



## بهینه‌سازی فرمولاسیون مرکب‌های فلکسوگرافی آب پایه جهت چاپ فیلم‌های پلی اتیلنی

شیوا قریب<sup>۱</sup>، سعید باستانی<sup>۲\*</sup>، رضا روستا آزاد<sup>۱</sup>، مجتبی جلیلی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۱۱۵۵-۱۱۳۶۵
  - ۲- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
  - ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۱۱۵۵-۱۱۳۶۵
  - ۴- کارشناس، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۵/۳ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۸/۹/۲۸

### چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی فرمولاسیون مرکب‌های فلکسوگرافی پایه آبی جهت چاپ فیلم‌های پلی اتیلنی با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 6.06 مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که اجزاء رزین، حلال و رنگدانه از مهمترین عوامل مؤثر بر خواص مرکب هستند به عنوان فاکتور در طراحی آزمایش به روش مخلوط منظور شده و تأثیر آنها بر خواص مرکب مطالعه شده است. از جمله آزمون‌هایی که روی نمونه‌های مرکب انجام شده شامل گرانروی، کشش سطحی، براقیت، مقاومت سایشی، چسبندگی و بازگشت‌پذیری می‌باشند که با بررسی پاسخ‌ها، نقش فاکتورها و برهمکنش آنها مطالعه و سپس نواحی بهینه در فرمولاسیون تعیین شده است. واژه‌های کلیدی: فلکسوگرافی، مرکب، آب پایه، طراحی آزمایش، بهینه‌سازی، فیلم‌های پلی اتیلنی.

## Optimization of Water Based Flexography Inks for Printing on Polyethylene Films

Sh. Gharib<sup>1</sup>, S. Bastani<sup>2\*</sup>, R. Roosta Azad<sup>1</sup>, M. Jalili<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box: 11365-11115, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Printing Science & Technology, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Surface Coatings and Corrosion, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

### Abstract

In this article optimization of water based flexography ink formulation for printing polyethylene films is investigated by the aid of Design Expert 6.06 software. Since resin, solvent and pigment are the most important components in composition of inks, which affect properties of ink, So these components are considered as factors in mixture experimental design and their effects on ink properties were studied. Measurements of some physical and mechanical properties such as viscosity, surface tension, gloss, abrasion resistance, adhesion and reversibility were carried out on ink samples. These factors and their interactions were determined and finally, the optimized area was obtained. J. Color Sci. Tech. 3(2009), 131-143 © Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Flexography, Ink, Water based, Experimental design, Optimization, Polyethylene films.

## ۱- مقدمه

مخلوط در تهیه فرمولاسیون یا بهینه‌سازی آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در روش مخلوط مجموع اجزاء ثابت بوده و ترکیب نسبی فرمولاسیون تغییر می‌کند از اینرو می‌توان تغییرات هر فاکتور را نسبت به سایر فاکتورها با توجه به تأثیر آن در پاسخ مشاهده کرد. به طوری که بیان ریاضی آن به شکل رابطه ۱ است:

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i = 1 \quad (1)$$

که در آن ( $x_i$ ) فاکتور یا جزء  $i$  ام می‌باشد).

به منظور بهینه‌سازی فرمولاسیون، رزین، حلال و رنگدانه به عنوان سه فاکتور اصلی در طراحی آزمایش منظور و براساس روش مخلوط طراحی آزمایش شدند. گرانیوی، زمان بازگشت‌پذیری، کشش سطحی، مقاومت سایشی، چسبندگی و براقیت به عنوان پاسخ مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیر هر فاکتور و برهمکنش فاکتورها مشخص شود. تمامی نمونه‌های مرکب، روی فیلم پلی‌اتیلن سبک که برای بالا بردن انرژی آزاد سطح آن با روش کرونا آمایش شده اعمال و تست‌های مربوطه روی آن انجام شد [۹-۱۲].

## ۲- بخش تجربی

## ۲-۱- مواد

کلیه موادی که در این تحقیق استفاده شده‌اند در جدول ۱ همراه با مشخصات ذکر شده‌اند.

1- Volatile organic compounds (VOC)

در دهه‌های گذشته به علت افزایش کیفیت چاپ، سادگی فرآیند و دستگاهها و تنوع زیرآیند، حجم قابل توجهی از محصولات با فناوری فلکسو چاپ می‌گردیدند. از جنبه‌های دیگر موفقیت چاپ فلکسو در بازار، سهولت انتقال فناوری حلال‌پایه به آب‌پایه بوده است. مرکب‌های فلکسو حلال‌پایه بیش از ۶۰٪ ترکیبات آلی فرار دارند که در اتمسفر و در حضور گرما و نور خورشید با اکسیدهای نیتروژن واکنش کرده، ازن آزاد می‌نمایند [۱].

امروزه به علت اهمیت مسائل زیست‌محیطی و ایمنی، روند بازار و تولید در جهت کاربرد فناوری‌های آب‌پایه و تابش‌پز است. در این سیستم‌ها از حلال آلی استفاده نشده و به ترتیب از آب و مونومر یا الیگومرها به عنوان حلال استفاده می‌شود که درصد ترکیبات آلی فرار آنها بسیار کم است [۲].

از جمله مسائلی که در کاربرد مرکب‌های آب‌پایه جهت اعمال روی فیلم‌های پلیمری مشاهده می‌شود چسبندگی و کشش سطحی است زیرا کشش سطحی آب بالا و انرژی آزاد این سطوح پایین بوده که باعث عدم تر شدن سطح می‌شود [۳-۵]. از اینرو معمولاً در فرمولاسیون جهت کاهش کشش سطحی مرکب از عوامل فعال سطحی استفاده کرده و سطوح پلیمری از قبیل پلی‌اتیلن و یا پلی‌پروپیلن که مرکب روی آن چاپ می‌شود توسط یکی از روش‌های مناسب آماده سازی سطح آمایش می‌کنند تا انرژی آزاد سطح افزایش یافته و شرایط معادله یانگ فراهم شود. این در حالی است که مرکب‌های آب پایه روی مقوا و کارتن‌های بسته‌بندی موفقیت چشمگیری داشته‌اند [۶-۸].

