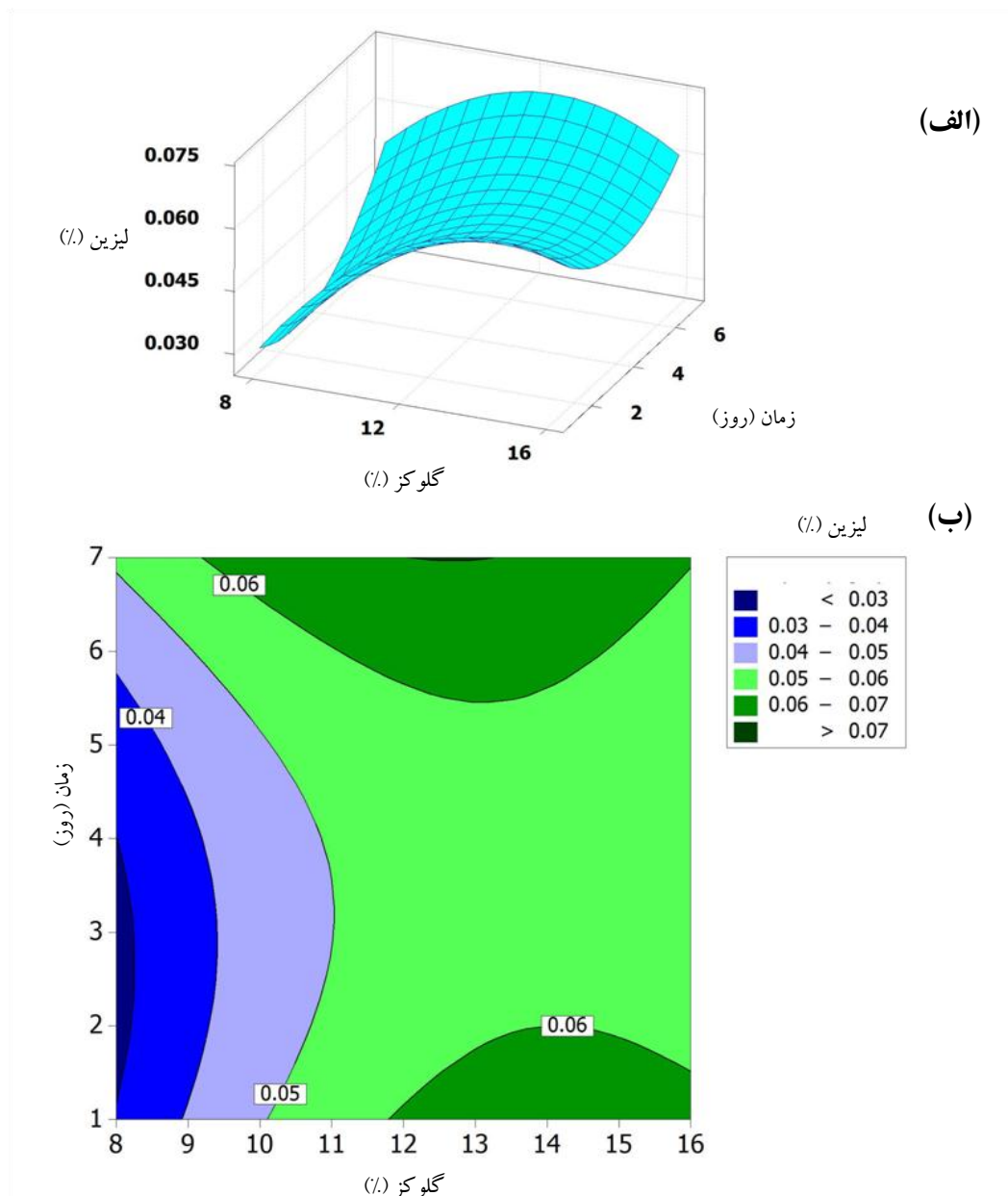
با توجه به شکل ۵ که نشان‌دهنده رابطه تأثیر افزایش مقدار متیونین و گلوکز در تولید لیزین است، مشخص شد که با افزایش مقدار متیونین تا غلظت ۵ میلی‌مولار مقدار تولید لیزین نیز افزایش می‌یابد؛ از طرف دیگر همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، گلوکز نیز تا غلظت



