

## مقاله پژوهشی

# بهینه‌سازی فرایند انعقاد در تصفیه آب آشامیدنی با استفاده از دانه بانه (*Pistacia atlantica*) به وسیله روش سطح پاسخ (RSM)

شهرام شریفی<sup>۱\*</sup>، مرتضی حسینی<sup>۲</sup> و حسن امینی‌راد<sup>۳</sup>

## چکیده

انعقاد یکی از مهم‌ترین فرایندها در تصفیه آب است. نگرانی روزافزون جهانی در مورد مسائل زیست‌محیطی، علاقه به تحقیق در مورد منعقدکننده‌های طبیعی را افزایش داده است. در حال حاضر ثابت شده است که منعقدکننده‌های طبیعی به دلیل در دسترس بودن، مقرون به صرفه بودن، ماهیت غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر بودن، جایگزین خوبی برای منعقدکننده‌های شیمیایی هستند. در این مطالعه، پتانسیل، مناسب بودن، اثربخشی و کارایی دانه بانه به عنوان منعقدکننده طبیعی برای تصفیه آب با کدورت اولیه ۱۰۰ NTU بررسی شد. از طرف دیگر، روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی (CCD) در ۵ سطح برای ارزیابی و بهینه‌سازی شرایط واکنش فرایند انعقاد-لخته‌سازی در تصفیه آب آشامیدنی به کار گرفته شد. از سه پارامتر غلظت منعقدکننده، pH و زمان تماس که از عوامل مهم و تأثیرگذار بر فرایند انعقاد-لخته‌سازی هستند، به عنوان متغیر در طراحی آزمایش استفاده شد. یک مدل چندجمله‌ای درجه دوم با مقدار  $R^2=0/9654$  (ضریب تشخیص) به داده‌ها ارائه شد. آزمایش‌های صحت مدل، مطابقت خوب بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده را نشان داد. در تصفیه آب آشامیدنی حاصل از نتایج تجربی، کاهش قابل ملاحظه کدورت یعنی ۹۵/۱۳ درصد با غلظت ۹۰/۵۳ میلی‌گرم در لیتر، pH=۹/۹۷ و زمان تماس ۴۴/۸۶ دقیقه برای منعقدکننده بانه حاصل شد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، دانه بانه به عنوان منعقدکننده در تصفیه آب آشامیدنی پتانسیل بالایی را از خود به نمایش گذاشت.

**واژه‌های کلیدی:** منعقدکننده طبیعی، بانه، حذف کدورت، بهینه‌سازی، انعقاد، RSM.

**ارجاع:** شریفی ش. حسینی م. و امینی‌راد ح. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی فرایند انعقاد در تصفیه آب آشامیدنی با استفاده از دانه بانه (*Pistacia atlantica*) به وسیله روش سطح پاسخ (RSM). مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۱-۱۰.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه نوشیروانی بابل.

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه نوشیروانی بابل.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل.

\* نویسنده مسئول: [shahram.shsh110@gmail.com](mailto:shahram.shsh110@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

## مقدمه

در سطح جهانی، آلودگی آب مسئله مهمی است که اثرات مضر آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان نیاز به توجه جدی دارد (چنگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ بلو و همکاران، ۲۰۱۷). در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، دسترسی به آب تمیز و سالم یک مشکل اساسی است. طبق گزارش سازمان ملل، ۱/۱ میلیارد نفر هنوز منابع مناسب آب آشامیدنی در دسترس ندارند و این افراد در بین فقیرترین افراد جهان هستند. دلیل اصلی کیفیت پایین آب، معیشت ضعیف مردم و به‌تبع آن سلامتی ضعیف حاصل از آن است؛ زیرا ۸۰ درصد بیماری‌های کشورهای در حال توسعه مربوط به آب است (بود و همکاران، ۲۰۱۷). هم‌آب‌های سطحی و هم‌آب‌های زیرزمینی به‌طور مداوم میانگینی از منبع آب را برای تصفیه آب آشامیدنی فراهم می‌کنند (پرسیوال و همکاران، ۲۰۰۰). این منابع آب می‌توانند با میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، مواد جامد محلول و معلق، ذراتی که باعث تغییر در طعم، بو و رنگ آب می‌شوند و آب را برای مصرف مستقیم انسان ناامن می‌کنند، آلوده شوند. وجود چنین ناخالصی‌ها و آلودگی‌هایی باعث کاهش کیفیت آب می‌شود و باید به‌طور مؤثری از بین بروند (ندابیچنستر و نارسیا، ۱۹۹۸). انعقاد/لخته‌سازی به‌عنوان اولین مرحله در فرایندهای تصفیه آب، برای رفع کدورت آب که حاصل ذرات معلق و مواد کلوئیدی است، انجام می‌پذیرد. موادی که در این مرحله از تصفیه آب استفاده می‌شوند، می‌توانند منعقدکننده‌های غیرآلی، پلیمرهای آلی مصنوعی یا منعقدکننده‌هایی با منشأ طبیعی باشند. سولفات آلومینیوم (آلوم) یک ماده منعقدکننده رایج در سطح جهان است که در تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم کارایی بالای آلوم در حذف کدورت، حجم لجن تولیدی آن پس از فرایند انعقاد زیاد است که همین مسئله باعث افزایش نگرانی‌ها نسبت به اثرات مضر زیست‌محیطی آن می‌شود. استفاده از پلیمرهای مصنوعی و وجود مونومرهای باقیمانده به‌دلیل مسمومیت عصبی و خاصیت سرطان‌زایی قوی، نامطلوب است (مالویاله و همکاران، ۱۹۸۴). با این حال، استفاده طولانی مدت از این مواد شیمیایی به‌عنوان منعقدکننده باعث آسیب جدی به سلامت انسان می‌شود؛ مانند آلوم که اختلالات سیستم عصبی خودمختار و مرکزی از جمله بیماری آلزایمر را سبب می‌شود (مارتین و همکاران، ۱۹۸۹). یکی از

