



بررسی متغیرهای مؤثر در جداسازی مواد زیستی توسط فیلتر غشایی تحت خلاء: مطالعه موردی محلول اسیدی پکتین

شعیب غلامی^۱، سعید مینائی^{۲*}، علیرضا مهدویان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۸

کلمات کلیدی:

استخراج،

بازده،

انرژی مصرفی،

پوست پرتقال،

پرلیت.

DOI: 10.22034/FSCT.20.138.64.

DOR:20.1001.1.20088787.1402.20.138.6.8

* مسئول مکاتبات:

minaee@modares.ac.ir

پکتین یکی از پرکاربردترین ترکیبات در صنایع غذایی است که از محصولات چوب پوست مرکبات و ضایعات استخراج می‌شود. از روش‌های متداول برای تصفیه محلول اسیدی به‌منظور استخراج پکتین، در مقیاس انبوه، استفاده از ترکیب نیروی خلاء و فیلترهای غشایی است. این پژوهش به بررسی متغیرهای مهم فیلتر غشایی تحت خلاء در جداسازی مواد فیبری از محلول اسیدی پکتین می‌پردازد. این متغیرها شامل اندازه ذرات کمک-فیلتر (پرلیت)، ضخامت لایه پرلیت و میزان خلاء است که موارد ذکر شده همگی بر کیفیت جداسازی، دبی حجمی تولید و انرژی مصرفی اثرگذارند. بدین منظور یک دستگاه فیلتراسیون تحت خلاء ساخته شد تا مواد فیبری حل‌شده در محلول را جداسازی نماید. متغیرهای مستقل پژوهش حاضر، در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند و به کمک روش سطح پاسخ (RSM) داده‌های حاصل از بررسی متغیرهای مذکور تحلیل شد و مقدار بهینه‌ی هر یک از متغیرها مشخص گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سطح خلاء از ۰/۲ تا ۰/۴ bar میزان دبی ۶/۵ برابر افزایش داشته است. اما با افزایش بیشتر مقدار خلاء، دبی تولید کاهش داشته است که نشان‌دهنده گرفتگی فیلتر کاغذی و کاهش دبی در سطح خلاء ۰/۶ bar و پرلیت ۱۰۰ میکرون است. نتایج ارزیابی نشان داد که اندازه ضخامت لایه پرلیت بیشترین تأثیر را بر بازده جداسازی دارد و با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ سانتی‌متر، بازده ۲/۵ برابر افزایش داشته است. مقدار بیشینه بازده جداسازی در سطح خلاء ۰/۲ bar، اندازه ذرات ۲۰ میکرون و ضخامت ۲ سانتی‌متر حاصل شد. مصرف انرژی در پرلیت ۶۰ میکرون برابر با ۰/۷۴ Wh در حالت بهینه قرار گرفت و در اندازه‌های درشت‌تر و ریزتر پرلیت انرژی مصرفی ۴/۵ برابری داشتند. یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر در ساخت سامانه جداسازی مواد زیستی توسط فیلتر غشایی تحت خلاء در مقیاس صنعتی کاربرد دارد.

۱- مقدمه

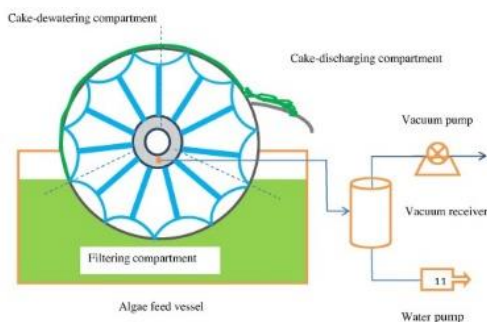


Figure 1: Rotary vacuum drum filter schematic [6].

فیلتر استوانه‌ای تحت خلاء دوار (RVDF)، ثبت شده در سال ۱۸۷۲، یکی از قدیمی ترین فیلترهایی است که در جداسازی مواد جامد و مایع صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیلتر استوانه‌ای دوار شامل یک فیلتر استوانه‌ای می‌باشد که توسط یک فیلتر یا پارچه پوشیده شده است. از اجزاء دیگر می‌توان به پمپ خلاء، مخزن نگهداری سیال و کمک فیلتر اشاره کرد [7]. فیلتر استوانه‌ای دوار در صنایع دارویی به منظور جمع آوری کربنات کلسیم، کربنات منیزیم، نشاسته و جداسازی میسلایوم برای ساخت آنتی بیوتیک‌ها کاربرد دارد. از سوی دیگر در صنایع غذایی برای جداسازی سیال‌هایی که مقدار قابل توجهی ماده جامد داشته و نیاز به فیلتر شدن مداوم دارند استفاده می‌شود [8]. از مشکلات فیلترهای تحت خلاء می‌توان به گرفتگی زودهنگام فیلتر و ته نشین شدن مواد جامد در مخزن سیال اشاره کرد [9]. متغیرهای مهندسی بسیاری در فیلترهای تحت خلاء نقش مهمی دارند اما در هر مطالعه موردی، بسته به سیال مورد نظر، ممکن است متفاوت باشد. از متغیرهای مهم می‌توان به ضخامت لایه کیک ایجاد شده، اندازه ذرات کمک فیلتر و مقدار خلاء برای انجام عمل فیلتراسیون اشاره کرد [8].

کمک فیلتر، یک لایه با ضخامت ثابت است و بر روی فیلتر قرار می‌گیرد که از انسداد زود هنگام فیلتر جلوگیری به عمل می‌آورد (شکل ۲). کمک فیلترها دارای تخلخل بالایی هستند، بنابراین جریان مایع را در اطراف ذرات خود تسهیل

جداسازی و بویژه جداسازی اجزای غیرهمگن یک سیال نه تنها به صورت کلی در فرآیندهای مهندسی اهمیت فراوانی دارد بلکه در حوزه صنایع غذایی و تجهیزات مربوط به آن، مبحث تعریف شده و مهمی به شمار می‌آید [1]. انواع جداسازی می‌تواند شامل مایع-جامد، جامد-گاز، جامد-جامد و... باشد. هر یک از این‌ها به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که می‌توان به جداسازی دورانی، ته‌نشینی، دیسکی، فشار مثبت و فیلتراسیون تحت خلاء اشاره کرد [2]. یکی از روش‌های جداسازی جامد-مایع، با عبور سوسپانسیون از یک محیط نفوذپذیر که ذرات جامد را حفظ می‌کند، حاصل می‌شود. بدین صورت که جریان سیال از طریق یک محیط با اعمال نیروی محرک مانند فشار مثبت، فشار منفی (خلاء)، گرانش یا گریز از مرکز حاصل می‌شود [3].

فیلتراسیون تحت خلاء فرآیندی است که طی آن سیال موجود از طریق یک محیط فیلتر کاغذی یا پارچه‌ای که ذرات جامد بر روی آن به جای مانده و تشکیل کیک می‌دهد به کمک فشار خلاء عبور می‌کند [4]. در فیلترهای تحت خلاء، هنگامی که سیال به محیط فیلتراسیون نزدیک می‌شود جامدات به صورت کیک روی سطح فیلتر قرار می‌گیرند، در حالی که مایع به کمک فشار منفی ایجاد شده به سمت پایین نفوذ می‌کند. هنگامی که لایه اولیه کیک تشکیل می‌شود، ساختار کیک به عنوان محیط فیلتر عمل می‌کند و با عبور سیال، جامدات بیشتری بر روی کیک رسوب کرده و به ضخامت آن می‌افزاید [5]. فرآیندهای بزرگ صنعتی به فیلترهای مداوم نیاز دارند. فیلترهای خلاء درام دوار، مانند آنچه در شکل (شکل ۱) نشان داده شده است، پرکاربردترین دستگاه‌های فیلتراسیون در صنعت هستند.

روش صنعتی برای استخراج پکتین به دلیل سهولت، استخراج با محلول‌های اسیدی در دماهای بالا است. به طور سنتی، پکتین در آب‌اسید در دمای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت با هم زدن مداوم استخراج می‌شود. استخراج پکتین به عوامل متعددی از جمله دما، مقدار pH، خواص حلال، نسبت جامد به حلال، مواد جامد خشک، اندازه ذرات و سرعت نفوذ بستگی دارد [17].

