

مدل سازی عملکرد تلمبه پریستالتیک در فلوتاسیون ستونی با استفاده از روش طراحی فاکتوریل آزمایش‌ها

سید ضیالدین شفاei تنکابنیⁱ؛ محمد کُرⁱⁱ؛ فرامرز دولتیⁱⁱⁱ؛ رضا کاکاییⁱⁱⁱ

چکیده

در فلوتاسیون ستونی گاهی ضروری است تا جریان پالپ ورودی با نرخ جریان کم تا ارتفاع زیاد منتقل شود. در تلمبه‌های معمولی، به دلیل وابستگی سطح ایستایی فشاری به نرخ جریان پمپاژ، دست یابی به این امر دشوار است. لذا در عملیاتی که تنظیم نرخ جریان بصورت مستقل از ایستایی فشاری و لزجت سیال مد نظر باشد، از تلمبه‌های پریستالتیک بجای تلمبه‌های معمولی استفاده می‌شود. در مقاله حاضر رفتار تلمبه پریستالتیک در شرایط اعمال تغییرات بر ایستایی فشاری و نوع سیال، به روش طراحی آزمایش‌ها و با استفاده از نرم افزار طراحی هوشمند مطالعه شده است. در این آزمایش‌ها متغیرهای سرعت چرخش موتور تلمبه و درجه تنظیم ایستایی فشاری به عنوان متغیرهای کمی، نوع سیال به عنوان متغیر کیفی و نرخ جریان بر حسب لیتر بر دقیقه به عنوان پاسخ انتخاب شد. از نظر ریاضی، مدل کوادراتیک به عنوان مناسب‌ترین مدل بر آزمایش‌ها برازش شد. تحلیل مانده‌ها برازش مطلوب مدل بر آزمایش‌ها را نشان می‌داد. تحلیل داده‌ها نشان داد که تنها عامل سرعت دور موتور تأثیر معنی‌دار بر میزان نرخ جریان داشت و عوامل درجه تنظیم ایستایی فشاری و نوع سیال (ویسکوزیته آن) در پاسخ بی اهمیت بود.

کلمات کلیدی

تلمبه پریستالتیک، فلوتاسیون ستونی، طراحی آماری آزمایش‌ها، نرم افزار طراحی هوشمند.

Modeling of a Peristaltic Pump Function in Column Flotation Using Statistical Design of Experiments

Sied Ziaedin Shafaei Tonkaboni; Mohammad Kor; Faramarz Doulati; Reza kakaie

ABSTRACT

In mineral processing plants, particularly in column flotation, the pulp flow is sometimes necessary to be sent up to the highest level in plant circuit with a low flow rate. This could not be achieved well by normal pumps due to the dependence of pressure head to the rate of pulp flow. On the other hand, the peristaltic pumps work independent of the pulp pressure head and its viscosity. This paper investigates the function and the behavior of peristaltic pumps installed on a pilot column flotation against the changes of pressure head and the type of pulp. To determine the mathematical model describing the pump behavior, a statistical experiment approach using a Design Expert software was used. In these experiments, the motor RPM and pressure head were selected as quantitative variables, Pulp type was chosen as qualitative variable and pulp flow rate was considered as response. The results show that a Quadratic model is the most appropriate model governing the pump behavior. Residual and sensitivity analyses show a close agreement between the model and experiments. These analyses also show that the motor RPM had a meaningful effect on the rate of pulp flow. The variation of pressure head and fluid type and its viscosity did not have a considerable effect on the response.

ⁱ دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن و ژئوفیزیک: kaveh_shafaei@yahoo.com

ⁱⁱ کارشناس ارشد اکتشاف معدن - دانشگاه صنعتی شاهرود.

ⁱⁱⁱ استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن و ژئوفیزیک.

KEYWORDS

Peristaltic pump, Column flotation, Statistical design of experiments, Design Expert.

۱- مقدمه

قسمت، مشخص کننده میزان ایستایی فشاری و مکشی را مشخص میکند که از عدد ۱ تا ۵ مدرج شده است. هنگامی که نشانگر بر روی عدد ۳ تنظیم شده باشد، نشان‌دهنده شرایط کاری نرمال بوده و روی عدد ۵ تلمبه بیشترین میزان فشار و یا مکش را تولید می‌کند. قسمت دوم که روی دراپور تلمبه نصب شده به منظور تنظیم سرعت چرخش تلمبه بوده که از ۲۰ تا ۶۵۰ دور در دقیقه قابل تغییر است و از عدد ۰ تا ۱۰ نیز مدرج شده است [۴].

ارزیابی تأثیر عوامل مختلف در یک فرآیند به دو روش عام قابل انجام است. در روش اول که به یک عامل در هر زمان موسوم است، برای ارزیابی تغییرات پاسخ سیستم در هر زمان تنها یک عامل را تغییر داده و بقیه عوامل را ثابت نگه می‌دارد. در روش دوم با استفاده از طرق مختلف طراحی آماری آزمایش‌ها، عوامل مختلف در قالب طرح به صورت هم‌زمان تغییر کرده و پاسخ‌ها نیز به صورت آماری مورد تحلیل قرار می‌گیرد. از مزیت‌های روش دوم امکان بررسی تأثیر متقابل بین متغیرها نسبت به پاسخ فرآیند، افزایش قدرت تحلیل و تفسیر نتایج، کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای تحلیل آماری و مدل سازی فرآیند است. اجرای این روش منجر به کاهش چشمگیر در هزینه‌ها می‌شود [۶، ۷].