شکل ۵- تأثیر هم‌زمان غلظت‌های مختلف از گلوکز و متیونین بر تولید لیزین در غلظت ۴ درصد از سولفات آمونیوم و طی ۴ روز گرماگذاری. (الف) ارتباط بین تولید لیزین با مقدار گلوکز و متیونین. (ب) نمودار کانتور رابطه تولید لیزین با مقدار گلوکز و متیونین.

کاهش روبه‌رو است و آن نیز می‌تواند به علت خطای آزمایش باشد) در واقع زمان تأثیر مثبتی در تولید لیزین دارد. افزایش زمان به همراه افزایش مقدار گلوکز باعث افزایش تولید لیزین می‌شود.

همان گونه که در شکل ۶ (تأثیر متقابل مقدار گلوکز و زمان گرماگذاری در غلظت ثابت متیونین و آمونیوم سولفات) دیده می‌شود، افزایش زمان گرماگذاری نیز تولید لیزین را افزایش می‌دهد (جز بخش ۰-۴ روز که با



شکل ۶- تأثیر متقابل غلظت‌های مختلف گلوکز و زمان‌های متفاوت بر تولید لیزین در غلظت ۴ درصد از سولفات آمونیوم و غلظت ۳/۵ میلی مولار از متیونین. (الف) ارتباط تولید لیزین با مقدار گلوکز و متیونین. (ب) نمودار کانتور رابطه تولید لیزین با مقدار گلوکز و زمان گرماگذاری.

## بحث و نتیجه‌گیری

افزایش تولید آمینواسید لیزین هم با تغییرات مهندسی ژنتیک و یا با مهندسی محیط می‌تواند از دید میکروبیولوژی صنعتی مهم باشد. با این حال با توجه به کم‌هزینه‌بودن و کم‌خطر بودن مهندسی محیط نسبت به مهندسی ژنتیک (به‌لحاظ ایمنی زیستی) امروزه استفاده از آن بیشتر مورد توجه واقع شده است.

در این پژوهش با تغییر میزان گلوکز (منبع کربنی)، آمونیوم سولفات (منبع نیتروژنی)، مقدار متیونین (افزودنی) و زمان گرماگذاری، افزایش ۱۴۰۰ برابری نسبت به محیط کشت پایه M9 حاصل شد. با توجه به میزان  $R^2$  بالا (۰/۹۴) می‌توان گفت نتایج تجربی و تخمین زده‌شده در این پژوهش هم‌خوانی بالایی دارد و بنابراین مدل پیشنهادی در این پژوهش قابل اعتماد است. نتایج حاصل از تحلیل پارتو نشان داد که در افزایش میزان تولید لیزین، متیونین بیشترین اهمیت را دارد و سپس گلوکز، مقدار آمونیوم سولفات و زمان گرماگذاری اهمیت دارند. متیونین به‌عنوان یک افزودنی، تأثیر زیادی در تولید لیزین دارد. دلیل این امر تأثیر متیونین در مهار عملکرد اپرون سازنده آنزیم‌های دخیل در ساخت آمینواسیدهایی است که از یک پیش ساز مشترک با لیزین ساخته می‌شوند (۱۷). از جمله این آمینواسیدها ترئونین و ایزولوسین است که در حضور متیونین میزان تولید آنها از ۷ به ۲ میلی‌مولار کاهش می‌یابد و در نتیجه پیش‌ساز مشترک آنها توسط آنزیم‌های تولیدکننده لیزین بیشتر مصرف می‌شود و لیزین بیشتری تولید می‌گردد (۱۷). بنابراین می‌توان گفت در باکتری کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم سویه ATCC15032 مسیر تولید ترئونین و ایزولوسین از پیش‌ساز مشترک با لیزین