راه‌حل‌های ممکن برای کاهش مشکلات موجود، استفاده از منعقدکننده‌های طبیعی است که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و همچنین سازگار با محیط زیست هستند (اکودا و همکاران، ۲۰۰۱؛ کاماچو و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از منعقدکننده‌های طبیعی قدمت بسیار زیادی دارد. از پلیمرهای طبیعی بیش از ۲۰۰۰ سال پیش در هند، آفریقا و چین به‌عنوان منعقدکننده و کمک‌منعقدکننده در حذف کدورت‌های بالای آب استفاده شده است که این منعقدکننده‌ها ممکن است از دانه‌ها، برگ‌ها و ریشه‌های گیاهان تولید شوند (کاوامورا، ۱۹۹۱). با توجه به موارد ذکرشده، استفاده از منعقدکننده‌های طبیعی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. از جمله ویژگی‌های منعقدکننده‌های طبیعی می‌توان به تجزیه بیولوژیک، ایمن‌بودن برای سلامتی انسان و تولید لجن کمتر که ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از آلوم است، اشاره کرد. علاوه‌براین، توسعه منعقدکننده‌ها به استفاده از منابع تجدیدپذیر که برای پایداری فناوری‌های تصفیه نسبتاً ارزان هستند، یک امر ضروری است. با این حال مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه در نقاط مختلف جهان که فاقد فناوری‌های نوین در امر تصفیه هستند، از منعقدکننده‌های طبیعی با منشأ گیاهی به‌عنوان منعقدکننده در تصفیه آب استفاده می‌کنند (اسرافازمان، ۲۰۱۱؛ دی سوزا و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق از دانه بانه (پسته کوهی) به‌عنوان یک منعقدکننده طبیعی استفاده شد. دانه‌های پسته وحشی (*Pistacia atlantica*) از گونه پسته هستند. گونه پسته در خانواده پسته‌ایان (*Anacardiaceae*) طبقه‌بندی می‌شود. پسته وحشی شامل ۳ زیرگونه است: کابولیکا (*Cabulica*)، کوردیکا (*Kurdica*) و موتیکا (*Mutica*). پسته وحشی یکی از گونه‌های اصلی است که در منطقه زاگرس با گونه‌های مختلف بلوط (*Quercus*) رشد می‌کنند. پسته وحشی ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا رشد می‌کند (ثابتی، ۱۹۹۴). دانه‌ها از درخت بانه در کوه‌های زاگرس محل سکونت (شهرستان لردگان منطقه ریگ) به‌دست آمدند.

اهداف این مطالعه:

- (۱) کاهش سطح کدورت آب با استفاده از منعقدکننده طبیعی موجود؛
- (۲) بهینه‌سازی فرایند به‌وسیله روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی (CCD) است.

**مواد و روش‌ها**

مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب با کدورت سنتز شده در جدول ۱ داده شده است.

**فعال کردن عامل انعقادی دانه بانه**

دانه‌های بانه که به صورت محلی به دست آمدند، به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس به روش دستی پوسته بیرونی و سخت آن‌ها جدا شد و مغز دانه‌های جدا شده درون هاون چینی آسیاب شدند و پس از آن با استفاده از

همزن خانگی (Bosch) به طور یکدست و یکنواخت آسیاب شدند. ۵ گرم دانه آسیاب شده در ۱ لیتر NaCl ۰/۵ مولار ریخته شد. محلول با استفاده از همزن مکانیکی (ES Overhead Stirrer Velp) به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه برای به دست آوردن عصاره، هم زده شد و از عصاره فیلتر شده با کاغذ صافی ضخیم به عنوان منعقدکننده با غلظت‌های مختلف برای انجام آزمایش انعقاد استفاده شد.

**جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب با کدورت سنتز شده**

شماره	پارامترها	مقادیر	واحد	دستگاه اندازه‌گیری
۱	کدورت	۱۰۰	NTU	HANNA HI93703
۲	PH	۷/۳		HANNA pH meter 211
۳	دما	۲۴/۱-۲۵	°C	Tel-Tru Thermometer, Rochester, NY USA
۴	اکسیژن محلول	۶/۳	mg/l	HANNA HI-9142
۵	هدایت الکتریکی	۴۸۹	µs/cm	Hach HQ40D
۶	آهن	۰/۷۴	mg/l	HANNA HI83200
۷	فلوراید	۰/۴۵	mg/l	HANNA HI83200
۸	کلراید	۰/۴۲	mg/l	HANNA HI83200
۹	TSS	۱۳۴۹	mg/l	اندازه‌گیری با کاغذ صافی
۱۰	TDS	۲۳۱	mg/l	Hach HQ40D

**تهیه فاضلاب سنتزی کائولین**

در این مطالعه کدورت آب سنتزی با افزودن سوسپانسیون کائولین استوک به آب شیر برای تمام آزمایش‌های انعقادی تهیه شد. سوسپانسیون کائولین موجود با حل کردن ۱۰ گرم پودر کائولین در ۱ لیتر آب مقطر حاصل شد. سوسپانسیون به آرامی با سرعت ۲۰ دور در دقیقه به مدت ۱ ساعت هم زده شد تا پراکندگی یکنواخت ذرات کائولین ایجاد شود. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد تا هیدراسیون کامل کائولین حاصل شود. این سوسپانسیون به عنوان یک محلول استوک برای تهیه نمونه‌های آب با کدورت مورد نظر برای آزمایش‌های انعقادی استفاده شد. pH آب با کدورت سنتزی اولیه با NaOH ۱ مولار و HCl ۱ مولار تنظیم شد.