در تحقیق حاضر طراحی و تحلیل آزمایش‌ها توسط بسته نرم افزاری طراحی هوشمند صورت گرفته و تعداد ۳۶ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل کامل انجام گردید. در این آزمایش‌ها سه عامل درجه سرعت چرخش موتور، درجه ایستایی فشاری و نوع سیال انتخاب به عنوان عوامل قابل کنترل و نرخ جریان سیال بر حسب لیتر در دقیقه به عنوان پاسخ آزمایش‌ها انتخاب شد. جدول ۱ عوامل و سطوح مختلف مربوط به طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

بسیاری از صنایع جریانی با نرخ جریان ثابت از سیال نیاز دارد که این جریان مستقل از فشار پالپ ورودی به درون سلول‌ها باشد. به طور نمونه، در عملیات فلوتاسیون ستونی با ارتفاع ستون زیاد (۶ الی ۱۲ متر)، برای تأمین زمان ماند لازم برای شناورسازی، باردهی با نرخ جریان کم انجام می‌شود. نرخ جریان کم پالپ حتی در زمانی که ورودی پالپ به سلول ثابت فرض شود، می‌بایست تا ارتفاع زیادی در ستون بالا رود. برقراری این شرایط با استفاده از تلمبه‌های معمولی غیر ممکن است. در تلمبه‌های معمولی با تغییر ایستایی سیال، میزان نرخ جریان نیز تغییر می‌کند زیرا ایستایی فشاری به سرعت چرخش دور موتور در تلمبه معمولی وابسته است. در نتیجه در مواردی که با تغییر ایستایی فشاری (ارتفاع‌های مختلف سیال) نرخ ثابت جریان مورد نیاز باشد، با تلمبه‌های معمولی نمی‌توان به راحتی به این هدف رسید. مشکل دیگر تلمبه‌های معمولی این است که حتی در ایستایی فشاری ثابت نیز با تغییر نوع سیال، نرخ جریان تغییر می‌کند. برای رفع این مشکلات امروزه از تلمبه‌های پریستالتیک^۱ به جای تلمبه‌های معمولی استفاده می‌شود [۱، ۲ و ۳].

در این مقاله نحوه رفتار یک تلمبه پریستالتیک، در هنگام اعمال تغییرات بر سرعت چرخش موتور، ایستایی فشاری و نوع سیال با استفاده از روش فاکتوریل کامل در طراحی آماری آزمایش‌ها^۲ بررسی می‌شود.

۲- طراحی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها توسط تلمبه پریستالتیک با دراپور (MASTERFLEX I/P) مدل (NEMA 7591-10) انجام شده است. شرایط کاری تلمبه در دو قسمت قابل تنظیم است. یک

جدول (۱): عوامل و سطوح مختلف مربوط به طراحی آزمایش‌ها

عوامل						سطوح		
A	درجه سرعت چرخش موتور	۳	۴	۵	۶	۷	۸	
B	درجه ایستایی فشاری	۲	۲.۵			۴		
C	نوع سیال	آب			پالپ ۱۰٪ جامد زغال			

تحت عنوان عامل B در سه سطح مشخص شده که نمایان گر درجات مختلف، تنظیم ایستایی فشاری در تلمبه پریستالتیک است، و نوع سیال نیز تحت عنوان عامل C از دو نوع سیال مختلف (آب و پالپی شامل ۱۰٪ زغال) در آزمایش‌ها استفاده

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان سرعت چرخش موتور به عنوان عامل A در ۶ سطح تغییر داده شده و درجات مختلف سرعت چرخش تلمبه بر اساس درجه بندی است که در روی دراپور تلمبه قرار دارد. درجه ایستایی فشاری نیز



شد. مطابق طرح فاکتوریل کامل آزمایش‌ها، براساس جدول ۱ تصادفی، آزمایش‌ها به طور تصادفی انجام گردید. جدول ۲ تعداد ۳۶ آزمایش انجام گرفت که جهت حذف خطاهای شرایط این آزمایش‌ها و پاسخ سیستم را نشان می‌دهد.

جدول (۲): شرایط آزمایش و پاسخ‌ها

ترتیب استاندارد آزمایش‌ها	ترتیب انجام آزمایش‌ها	عامل اول A: سرعت چرخش موتور درجه	عامل دوم B: ایستایی فشاری درجه	عامل سوم C: سیال نوع	پاسخ نرخ جریان لیتر بر دقیقه
۲۲	۱	۸	۲	پالپ	۶۰۱
۹	۲	۶	۳	پالپ	۴۴۴
۲۷	۳	۴	۴	پالپ	۲۷۳
۱۷	۴	۴	۳۵	پالپ	۲۷۵
۳۵	۵	۸	۴	آب	۶
۲۴	۶	۸	۳۵	پالپ	۵۹۹
۱۰	۷	۷	۳	پالپ	۵۲۷
۲۲	۸	۴	۴	آب	۲۷۴
۱۶	۹	۳	۳۵	پالپ	۲۰۱
۱۳	۱۰	۵	۳۵	آب	۳۵۷
۵	۱۱	۷	۳	آب	۵۲۷
۴	۱۲	۶	۲	آب	۴۴۶
۱۲	۱۳	۴	۳۵	آب	۲۷۴
۶	۱۴	۳	۲	پالپ	۲۰۱
۲۰	۱۵	۷	۳۵	پالپ	۵۲۸
۲۱	۱۶	۲	۴	آب	۲
۳	۱۷	۵	۲	آب	۳۵۶
۱۵	۱۸	۷	۳۵	آب	۵۲۷
۷	۱۹	۴	۳	پالپ	۲۷۳
۳۳	۲۰	۸	۳۵	آب	۶
۱۴	۲۱	۶	۳۵	آب	۴۴۴
۱	۲۲	۳	۲	آب	۲۰۱
۲۵	۲۳	۷	۴	آب	۵۲۶
۲۶	۲۴	۳	۴	پالپ	۲
۱۸	۲۵	۵	۳۵	پالپ	۳۵۵
۲۹	۲۶	۶	۴	پالپ	۴۴۵
۳۶	۲۷	۸	۴	پالپ	۵۹۹
۲۴	۲۸	۶	۴	آب	۴۴۴
۱۱	۲۹	۳	۳۵	آب	۱۹۹
۲۳	۳۰	۵	۴	آب	۳۵۵
۳۰	۳۱	۷	۴	پالپ	۵۲۹
۲۸	۳۲	۵	۴	پالپ	۳۵۶
۸	۳۳	۵	۳	پالپ	۳۵۶
۱۹	۳۴	۶	۳۵	پالپ	۴۴۴
۳۱	۳۵	۸	۳	آب	۶۰۱
۲	۳۶	۴	۳	آب	۲۷۱