با توجه به کاربردهای ذکر شده برای پکتین، اهمیت روزافزون افزایش بهره‌وری در حوزه‌ی صنایع غذایی بویژه در موضوع بازیافت ماده مهمی همچون استخراج پکتین و از سویی عدم وجود گزارش‌های علمی در خصوص کاربرد فیلترهای تحت خلاء در جداسازی اینگونه سیالات انگیزه اجرای این پژوهش بوده است. در مقیاس صنعتی، جداسازی جامد از سیال با استفاده از ترکیب فیلترهای تحت خلاء و غشایی صورت می‌پذیرد. از سوی دیگر در حوزه‌ی جداسازی تحت خلاء درباره متغیرهای مهم که تاثیر فراوانی بر کیفیت و بهره‌وری داشته و ناخالصی سیال به شدت وابسته به آن‌ها است گزارشی مشاهده نشده. لذا، در این پژوهش بطور مشخص، بررسی متغیرهای مهم فیلتر تحت خلاء در جداسازی مواد فیبری از محلول اسیدی پکتین انجام شده است. متغیرهای وابسته شامل اندازه ذرات کمک فیلتر، اندازه ضخامت لایه کمک فیلتر و سطح خلاء فیلتر هستند که تاثیر همگی آنها بر متغیرهای وابسته تحقیق یعنی انرژی مصرفی، بازده تولید، دبی، و کیفیت جداسازی بررسی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش طراحی و ساخت سامانه فیلتر تحت خلاء

به منظور ساده سازی اجزا و اعمال سطوح متغیرهای وابسته تحقیق به یک سامانه فیلتر تحت خلاء آزمایشی و کوچک مقیاس به شرح زیر ساخته شد. نمودار روند نمای سامانه

کرده و سرعت فیلتراسیون را بهبود بخشیده و بدین شکل از انسداد فیلتر جلوگیری می‌شود [10].

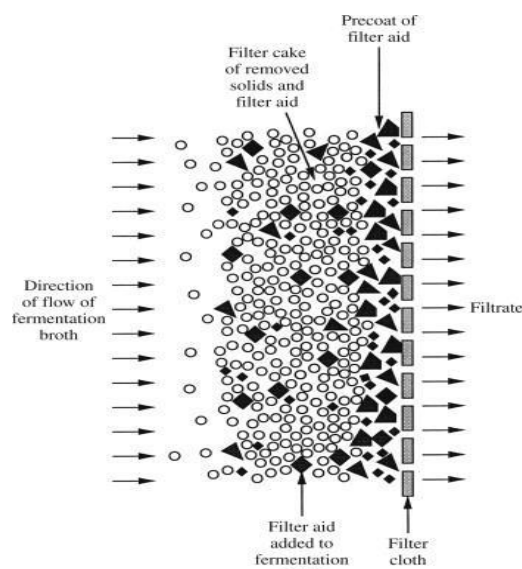


Figure 2: How Filter Assistance Operates [10].

پکتین یک ترکیب هیدروکلوئیدی اسیدی است که به عنوان افزودنی طبیعی در صنایع به ویژه در صنایع خوراکی، دارویی و پزشکی کاربردهای بسیاری دارد [11]. در صنعت غذا برای خاصیت ژل‌کنندگی، تثبیت‌کنندگی، ایجاد بافت، امولسیفایری، قوام دهنده‌گی و جایگزین چربی به کار برده می‌شود [12]. همچنین در پزشکی و داروسازی از آن به عنوان فیبر غذایی برای درمان مشکلات گوارشی بهره‌وری می‌گردد. بیشترین کاربرد پکتین در صنایع غذایی، استفاده از آن در تولید مرباها و ژله‌ها به عنوان یک ماده ایجاد کننده‌ی ژل و قوام دهنده است [13], [14]. پکتین به طور معمول در همه گیاهان موجود است اما مقدار و خواص شیمیایی آن بسته به گونه گیاهی، رقم، بلوغ، بخش گیاهی، بافت و شرایط رشد گیاه متفاوت است [15]. در رابطه با کاربردهای پزشکی، پکتین در پیشگیری از سرطان روده و کاهش کلسترول خون بسیار مفید است [16]. استخراج پکتین توسط روش‌های مختلفی صورت گرفته است.

نهایت برای جلوگیری از نشتی‌های احتمالی، چسب آکواریوم بکار برده شد. با توجه به اینکه مواد جامد موجود در سیال جداسازی انحلال ناپذیرند، بدیهی است که با گذشت زمان رسوب خواهند کرد. از این رو از یک هم زن مکانیکی بهره‌گیری شد.

به منظور اتصال پمپ خلاء و محفظه تحت خلاء از اتصالات نیوماتیک استفاده گردید. با توجه به بخش‌های مختلف ساخته شده و اتصال هر یک، سامانه جداسازی تحت خلاء در شکل (۵) نشان داده شده است. در این سامانه از قسمت‌های مختلف شاسی نگهدارنده به منظور نگاهداشت سامانه و پمپ خلاء به منظور ایجاد نیروی خلاء عمل فیلتراسیون و همچنین ۲ مخزن برای نگهداری و مخزن خلاء استفاده شده است.



Figure 5: Vacuum-built filter system

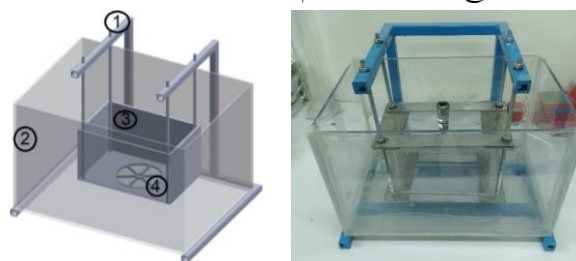
1: holding chassis, 2: fluid storage tank, 3: vacuum tank, 4: mechanical stirrer, 5:

and vacuum pump are listed in that order .

۲-۲- روش آماده کردن سیال فیلتراسیون

به منظور تهیه پودر پوست پرتقال، از بازار میوه و تره بار تهران ۴۰ کیلوگرم پرتقال تامسون تازه تهیه و پوست آن برای خشک کردن جدا شد. پوست پرتقال‌ها در اجاق برقی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۵ درجه سلسیوس خشک گردید. پوست‌های خشک شده توسط آسیاب پودر شده و به منظور یکسان سازی اندازه ذرات، از الک با مش شماره ۴۰ صاف شد. در نهایت پودر تهیه شده برای فرآیند

فیلتر دوار تحت خلاء در شکل ۳ قابل مشاهده است که در ادامه شرح داده می‌شود. به منظور تامین سطوح خلاء از یک پمپ خلاء بهره گرفته شد که به کمک یک شیر دروازه‌ای، در آن سطوح خلاء قابل تنظیم است.



(A) (B)

Figure 3: Vacuum-operated filter system.

A: software design was made, **B:** a test system was constructed.

1:holding chassis, 2:fluid storage tank, 3:vacuum tank, 4:storage valve for design templates, and holding chassis

به منظور بهره‌گیری از اندازه‌های متفاوت کمک فیلتر (پرلیت) برای جداسازی، پرلیت با اندازه مشخص و در سه سطح کمتر از ۲۰ میکرون، ۴۰ تا ۶۰ میکرون و ۶۰ تا ۸۰ میکرون بکار برده شد. همچنین متغیر میزان ضخامت لایه در سه سطح ۱، ۱/۵ و ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که به منظور اعمال دقیق این اندازه‌ها شابلون‌هایی مطابق با شکل ۴ ساخته و بکار گرفته شد.

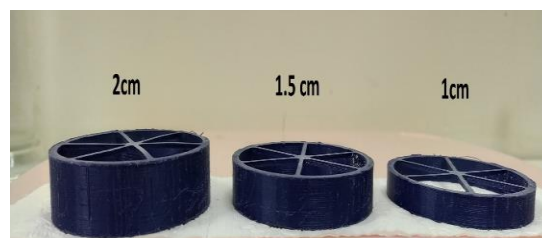


Figure 4: shows a view of three different stencil thicknesses, 2, 1.5, and 1 cm.

به منظور نگهداری سیال آماده شده و محفظه خلاء، دو مخزن در نرم افزار Solidworks 2016 طراحی و سپس با استفاده از ورق به جنس پلکسی گلاس ساخته شد. در

کمک فناوری لایه‌نشانی سه بعدی^۱ بهره برده شد. در گام بعدی، با تشکیل ضخامت مشخص از پرلیت، حجم معینی از سیال آماده شده برای آزمایش درون مخزن ریخته شد و با تعیین سطح خلاء مورد نظر، پمپ خلاء شروع به کار کرده و محلول مذکور از کمک فیلتر و فیلتر کاغذی عبور کرد و مدت زمان جداسازی ثبت گردید. در گام پایانی، محلول فیلتر شده به نسبت یک به سه اتانول زنی (۹۶ درصد) شد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید. سپس پکتین موجود در مخلوط آب و الکل که به صورت ابری شناور بود، به کمک سانتریفیوژ در سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه جداسازی گردید و در نهایت، پکتین بدست آمده در اجاق برقی به مدت ۶ ساعت خشک گردید. در این پژوهش اثر عوامل سطح خلاء (۰/۶ bar، ۰/۴، ۰/۲)، ضخامت لایه پرلیت (۲ cm، ۱/۵، ۱) و اندازه ذرات پرلیت (۱۰۰ micron، ۶۰، ۲۰) بر انرژی مصرفی، میزان دبی، بازده جداسازی و بازده استخراج پکتین مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۴- روش اندازه گیری انرژی مصرفی

به منظور اندازه گیری انرژی مصرفی هر آزمایش، به کمک یک پاور آنالایزر بار توان مصرفی در سطوح خلاء انتخابی ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۲ ثبت شد و با توجه به مدت زمان ثبت شده برای هر آزمایش، مصرف انرژی محاسبه شد.