**آزمایش انعقاد**

آزمایش جار برای ارزیابی عملکرد عصاره بانه به عنوان ماده منعقدکننده بر اساس روش‌های استاندارد انجام شد. شش بشر ۶۰۰ میلی‌لیتری با ۳۰۰ میلی‌لیتر آب با کدورت

۱۰۰ NTU پر شدند و در مکان‌های مشخص از دستگاه جارست (مدل JLT6 Velp) که هرکدام به یک روشن‌کننده مجهز بود، قرار داده شدند. غلظت‌های مختلفی از عصاره دانه‌ها به هر بشر اضافه شد و به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه به منظور اختلاط سریع هم زده شدند. بعد از آن سرعت اختلاط به ۴۰ دور در دقیقه به مدت ۲۵ دقیقه کاهش یافت (اختلاط آرام). سپس همه بشرها به مدت ۳۰ دقیقه (مدت زمان استاندارد زمان ته‌نشینی) برای انجام فرایند ته‌نشینی لخته‌های تشکیل شده کنار گذاشته شدند. بعد از سپری شدن مدت زمان مذکور، نمونه‌های زلال و شفاف شده از بالای بشر (سوپرناتانت) به وسیله پی‌پت برداشته شد. سپس کدورت هر نمونه شفاف شده با استفاده از کدورت‌سنج HANNA HI93703 اندازه‌گیری شد. پارامترهای غلظت منعقدکننده، pH و زمان تماس (زمان اختلاط) به عنوان متغیر با مقادیر مختلف درجهت بهینه‌سازی آزمایش انتخاب شدند که برای این امر از نرم‌افزار Design Expert 11 (USA, Stat soft) روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی (CCD) استفاده شد. همه

آزمایشات حداقل دو بار برای اطمینان از صحت نتایج تکرار و به صورت میانگین بیان شدند. درصد حذف کدورت با استفاده از معادله زیر به دست آمد:

$$(1) \quad \text{درصد حذف کدورت} = \frac{\text{کدورت نهایی} - \text{کدورت اولیه}}{\text{کدورت اولیه}} \times 100$$

## نتایج و بحث

### بررسی حذف کدورت

ماتریس طراحی متغیرهای مستقل همراه با درصد حذف کدورت به دست آمده در جدول ۲ آمده است. با استفاده از آزمون F، عدم تطابق (پراکندگی داده‌ها) در اطراف مدل برازش شده مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- مجموعه آزمایش‌های مختلف طراحی شده به وسیله CCD همراه با پاسخ حذف کدورت

آزمایش	متغیر ۱ غلظت A: (mg/l)	متغیر ۲ B: pH	متغیر ۳ زمان تماس C: (min)	حذف کدورت (%)	
				پیش‌بینی شده	باقی مانده
۱	۹۰/۵۳۹	۹/۹۷۳	۴۴/۸۶۵	۹۳/۷۱	۱/۴۲
۲	۹۰/۵۳۹	۴/۰۲۶	۱۵/۱۳۴	۷۲/۷۱	۱/۲۱
۳	۲۰/۹۴۶	۹/۹۷۳	۱۵/۱۳۴	۸۷/۴۱	۱/۰۰
۴	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	-۰/۳۶۱۶
۵	۲۵۰	۷	۳۰	۸۷/۳۱	-۰/۶۷۰۵
۶	۹۰/۵۳۹	۴/۰۲۶۹	۴۴/۸۶۵	۷۰/۶۰	-۰/۷۳۳۴
۷	۱۵۰	۲	۳۰	۷۰/۴۳	-۰/۱۸۵۶
۸	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	-۲/۶۰
۹	۱۵۰	۱۲	۳۰	۹۴/۱۸	-۱/۹۲
۱۰	۱۵۰	۷	۵	۸۵/۸۵	-۱/۰۵
۱۱	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	۲/۷۸
۱۲	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	۲/۰۴
۱۳	۹۰/۵۳۹	۹/۹۷۳	۱۵/۱۳۴	۹۲/۹۹	-۰/۸۵۲۴
۱۴	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	-۰/۸۲۸۴
۱۵	۲۰/۹۴۶	۴/۰۲۶	۴۴/۸۶۵	۸۴/۴۰	-۰/۳۳۲۴
۱۶	۲۰/۹۴۶	۴/۰۲۶	۱۵/۱۳۴	۸۰/۹۵	-۰/۸۰۰۵
۱۷	۱۵۰	۷	۵۵	۸۹/۳۸	-۰/۱۷۳۳
۱۸	۵۰	۷	۳۰	۸۰/۱۵	-۱/۵۵
۱۹	۱۵۰	۷	۳۰	۸۹/۰۳	-۲/۵۱
۲۰	۲۰/۹۴۶	۹/۹۷۳	۴۴/۸۶۵	۹۲/۴۰	-۰/۵۹۴۴

## آنالیز ANOVA

آنالیز ANOVA برای مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. معنادار نبودن مقدار Lack of Fit (عدم تناسب)، مقدار F مدل (۳۱/۰۵)، مقدار P کمتر از ۰/۰۰۰۱ و ضریب تشخیص ( $R^2=۰/۹۶۵۴$ ) مناسب بودن و معنادار بودن مدل را برای بیان رابطه واقعی بین پارامترها نشان داد. بر اساس تعریف نرم افزار، مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ قابل قبول هستند. این مقدار برای تأثیرگذاری عامل بر روی پاسخ تا ۰/۱ قابل تحمل یا قابل اغماض است؛ به همین دلیل عامل BC و  $C^2$  چون مقدار p-value آن‌ها از ۰/۱ بیشتر است، برای ادامه روند از مدل حذف شدند. p-value‌های هر کدام از متغیرها که کمتر از ۰/۰۵ و مقدار قابل تحمل است، نشان دهنده این

است که بر روی پاسخ تأثیر قابل توجهی دارند. با توجه به مقدار p-value متغیرها در جدول می‌توان گفت که تأثیر دو متغیر pH و غلظت منعقدکننده بر روی فرایند انعقاد بیشتر از متغیر زمان تماس است.