مفهوم برازش مناسب تر است. بدین ترتیب با توجه به جدول ۳، دو مدل خطی^۱ و کوادراتیک^۲ دارای میزان P- کمتری نسبت به دیگر پارامترها هستند.

در جدول ۴ هر چه مقادیر ضریب هم بستگی (R^2) محاسبه شده به یکدیگر نزدیکتر باشد وضعیت مدل برازش شده بهتر است. از طرفی ضریب همبستگی نزدیک ۱ برای مدل، نشان دهنده برازش خوب آن مدل بر آزمایشها است. ستون PRESS^۸ نشان دهنده مجموع مربعات خطای تخمین (اختلاف مقادیر واقعی و تخمین زده شده توسط مدل) برای هر مدل است. مدلی که برازش خوبی بر آزمایشها داشته باشد به دلیل نزدیک بودن مقادیر واقعی و تخمین زده شده توسط مدل، مقدار عدد PRESS آن کوچکتر خواهد بود. عبارت الیاز^۱ برای مدل کوپیک^۱ بدین مفهوم است که تعداد آزمایشهای کافی برای برازش این مدل انجام نشده است.

جدول (۳): بررسی وضعیت برازش مدل های مختلف نسبت به یک دیگر

میزان P- احتمال >F	میزان F-	میانگین مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل ها نسبت به یک دیگر
		۶۲۶۵۱۲۸	۱	۶۲۶۵۱۲۸	میانگین نسبت به کل
کم تر از ۰.۰۰۰۱	۴۶۱۸۶۹	۱۶۸۵۹۴	۳	۵۰۵۷۸۱	خطی نسبت به میانگین
۰.۹۹۹۹	۰.۰۰۱۰۹	۰.۰۰۰۰۰۴	۳	۰.۰۰۰۰۱	2FI نسبت به خطی
کم تر از ۰.۰۰۰۱	۷۱۱۵.۱۶	۰.۰۵۸۲۷	۲	۰.۱۱۶۵۵	کوادراتیک نسبت به 2FI
۰.۸۶۶۹	۰.۰۴۰۵۷۴	۰.۰۰۰۰۰۴	۶	۰.۰۰۰۰۲	کوپیک نسبت به کوادراتیک
		۰.۰۰۰۰۱	۲۱	۰.۰۰۰۰۲	باقی مانده
		۱۸۸۴۰۵	۲۶	۶۷۸۲۵۹۷	کل

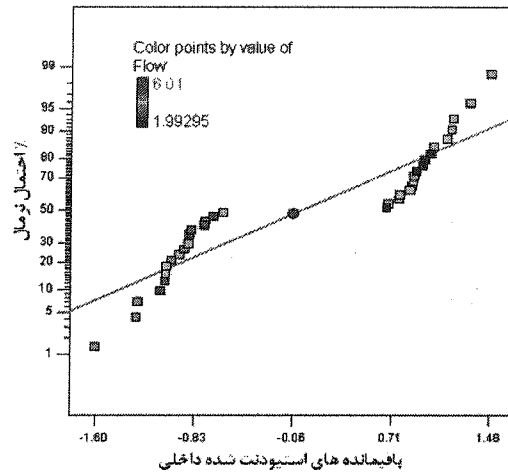
جدول (۴): بررسی آماری کیفیت برازش مدل های مختلف

مدل مبنا	انحراف معیار	ضریب هم بستگی	ضریب هم بستگی تنظیم شده	ضریب همبستگی پیش بینی شده	PRESS
خطی	۰.۰۶۰۴۱۰۸	۰.۹۷۷۴۳۲	۰.۹۷۵۲۱۶	۰.۹۷۰۷۴۶	۰.۱۵۱۲۷۷
2FI	۰.۰۶۲۴۵۵	۰.۹۷۷۴۳۴	۰.۹۷۲۷۶۵	۰.۹۶۰۶۳۹	۰.۲۰۴۶۷۸
کوادراتیک	۰.۰۰۲۸۶۱۸	۰.۹۹۹۹۵۷	۰.۹۹۹۹۴۵	۰.۹۹۹۹۲۷	۰.۰۰۰۲۷۵
کوپیک	الیاز	الیاز	الیاز	الیاز	الیاز