از طرفی کاربرد روش‌های طراحی آمایش به خصوص روش

جدول ۱: مشخصات اجزای سازنده مرکب.

شرکت سازنده یا ارائه دهنده	نام تجاری	جزء
Ciba	Unisperse Red 3RS-E2	خمیر رنگدانه
Ciba	Unisperse Yellow GO- E	خمیر رنگدانه
Neo resin	Neocryl A-1120	رزین
دانشگاه صنعتی شریف	آب مقطر	حلال
Petrochem Middle East FZE	اتیلن گلیکول مونواتیل اتر (EGEE)	عامل درهم‌آمیختگی
Shamrock	Hydrocer145	واکس
EFKA	EFKA-2526	ضد کف
Merck	آمونیاک	تنظیم کننده pH
EFKA	EFKA 3500	همتراز کننده

## ۲-۲- روش کار

براساس روش آماری مخلوط و با در نظر گرفتن محدوده تغییرات فاکتورها، رزین از ۳۵-۴۵، حلال (آب) از ۷-۳ و خمیر رنگدانه از ۵۰-۳۸ درصد وزنی فرمولاسیون، فضای آزمایش D-Optimal می‌باشد [۹] که نتایج طراحی آزمایش‌ها همراه با پاسخ برای هر دو نمونه مرکب‌های زرد و قرمز در جداول ۲ و ۳ ذکر شده است. از آنجا که ۱۰ درصد اجزاء تشکیل دهنده مرکب شامل افزودنی‌هایی از قبیل تنظیم کننده pH، واکس، عامل درهم‌آمیختگی و ... بوده و در همه فرمولاسیون‌ها مقدارشان یکسان است، این مقدار ثابت فرض شده و در نتیجه مجموع اجزاء متغییر در فرمولاسیون‌های طراحی آزمایش ۹۰٪ می‌شود. لازم به ذکر است کلیه اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط انجام شده است (۲۴°C).

جهت اعمال نمونه‌های مرکب روی فیلم پلی‌اتیلن از Hand K-Lox Proofer ساخت کمپانی RK Print استفاده شد. ویسکومتر مورد استفاده مدل Brook Field LVDV-E و دستگاه براقیت‌سنج ساخت کمپانی BYK Gardner و مدل micro-TRI-gloss بود که براقیت نمونه‌ها در زاویه ۶۰ درجه سه بار تکرار شده و میانگین آن به عنوان پاسخ گزارش شده است. آزمون چسبندگی به وسیله دستگاه کراس‌کات و مطابق استاندارد ASTM D3359 انجام شد. آزمون مقاومت سایشی به وسیله دستگاه BRAIVE (TABER) Abraser 5131 صورت گرفت که ساینده‌ها از نوع CS-10 و میزان بار اعمال شده 500g بود. کشش سطحی با دستگاه Kruss K100MK2 Tensiometer اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲: طراحی آزمایش مرکب قرمز.

شماره آزمایش	رزین: A: X <sub>1</sub>	آب: B: X <sub>2</sub>	رنگدانه: C: X <sub>3</sub>	گرانروی (mPa.s)	کشش سطحی (mN/m)	براقیت	مقاومت سایشی (Cycles No.)	چسبندگی (ASTM D3359)	زمان برگشت پذیری (s)
۱	۳۹,۴	۵	۴۵,۶	۳۸۰	۳۵	۶۳,۷	۹۰	۳B	۴
۲	۴۲,۲	۶	۴۱,۸	۳۳۸	۳۷	۶۷,۳	۶۰	۴B	۴
۳	۳۵	۵	۵۰	۵۵۴	۳۸	۵۷,۴	۷۰	۳B	۶
۴	۴۵	۵	۴۰	۴۷۰	۳۷,۵	۶۰,۹	۱۲۰	۴B	۱۱
۵	۴۵	۷	۳۸	۳۲۹	۳۸	۶۲,۶	۶۰	۴B	۲
۶	۳۷,۲	۵	۴۷,۸	۵۸۳	۳۸	۶۲,۵	۵۰	۳B	۱۰
۷	۴۵	۳	۴۲	۵۸۸	۳۵	۶۳,۶	۸۰	۴B	۱۰
۸	۳۷	۳	۵۰	۵۳۰	۳۶	۵۷,۶	۶۰	۳B	۴
۹	۳۵	۷	۴۸	۵۴۴	۳۹	۶۴,۵	۷۰	۳B	۱۰
۱۰	۴۲,۲	۴	۴۳,۸	۴۲۲	۳۵,۵	۶۰,۶	۴۰	۴B	۸

جدول ۳: طراحی آزمایش مرکب زرد.

شماره آزمایش	رزین: A: X <sub>1</sub>	آب: B: X <sub>2</sub>	رنگدانه: C: X <sub>3</sub>	گرانروی (mPa.s)	کشش سطحی (mN/m)	براقیت	مقاومت سایشی (Cycles No.)	چسبندگی (ASTM D3359)	زمان برگشت پذیری (s)
۱	۳۹,۴	۵	۴۵,۶	۱۲۰	۳۵	۱۲۰	۴۵,۶	۵B	۳۹,۴
۲	۴۲,۲	۶	۴۱,۸	۱۱۸	۳۵	۱۱۸	۴۱,۸	۶B	۴۲,۲
۳	۳۵	۵	۵۰	۱۴۲	۳۵	۱۴۲	۵۰	۵B	۳۵
۴	۴۵	۵	۴۰	۱۲۲	۳۵	۱۲۲	۴۰	۵B	۴۵
۵	۴۵	۷	۳۸	۱۱۹	۳۵	۱۱۹	۳۸	۷B	۴۵
۶	۳۷,۲	۵	۴۷,۸	۱۳۳	۳۵	۱۳۳	۴۷,۸	۵B	۳۷,۲
۷	۴۵	۳	۴۲	۱۵۲	۳۴,۵	۱۵۲	۴۲	۳B	۴۵
۸	۳۷	۳	۵۰	۱۴۱	۳۴,۵	۱۴۱	۵۰	۳B	۳۷
۹	۳۵	۷	۴۸	۱۱۳	۳۵,۵	۱۱۳	۴۸	۷B	۳۵
۱۰	۴۲,۲	۴	۴۳,۸	۱۴۲	۳۴,۵	۱۴۲	۴۳,۸	۴B	۴۲,۲

جدول ۴: آنالیز واریانس.