برازش داده‌ها به مدل‌های مختلف و آنالیز ANOVA نشان داد که فرایند حذف کدورت با مناسب‌ترین مدل، یعنی چندجمله‌ای درجه دوم به خوبی توصیف شده است. معادله مدل از نظر فاکتورهای رمزگذاری شده به شرح زیر است:

$$(2) \quad \begin{aligned} \text{حذف کدورت} &= ۸۹/۰۳ + ۲/۱۳A + ۷/۴۶B \\ &- ۱/۰۴C - ۲/۵۹AB \\ &+ ۱/۳۲AC - ۱/۸۷A^2 \\ &- ۲/۳۳B^2 \end{aligned}$$

که در آن A غلظت منعقدکننده، B بیانگر pH و C زمان تماس است.

جدول ۳- نتایج ANOVA برای مدل حذف کدورت توسط فرایند انعقاد-لخته‌سازی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۱۰۶۹/۰۹	۹	۱۱۸/۷۹	۳۱/۰۵	< ۰/۰۰۰۱
غلظت A-	۶۱/۹۱	۱	۶۱/۹۱	۱۶/۱۹	۰/۰۰۲۴
B-pH	۷۶۰/۰۷	۱	۷۶۰/۰۷	۱۹۸/۷۱	< ۰/۰۰۰۱
زمان تماس C-	۱۴/۶۸	۱	۱۴/۶۸	۳/۸۴	۰/۰۷۸۶
AB	۱۰۳/۳۲	۱	۱۰۳/۳۲	۲۷/۰۱	< ۰/۰۰۰۴
AC	۱۴/۰۲	۱	۱۴/۰۲	۳/۶۶	۰/۰۸۴۶
BC	۳/۳۴	۱	۳/۳۴	۰/۸۷۳۵	۰/۳۷۲۰
A <sup>2</sup>	۵۰/۵۱	۱	۵۰/۵۱	۱۳/۲۰	۰/۰۰۴۶
B <sup>2</sup>	۷۱/۸۴	۱	۷۱/۸۴	۱۸/۷۸	۰/۰۰۱۵
C <sup>2</sup>	۳/۶۸	۱	۳/۶۸	۰/۹۶۳۲	۰/۳۴۹۵
باقی‌مانده	۳۸/۲۵	۱۰	۳/۸۳		
عدم‌برازش	۱۲/۳۸	۵	۲/۴۸	۰/۴۷۸۷	۰/۷۸۱۰
خطای خام	۲۵/۸۷	۵	۵/۱۷		
کل	۱۱۰۷/۳۵	۱۹			

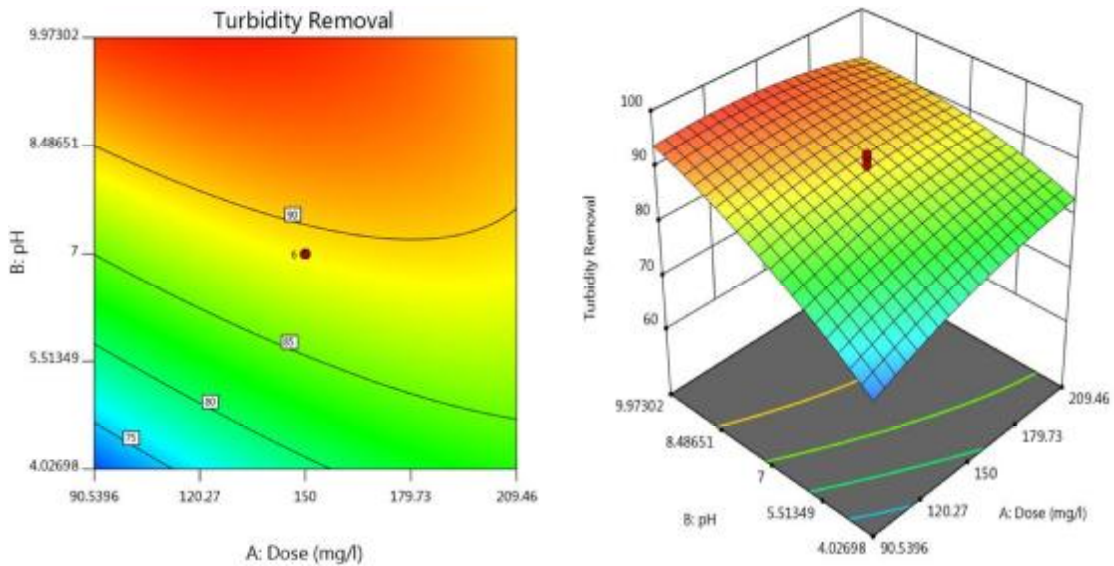
## تأثیر متقابل متغیرها در فرایند حذف کدورت

کارایی حذف کدورت به‌عنوان پاسخ، سطوح پاسخ مدل درجه دوم با یک متغیر که در سطح مطلوب (مقدار بهینه) نگه داشته می‌شود و دو متغیر دیگر با مقادیر و محدوده تعیین شده برای طراحی آزمایش هستند در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. به‌وضوح پیداست که آنچه در سطوح پاسخ نشان داده شده است، بیان‌کننده این موضوع است که شرایط بهینه دقیقاً در محدوده مقادیر متغیرهای طراحی آزمایش قرار داشت؛ به‌عبارت‌دیگر، اثرات متقابل مهمی بر روی کدورت بین غلظت منعقدکننده، pH و همچنین زمان تماس و غلظت منعقدکننده وجود دارد.