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است قبل از اعمال تبدیل، توزیع باقی ماندهها حالت غیر خطی و غیر نرمال را نشان می دهند، که بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی، این توزیع به شکل خطی و به حالت نرمال نزدیک تر شده است (شکل ۲). بدین ترتیب و با توجه به جداول ۳ و ۴ و تحلیل های حاصل برای نرمال کردن باقی ماندهها، مدل کوادراتیک با تبدیل لگاریتم طبیعی به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل های موجود برای برازش بر روی آزمایشها انتخاب شد. معادله تجربی مدل کوادراتیک با تبدیل لگاریتم طبیعی که نرخ جریان را برای مقادیر واقعی عوامل تخمین می زند، در حالتی که سیالات از نوع آب و پالپ زغال انتخاب شده باشند، به صورت زیر است:

۳-۲- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ (نرخ جریان سیال)

در روش های طراحی آماری آزمایشها هنگامی که بازه پاسخ مربوط به آنها وسیع باشد و باقی ماندههای^{۱۱} مدل به صورت نرمال توزیع نشده باشند اعمال تبدیل بر روی پاسخ ضروری است، تا مدل ریاضی مناسب به وجود آید. با این هدف و بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار، تبدیل لگاریتم طبیعی مناسب تشخیص داده شد. شکل های ۱ و ۲ به ترتیب توزیع باقی ماندههای مدل برازش شده قبل و بعد از اعمال تبدیل را نشان می دهد.



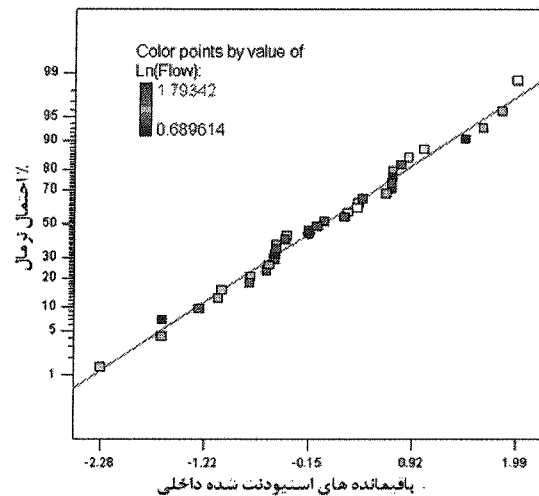
شکل (۱): منحنی توزیع نرمال باقی مانده ها قبل از اعمال تبدیل

$$\ln(\text{Flow}) = -0.55386 + 0.4716A + 0.0225B - 0.00024AB - 0.02280A^2 - 0.00312B^2 \quad [\text{سیال آب}]$$

$$\ln(\text{Flow}) = -0.549 + 0.4709A + 0.022612B - 0.00024AB - 0.02280A^2 - 0.00312B^2 \quad [\text{سیال پالپ}]$$

۳-۳- آنالیز واریانس

تحلیل واریانس ابزاری قدرتمند برای مشخص کردن معنی دار بودن آماری اثرات عوامل است که به طور گسترده در تحلیل های آماری به کار گرفته می شود. در تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش ها، هدف اصلی از آنالیز واریانس این است که مشخص شود آیا تغییرات مشاهده شده در پاسخ، ناشی از تغییر سطوح عامل مورد نظر است یا این تغییرات صرفاً به دلیل خطاهای تصادفی اندازه گیری ها بوجود آمده اند. جدول ۵ آنالیز واریانس مدل نسبت به پارامترهای مورد مطالعه را نشان می دهد.

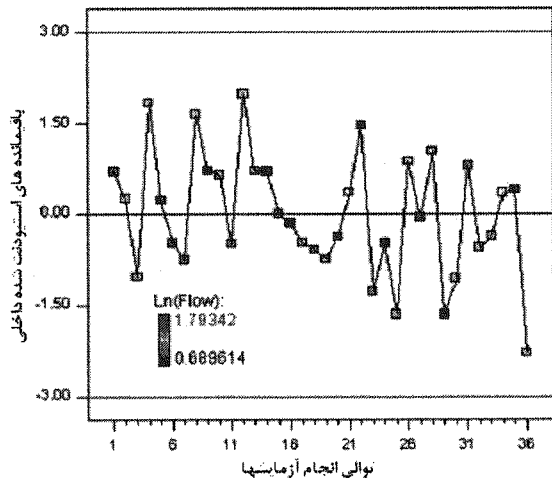


شکل (۲): منحنی نرمال باقی مانده ها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی

جدول (۵): تحلیل واریانس مدل نسبت به پارامترهای مورد مطالعه

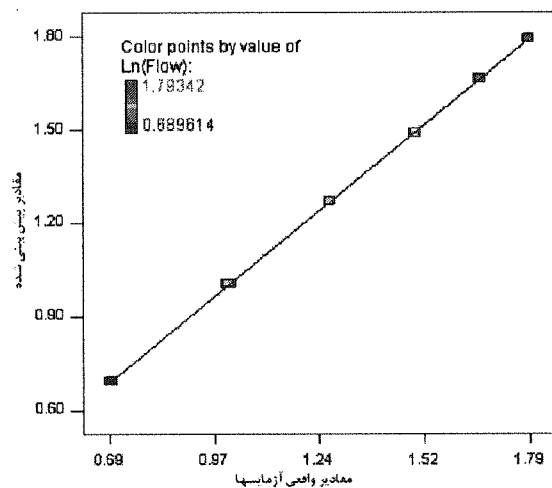
میزان P- احتمال > F	میزان F	میانگین مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	پارامترها
کمتر از ۰.۰۰۰۱	۷۸۹۷۲.۵	۰.۶۴۶۷۹۷	۸	۵.۱۷۴۲۷۲۶	مدل
کمتر از ۰.۰۰۰۱	۶۱۷۵۴۶	۵.۰۵۷۷۹۹	۵	۲۵.۲۸۸۹۹۵	A: سرعت چرخش موتور
۰.۶۰۳۳	۰.۲۷۶۴۹	۲.۲۶×10^{-۶}	۲	۴.۵۳×10^{-۶}	B: ایستایی فشاری
۰.۲۶۵۸	۱.۲۹۱۱	۱.۰۶×10^{-۵}	۱	۱.۰۶×10^{-۵}	C: سیال
۰.۷۲۵	۰.۱۲۶۳۳	۱.۰۳×10^{-۶}	۱۰	۱.۰۴×10^{-۵}	تقابل AB
۰.۲۳۲۵	۱.۴۸۵۴۲	۱.۲۲×10^{-۵}	۵	۶.۱۲×10^{-۵}	تقابل AC
۰.۹۶۹۴	۰.۰۰۱۵	۱.۲۳×10^{-۸}	۲	۲.۴۷×10^{-۸}	تقابل BC
کمتر از ۰.۰۰۰۱	۱۴۲۲۹.۷	۰.۱۱۶۵۴۴	۲۵	۲.۹۱۳۶۶۵	A ²
۰.۴۴۷۴	۰.۵۹۴۴۹	۱.۲۲×10^{-۶}	۴	۴.۸۷×10^{-۶}	B ²
		۸.۱۹×10^{-۶}	۲۷	۰.۰۰۰۲۲۱	باقیمانده
			۲۵	۵.۱۷۴۵۹۵	کل

که به مفهوم مستقل بودن باقی مانده از توالی انجام آزمایش‌ها است که مطلوب است.



شکل (۴): تغییرات باقی مانده در مقابل توالی انجام آزمایش‌ها

شکل ۵ برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی آزمایش‌ها بکار می‌رود. از آنجایی که مقادیر واقعی و پیش بینی شده آزمایش‌ها توسط مدل، به هم نزدیک بوده‌اند، نقاط تقریباً در امتداد یک خط ۴۵ درجه قرار گرفتند که نشان دهنده کیفیت مطلوب مدل برازش شده است. شکل ۶ نیز خطای استاندارد آزمایش‌ها به هنگام تغییرات دو عامل درجه سرعت چرخش موتور و درجه ایستایی فشاری را نشان می‌دهد. خطای استاندارد در مرکز سطوح کم تر است.



شکل (۵): مقادیر واقعی آزمایش‌ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده توسط مدل

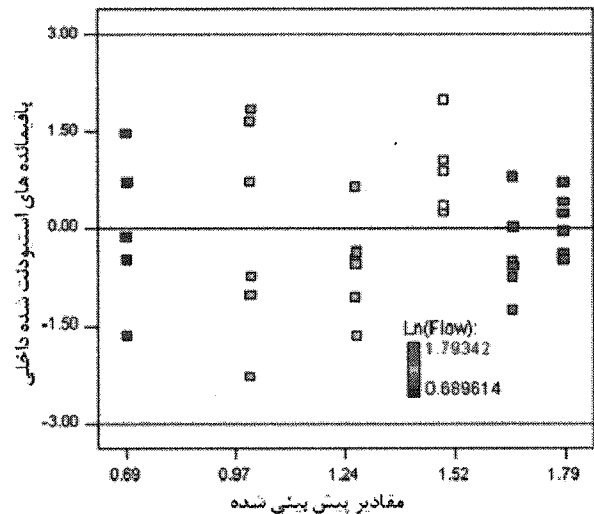
در سطح احتمال ۹۵٪ مقدار میزان-P کوچک تر از ۰/۰۵ نشان دهنده معنی‌دار بودن آماری عامل است و در میزان-P بزرگ تر از ۰/۱ نیز آن عامل بی اهمیت تلقی می‌شود.

ملاحظه می‌شود که فقط عامل A که تنظیم کننده سرعت چرخش تلمبه است در تغییرات نرخ جریان اهمیت زیادی داشته و از نظر آماری معنی‌دار تلقی می‌شود. این در حالی است که عوامل ایستایی فشاری، نوع سیال و هم چنین اثر متقابل بین عوامل، اثر معنی‌داری در پاسخ سیستم ندارند. که این امر به دلیل وجه تمایز رفتار تلمبه پریستالتیک نسبت به تلمبه‌های معمولی است و در حقیقت تلمبه پریستالتیک باید به همین گونه عمل کند.

۳-۴- اعتبارسنجی مدل ریاضی

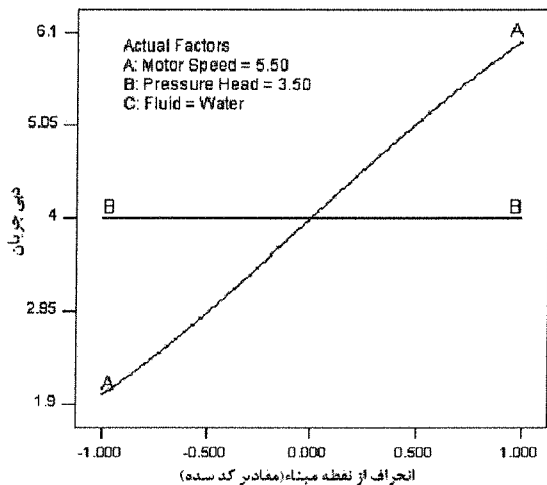
برای بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایش‌ها و چگونگی عملکرد مدل، آنالیز خطاها انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

شکل ۳ وضعیت باقی مانده‌ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده آزمایش‌ها توسط مدل نشان می‌دهد. آنچه که انتظار می‌رود این است که باقی مانده‌ها به مقادیر پیش بینی شده توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که شکل ۳ این وضعیت را تأیید می‌کند.