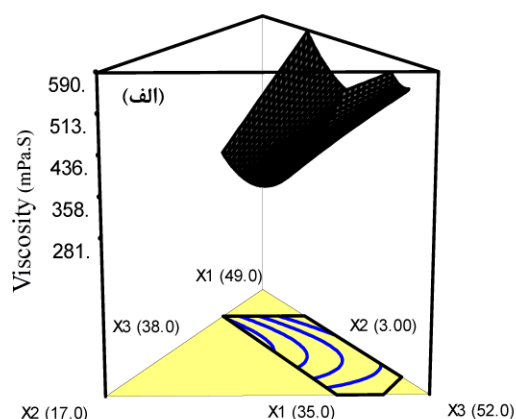
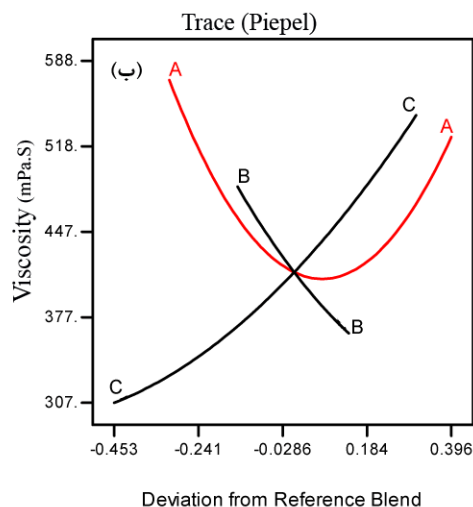
P-Value	F-Value	متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰,۰۳	۶,۶	۱۹۲۲۸,۴۶	۴	۷۶۹۱۳,۸۵	مدل
۰,۰۳۳	۷,۳	۲۱۱۹۰,۵۲	۲	۴۲۳۸۱,۰۴	مدل خطی
۰,۰۳۱	۸,۸	۲۵۷۵۵,۳۹	۱	۲۵۷۵۵,۳۹	AB
۰,۰۵	۶,۳	۱۸۳۶۷,۸	۱	۱۸۳۶۷,۸	AC
		۲۹۱۵,۳۱۱	۵	۱۴۵۷۶,۵۵	Residual
			۹	۹۱۴۹۰,۴	Cor Total

مدل منظور شده جهت بررسی اثر فاکتورها مناسب می‌باشد. چنانچه مدل مناسب نباشد باید سایر موارد از قبیل منحنی توزیع نرمال، منحنی مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، تبدیل Box Cox (تبدیل Box Cox به منظور ثابت کردن واریانس و به دست آوردن مدل مناسب استفاده می‌شود) و ... را بررسی نمود.

لازم به ذکر است که در مورد سایر پاسخ‌ها مراحل انتخاب مدل، آنالیز واریانس، بررسی مناسب بودن مدل در مطابقت با نتایج تجربی و پیش‌بینی نتایج در سایر نقاط، تغییر مدل در صورت نیاز و رسم نمودارهای گرافیکی و ارائه مدل مناسب انجام شده که نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد. به عنوان مثال از آنجا که در این روش آماری مقدار  $\alpha$  معادل ۰,۰۵ منظور شده است لذا مدل و فاکتورهایی مؤثر هستند.

۱ - با افزایش تعداد پارامترها در مدل میزان همبستگی ( $R^2$ ) افزایش می‌یابد ولی باید مشخص شود که آیا پارامترهای اضافه شده به مدل، واقعا در مدل مؤثر هستند؟ به منظور حذف پارامترهای اضافی از کمیت Adj. R-Squared استفاده می‌شود.

۲ - قدرت تخمین مدل در سایر نقاط را بیان می‌کند.



شکل ۱: (الف) سطح پاسخ و (ب) تاثیر فاکتورها بر گرانی.

### ۳- نتایج و بحث

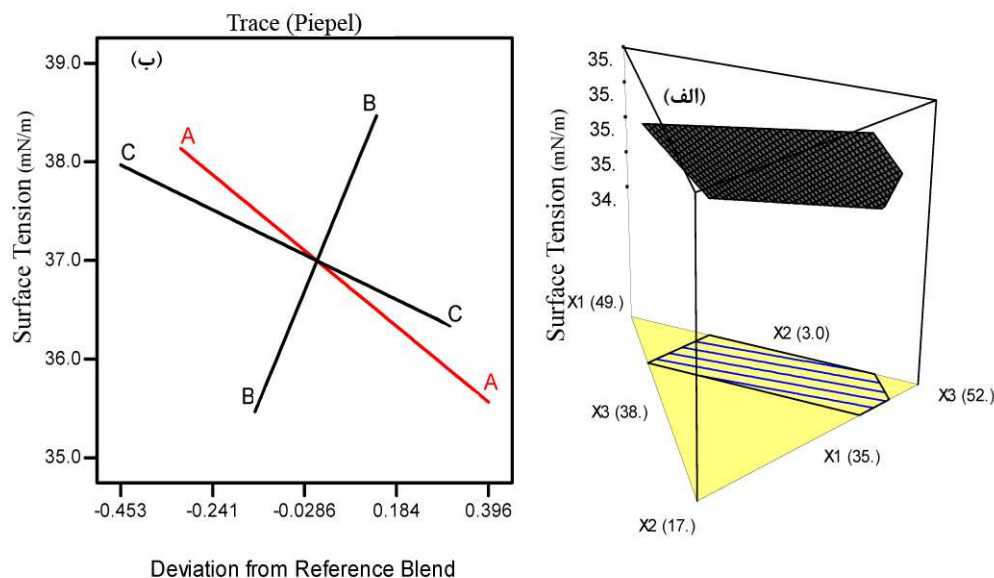
#### ۳-۱- مرکب قرمز

##### گرانروی

در بررسی تأثیر فاکتورها بر گرانی مرکب قرمز مشاهده شد که مدل درجه دو کاهش یافته به خوبی این تغییرات را نشان می‌دهد که نتایج آنالیز واریانس آن در جدول ۴ بیان شده است.