۲-۵- روش اندازه گیری دبی تولید

با توجه به اینکه حجم محلول مورد نظر مشخص و قابل اندازه‌گیری بوده و از طرفی زمان فرآیند جداسازی ثبت شد، به آسانی متوسط دبی حجمی عبور یافته از رابطه (۱) محاسبه گردید.

استخراج، در دمای ۴- درجه سلسیوس درون یخچال نگهداری شد. پودر پرتقال به نسبت ۱ به ۲۵ با آب مقطر مخلوط گردید و pH محلول با استفاده از هیدروکلریک اسید به ۱/۷ رسانده شد. محلول آماده شده توسط همزن به مدت ۵۰ دقیقه در دمای بین ۸۰ تا ۸۲ درجه سلسیوس هم‌زنی گردید (شکل ۶). پس از تهیه محلول، نمونه ازنمایی پارچه‌ای عبور داده شده و در دمای اتاق سرد شد. سیال به‌دست آمده، ماده مورد آزمایش در این تحقیق است. در فرآیند استاندارد آزمایشگاهی به منظور جداسازی پالپ از سیال یک مرحله سانتریفیوژ انجام می‌شود و سپس به نسبت ۱ به ۳ اتانول زنی به منظور جداسازی پکتین از سیال انجام می‌شود که در تحقیق حاضر مرحله جداسازی توسط سانتریفیوژ به کمک فیلتر تحت خلاء صورت می‌گیرد.



Figure 6: A view of the sample solution preparation process using a stirrer.

۲-۳- نحوه فیلتراسیون به کمک سامانه فیلتر تحت خلاء

در گام نخست به منظور آماده سازی لایه کمک فیلتر، حجم مشخصی از آب مقطر و پرلیت درون مخزن ریخته شد. هنگامی که کمک فیلتر به ضخامت مورد نظر رسید، پمپ خاموش و ضخامت لایه پرلیت تنظیم گردید. به منظور تنظیم ضخامت لایه، از یک سازه سه بعدی ساخته شده به

اندازه گیری شد. با توجه به رابطه (۲) بازده جدا سازی

محاسبه شد.

$$Ra_f = \frac{m_t - m_i}{m_t} * 100 \quad (2)$$

در این رابطه:

Ra_f = بازده جداسازی (%)

m_t = مقدار ماده جامد محلول شاهد (g)

m_i = مقدار ماده جامد محلول فیلتر شده (g).

۲-۷- تحلیل آماری

تعداد آزمایش انجام شده ۱۷ عدد بوده است که ۵ تکرار برای نقطه مرکزی در نظر گرفته شد. در جدول ۱ تیمارهای اعمال شده در آزمایش برای تحلیل به روش سطح پاسخ و پاسخهای مربوطه نشان داده شده است.

$$Q = \frac{v}{t} \quad (1)$$

در این رابطه:

Q = دبی حجمی عبور یافته (mL/s)

v = حجم سیال (mL)

t = زمان (s).

۲-۶- روش اندازه گیری بازده جداسازی

حجم مشخصی از محلول شاهد برداشته و در فویل

الومینیومی شکل داده شده ریخته شد. سپس به مدت ۲۴

ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در اجاق برقی خشک

گردید. به طور مشابه برای محلول فیلتر شده نیز این

عملیات تکرار شد و در پایان توسط ترازو وزن ماده خشک

Table 1: treatment strategies used in the experiment for the response surface analysis

number	Pressure (bar)	Perlite particle size (micron)	Perlite layer thickness size (cm)
1	0.4	60	1.5
2	0.4	60	1.5
3	0.4	60	1.5
4	0.4	60	1.5
5	0.2	60	2
6	0.2	20	1.5
7	0.2	60	1
8	0.4	100	2
9	0.6	60	2
10	0.4	20	2
11	0.4	20	1
12	0.6	60	1
13	0.6	20	1.5
14	0.4	100	1

15	0.6	100	1.5
16	0.2	100	1.5
17	0.4	60	1.5

در این پژوهش به منظور تحلیل تاثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته، از نرم افزار Expert Design و روش Box- Behnken در روش کلی سطح پاسخ بهره گیری شد.

در جدول (۲) آورده شده است. یافته های این بررسی نشان داد که مدل معنی دار و عدم برازش معنی دار نشده است. بنابراین انتخاب مدل و تحلیل ها قابل استناد و معتبر است. اثر عوامل سطح خلاء و توان دوم اندازه ذرات پرلیت در سطح ۱٪ و اندازه ضخامت لایه پرلیت و توان دوم سطح خلاء و اندازه ضخامت لایه پرلیت در سطح احتمال ۵٪ معنی دار است. معنی داری اثرات نام برده بیانگر اهمیت و تأثیرگذاری متغیرهای مستقل انتخاب شده در این آزمایش است. در جدول ۲ اثر سطح خلاء با (A)، اندازه ذرات پرلیت (B) و اثر اندازه ضخامت لایه پرلیت با (C) نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجزیه واریانس داده های انرژی مصرفی توسط سامانه فیلتراسیون تحت خلاء

نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) داده های انرژی مصرفی

Table 2: variance analysis of the tested variables for energy consumption

source	df	Sum of squares	Mean squares	F-value	p-value
model	9	3.01	0.3343	26.93 ^a	0.0001
A- pressure	1	0.8902	0.8902	71.72 ^b	< 0.0001
B- perlite particle size	1	0.0701	0.0701	5.65 ^a	0.0491
C- Perlite layer thickness size	1	0.0714	0.0714	1.46 ^a	0.0476
A × B	1	0.0181	0.0181	1.08 ^{ns}	0.2668
A × C	1	0.0004	0.0004	0.0327 ^{ns}	0.8615
B × C	1	0.0169	0.0169	1.46 ^{ns}	0.2820
A × A	1	0.4919	0.4919	39.63 ^a	0.0004
B × B	1	1.33	1.33	106.96 ^b	<0.0001
C × C	1	0.0789	0.0789	6.35 ^a	0.0398
residual	7	0.0869	0.0124		
Lack of fit	3	0.0706	0.0235	5.77 ^{ns}	0.0617
Pure error	4	0.0163	0.0041		
Cor total	16	3.1			

^asignificant at the 5% probability level

^bsignificant at the 1% probability level

^{ns} not significant

با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ، مدل چند جمله‌ای درجه دوم کامل با ضریب تعیین ۹۷/۱۹ برای تخمین مقدار انرژی مصرفی، با تغییر در میزان مقادیر متغیرهای مستقل، به صورت کد شده انتخاب گردید. مدل واقعی پیشنهاد شده، یک تابع چند جمله‌ای درجه دوم به صورت رابطه (۳) است ($R^2=97/19$):

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} E = & 1.92 - 8.15 * A - 0.03 * B + 1.61 * C \\ & - 0.008 * A * B + 0.1 * A * C \\ & - 0.003 * B * C + 8.54 * A^2 \\ & + 0.0003 * B^2 - 0.55 * C^2 \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه متغیر E بیانگر انرژی مصرفی است و با توجه به نتایج مدل رگرسیونی، مدل پیشنهادی در پیش‌بینی روند مصرف انرژی با متغیرهای مستقل انتخابی معنی‌دار است. علامت مثبت هر عبارت نشان‌دهنده تأثیر هم‌افزایانه و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر منفی متغیر(ها) بر پاسخ است.