در نهایت نتایج نشان داد که با مقایسه نتایج حاصله از تولید لیزین در محیط کشت M9 در مدت یک هفته (۰/۷ میلی‌گرم در لیتر) (جدول ۱) با محیط کشت شماره ۷ (جدول ۴) یعنی محیط کشت M9 حاوی ۱۴ درصد گلوکز، ۵ درصد آمونیوم سولفات و متیونین ۵ میلی‌مولار (تولید ۰/۹۸ گرم در لیتر لیزین در مدت ۲/۵ روز) دیده می‌شود که تولید لیزین تقریباً ۱۴۰۰ برابر افزایش یافته است.

**گرانوله کردن:** با توجه به اهمیت محیط حاوی لیزین در صنعت غذای دام و طیور محیط کشت حاوی لیزین گرانوله شد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، گرانول‌های حاوی لیزین تهیه شدند. این گرانول‌ها به دلیل دارا بودن عصاره باکتری علاوه بر آمینواسید دارای پروتئین و ویتامین نیز هستند.



شکل ۷- گرانول‌های لیزین

بیشتر است به‌طوری که با مهار این مسیر توسط متیونین، تولید لیزین در مقایسه با سایر عوامل موردبررسی به‌میزان زیادی افزایش می‌یابد. در رده دوم اهمیت جهت افزایش تولید لیزین گلوکز قرار دارد. نتایج این پژوهش نشان داد مقدار ۱۴ درصد گلوکز، بیشترین تأثیر را در افزایش تولید لیزین دارد و غلظت‌های بالاتر از آن باعث کاهش تولید لیزین می‌شود. برای تولید لیزین در دسترس بودن سوبسترا به‌عنوان یک فاکتور مهم نقش بسزایی دارد. این امر نه تنها برای تولید لیزین بلکه برای توانایی زیستن و رشد باکتری نیز مهم است. گلوکز یکی از انواع منابع کربنی قابل‌استفاده توسط کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم و در عین حال بهترین آنهاست (۱۸). طبق مطالعات انجام‌شده در سال ۱۹۸۵، مشخص شد که افزایش غلظت گلوکز از یک حد مشخص، رشد باکتری را در سطح پایینی محدود می‌کند (۱۸). درواقع علت این امر تأثیر مقدار سوبسترای اضافی بر کاهش تولید محصول است؛ زیرا با افزایش گلوکز مقدار رشد باکتری تا حدی که شرایط ایجاب می‌کند افزایش می‌یابد (۱۸). بعد از رسیدن باکتری به مرحله ایستایی از رشد خود، از یک طرف تولید آمینواسید و خروج آنها از باکتری افزایش می‌یابد و از طرف دیگر باکتری با کمبود فاکتور مهمی مانند آمینواسیدها روبه‌رو می‌شود. در نتیجه رشد باکتری در زمانی که غلظت لیزین به حداکثر می‌رسد شروع به کاهش یافتن می‌کند؛ پس از مدتی کاهش رشد باکتری باعث کاهش تولید لیزین می‌شود (۱۹). از این رو در این پژوهش تا غلظت ۱۴ درصد از گلوکز افزایش تولید و پس از آن کاهش تولید کاهش مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که آمونیم سولفات به‌لحاظ اهمیت در تأثیر بر تولید لیزین،