از آنجا که مقدار p-value (کمترین مقدار از  $\alpha$  که بتوان فرضیه صفر را رد کرد) مدل از  $\alpha$  Significance Level و یا احتمال اینکه فرضیه صفر رد شود در حالی که درست بوده باشد) کمتر است مدل انتخاب شده مناسب بوده و همچنین با توجه به اینکه p-value فاکتورها و برهمکنش‌های آنها نیز کمتر از مقدار  $\alpha$  است بیانگر مؤثر بودن آنها در مدل پیشنهادی است.

پس از بررسی و انتخاب مدل مناسب تغییرات گرانی با تغییر فاکتورها مطابق شکل ۱ می‌باشد ( واحد پاسخها و اجزاء A, B و C در جدول ۲ معرفی شده‌اند). از طرفی از آنجا که مقدار Adj. R-Squared<sup>1</sup> (۰,۷۱) و Pred. R-Squared<sup>2</sup> (۰,۶۷) به یکدیگر نزدیک بوده و میزان سیگنال به عامل اختلال بیشتر از ۴ است (۶,۸)



شکل ۲: (الف) سطح پاسخ و (ب) تاثیر فاکتورها بر کشش سطحی.

می‌دهد برهمکنش رزین - رنگدانه بیشترین تاثیر در گرانیوی دارد. اثر متفاوت رزین بر تغییرات گرانیوی احتمالا در اثر برهمکنش‌های رزین - رنگدانه می‌باشد [۱۲].

### کشش سطحی

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر سه فاکتور تاثیر خطی بر پاسخ دارند و در نمودار Trace ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان رزین و رنگدانه کشش سطحی کاهش یافته و با کاهش میزان این دو عامل کشش سطحی افزایش می‌یابد ولی آب تاثیر معکوس و بیشترین تاثیر را بر کشش سطحی دارد که در واقع ناشی از ساختار قطبی و کشش سطحی ذاتی بالای آن نسبت به سایر اجزاء است.

### براقیت

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که تاثیر آب خطی بوده و تغییرات آن متناسب با تغییر براقیت است ولی با افزایش میزان رنگدانه براقیت کاهش و با کاهش آن براقیت پس از رسیدن به بیشترین مقدار مجدداً کاهش می‌یابد. در محدوده آزمایش افزایش مشاهده شده در براقیت با افزایش آب احتمالا در اثر تشکیل فیلم بهتر بوده، ولی در مورد رزین و رنگدانه رفتار غیر متعارفی مشاهده می‌شود که احتمالا ناشی از برهمکنش‌های خاص بین رنگدانه در ترکیب درصد مشخص می‌باشد که میزان رنگدانه تاثیر مستقیم بر غلظت حجمی بحرانی رنگدانه<sup>۱</sup> فیلم

1- Pigment volume concentration (PVC)

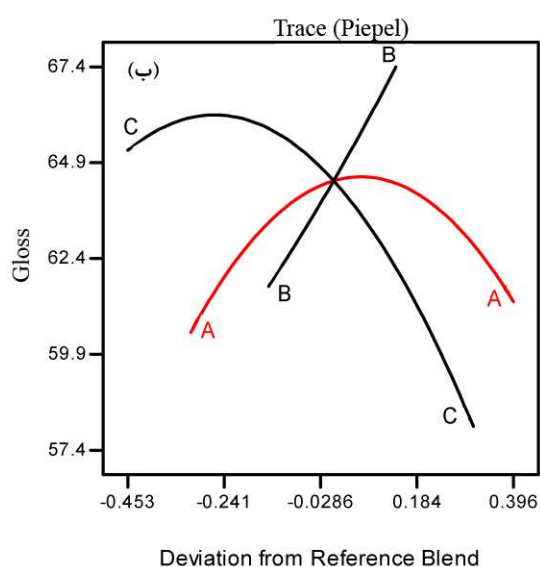
که مقادیر P-Value آنها از ۰,۰۵ کمتر باشد. همچنین در صورتی تغییر مدل لازم است که نتایج به دست آمده از مدل با نتایج تجربی مطابقت نداشته و یا قدرت تخمین نتایج در سایر نقاط ضعیف بوده و مدل نتایج دور از انتظار حاصل کند که بر اساس مقادیر لاندا ( $\lambda$ ) Box Cox تغییر مدل انجام شده است. به عنوان مثال اگر مقدار لاندا صفر باشد مدل مناسب، لگاریتمی و اگر منفی یک (-۱) باشد مدل مناسب، معکوس می‌باشد که در هر پاسخ در صورت نیاز بر حسب شرایط اعمال شده است [۹].

از نمودار Trace مشاهده می‌شود که فاکتورهای B و C تقریباً تاثیر خطی بر گرانیوی دارند به طوری که با افزایش میزان آب و رنگدانه به ترتیب گرانیوی کاهش و افزایش می‌یابد ولی تاثیر رزین خطی نبوده و در فضای آزمایش با حرکت از محل تقاطع، که در واقع ترکیب متوسط در مخلوط می‌باشد، به سمت راست با افزایش رزین گرانیوی افزایش می‌یابد و با حرکت از مرکز به سمت چپ با کاهش رزین گرانیوی افزایش می‌یابد. در نمودارهای Trace به منظور تشریح اثر فاکتورها بر پاسخ یک نقطه مرکزی که در واقع ترکیب متوسط مخلوط و محل تقاطع منحنی‌های هر فاکتور است مینا در نظر گرفته می‌شود. سپس چنانچه از مرکز به سمت راست حرکت کنیم فاکتور مورد نظر افزایش و چنانچه به سمت چپ حرکت کنیم فاکتور کاهش می‌یابد. در روش طراحی مخلوط و بررسی نمودارهای Trace همیشه با افزایش یا کاهش یک جزء و بررسی تاثیر آن بر پاسخ، نسبت سایر اجزا ثابت بوده و به یک میزان کاهش یا افزایش می‌یابند و در حالت کلی مجموع اجزاء ثابت باقی می‌ماند. همان طور که معادله گرانیوی نشان

## چسبندگی

در شکل ۵ از نمودار Trace مشاهده می‌شود که چسبندگی با افزایش میزان رزین افزایش و با افزایش میزان رنگدانه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش آب چسبندگی کاهش یافته است. با توجه به اینکه چسبندگی روی سطوح نفوذناپذیر بر اساس پیوندهای ثانویه بین رزین و سطح می‌باشد هر چقدر میزان رزین در فیلم مرکب بیشتر باشد چسبندگی افزایش می‌یابد.