۳-۲- اثر متقابل متغیرهای مستقل بر انرژی مصرفی

در شکل ۷ نمودار سطح پاسخ متغیر وابسته (مصرف انرژی) به ازای تغییرات متغیرهای مستقل به صورت خطوط تراز دیده می‌شود. با توجه به شکل ۷-الف مشاهده می‌شود که کمینه انرژی مصرفی در سطح خلاء (۰/۴ bar) ارزیابی شده است. در کمینه سطح خلاء روند تغییرات انرژی مصرفی با افزایش اندازه ذرات پرلیت سهمی‌وار است و مقدار کمینه انرژی مصرفی در اندازه ۶۰ میکرون ذرات پرلیت حاصل شده است. در سطوح بیشینه و کمینه اندازه ذرات پرلیت، با افزایش سطح خلاء، ابتدا به شدت انرژی مصرفی کاهش می‌یابد و پس‌از آن روند تغییرات محسوس نیست. بدیهی است که با افزایش سطح خلاء، زمان عبور سیال (با حجم ثابت در نظر گرفته شده) کاهش پیدا می‌کند، از این رو انرژی مصرفی روند کاهشی را دنبال کرده است. از سوی دیگر در سطح میانی اندازه ذره پرلیت و کمینه سطح خلاء

با توجه به اینکه اندازه ذرات مناسب بوده است، روند فیلتراسیون به خوبی انجام شده و فیلتر دچار گرفتگی نشده است. بنابراین سطح انرژی مصرفی در این حالت کمتر از حالت‌های دیگر است. همچنین به تدریج با افزایش ضخامت لایه پرلیت در کمینه سطح خلاء، ابتدا انرژی مصرفی اندکی افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است (شکل ۷-ب). کاهش انرژی مصرفی در این حالت نشان‌دهنده آن است که در ضخامت‌های کمتر لایه پرلیت، با توجه به این مهم که کمک-فیلتر مقدار کمتری از مواد جامد سیال را جذب می‌کند، فیلتر سریع‌تر دچار گرفتگی شده و زمان فیلتراسیون افزایش پیدا می‌کند که افزایش انرژی مصرفی را به همراه خواهد داشت. این روند با افزایش ضخامت لایه کمک-فیلتر با جذب مواد جامد بیشتر، به عمل فیلتراسیون کمک کرده و زمان فرآیند کاهش پیدا کرده است که موجب روند نزولی مصرف انرژی است. از سویی دیگر، افزایش سطح خلاء موجب کاهش زمان فیلتراسیون شده که در نهایت منجر به روند کاهشی انرژی مصرفی شده است. در حالت‌های دیگر، روند تغییرات ناچیز است. همان‌گونه که شکل ۷-ج نشان می‌دهد، به‌طور کلی روند تغییرات انرژی مصرفی محسوس نیست. اما باید توجه داشت که روند تغییرات انرژی به ازای تغییر اندازه ذرات پرلیت سهمی‌وار است. زمانی که از پرلیت با اندازه ۲۰ میکرون استفاده شده است، ذرات جامد در سیال به سختی از کمک-فیلتر عبور کرده و موجب افزایش زمان فرآیند فیلتراسیون شده است. این در حالی است که استفاده از پرلیت با اندازه ۱۰۰ میکرون با توجه به عبور راحت‌تر ذرات جامد سیال جامد از خلل و فرج کمک-فیلتر، باعث گرفتگی سریع‌تر فیلتر شده و مجدد باعث افزایش زمان فرآیند فیلتراسیون و افزایش سطح انرژی مصرفی شده است. مانو هوتن و همکاران [18] در تحقیقی به منظور بررسی انرژی مصرفی در سامانه فیلتر تحت خلاء با بررسی سطوح خلاء bar ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۲ نشان دادند که تغییرات در میزان خلاء تأثیر

انرژی در سطح خلاء ۰/۲ bar تا ۰/۳ قرار دارد.

به سزایی بر مقدار انرژی مصرفی ندارد و مصرف بهینه

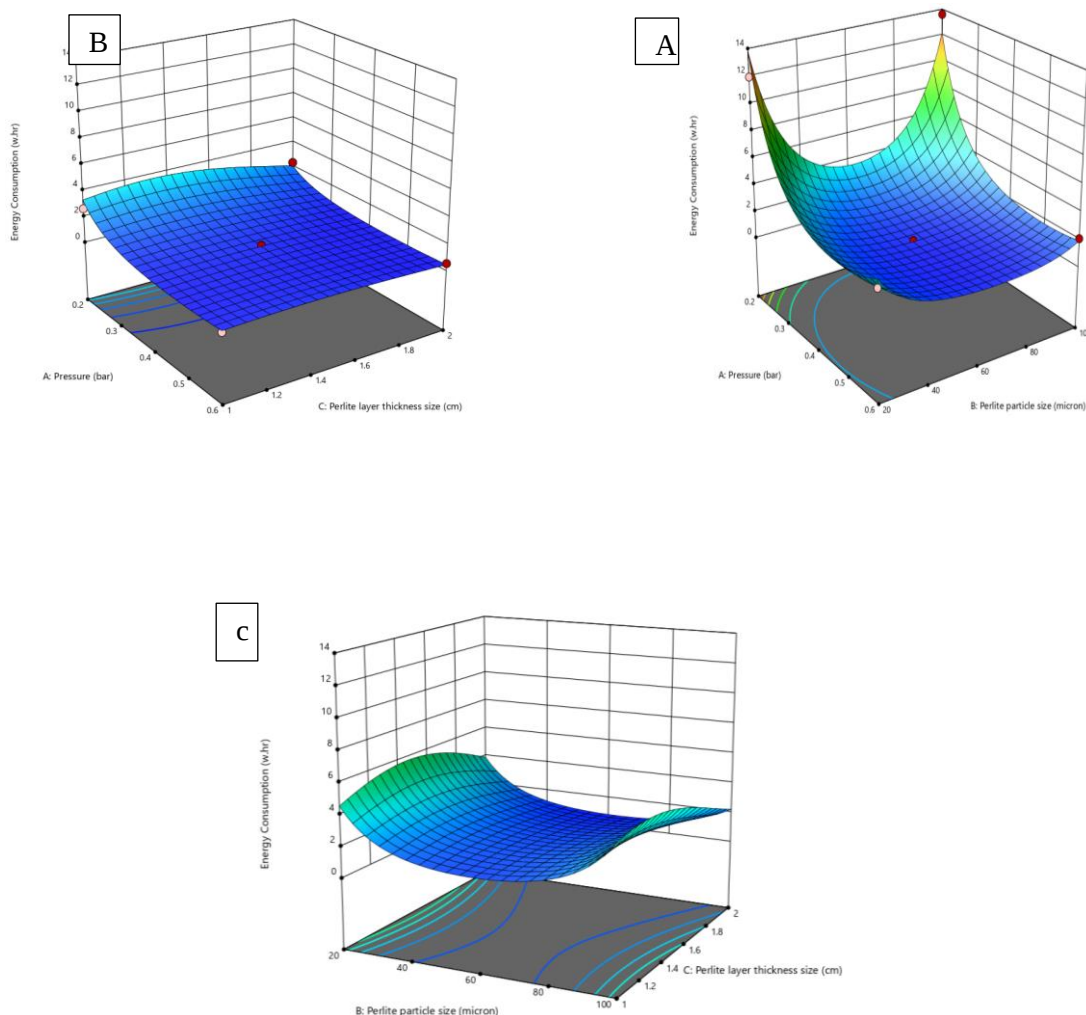


Figure 7: the effect of different variables on the energy consumption A. reaction of pressure and perlite particle size B. reaction of pressure and perlite layer thickness size C. reaction of perlite particle size and perlite layer thickness size

آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مدل معنی دار و عدم برازش معنی دار نشده است. بنابراین انتخاب مدل و تحلیل‌ها قابل استناد و معتبر است. اثر عامل‌های سطح خلاء و توان دوم سطح خلاء، اندازه ذرات پرلیت و اندازه ضخامت لایه پرلیت در سطح احتمال ۵٪ معنی دار است. معنی‌داری اثرات نام‌برده بیانگر اهمیت و تأثیرگذاری متغیرهای مستقل انتخاب‌شده در این آزمایش است. اثرات سطح خلاء با (A)، اندازه ذرات پرلیت (B) و اندازه

۳-۳- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) برای دبی

سیال

دبی سیال عبوری برابر است با حجم مشخصی از سیال که از مقطع فیلتر در واحد زمان عبور می‌کند. نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای مختلف بر دبی تولید در جدول (۳)

ضخامت لایه پرلیت با (C) در جدول ۳ نشان داده شده است.