شکل (۳): تغییرات باقی مانده در مقابل مقادیر پیش بینی شده آزمایش‌ها توسط مدل

شکل ۴ وجود الگوی احتمالی مقادیر باقی مانده‌ها را با توجه به توالی انجام آزمایش‌ها بررسی می‌کند. به عبارت دیگر سوال این است که آیا مقادیر باقی مانده‌ها با توالی انجام آزمایش‌ها رابطه‌ای داشته است یا خیر. همان طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود مقادیر باقی مانده به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند

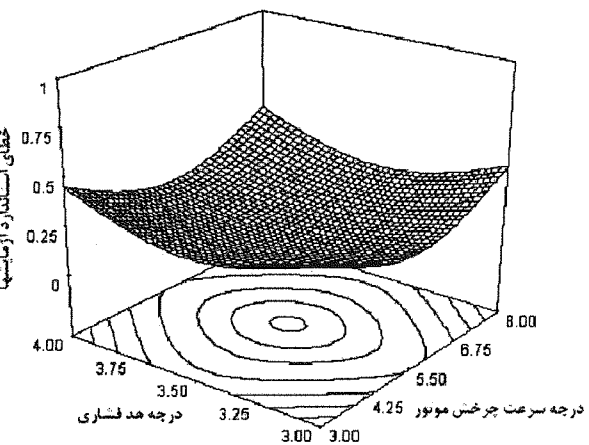
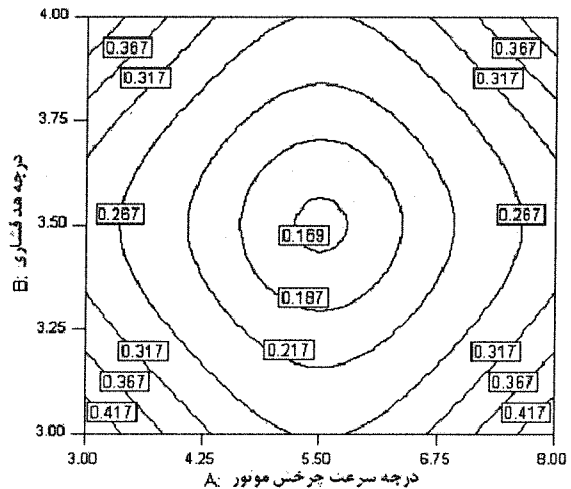


شکل (۷): نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ

شکل ۸ تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ هنگامی که از پایین‌ترین تا بالاترین سطح‌شان (+1)، تغییر می‌کنند به صورت خطی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود میزان نرخ جریان فقط با تغییر سرعت چرخش موتور تغییر می‌کند و تغییرات دو عامل دیگر تأثیر چندانی بر نرخ جریان ندارند.

شکل ۹ نیز تأثیر متقابل عوامل را بر پاسخ بررسی می‌کند. تأثیر متقابل عوامل بدین مفهوم است که میزان و نرخ تأثیر یک عامل با تغییر سطح عامل دیگر تغییر کند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود خطوط مربوط به تأثیر سطوح عوامل بر روی هم منطبق شده است که نشان دهنده عدم وجود تأثیر متقابل معنی‌دار در بین عوامل است که به مفهوم مستقل بودن عوامل از یک دیگر می‌باشد.

شکل ۱۰ نمایشی دوبعدی به صورت خطوط هم‌تراز و نمای سه بعدی از تأثیر عوامل بر پاسخ مدل است. بدین صورت که تأثیر هم‌زمان دو عامل درجه سزعت چرخش موتور و درجه ایستایی فشاری بر پاسخ بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نرخ جریان (پاسخ) تنها با تغییر درجه سرعت چرخش موتور تغییر کرده است و تغییرات درجه ایستایی فشاری هیچ تأثیری بر نرخ جریان نداشته است.