با افزایش رزین قدرت تشکیل فیلم بهبود یافته و فیلم برهمکنش بیشتری با سطح زیرآیند نشان می‌دهد ولی با افزایش رنگدانه درصد جامد فیلم افزایش و برهمکنش فیلم با زیرآیند تحت تأثیر قرار می‌گیرد که نتایج آن در چسبندگی مشهود است.

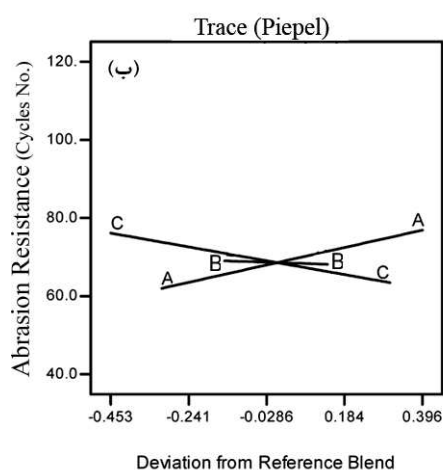
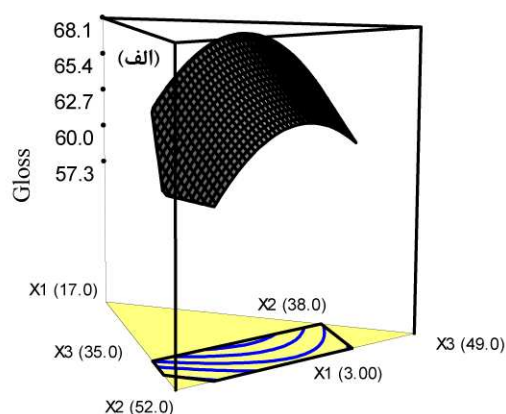


شکل ۳: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر براقیت.

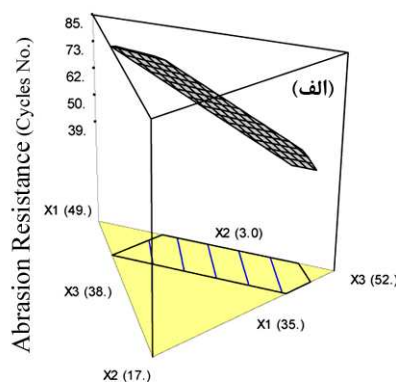
و میزان تخلخل آن دارد در نتیجه براقیت در سطح خاصی از رنگدانه بهینه است.

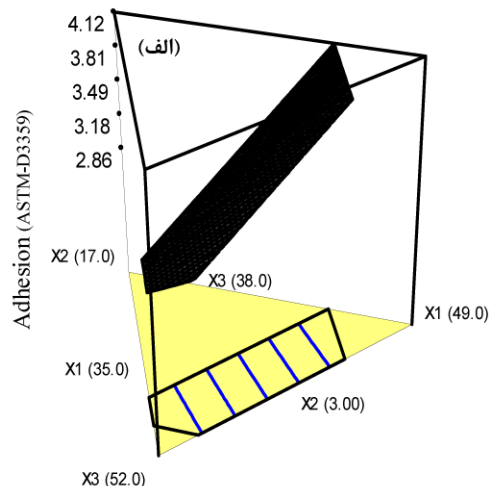
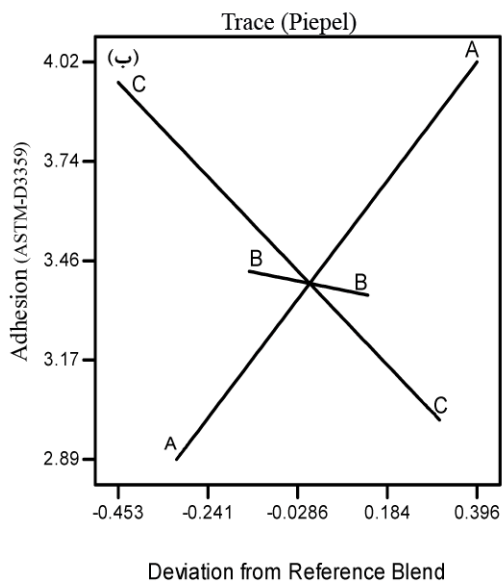
## مقاومت سایشی

مطابق شکل ۴ و با توجه به نمودار Trace با افزایش رنگدانه مقاومت سایشی کاهش و با کاهش آن افزایش می‌یابد. اگرچه آب نیز موثر است ولی در مقایسه با دو فاکتور دیگر و در محدوده آزمایش می‌توان از تأثیر آن صرف‌نظر کرد. با افزایش رزین مقاومت سایشی افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابد. به طور طبیعی با افزایش رنگدانه و کاهش میزان رزین قدرت تشکیل فیلم کاهش می‌یابد که نتایج آن در مقاومت سایشی مشهود است.

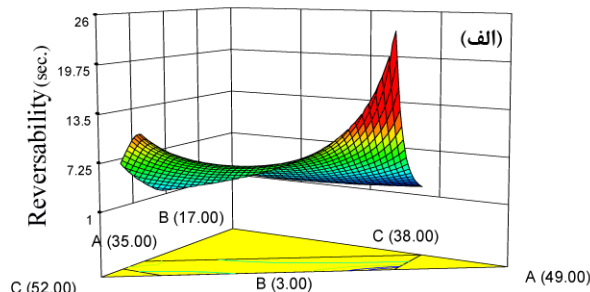
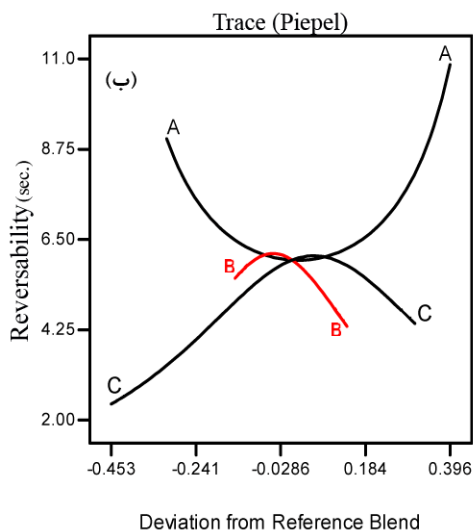


شکل ۴: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر مقاومت سایشی.