Table 3: variance analysis of the tested variables for flow rate

source	df	Sum of squares	Mean squares	F-value	P-value
model	9	3.07	0.3414	17.96 ^a	0.0005
A-pressure	1	0.9039	0.9039	47.55 ^a	0.0002
B-perlite particle size	1	0.0196	0.0196	ns 1.03	0.3442
C- Perlite layer thickness size	1	0.0173	0.0173	ns 0.9102	0.3718
B × A	1	0.021	0.021	ns 1.1	0.3285
C × A	1	0.0001	0.0001	ns 0.0044	0.9488
C × B	1	0.0065	0.0065	ns 0.3415	0.5773
A × A	1	0.7255	0.7255	a 37.17	0.0005
B × B	1	1.22	1.22	b 64.03	0.0001<
C × C	1	0.1203	0.1203	a 6.33	0.0401
residual	7	0.1331	0.019		
Lack of fit	3	0.1103	0.0368	6.45 ^{ns}	0.0518
Pure error	4	0.0228	0.0057		
Cor total	16	3.21			

^asignificant at the 5% probability level

^bsignificant at the 1% probability level

^{ns} not significant

$$\begin{aligned} \log_{10}^q = & -1.28 + 9.51 * A + 0.03 * B - 2.04 * C \\ & + 0.009 * A * B - 0.46 * A \\ & * C + 0.002 * B * C - 10.38 \quad (4) \\ & * A^2 + 0.0003 * B^2 + 0.68 \\ & * C^2 \end{aligned}$$

با توجه به نتایج مدل رگرسیونی، مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی روند دبی با متغیرهای مستقل انتخابی معنی‌دار است. علامت مثبت هر عبارت نشان‌دهنده تأثیر هم‌افزایانه و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر منفی متغیر(ها) بر پاسخ است.

۳-۴- اثر متقابل متغیرهای مستقل بر دبی

با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ، مدل چندجمله‌ای درجه دوم کامل با ضریب تعیین ۹۵/۸۵ برای تخمین مقدار دبی، با تغییر در میزان مقادیر متغیرهای مستقل، به صورت کد شده انتخاب گردید. مدل واقعی پیشنهادشده، یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم به صورت رابطه (۴) است. ($R^2=95/85$):

در شکل ۸ نمودار سطح پاسخ متغیر وابسته (دبی) در برابر تغییرات سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت به دو صورت سه‌بعدی و خطوط تراز دیده می‌شود. با توجه به شکل ۸-الف که نمودار سطح پاسخ متغیر وابسته (دبی) در برابر تغییرات سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت را به صورت خطوط تراز نشان می‌دهد، در برابر یک سطح خلاء مشخص، با افزایش اندازه ذرات پرلیت، تغییرات دبی سهمی‌وار بوده و همچنین با افزایش سطح خلاء این روند شدت بیشتری دارد. به‌طور مشابه نیز با در نظر گرفتن یک اندازه مشخص ذره پرلیت، با افزایش سطح خلاء روند تغییرات متغیر وابسته سهمی‌وار است. بیشینه مقدار دبی حجمی (سیال عبور یافته از مقطع فیلتر)، در سطح خلاء 0.5 bar و اندازه 60 میکرون ذرات پرلیت حاصل شده است. در حالت‌های بیشینه و کمینه اندازه ذرات پرلیت، با توجه به اینکه مقطع فیلتر به‌سرعت دچار گرفتگی شده است یا به علت کوچک بودن ذرات کمک-فیلتر سیال به‌خوبی عبور پیدا نمی‌کند و کمک-فیلتر دچار گرفتگی شده مقدار متغیر وابسته در سطح پایین‌تری است. با توجه به دلایل بیان‌شده، حالت میانی اندازه ذرات پرلیت مناسب است و از طرف دیگر روند تغییرات سطح خلاء بر روی متغیر وابسته نشان می‌دهد که در بیشینه سطح خلاء، با عبور سریع‌تر سیال، امکان گرفتگی هم در کمک-فیلتر و هم در مقطع فیلتر افزایش یافته است. از این‌رو در سطح خلاء bar 0.6 کاهش دبی عبور یافته از مقطع فیلتر مشاهده شده است. بر پایه شکل ۸-ب، در سطح خلاء 0.2 bar با افزایش ضخامت لایه پرلیت، روند تغییرات متغیر وابسته اندک است اما به‌تدریج با افزایش سطح خلاء یک‌روند سهمی‌وار مشاهده شد. از سوی دیگر با در نظر گرفتن یک ضخامت مشخص از کمک-فیلتر، با افزایش سطح خلاء روند افزایشی کاهشی سهمی‌وار مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه

بیشینه مقدار دبی عبور یافته از مقطع فیلتر مطلوب است، این حالت در بیشینه ضخامت لایه کمک-فیلتر (2 cm) و سطح خلاء میانی (0.4 bar) حاصل شد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ضخامت لایه کمک-فیلتر، امکان گرفتگی ذرات جامد موجود در سیال بر روی کمک-فیلتر کاهش پیدا کرده است، لذا سطح بیشینه اندازه ذرات لایه پرلیت مطلوب است. همان‌گونه که شکل ۸-ج نشان می‌دهد، با افزایش روند متغیرهای مستقل، تغییرات متغیر وابسته (دبی) سهمی‌وار است. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد در اندازه ذرات پرلیت کوچک، تراکم بیشتر بوده و سیال به‌سختی از پرلیت عبور کرده است. از سوی دیگر، در بیشینه اندازه ذرات پرلیت، با افزایش خلل و فرج درون کمک-فیلتر، امکان گرفتگی سطح مقطع فیلتر افزایش پیدا کرده است و فرآیند فیلتراسیون به‌خوبی انجام نشده و متغیر وابسته کاهش یافته است. در حالت‌های بیشینه و کمینه اندازه ذرات پرلیت، روند تغییرات متغیر وابسته با افزایش اندازه ضخامت لایه پرلیت ناچیز است. از سوی دیگر در حالت‌های میانی اندازه ذرات پرلیت، با در نظر گرفتن یک اندازه مشخص، با افزایش اندازه ضخامت لایه پرلیت، متغیر وابسته روند سهمی‌وار را دنبال می‌کند. با توجه به اینکه بیشینه مقدار دبی سیال عبور یافته از سطح مقطع فیلتر مطلوب است، بیشینه اندازه ضخامت لایه پرلیت و حالت میانی اندازه ذرات پرلیت نقطه بهینه برای بیشینه متغیر وابسته است. گزارش پژوهشگران دیگر نشان می‌دهند که با افزایش فشار، سرعت فیلتراسیون افزایش یافته اما ارتباط بین فشار و میزان سیال عبور یافته از نوع خطی نیست [19]. در تحقیقی دیگر سیواکومار و همکاران [20] نشان دادند باگذشت زمان، مقدار سیال عبور یافته از مقطع فیلتر (سرعت فیلتراسیون) کاهش یافته است که بیانگر افزایش گرفتگی در سطح فیلتر است.