نسبت به متغیرهای دیگر در رده سوم قرار می‌گیرد. حضور منبع نیتروژنی مانند آمونیم سولفات یکی از عوامل مؤثر در افزایش تولید لیزین است. لیزین در باکتری کورینه‌باکتریوم گلوتامیکوم برخلاف سایر باکتری از دو مسیر سوکسینیلاز و دهیدروژناز ساخته می‌شود. دسترسی باکتری به آمونیم، تعیین‌کننده مسیر نهایی تولید لیزین از پیش‌ساز پیریدین ۲،۶ دی‌کربوکسیلات به دی‌آمینوپیمیلات است. درواقع حضور آمونیم باعث استفاده باکتری از آنزیم دی‌آمینوپیمیلات دهیدروژناز می‌شود. تمایل این آنزیم به آمونیم بالا است (با  $K_m$  بالای ۳۵ میلی‌مولار) و باعث می‌شود در حضور مقدار بالای آمونیم، ۵۰ درصد از مسیر سنتز لیزین را به عهده بگیرد (۲۰). برعکس در حضور نیتروژن‌های آلی مانند اوره و گلوتامیک‌اسید این فرآیند به سمت آنزیم خانواده سوکسینیلاز سوق پیدا می‌کند (۲۰). با این حال افزایش بیش‌ازحد یون آمونیم با ایجاد تغییر در فشار اسمزی از رشد باکتری و تولید لیزین جلوگیری می‌کند (۲۱). افزایش زمان تا یک حد معقول باعث افزایش تولید لیزین می‌شود؛ اما پس از گذشت مدت‌زمان طولانی باکتری با کمبود مواد غذایی روبه‌رو می‌شود و تولید لیزین کاهش می‌یابد (۹). در این پژوهش در محیط کشت شماره ۷ (جدول ۴) که دارای گلوکز ۱۴ درصد، آمونیم سولفات ۵ درصد و متیونین ۵ میلی‌مولار است و به مدت ۲/۵ روز در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد گرماگذاری شده است، مقدار لیزین تولیدی نسبت به محیط کشت پایه M9 (۰/۰۰۰۷ گرم بر لیتر) تا ۱۴۰۰ برابر (۰/۹۸ گرم بر لیتر) افزایش داشت. در یک پژوهش نلوفر<sup>۱</sup> و همکاران با استفاده از گلوکز (۱۴ درصد)، با کمک عصا ماهی، برخی نمک‌ها و

بیوتین به عنوان افزاینده، در طی سه روز میزان تولید لیزین را ۲/۶ برابر افزایش دادند (۹). در پژوهشی دیگر در باکتری کورینه باکتریوم گلو تامیکوم سویه *ATCC 13032* با تغییرات ژنتیکی محدود به یک یا دو ژن تولید تا ۷۰ برابر (از ۱ میلی مولار به ۷۰ میلی مولار) افزایش یافت (۲۲). امروزه با افزایش تغییرات در بیش از ده‌ها ژن تولید را تا تقریباً یک مول بر لیتر رسانده‌اند (افزایش تولید تا ۱۰۰۰ برابر) (۲۳). در سال ۲۰۰۸ با استفاده از گونه جهش یافته کورینه باکتریوم گلو تامیکوم سویه *AeC-2* در محیط کشت حاوی گلوکز، آمونیوم سولفات و تغییر برخی از فاکتورهای فیزیکی مثل دما و pH و در دو مرحله استفاده از روش رویه پاسخ و با  $R^2=0/84$  مقدار تولید لیزین تا ۲/۶ برابر افزایش داده شد (۱۰). در این پژوهش بعد از انتخاب ۴ متغیر از بین چندین متغیر مؤثر در تولید لیزین و طی یک مرحله رویه پاسخ با  $R^2=0/94$ ، میزان تولید لیزین تا حدود ۱۴۰۰ برابر افزایش یافت؛ بنابراین با توجه به افزایش چشمگیر در میزان افزایش لیزین و همچنین صحت بالای مدل پیشنهادی توسط روش رویه پاسخ می‌توان گفت که با به کار بردن روش حاضر می‌توان تا مقدار قابل توجهی میزان تولید لیزین را در کورینه باکتریوم گلو تامیکوم بدون نیاز به دستکاری ژنتیکی و در یک محیط کشت قابل دسترس بهبود بخشید. در این پژوهش با تغییر تنها چهار فاکتور که از ویژگی‌های بارز آنها در دسترس بودن است مقدار تولید لیزین طی ۶۰ ساعت به طرز چشمگیری افزایش یافت.