شکل ۵: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر چسبندگی.



شکل ۶: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر برگشت پذیری.

### بهینه‌سازی عددی پاسخها

بعد از اینکه تأثیر فاکتورها و برهمکنشها در صورت وجود، روی هر یک از پاسخها بررسی شد این سؤال مطرح می‌شود که در چه محدوده‌ای از فاکتورها تمامی پاسخها بهینه هستند؟ به منظور حاصل شدن این امر و تعیین مقادیر عددی و محدوده گرافیکی فاکتورها، بهینه‌سازی عددی و گرافیکی انجام می‌شود.

در بهینه‌سازی عددی شرایط مورد نظر مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده که با اعمال آنها میزان هر یک از فاکتورها و پاسخ مربوطه مشخص و در جدول ۶ ذکر شده است.

### برگشت پذیری

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش آب و رنگدانه زمان برگشت پذیری کاهش و با کاهش آنها کاهش می‌یابد و در نتیجه دارای مقدار بهینه می‌باشد ولی با افزایش و کاهش رزین، زمان برگشت پذیری افزایش می‌یابد با این تفاوت که افزایش آن اثر مشهودتری در فضای آزمایش نشان می‌دهد و در کل دارای مقداری بهینه است.

به طور طبیعی با افزایش آب و رنگدانه تشکیل فیلم به تأخیر افتاده و قدرت حلالیت مجدد فیلم افزایش یافته و زمان برگشت پذیری کاهش می‌یابد ولی با افزایش رزین فیلم سریع‌تر تشکیل شده و قدرت حلالیت کاهش می‌یابد که در اینجا به علت برهمکنشها دارای مقداری بهینه هستند.

جدول ۵: شرایط مطلوب در بهینه‌سازی عددی.

معکوس برگشت پذیری	چسبندگی	مقاومت سایشی	براقیت	کشش سطحی	گرانروی	پاسخ
حداکثر	حداکثر	حداکثر	حداکثر	حداقل	در محدوده	شرایط بهینه

جدول ۶: سطح فاکتورها و پاسخ‌های مربوطه در بهینه‌سازی عددی.

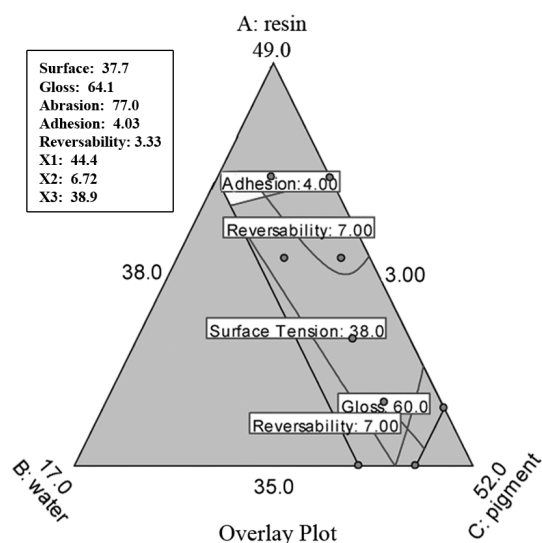
معکوس برگشت پذیری (s)	چسبندگی (ASTM D3359)	مقاومت سایشی (Cycles No.)	براقیت	کشش سطحی (mN/m)	گرانروی (mPa.s)	رنگدانه X <sub>3</sub>	آب X <sub>2</sub>	رزین X <sub>1</sub>	ردیف
۰,۲۱	۴B	۷۷	۶۲	۳۷	۴۴۱	۳۹,۸	۵,۲۳	۴۵	۱

جدول ۷: محدوده بهینه پاسخ‌ها.

برگشت پذیری (s)	چسبندگی (ASTM D3359)	مقاومت سایشی (Cycles No.)	براقیت	کشش سطحی (mN/m)	گرانروی (mPa.s)	پاسخ
۲-۷	۴B-۵B	۵۰-۱۲۰	۶۰-۶۸	۳۵-۳۸	۳۲۹-۵۸۸	محدوده بهینه

زرد در فرمولاسیون‌های پیشنهادی ساختار شبکه‌ای تشکیل می‌دهد و احتمالاً به همین علت رفتار گرانروی مرکب آن خطی نیست.

در واقع جدول ۶ بیانگر این نکته است که اگر در فرمولاسیون مرکب فلکسو سه جزء رزین، خمیر رنگدانه و حلال با سطوح ذکر شده (به ترتیب ۴۵، ۳۹,۸ و ۵,۲۳) به کار گرفته شوند و بقیه اجزاء ثابت باشند چنین نتایجی حاصل می‌شود.



شکل ۷: نمودار بهینه‌سازی گرافیکی.