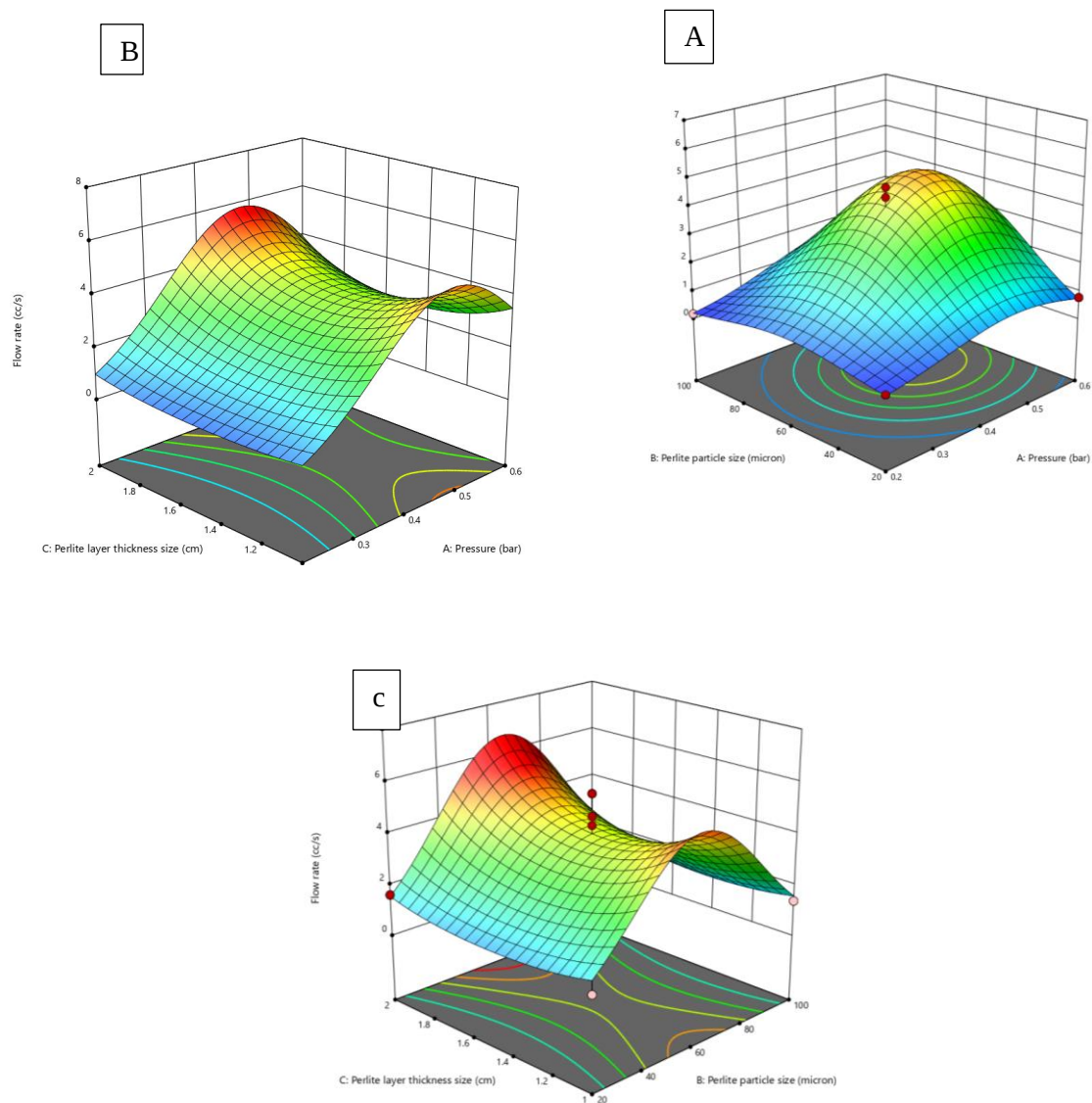


Figure 8: the effect of different variables on the flow rate A. reaction of pressure and perlite particle size B. reaction of pressure and perlite layer thickness size C. reaction of perlite particle size and perlite layer thickness size

متغیرهای متخلف بر روی بازده جداسازی در جدول (۴) آورده شده است. یافته‌های این بررسی نشان دادند که مدل معنی‌دار و عدم برازش معنی‌دار نشده است. بنابراین انتخاب مدل و تحلیل‌ها قابل استناد و معتبر است. اثر عامل‌های اندازه ذرات پرلیت، اندازه ضخامت لایه پرلیت و توان دوم اندازه ذرات پرلیت در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است همچنین اثر سطح خلاء، اثر متقابل سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت، سطح خلاء و اندازه ضخامت لایه پرلیت و

۳-۵- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) برای بازده جداسازی

بازده جداسازی عبارت است از نسبت اختلاف مقدار ماده جامد در حالت شاهد با مقدار ماده جامد جدا شده توسط سامانه فیلتر تحت خلاء بر مقدار ماده جامد جدا شده در حالت شاهد. نتایج تجزیه واریانس (ANOVA)، اثر

است. در جدول ۵ اثر سطح خلاء را با (A)، اثر اندازه ذرات پرلیت (B) و اثر اندازه ضخامت لایه پرلیت با (C) نشان داده شده است.

همچنین توان دوم سطح خلاء در سطح احتمال ۵٪ معنی دار هستند. معنی داری اثرهای نام برده بیانگر اهمیت و تأثیرگذاری متغیرهای مستقل انتخاب شده در این آزمایش

Table 4: variance analysis of the tested variables for extraction Yield

Source	df	Sum of squares	Mean squares	F-value	P-value
Model	9	3332.33	370.26	132.24 ^b	0.0001<
A-pressure	1	168.54	168.54	60.19 ^a	0.0001
B-perlite particle size	1	940.48	940.48	335.89 ^b	0.0001<
C- Perlite layer thickness size	1	1609.71	1609.71	^b 574.9	0.0001<
B × A	1	41.54	41.54	^a 14.84	0.0063
C × A	1	82.54	82.54	^a 29.48	0.0010
C × B	1	0.8742	0.8742	^{ns} 0.3122	0.5937
A × A	1	16.08	16.08	^a 6.00	0.0442
B × B	1	460.44	460.44	^b 164.44	0.0001<
C × C	1	5.36	5.36	^{ns} 1.91	0.2092
Residual	7	19.6	2.8		
Lack of fit	3	8.17	2.72	0.9531 ^{ns}	49.54
Pure error	4	11.43	2.86		
Cor total	16	3351.93			

^asignificant at the 5% probability level

^bsignificant at the 1% probability level

^{ns} not significant

چند جمله ای درجه دوم به صورت رابطه (۵) است. ($R^2=99/42$):

$$\begin{aligned}
 Ra_s = & 23.14 - 18.93 * A - 1.25 * B \\
 & + 58.67 * C + 0.4 * A * B \\
 & - 45.42 * A * C + 0.02 * B \\
 & * C + 49.93 * A^2 + +0.006 \\
 & * B^2 - 4.5 * C^2
 \end{aligned} \quad (5)$$

با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل چند جمله ای درجه دوم کامل با ضریب تعیین ۹۹/۴۲ درصد برای تخمین مقدار بازده جداسازی، با تغییر در میزان مقادیر متغیرهای مستقل، به صورت کد شده انتخاب گردید. مدل واقعی پیشنهاد شده، به منظور بررسی تاثیر متغیرهای انتخابی یک تابع

علامت مثبت هر عبارت نشان‌دهنده تأثیر هم‌افزایانه و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر منفی متغیر(ها) بر پاسخ است. دیده می‌شود که بیشینه تأثیرگذاری ناشی از ضخامت لایه پرلیت و کمینه اثر توان دوم اندازه سطح خلاء بوده است. با توجه به نتایج مدل رگرسیونی، مدل پیشنهادی در پیش‌بینی روند دبی با متغیرهای مستقل انتخابی معنی‌دار است.

۳-۶- اثر متقابل متغیرهای مستقل بر بازده جداسازی

در شکل ۹ نمودار سطح پاسخ متغیر وابسته (بازده استخراج) در برابر تغییرات سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت به صورت خطوط تراز دیده می‌شود. در شکل ۹-الف نمودار سطح پاسخ متغیر وابسته (بازده جداسازی) به ازای تغییرات سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت دیده می‌شود. با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که روند متغیر وابسته بازده جداسازی در بیشینه اندازه ذرات پرلیت با افزایش سطح خلاء محسوس نیست اما به تدریج با کاهش اندازه ذرات پرلیت، به ازای یک سطح خلاء مشخص روند تغییرات بازده جداسازی افزایشی است. قابل توجه است که هر چه اندازه ذرات پرلیت کوچک‌تر باشد مواد جامد بیشتری توسط کمک-فیلتر جذب‌شده بنابراین بازده جداسازی افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر نیز با افزایش سطح خلاء مواد جامد بیشتری از کمک-فیلتر عبور کرده در نتیجه بازده جداسازی در این حالت کمتر خواهد بود و بالعکس. در کمینه سطح خلاء، بازده جداسازی بیشینه است. بنابراین مقدار بیشینه بازده جداسازی در سطح خلاء (۰/۲ bar) و اندازه ذرات پرلیت (۲۰ micron) بیشینه

است. با توجه به شکل ۹-ب، به تدریج با افزایش اندازه ضخامت لایه پرلیت به ازای یک سطح خلاء مشخص، بازده جداسازی روند افزایشی دارد و این روند در سطوح خلاء کمتر شیب بیشتری دارد. با افزایش نیروی مکش در سطح خلاء بالاتر، مواد جامد بیشتری از کمک-فیلتر عبور کرده، بنابراین روند تغییرات متغیر وابسته بازده جداسازی کاهش می‌یابد. از سویی دیگر نیز باید توجه داشت در حالت کمینه اندازه ضخامت لایه پرلیت روند تغییرات محسوس نیست. همان‌گونه که شکل ۹-ج نشان می‌دهد، با افزایش اندازه ضخامت لایه کمک-فیلتر در برابر یک اندازه ذرات پرلیت مشخص، روند تغییرات متغیر وابسته بازده جداسازی افزایشی است. از سویی دیگر، روند تغییرات بازده جداسازی به ازای یک ضخامت لایه کمک-فیلتر مشخص روند سهموی وار دارد. با توجه باینکه مقدار بیشینه بازده جداسازی مطلوب است، این مقدار در کمینه اندازه ذرات پرلیت (۲۰ micron) و اندازه ضخامت لایه پرلیت (۲ cm) حاصل شد. از سویی دیگر خطوط هم‌تراز، رابطه سهموی وار اندازه ذرات پرلیت با متغیر بازده جداسازی را به خوبی نشان داده است. همچنین دوارته و همکاران [21] در تحقیقی باهدف بررسی مقایسه اثر اندازه فیلتر بر عملکرد جداسازی نشان دادند که اندازه ذرات کوچک‌تر فیلتر موجب جداسازی بهتر در فرآیند تصفیه می‌گردد. همچنین فیلا دیو و همکاران [22] نشان دادند که کاهش اندازه منافذ در فرآیند فیتراسیون غشایی موجب تشکیل یک لایه از کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها بر روی منافذ فیلتر می‌گردد که این نشان‌دهنده‌ی میزان جداسازی بیشتر در اندازه ذرات ریز است.