از آنجا که لیزین آمینواسید صنعتی است، گرانوله کردن آن اهمیت ویژه‌ای دارد؛ به همین منظور سعی شده تا با مواد ارزان و در دسترس گرانوله کردن محیط

کشت حاوی لیزین صورت گیرد. گرانوله کردن آن هم از طریق جدا کردن و تخلیص لیزین از محیط کشت و هم به محیط کشت (به همراه باکتری) صورت می‌گیرد. با توجه به هزینه بر بودن تخلیص لیزین و همچنین غنای بالای گرانول‌ها (به لحاظ غذایی) در حضور باکتری (۲) در این پژوهش سعی شد روشی آسان جهت گرانوله کردن محیط کشت حاوی لیزین ارائه شود.

در نهایت می‌توان گفت با توجه به میزان  $R^2$  بالای (۰/۹۴) منحنی ارتباط بین نتایج تجربی و نتایج تخمین زده شده، مدل پیشنهادی در این پژوهش از صحت بالایی برخوردار بوده و از بین عوامل مورد بررسی، متیونین بیشترین تأثیر را در افزایش تولید لیزین داشته است. همچنین نتایج نشان داد محیط کشت M9 حاوی ۱۴ درصد گلوکز، ۵ درصد آمونیوم سولفات و متیونین ۵ میلی مولار باعث افزایش چشمگیر تولید لیزین در باکتری کورینه باکتریوم گلو تامیکوم سویه *ATCC15032* (تا ۱۴۰۰ برابر بیشتر از محیط M9) شد که این میزان افزایش با روش‌های تغییر گسترده ژنتیکی در باکتری کورینه باکتریوم گلو تامیکوم برابری می‌کند. با این حال با توجه به اینکه سویه باکتری مورد استفاده در این پژوهش سویه صنعتی نیست، می‌توان جهت افزایش تولید تا حد مورد قبول در صنعت (۲۰۰ گرم در لیتر) از سویه صنعتی و با به کار بردن محیط کشت و روش پیشنهادی در این پژوهش استفاده کرد.

#### تشکر و قدردانی:

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید مدنی آذربایجان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## References