### بهینه‌سازی گرافیکی پاسخ‌ها

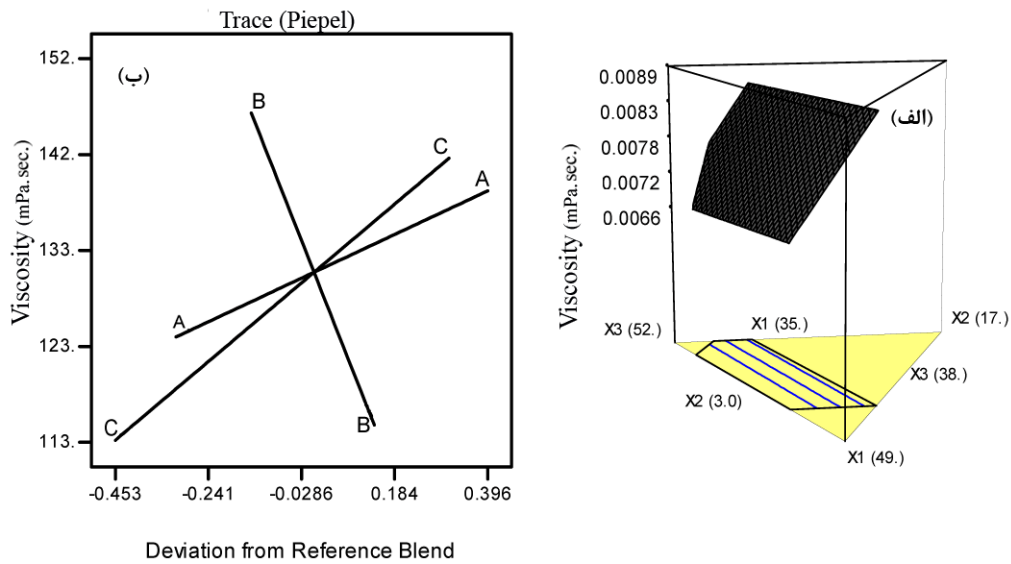
در این مرحله می‌توان محدوده‌ای از پاسخ‌ها که بهینه بوده و یا مورد نظر محقق یا تولید کننده است را تعیین و به طور همزمان اعمال کرد تا محدوده فاکتورها که چنین پاسخ‌هایی را ایجاد می‌کنند تعیین شود. در این تحقیق شرایط بهینه هر پاسخ در جدول ۷ ذکر شده است که با اعمال آنها محدوده فاکتورها مطابق شکل ۷ حاصل می‌شود.

### ۲-۳- مرکب زرد

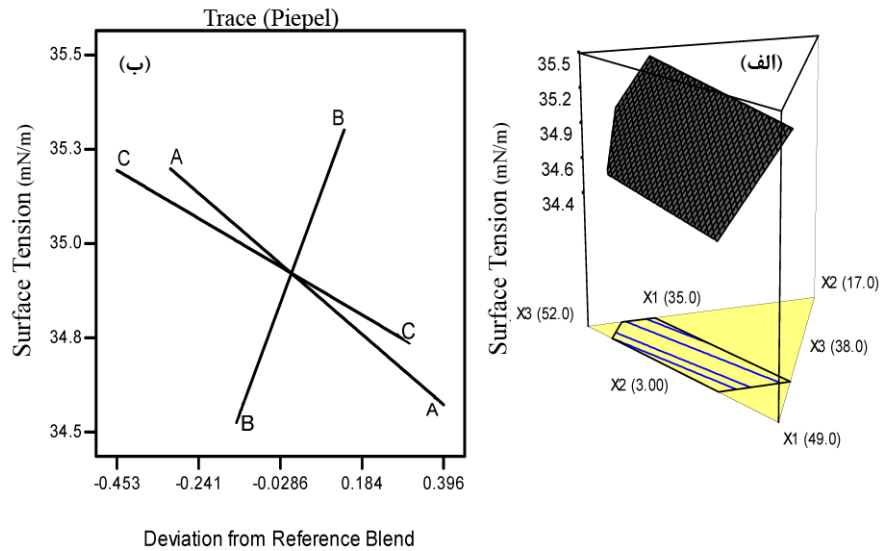
#### گرانروی

با توجه به نمودارها (شکل ۸)، با افزایش میزان آب گرانروی شدیداً کاهش می‌یابد در حالی که دو فاکتور دیگر تأثیر مستقیم بر گرانروی داشته و تأثیر رنگدانه بیشتر مشهود است که ناشی از افزایش درصد جامد مرکب و برهمکنش‌های بین اجزاء است. رنگدانه قرمز بر خلاف





شکل ۸: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر گرانروی.



شکل ۹: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر کشش سطحی.

اینکه مواد مذکور در آب پخش شده‌اند تأثیرپذیری کشش سطحی مستقیماً متأثر از آب است. هر چه مقدار آب کاهش یابد میزان کشش سطحی مجموع نیز کاهش خواهد یافت.

**براقیت**

در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که افزایش آب و رزین همراه با افزایش

**کشش سطحی**

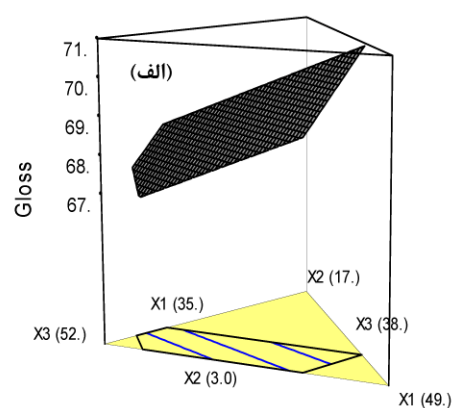
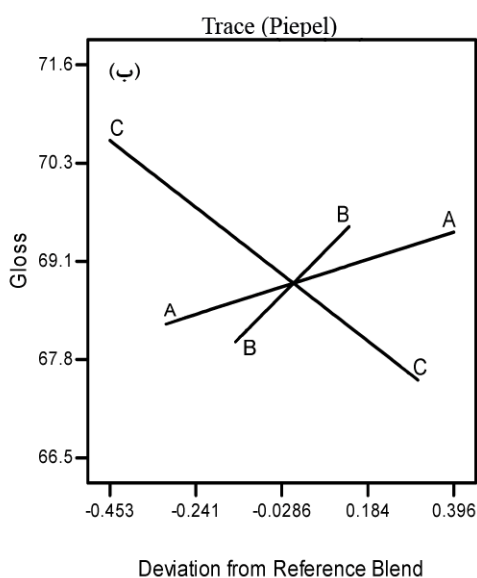
با بررسی شکل ۹ مشاهده می‌شود که آب بیشترین تأثیر بر کشش سطحی دارد زیرا کشش سطحی آب ۷۲ dyens/cm است که خیلی بالا بوده و مقادیر کم آن نیز باعث افزایش کشش سطحی نمونه می‌شود ولی تأثیر دو فاکتور دیگر خیلی مشهود نیست. افزایش رنگدانه و رزین به مفهوم کاهش میزان آب در فرمولاسیون است. با توجه به

شکل ۱۱، رزین و آب تأثیر مستقیم و میزان رنگدانه تأثیر معکوس روی مقاومت سایشی دارد. همچنین تأثیر رزین نسبت به آب بیشتر است. زیرا افزایش میزان رنگدانه همان طور که در سایر موارد ذکر شد باعث افزایش PVC فیلم مرکب و در نتیجه کاهش مقاومت سایشی و افزایش آب و رزین سبب تشکیل بهتر فیلم در محدوده آزمایش می‌شوند. تأثیر کم آب شاید به علت محدوده باریکی است که در طراحی آزمایش برای آن در نظر گرفته شده که در این محدوده تأثیر خاصی روی خواص مکانیکی ندارد.