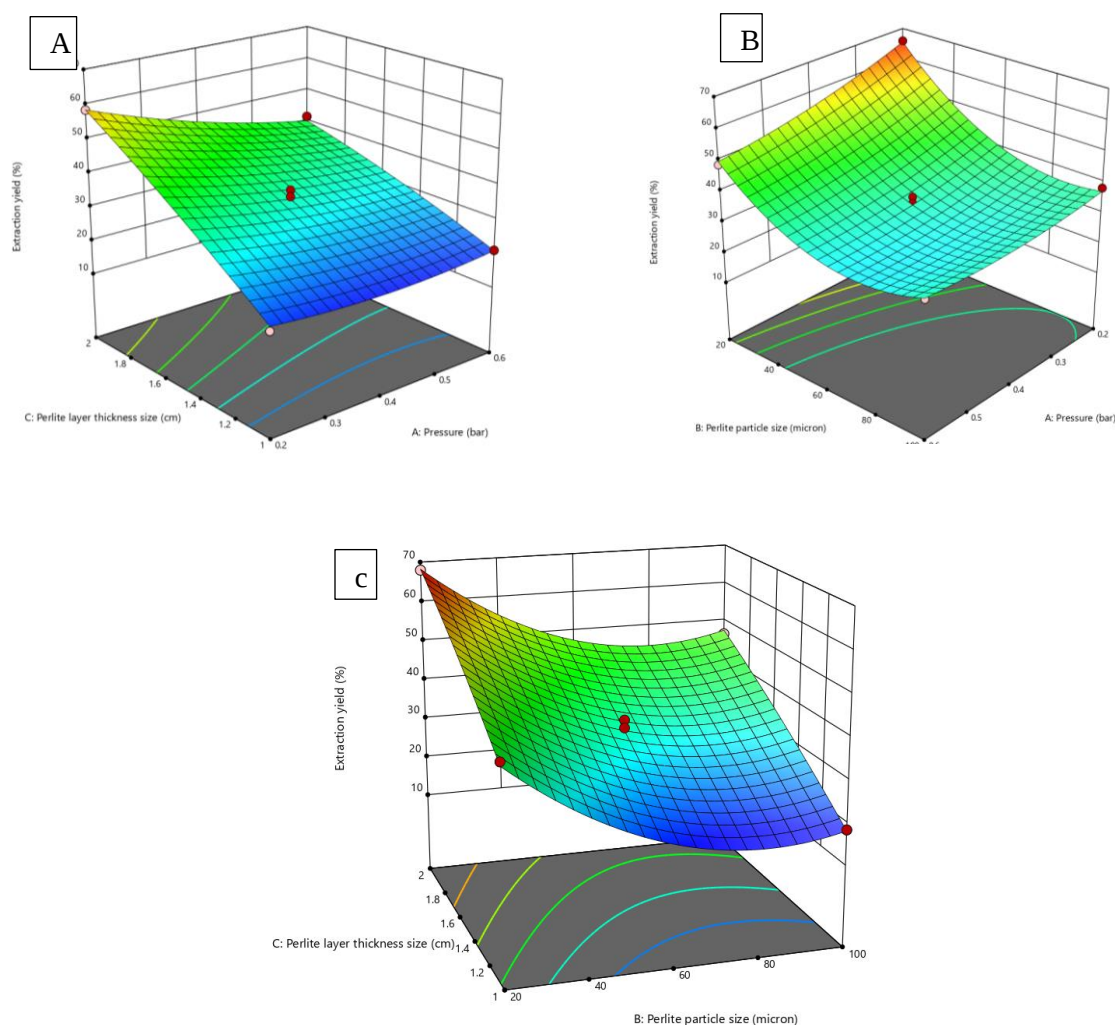


Figure 9: the effect of different variables on the extraction yield A. reaction of pressure and perlite particle size B. reaction of pressure and perlite layer thickness size C. reaction of perlite particle size and perlite layer thickness size

گرفته شد. شرایط بهینه، زمانی پدیدار می‌گردد که با کم‌ترین انرژی مصرفی، مقادیر بازده جداسازی و دبی بیشینه باشند.

Table 5: independent and objective programs boundary conditions to optimize the filtration process

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight
pressure	is in range	0.2	0.6	1	1
Perlite particle size	is in range	20	100	1	1
Perlite layer thickness size	is in range	1	2	1	1
Energy Consumption	minimize	0.54	13.6	1	1
Flow rate	maximize	0.17	5.62	1	1
Extraction yield	maximize	18.46	68	1	1

۷-۳- تعیین نقاط کمینه در گستره ارزیابی فرآیند فیلتراسیون به کمک سامانه فیلتر تحت خلاء

برای بهینه‌سازی فرآیند فیلتراسیون به کمک سامانه فیلتر تحت خلاء، باید میزان انرژی مصرفی به مقدار کمینه و دیگر متغیرهای وابسته به بیشینه مقدار خود برسند. بدین منظور مطابق جدول ۵ شرایط مرزی متغیرهای مستقل و هدف تعیین گردیدند. از قسمت‌های مهم بهینه‌سازی، وزن-دهی به متغیرهای تابع هدف است. با توجه به اهمیت یکسان متغیرهای مستقل، وزنی برابر با ۱ برای آن‌ها در نظر

متغیرهای مستقل که با توجه به اطلاعات پیشینه پژوهش انتخاب شد عبارت بودند از: سطح خلاء، اندازه ذرات پرلیت و ضخامت لایه پرلیت. تاثیر متغیرها بر انرژی مصرفی، بازده جداسازی و دبی به عنوان متغیرهای وابسته بررسی گردید. نتایج حاصل از پژوهش به طور خلاصه عبارتند از:

۱- سامانه فیلتراسیون غشایی تحت خلاء ساخته شده می تواند به عنوان جداسازی سودمند در فرایند تولید پکتین مورد استفاده قرار گیرد.

۲- متغیر وابسته بازده جداسازی، نشان دهنده خلوص سیال جدا شده است و ارزیابی نشان داد که میزان خلاء، اندازه ذرات پرلیت و اندازه ضخامت لایه پرلیت بر روند تغییرات آن مؤثر است. افزایش سطح خلاء باعث مکش بیشتر ناخالصی به درون سیال شده و بازده جداسازی را از ۴۱ درصد به ۳۰ درصد کاهش داده است. با افزایش ذرات از ۲۰ میکرون به ۶۰ میکرون، بازده از ۵۵ درصد به ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده است اما افزایش ذرات از ۶۰ میکرون به ۱۰۰ میکرون تأثیر معناداری بر بازده جداسازی ندارد. اندازه ضخامت لایه پرلیت بیشترین تأثیر را بر بازده جداسازی دارد و با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ سانتی متر، بازده ۲/۵ برابر افزایش داشته است. مقدار بیشینه بازده جداسازی در سطح خلاء ۰/۲ bar، اندازه ذرات ۲۰ میکرون و ضخامت ۲ سانتی متر حاصل شد.

۳- سطح خلاء و اندازه ذرات پرلیت بر روند تغییرات دبی سیال مؤثر است. با افزایش سطح خلاء از ۰/۲ bar تا ۰/۴ bar میزان دبی ۶/۵ برابر افزایش داشته است اما با افزایش بیشتر خلاء، دبی کاهش نشان می دهد. این روند در مورد اندازه ذرات پرلیت نیز دیده شد که نشان دهنده گرفتگی فیلتر و کاهش دبی در سطح خلاء ۰/۶ bar و اندازه پرلیت ۱۰۰ میکرون است.

۴- ارزیابی انرژی مصرفی سامانه فیلتراسیون نشان داد که متغیرهای مؤثر بر مصرف انرژی عبارتند از میزان خلاء و

نقطه بهینه فرایند فیلتراسیون و جداسازی پکتین در جدول ۶ نشان داده شده است. شرایط بهینه در سطح خلاء ۰/۴ bar، اندازه پرلیت ۶۰ micron و ضخامت لایه پرلیت ۲ cm با روش RSM توسط رایانه به دست آمده است.