## تأثیر متقابل دو متغیر غلظت منعقدکننده و pH بر روی حذف کدورت

غلظت منعقدکننده و pH دو فاکتور مهم در مکانیسم انعقاد هستند. pH می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی فرایند انعقاد را افزایش دهد، زیرا pH ماهیت الکتروشیمیایی حلال و پلیمرهای یونی مورد استفاده را تغییر می‌دهد (سوماسانداران و همکاران، ۲۰۰۵). منعقدکننده‌هایی که باز مصرف می‌کنند، ممکن است شروع به کاهش قلیائیت و مقدار pH کنند (مانند منعقدکننده‌های مبتنی بر آهن و آلومینیوم)، pH حاصل، بستگی به دوز ماده منعقدکننده دارد؛ بنابراین این مقدار pH باید برای هر دوز منعقدکننده مورد آزمایش قرار گیرد (ناسرادسکا و همکاران، ۲۰۱۹). در برخی از

منعقدکننده‌های آلی، چگالی بار گالاکتورونیک اسید که دارای گروه کربوکسیلیک اسید ضعیفی است و به زنجیره پلیمری متصل است، وابسته به pH است (بولتو و گرگوری، ۲۰۰۷). گروه کربوکسیل موسیلاژ آنیونی با افزایش pH مستعد یونیزاسیون است. در نتیجه واپیچی و کشش زنجیره پلیمری به‌دلیل افزایش دافعه‌های الکترواستاتیک درون مولکولی ناشی از یونیزاسیون گروه اسیدی افزایش می‌یابد (ریو و سوماسوداران، ۱۹۹۶). در pH بالاتر از ۹، موسیلاژ آنیونی دانه گیاه بامیه بیشتر از هم جدا می‌شوند تا به شکل مسطح و آویزان درآیند که این امر برای افزایش انعقاد مفید است. دلیل آن است که مقدار بیشتری از فضاهای خالی در زنجیره پلیمری برای بهبود پل‌زدن ذرات کلئیدی در دسترس قرار می‌گیرد (وولف و همکاران، ۱۹۷۷). همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، نمودار سه‌بعدی تأثیر متقابل غلظت منعقدکننده و pH نشان می‌دهد که با افزایش pH، مقدار حذف کدورت افزایش پیدا می‌کند و متناسب با افزایش pH با افزایش مقدار غلظت منعقدکننده مقدار حذف کدورت نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دوز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در pH برابر ۷ مقدار حذف کدورت از ۹۱/۸۱ به ۸۷/۹۸ کاهش یافت. مقادیر بیش از حد غلظت به‌دلیل برگشت بار می‌تواند کدورت را تثبیت کند؛ بنابراین تعیین دوز بهینه علاوه بر افزایش مقدار حذف می‌تواند باعث کم‌شدن هزینه و کاهش حجم لجن در فرایند تصفیه شود (جنگ کورن، ۲۰۱۱).

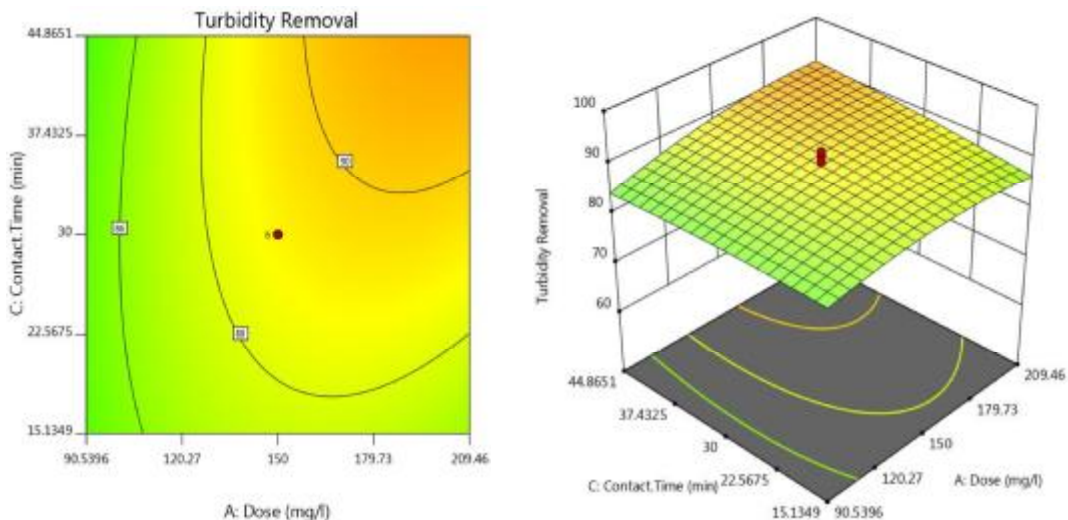


شکل ۱- نمودار کانتور و سه‌بعدی تأثیر متقابل متغیرهای غلظت منعقدکننده و pH بر روی پاسخ حذف کدورت

داشت تا اینکه به مقدار بهینه غلظت برسد. افزایش مقدار منعقدکننده بالاتر از ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در زمان‌های مختلف تأثیر چشمگیری بر حذف کدورت نداشت؛ بنابراین انتخاب مقدار کم ماده منعقدکننده (۹۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و در نتیجه حذف درصد بالای کدورت، ترجیح داده می‌شود. غلظت مورد نیاز منعقدکننده به غلظت اولیه کدورت بستگی دارد. از مصرف بیش از حد ماده منعقدکننده باید اجتناب شود، زیرا باعث می‌شود ذرات تجمع پیدا کرده مجدداً پراکنده شوند و ته‌نشینی ذرات را مختل کند (میشر و باجپای، ۲۰۰۵).