- (1) Okfar N. *Modern Industrial Microbiology and Biotechnology*. First ed. California: Science Publishers; 2007.
- (2) Herman T. Industrial Production of Amino Acids by Coryne form Bacteria. *Journal Of Biotechnology* 2003; 104 (1): 155-172
- (3) Shen Xi., Zhou N., Liu Sh. Degradation and Assimilation of Aromatic Compounds by *Corynebacterium glutamicum*: Another Potential for Applications for This Bacterium? *Applied Microbiology and Biotechnology* 2012; 95 (1): 77-89.
- (4) Georgi T., Rittmann D., Wendisch VF. Lysine and Glutamate Production by *Corynebacterium glutamicum* on Glucose, Fructose and Sucrose: Roles of Malic Enzyme and Fructose-1, 6-Bisphosphatase. *Metabolic Engineering* 2005; 7(4): 291-301.
- (5) Shah A. H., Abdul H., Safia A., Khan GM. Optimization of Culture Conditions for L-Lysine Fermentation by *Corynebacterium glutamicum*. *Journal of Biological Sciences* 2002; 2(3): 151-156.
- (6) Myers Raymond H., Montgomery DC. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiment*. NewYourk: A Wiley-Interscience Publication; 2002.
- (7) Kaboosi H., Tabari N., Samadlouie HR. Optimization of  $\alpha$ -amylase production by *Bacillus amyloliquefaciens* using response surfaces methodology. *Biological Journal of Microorganism* 2014; 15(11): 79-90.
- (8) Poroach-Seritan M., Gutt S., Gutt G., Cretescu I., Cojocar C., & Severin, T. Design of experiments for statistical modeling and multi-response optimization of nickel electroplating process. *Chemical Engineering Research and Design* 2011; 89(2): 136-147.
- (9) Coello N., Montiel E., Concepcion M., Christen P. Optimisation of a culture medium containing fish silage for L-lysine production by *Corynebacterium glutamicum*. *Bioresource technology* 2002; 85(2): 207-11.
- (10) Nelofer R., Syed Q., Nadeem M. Statistical Optimization of Process Variables for L-Lysine Production by *Corynebacterium glutamicum*. *Turkish Journal of Biochemistry-Turk Biyokimya Dergisi* 2008; 33(2): 50-57.
- (11) Green M R., Sambrook J. *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*; Vol 1. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press; 2012.
- (12) Chinard FP. Photometric Estimation of Proline and Ornithine. *Journal Of Biological Chemistry* 1952; 199(1): 91-95.
- (13) Härkönen H., Koskinen M., Linko P., Siika-aho M., Poutanen K. Granulation of enzyme powders in a fluidized bed spray granulator. *LWT-Food Science and Technology* 1993; 26(3): 235-41.
- (14) Khataee AR., Zarei M., Asl S K. Photocatalytic Treatment of a Dye Solution Using Immobilized Tio 2 Nanoparticles Combined with Photoelectro-Fenton Process: Optimization of Operational Parameters. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2010; 648(2): 143-150.
- (15) Abdessalem A K., Oturan N., Bellakhal N., Dachraoui M., Oturan MA. Experimental Design Methodology Applied to Electro-Fenton Treatment for Degradation of Herbicide Chlortoluron. *Applied Catalysis B: Environmental* 2008; 78(3): 334-341.
- (16) Haaland PD. *Experimental Design In Biotechnology*. First ed. NewYork: Marcel Dekker; 1989.
- (17) Vrljic M., Kronemeyer W., Sahm H., Eggeling L. Unbalance of L-Lysine Flux in *Corynebacterium glutamicum* and Its Use for the Isolation of Excretion-Defective Mutants. *Journal of Bacteriology* 1995; 177(14): 4021-4027.

- (18) Sassi AH., Fauvart L., Deschamps A M., Lebeault, J M. Fed-Batch Production of L-Lysine by *Corynebacterium glutamicum*. *Biochemical Engineering Journal* 1998; 1(1): 85-90.
- (19) Eikmanns BJ., Eggeling L., Sahm H. Molecular Aspects of Lysine, Threonine, and Isoleucine Biosynthesis in *Corynebacterium glutamicum*. *Antonie Vanleeuwenhoek* 1993; 64(2): 145-163.
- (20) Ekwealor IA., Obeta JAN. Studies on Lysine Production by *Bacillus megaterium*. *African Journal of Biotechnology* 2005; 4(7): 633-638.
- (21) Hadj S A., Queric M P., Deschamps A M., Lebeault J M. Optimisation of L-Lysine Production by *Corynebacterium sp* in Fed-Batch Cultures. *Biotechnology Letters* 1988; 10(8): 583-586.
- (22) Hirao T., Nakano T., Azuma T., Sugimoto M., Nakanishi T. L-Lysine Production in Continuous Culture of and L-Lysine Hyperproducing Mutant of *Corynebacterium glutamicum*. *Applied Microbiology and Biotechnology* 1989; 32(3): 269-273.
- (23) Georgi T., Rittmann D., Wendisch VF. Lysine and Glutamate Production by *Corynebacterium Glutamicum* on Glucose, Fructose and Sucrose: Roles of Malic Enzyme and Fructose-1, 6-Bisphosphatase. *Metabolic Engineering* 2005; 7(4): 291-301.

---

<sup>1</sup>- Response surface methodology (RSM)

<sup>2</sup>- Central composite design

<sup>3</sup>- Box-Behnken designs

<sup>4</sup>- Central points

<sup>5</sup>- Orthogonality

<sup>6</sup>- Axial points

<sup>7</sup>- Chinard

<sup>8</sup>- Mini tab

<sup>9</sup>- Central composite design

<sup>10</sup>- Nelofer R.