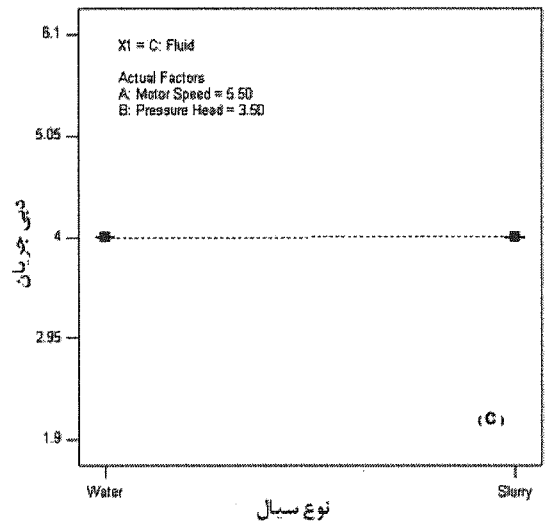
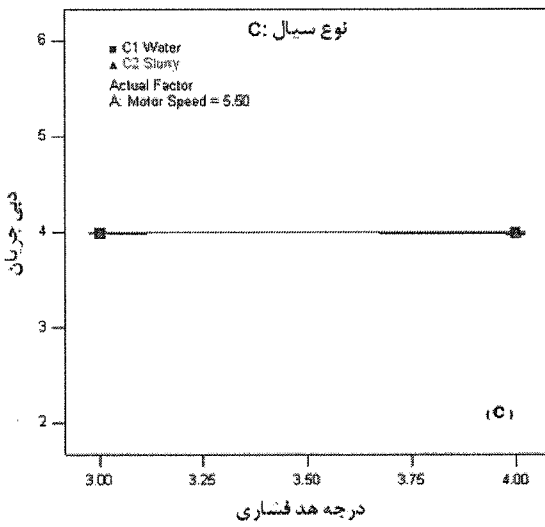
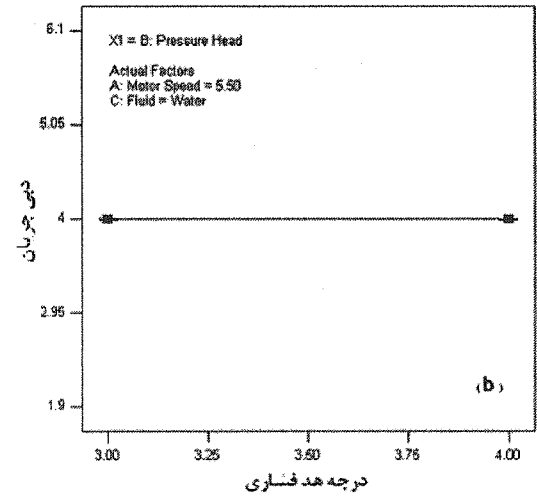
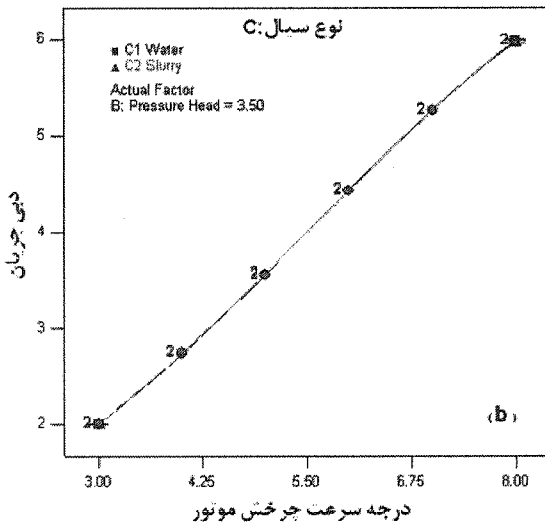
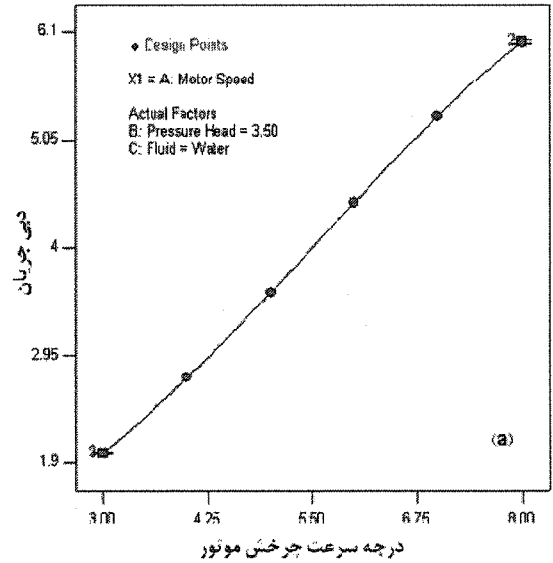
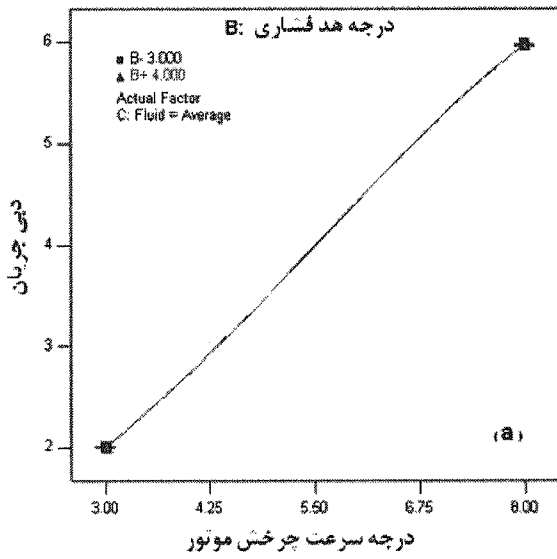


شکل (۶): نمایش دوبعدی خطوط هم‌تراز و سه بعدی خطای استاندارد آزمایش‌ها

۳-۵- تحلیل مدل

با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و هم‌چنین توزیع مناسب خطا، به بررسی نتایج حاصله از آزمایش‌ها پرداخته شده است. شکل‌های ۷ تا ۹ تحلیل حساسیت، تأثیر عوامل و تأثیر متقابل عوامل بر پاسخ را بررسی می‌کند.

شکل ۷ به فهم میزان و چگونگی حساسیت پاسخ نسبت به عوامل کمک می‌کند. پاسخ محاسبه شده در این شکل بدین صورت بوده است که در یک زمان تنها یک عامل تغییر و بقیه عوامل ثابت نگه داشته شده‌اند. شیب زیاد در شکل نشان‌دهنده حساسیت زیاد آن عامل بر پاسخ است، و شیب کم و تقریباً افقی منحنی به معنی کم بودن حساسیت پاسخ نسبت به تغییرات عامل مورد نظر است. ملاحظه می‌شود که فقط عامل A، یعنی درجه سرعت چرخش موتور، عامل حساس بر پاسخ بوده و عامل B تأثیر کمی بر پاسخ داشته است.