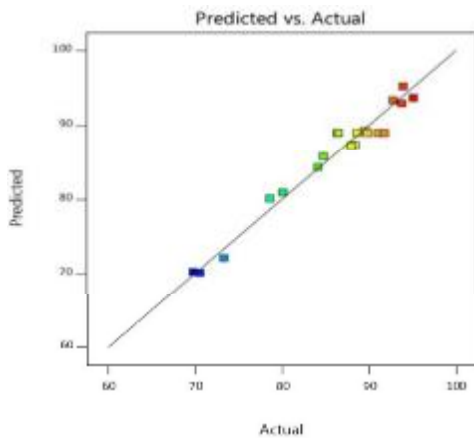
### تأثیر متقابل دو متغیر غلظت منعقدکننده و زمان تماس بر روی حذف کدورت

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در pH برابر ۷ و غلظت ثابت ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با افزایش زمان تماس از ۵ دقیقه به ۳۰ دقیقه مقدار حذف کدورت به ترتیب زمان تماس ۸۴/۸۰ و ۸۶/۴۱ به دست آمد که بیان‌کننده این مطلب است که تغییر در مقدار زمان تماس در مقایسه با غلظت منعقدکننده و pH تأثیر قابل توجهی بر حذف کدورت آب نمی‌گذارد؛ همان‌گونه که در بررسی آنالیز ANOVA مشخص شد (روی و داود، ۲۰۱۲)؛ اما با افزایش مقدار غلظت منعقدکننده، مقدار حذف نیز افزایش

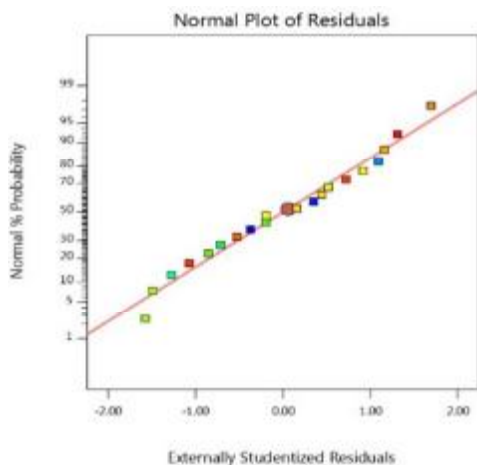


شکل ۲- نمودار کانتور و سه‌بعدی تأثیر متقابل متغیرهای pH و زمان تماس بر روی پاسخ حذف کدورت

پلزدن بین ذرات در آب باعث ایجاد لخته می‌شوند. عصاره دانه نیرمالی حاوی گروه‌های OH- و COOH- آزاد هستند که باعث افزایش کارایی انعقاد می‌شوند (تریپاتی و همکاران، ۱۹۷۶).



شکل ۳- نمودار پراکندگی مقادیر واقعی به مقادیر پیش‌بینی شده برای پاسخ حذف کدورت



شکل ۴- پراکندگی نرمال باقی‌مانده داده‌ها برای پاسخ حذف کدورت

بنه سرشار از پروتئین و از آمینواسیدهای بالایی برخوردار است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۰). طیف FTIR عصاره بنه در شکل ۵ نشان داده شده است. جایی که پیک‌های شدید در  $1702$ ،  $1622$  و  $1446$  مشاهده شد. در پیک  $3421$   $\text{cm}^{-1}$  می‌توان تشخیص داد که تغییرات گروه  $\text{COOH}^-$  برای  $\text{OH}^-$ ، یعنی گروه هیدروکسیل است. پیک موجود در طول موج  $1384$   $\text{cm}^{-1}$  مربوط به کشش C-N گروه آمین است (نارایانان و همکاران، ۲۰۰۸). باند  $1702$   $\text{cm}^{-1}$  حاوی پیوند یگانه C-C است. پیک جذب در  $1702$

شکل ۳ نشان‌دهنده پراکندگی مقدار واقعی به مقادیر پیش‌بینی شده است که مقدار ضریب تشخیص  $(R^2=0.9654)$  به دست آمده برازش مناسب مدل را نشان می‌دهد که دلالت بر تأثیرپذیری بالای مدل است (یعنی تأثیرگذاری ۹۶ درصدی عوامل مستقل به متغیر وابسته (پاسخ)) و فقط کمتر از ۴ درصد از تغییرات کلی نمی‌تواند توسط مدل توضیح داده شوند. در شکل ۴ پراکندگی نرمال باقی‌مانده نمایش داده شده است که نشان می‌دهد مدل فقط ۲ انحراف از حالت عادی دارد که بیان‌کننده مناسب بودن مدل است. مقدار عدم تناسب بیشتر از  $0.05$  معنادار نیست که نشان می‌دهد مدل معنادار است؛ بنابراین مدل به دست آمده می‌تواند در پیش‌بینی نظری متغیر وابسته (پاسخ) استفاده شود. هرچه داده‌ها خطی‌تر باشند، نشان‌دهنده نرمال بودن داده‌هاست. به‌طور کلی هرچه داده‌ها غیرخطی باشند، یعنی به صورت S شکل یا عمودی باشند، نیاز به تغییر تابع توانی (Transform) یا آزمایش مجدد دارند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، داده‌ها برای پاسخ کدورت حول خط داخل نمودار به صورت خطی هستند که نشان از پراکندگی مناسب و نرمال دارند (بتیکو و آدسینا، ۲۰۱۳).