Table 6: optimum level of independent variables for Vacuum Membrane Filtering system

number	pressure (bar)	Perlite particle size (micron)	Perlite layer thickness size (cm)	Energy consumption (Wh)	Flow rate (ml/s)	Extraction yield (%)
1	0.379	56.174	2	0.498	5.865	50.216
2	0.380	55.798	1.999	0.499	5.864	50.257
3	0.380	55.857	1.999	0.499	5.865	50.240
4	0.383	55.188	1.995	0.500	5.864	50.220
5	0.392	53.352	1.983	0.503	5.864	50.052

در انتها نقطه بهینه پیشنهادی توسط رایانه، به صورت تجربی در ۳ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. میانگین متغیرهای وابسته به دست آمده با وجود منابع خطا، به مقدار رابطه تجربی نزدیک بوده است. مقادیر ثبت شده با اعمال شرایط بهینه به ترتیب برابر است با: انرژی مصرفی ۰/۵۴ Wh، دبی ۵/۳ میلی لیتر بر ثانیه و بازده جداسازی ۵۴/۲ درصد. مقادیر به دست آمده توسط رابطه تجربی، خطای قابل قبولی (۸ درصد) نسبت به میزان مقدار پیش بینی شده توسط مدل (ردیف ۱ جدول ۶) را نشان می دهد که این امر حاکی از انتخاب صحیح مدل و جواب مناسب آن برای داده ها است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت پکتین در صنایع مختلف، یک سامانه فیلتراسیون تحت خلاء برای جداسازی پکتین از سیال ساخته شد و در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت.

- [11] J. Milani and G. Maleki, "Hydrocolloids in food industry," *Food Ind. Process. Equip.*, vol. 2, pp. 2–37, 2012.
- [12] E. D. Nguémazong, S. Christiaens, A. Shpigelman, A. Van Loey, and M. Hendrickx, "The emulsifying and emulsion-stabilizing properties of pectin: A review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 14, no. 6, pp. 705–718, 2015.
- [13] A. N. Grassino, J. Halambek, S. Djaković, S. R. Brnčić, M. Dent, and Z. Grabarić, "Utilization of tomato peel waste from canning factory as a potential source for pectin production and application as tin corrosion inhibitor," *Food Hydrocoll.*, vol. 52, pp. 265–274, 2016.
- [14] J. P. Maran, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and R. Sridhar, "Microwave assisted extraction of pectin from waste Citrullus lanatus fruit rinds," *Carbohydr. Polym.*, vol. 101, pp. 786–791, 2014.
- [15] D. R. Bagal-Kestwal, M. H. Pan, and B. Chiang, "Properties and applications of gelatin, pectin, and carrageenan gels," *Bio monomers green Polym. Compos. Mater.*, pp. 117–140, 2019.
- [16] L. Leclerc, P. Van Cutsem, and C. Michiels, "Anti-cancer activities of pH-or heat-modified pectin," *Front. Pharmacol.*, vol. 4, p. 128, 2013.
- [17] R. Minjares-Fuentes, A. Femenia, M. C. Garau, J. A. Meza-Velázquez, S. Simal, and C. Rosselló, "Ultrasound-assisted extraction of pectins from grape pomace using citric acid: A response surface methodology approach," *Carbohydr. Polym.*, vol. 106, no. 1, pp. 179–189, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.02.013.
- [18] M. Huttunen *et al.*, "Specific energy consumption of vacuum filtration: Experimental evaluation using a pilot-scale horizontal belt filter," *Dry. Technol.*, 2019.
- [19] J. Hammond, M. Brennan, and A. Price, "The control of microbial spoilage of beer," *J. Inst. Brew.*, vol. 105, no. 2, pp. 113–120, 1999.
- [20] T. Sivakumar, G. Vijayaraghavan, and A. V. Kumar, "Enhancing the performance of rotary vacuum drum filter," *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 41–47, 2011.
- [21] F. L. Duarte, L. Coimbra, and M. Baleiras-Couto, "Filter media comparison for the removal of *Brettanomyces bruxellensis* from wine," *Am. J. Enol. Vitic.*, vol. 68, no. 4, pp. 504–508, 2017.
- [22] L. Fillaudeau and H. Carrère, "Yeast cells, beer composition and mean pore diameter impacts on fouling and retention during cross-flow filtration of beer with ceramic membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 196, no. 1, pp. 39–57, 2002, doi: 10.1016/S0376-7388(01)00568-3.
- اندازه ذرات پرلیت. با افزایش سطح خلاء از ۰/۲ bar به ۰/۶ bar انرژی مصرفی ۵ برابر کاهش پیدا کرده است. مصرف انرژی در پرلیت ۶۰ میکرون برابر با ۰/۷۴ Wh در حالت بهینه قرار گرفت و اندازه‌های درشت‌تر و ریزتر پرلیت، دارای انرژی مصرفی ۴/۵ برابر بودند.
- ۵- شرایط بهینه در سطح خلاء ۰/۴bar، اندازه پرلیت ۶۰micron و ضخامت لایه پرلیت ۲cm با روش RSM توسط رایانه به‌دست‌آمده است.
- ۵- منابع
- [1] G. R. Pesch and F. Du, "A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles," *Electrophoresis*, vol. 42, no. 1–2, pp. 134–152, 2021.
- [2] S. R. Rao, *Surface chemistry of froth flotation: Volume 1: Fundamentals*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] N. Uduman, Y. Qi, M. K. Danquah, G. M. Forde, and A. Hoadley, "Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels," *J. Renew. Sustain. energy*, vol. 2, no. 1, p. 12701, 2010.
- [4] N. P. Cheremisinoff, "Industrial liquid filtration equipment," in *Fibrous filter media*, Elsevier, 2017, pp. 27–50.
- [5] R. Wakeman and S. Tarleton, *Solid/liquid separation: principles of industrial filtration*. Elsevier, 2005.
- [6] P. Shao, K. Darcovich, T. McCracken, G. Ordorica-Garcia, M. Reith, and S. O'Leary, "Algae-dewatering using rotary drum vacuum filters: Process modeling, simulation and techno-economics," *Chem. Eng. J.*, vol. 268, pp. 67–75, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.029.
- [7] D. Purchas and K. Sutherland, *Handbook of filter media*. Elsevier, 2002.
- [8] L. Svarovsky, *Solid-liquid separation*. Elsevier, 2000.
- [9] V. Jadwani, "Development of a Method to Prepare a Test Fluid with Soft Particles in Biodiesel Fuel Blends." 2020.
- [10] P. M. Doran, "Unit operations," *Bioprocess Eng. Princ.*, pp. 445–595, 2013.



Scientific Research

A Survey of Effective Parameters in Biomass Separation Using Vacuum Membrane Filtering: A Case Study of Pectin Acidic Solution

Shoaib Gholami¹, Saeid Minaei^{2*}, Alireza Mahdavian³

- 1- MSc, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran
- 2- Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran
- 3- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran

ABSTRACT

ARTICLE INFO

Pectin, which is made from citrus peel and waste, is one of the most commonly used compounds in the food industry. For large scale production, a combination of membrane-vacuum filtering has been suggested as an alternative to traditional methods of purifying the acidic solution for pectin extraction. This study investigates the main factors involved in membrane filtering system for separation of fibrous materials from an acidic pectin solution under vacuum. These factors which include: filter-aid-particle size, amount of filter-aid (perlite) added to the solution, and the vacuum level, affect, separation quality, volumetric flow rate, and energy consumption. A vacuum separation device was developed for this purpose in order to separate the fibrous material dissolved in solution. The independent variables were examined at three levels, the data were analyzed, and the optimum value for each variable was determined using the response surface method (RSM). Results revealed that increasing the vacuum level from 0.2 to 0.4 bar increases the flow-rate 6.5 folds, while, further increase in the vacuum level decreases the flow-rate. This indicates clogging of the paper filter and decreased flow-rate at vacuum level of 0.6 bar and perlite particle size of 100 microns. The evaluation results showed that thickness of the perlite layer has the greatest effect on the separation efficiency and when increased from 1 to 2 cm, increases the efficiency 2.5 folds. The maximum value of separation efficiency was obtained at a vacuum level of 0.2 bar, particle size of 20 microns and perlite thickness of 2 cm. The energy consumption of 60-micron perlite was 0.74 Wh in the optimal state, and the larger and smaller sizes of perlite had 4.5 times the energy consumption. These findings are applicable in the industrial scale implementation of a biomaterial separation system using vacuum membrane filtering.

Article History:

Received: 2022/9/19

Accepted: 2022/11/19

Keywords:

Extraction,
Yield,
Energy Consumption,
Orange Peel,
Perlite

DOI: 10.22034/FSCT.20.138.54

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.138.6.8

*Corresponding Author E-Mail:
minaee@modares.ac.ir