شکل (۹): بررسی تأثیر متقابل بین فاکتورها بر پاسخ

شکل (۸): نمودار تأثیر عوامل بر پاسخ، (a) درجه سرعت چرخش موتور، (b) درجه ایستایی فشاری، (c) نوع سیال

ع- نتیجه گیری

جریان ثابتی از سیال را به ارتفاع دلخواه پمپاژ نمایند. با توجه به اخذ نتایج مثبت در برآزش مدل و تحلیل خطاها، از میان سه عاملی که بررسی شد، تنها عامل درجه سرعت چرخش موتور تلمبه، در تنظیم نرخ جریان اهمیت داشته و تأثیر عوامل درجه تنظیم ایستایی فشاری و نوع سیال، در پاسخ اهمیت ندارند. این امر نشان دهنده صحت عمل کرد تلمبه است.

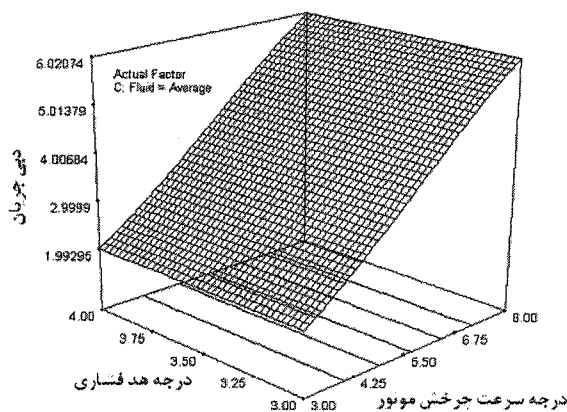
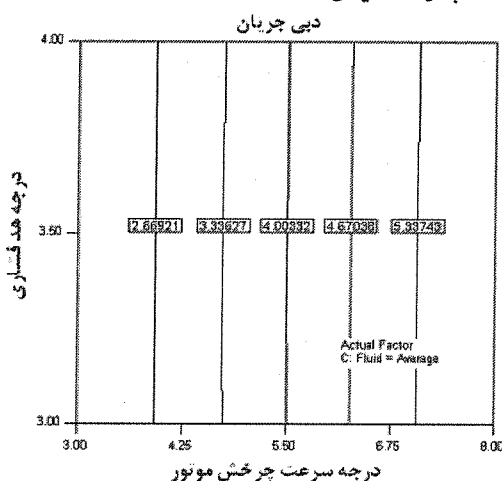
۵- مراجع

- [۱] Finch, J. A.; & Dobby, G. S.; *Column Flotation*, PERGAMON Press, 1990.
- [۲] Seeger M.A.; Schiefner, A.; Eicher, T.; Verrey, F.; Klaas M.; "Structural Asymmetry of AcrB Trimer Suggests a Peristaltic Pump Mechanism", *Science* Vol. 313. no 5791, pp 1295 - 1298 2006
- [۳] Hacifazlioglu, H., Toroglu, I.; "Optimization of design and operating parameters in a pilot scale Jameson cell for slime coal cleaning", *Fuel Processing Technology* Vol. 88, pp 731 - 736, 2007
- [۴] Cole-Parmer Instrument CO; *Operating Manual For All Models Of MASTER FLEX I/P*
- [۵] Mark, J. Anderson; & Patrick, J. Whitcomb; *DOE Simplified: Practical Tools For Effective Experimentation*, Productivity Press, 2000
- [۶] Stat-Ease; *Design Expert Manual*, 2005
- [۷] Chou, C. F.; Changrani, R.; Roberts, P.; Sadler, D.; Burdon, J.; Zenhausern, F.; Lin, S.; Mulholland, A.; Swami N.; Terbrueggen R.; "A miniaturized cyclic PCR device—modeling and experiments", *Microelectronic Engineering* Vol. 6462 , pp. 921 - 925, 2002

۶- زیر نویس ها

- ¹ Peristaltic
- ² Statistical design of experiments
- ³ One Factor At a Time (OFAT)
- ⁴ Interaction
- ⁵ Design Expert
- ⁶ Linear
- ⁷ Quadratic
- ⁸ Predicted Residual Sum of Squares
- ⁹ Alias
- ¹⁰ Cubic
- ¹¹ Residuals

مطالعات رفتار تلمبه پریستالتیک به روش طراحی فاکتوریل کامل، با استفاده از نرم افزار طراحی هوشمند انجام شد. در این آزمایش‌ها متغیر درجه سرعت چرخش موتور تلمبه و درجه تنظیم ایستایی فشاری به عنوان متغیرهای کمی، نوع سیال به عنوان متغیر کیفی و میزان نرخ جریان بر حسب لیتر بر دقیقه به عنوان پاسخ انتخاب شدند. به منظور برآزش بهترین مدل تجربی به آزمایش‌ها، مدل‌های مختلف تجربی موجود بررسی شد و از میان آنها مدل تجربی کوادراتیک با تبدیل لگاریتم طبیعی مناسب‌تر تشخیص داده شد.



شکل (۱۰): نمودار دوبعدی (خطوط هم‌تراز) و سه بعدی تأثیر فاکتورها بر پاسخ

به منظور اطلاع بیش تر از مدل برآزش شده و هم چنین کیفیت آزمایش‌های انجام شده، عملیات تحلیل و بررسی خطاها، با استفاده از رسم نمودارهای مربوطه صورت گرفت که نتایج رضایت بخش بودند، بطوری که بازه خطاها در حد مجاز و توزیع خطاها نیز مطلوب بودند.

با توجه به قابلیت‌های تلمبه‌های پریستالتیک، تغییرات ایستایی فشاری و نوع سیال می‌بایست مستقل از تغییرات سرعت چرخش موتور عمل کنند تا این تلمبه‌ها بتوانند نرخ