### آنالیز FTIR

به‌طور کلی اکثر منعقدکننده‌های طبیعی براساس ترکیبات اصلی بر پایه فعالیت انعقادی به دو گروه پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها تقسیم می‌شوند. پلی‌ساکاریدها مانند کیتوزان، نشاسته و موسیلاژ هستند؛ درحالی‌که برای منعقدکننده‌های طبیعی بر پایه پروتئین، معمولاً از گیاهان (مورینگا و...) استفاده می‌شود (جوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ شمس‌نجاتی و همکاران، ۲۰۱۵). حضور گروه‌های عاملی هیدروکسیل و آمینو در این ترکیبات به قابلیت انعقاد کمک می‌کند. تعاملات باردار از جمله فعل و انفعالاتی است که بین پلیمر و حلال رخ می‌دهد این فعل و انفعالات در یک محیط محلول تا حدی به گروه‌های OH- متصل به زنجیره پلیمر وابسته است. این منعقدکننده‌ها معمولاً با دو مکانیسم جذب و خنثی‌سازی بار و فشردن لایه دابل باعث ایجاد انعقاد می‌شوند (آنگ و محمد، ۲۰۲۰؛ ویجیاقاوان، ۲۰۱۱).

بعضی منعقدکننده‌های طبیعی مانند دانه نیرمالی آنیون‌های پلی‌الکترولیتی هستند که با استفاده از مکانیسم

که با توجه به مقادیر بهینه متغیرها یعنی  $pH=9/97302$ ، مقدار غلظت  $147/561$  میلی‌گرم بر لیتر و زمان تماس  $44/865$  دقیقه مقدار حذف کدورت با  $95$  درصد تخمین و با میانگین  $3$  بار تکرار آزمایش  $96/24$  درصد حذف کدورت به‌دست آمد.

جدول ۵- مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای متغیرها

غلظت منعقد کننده	pH	زمان تماس
۱۴۷/۵۶۱	۹/۹۷۳۰۲	۴۴/۸۶۵

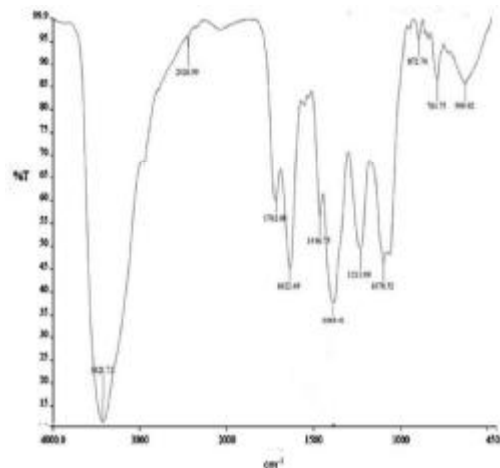
### نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر پارامترهای مختلف مانند pH و غلظت منعقدکننده و زمان تماس به‌عنوان متغیر برای بهینه‌سازی آزمایش به روش RSM از نوع CCD مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که متغیرهای pH و غلظت منعقدکننده تأثیر قابل‌توجهی بر روی فرایند انعقاد و لخته‌سازی دارند؛ درحالی‌که متغیر زمان تماس اثر کمتری بر روی حذف کدورت و روند آزمایش انعقاد داشت. همچنین مشاهده شد که استفاده از منعقدکننده طبیعی بانه در حذف کدورت به‌وسیله فرایند انعقاد و لخته‌سازی بسیار مؤثر است؛ به‌طوری‌که در شرایط بهینه، یعنی  $pH=9/97302$ ، مقدار غلظت  $147/561$  میلی‌گرم بر لیتر و زمان تماس  $44/865$  دقیقه، مقدار حذف کدورت  $96/24$  درصد به‌دست آمد که مقدار قابل‌ملاحظه‌ای است. بدین ترتیب و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده منعقدکننده طبیعی دانه بانه قابلیت رقابت با منعقدکننده‌های شیمیایی در جهت حذف کدورت از آب به‌وسیله فرایند انعقاد را دارا است.

### منابع

1. Abood M. M. Azhari N. N. B. and Abdelmoneim A. O. 2017. The Use of Peanut and Sesame Seeds as Natural Coagulant in the Water Treatment. Infrastructure University Kuala Lumpur Research Journal. 5(1): 1-10.
2. Ang W. L. and Mohammad A. W. 2020. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. Journal of Cleaner Production: 121267.
3. Asrafuzzaman M. Fakhruddin A. and Hossain M. 2011. Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. International Scholarly Research Notices. 2011.

$3421$  مشاهده شده در عصاره، ناشی از ارتعاش کشش OH است. این پیک موجود در عصاره به گروه N-H از پروتئین اختصاص داده شد. باندهای IR در  $1702\text{ cm}^{-1}$  و  $1622\text{ cm}^{-1}$  مشخصه آمید نوع اول هستند، درحالی‌که نوار در  $1515\text{ cm}^{-1}$  به مشخصه آمید نوع دوم است (شنی و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۵- FTIR عصاره دانه بانه (صادقی و همکاران، ۲۰۱۵)

### بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی، مقادیر هدف برای متغیرها و پاسخ (حذف کدورت) تعیین شد. به‌منظور بهینه‌یابی حذف کدورت، با توجه به هدف شرایطی تعیین کردیم، یعنی برای متغیرها همان مقدار تعیین‌شده برای طراحی آزمایش (in range) و برای پاسخ آزمایش به‌دلیل اینکه به‌دنبال بیشترین حذف بودیم، مقدار بیشینه (maximize) انتخاب شد که برحسب آن حد بالا و پایین و مطلوب هر یک از ویژگی‌ها، وزن و اهمیت آن‌ها تعیین شد (جدول ۴).

جدول ۴- پارامترهای بهینه‌یابی در حذف کدورت

نام	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن	اهمیت
غلظت	در محدوده	۹۰/۵۳۹۶	۲۰۹/۴۶	۱	۳
pH	در محدوده	۴/۰۲۶۹۸	۹/۹۷۳۰۲	۱	۳
زمان تماس	در محدوده	۱۵/۱۳۴۹	۴۴/۸۶۵۱	۱	۳
حذف کدورت	بیشینه	۸۰	۱۰۰	۱	۳

سپس با توجه به بهترین پاسخ پیشنهادشده مقادیر بهینه متغیرها مشخص شد (جدول ۵).



- Supply: Research and Technology-Aqua. 68(3): 222-230.
16. Narayanan K. B. and Sakthivel N. 2008. Coriander leaf mediated biosynthesis of gold nanoparticles. *Materials Letters*. 62(30): 4588-4590.
  17. Ndabigengesere A. and Narasiah K. S. 1998. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water research*. 32(3): 781-791.
  18. Okuda T. Baes A. U. Nishijima W. and Okada M. 2001. Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water research*. 35(2): 405-410
  19. Percival S. L. Walker J. T. and Hunter P. R. 2000. Microbiological aspects of biofilms and drinking water. CRC press.
  20. Rui L. M. and Daud Z. 2012. Coagulation-flocculation in leachate treatment using combination of pac with cationic and anionic polymers.
  21. Sabeti H. 1994. Forest, trees, and shrubs of Iran. 2nd edition, Iran University of Science and Technology Press. 514-579.
  22. Sadeghi B. Rostami A. and Momeni S. 2015. Facile green synthesis of silver nanoparticles using seed aqueous extract of *Pistacia atlantica* and its antibacterial activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 134: 326-332.
  23. Shamsnejati S. Chaibakhsh N. Pendashteh A. R. and Hayeripour S. 2015. Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment. *Industrial Crops and Products*. 69: 40-47.
  24. Shen D. Philip D. and Mathew J. 2012. Rapid green synthesis of palladium nanoparticles using the dried leaf of *Anacardium occidentale*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 91: 35-38.
  25. Somasundaran P. Runkana V. and Kapur P. 2005. Flocculation and dispersion of colloidal suspensions by polymers and surfactants: experimental and modeling studies. *Coagulation and flocculation*. 126: 767-803.
  26. Souza M. T. F. Ambrosio E. de Almeida C. A. de Souza Freitas T. K. F. Santos L. B. de Cinque Almeida V. and Garcia J. C. 2014. The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. *Environmental monitoring and assessment*. 186(8): 5261-5271.
  27. Tripathi P. Chaudhuri M. and Bokil S. 1976. Nirmali seed--a naturally occurring
  4. Bello O. S. Lasisi B. M. Adigun O. J. and Ephraim V. 2017. Scavenging Rhodamine B dye using *Moringa oleifera* seed pod. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 29(1): 120-134.
  5. Betiku E. and Adesina O. A. 2013. Statistical approach to the optimization of citric acid production using filamentous fungus *Aspergillus niger* grown on sweet potato starch hydrolyzate. *Biomass and Bioenergy*. 55: 350-354.
  6. Bolto B. and Gregory J. 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water research*. 41(11): 2301-2324.
  7. Camacho F. P. Sousa V. S. Bergamasco R. and Teixeira M. R. 2017. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*. 313: 226-237.
  8. Cheng R. Kang M. Zhuang S. Wang S. Zheng X. Pan X. and Wang J. 2019. Removal of bacteriophage f2 in water by Fe/Ni nanoparticles: Optimization of Fe/Ni ratio and influencing factors. *Science of the Total Environment*. 649: 995-1003.
  9. Choy S. Y. Prasad K. M. N. Wu T. Y. Raghunandan M. E. and Ramanan R. N. 2014. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*. 26(11): 2178-2189.
  10. Jangkorn S. Kuhakaew S. Theantanoo S. Klinla-Or H. and Sriwiriyarat T. 2011. Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants. *Journal of Environmental Sciences*. 23(4): 587-594.
  11. Kawamura S. 1991. Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. *Journal American Water Works Association*. 83(10): 88-91.
  12. Mallevalle J. Bruchet A. and Fiessinger F. 1984. How safe are organic polymers in water treatment? *Journal American Water Works Association*. 76(6): 87-93.
  13. Martyn C. Osmond C. Edwardson J. Barker D. Harris E. and Lacey R. 1989. Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminium in drinking water. *The Lancet*. 333(8629): 59-62.
  14. Mishra A. and Bajpai M. 2005. Flocculation behaviour of model textile wastewater treated with a food grade polysaccharide. *Journal of Hazardous Materials*. 118(1-3): 213-217.
  15. Naceradska J. Pivokonska L. and Pivokonsky M. 2019. On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water*

- coagulant. *Indian Journal of Environmental Health*. 18(4).
28. Vijayaraghavan G. Sivakumar T. and Kumar A.V. 2011. Application of plant based coagulants for waste water treatment. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*. 1(1): 88-92.
29. Wang X. and Bunkers G. J. 2000. Potent heterologous antifungal proteins from cheeseweed (*Malva parviflora*). *Biochemical and biophysical research communications*. 279(2): 669-673.
30. Woolfe M. L. Chaplin M. F. and Otchere G. 1977. Studies on the mucilages extracted from okra fruits (*Hibiscus esculentus* L.) and baobab leaves (*Adansonia digitata* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 28(6): 519-529.
31. Yu X. and Somasundaran P. 1996. Role of polymer conformation in interparticle-bridging dominated flocculation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 177(2): 283-287.