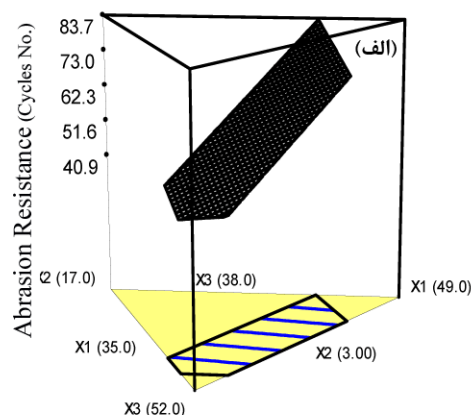
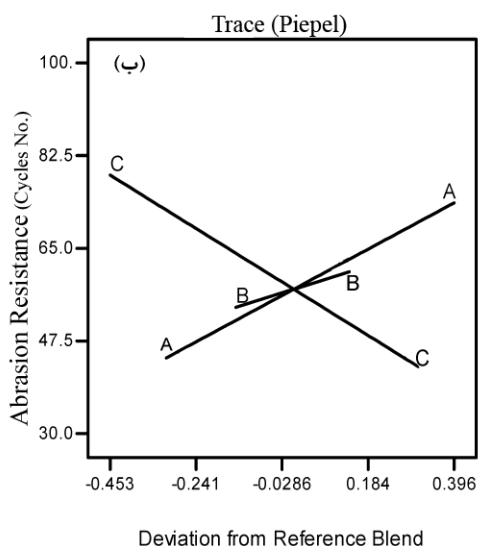
براقیت بوده و با افزایش میزان رنگدانه PVC فیلم مرکب افزایش یافته و براقیت کاهش می‌یابد. در مرکب قرمز به علت احتمال تشکیل ساختار شبکه‌ای رنگدانه و تشکیل فیلم مرکب در حضور این ساختارها، سطح فیلم ناصاف شده و براقیت کاهش می‌یابد که دلیلی بر رفتار غیر خطی آن است.

### مقاومت سایشی

از معادله مقاومت سایشی صرفنظر شده است زیرا مقادیر محاسبه شده با معادله و مقادیر تجربی انطباق خوبی با یکدیگر نداشتند. با توجه به



شکل ۱۰: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر براقیت.

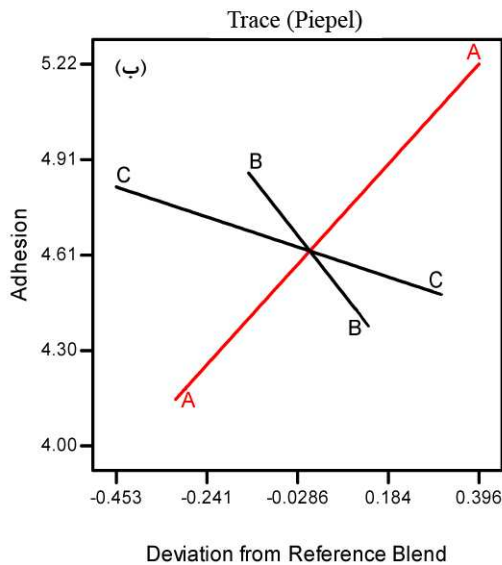


شکل ۱۱: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر مقاومت سایشی.

رنگدانه - رنگدانه و رزین - رزین افزایش یافته و زمان برگشت پذیری افزایش می‌یابد.

### بهینه‌سازی عددی پاسخها

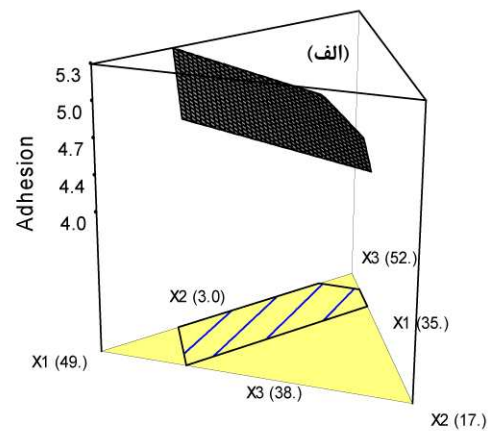
شرایط بهینه‌سازی مرکب زرد همان شرایط ذکر شده برای مرکب قرمز است که در جدول ۵ بیان شده است با این تفاوت که برای مرکب زرد باید به جای معکوس زمان برگشت پذیری، زمان برگشت پذیری را جایگزین نمود و شرایط بهینه مربوط به آن از حداکثر به حداقل تبدیل شود. با منظور کردن شرایط مذکور سطح فاکتورها و پاسخها در جدول ۸ گزارش شده است.



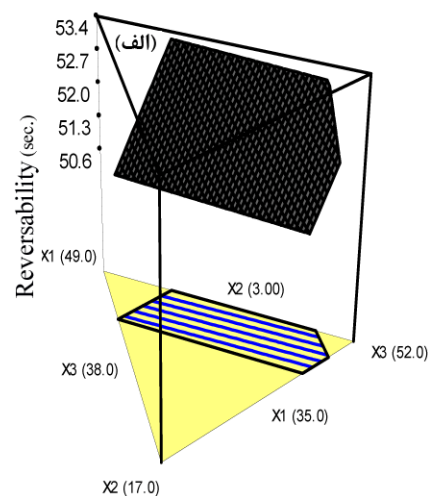
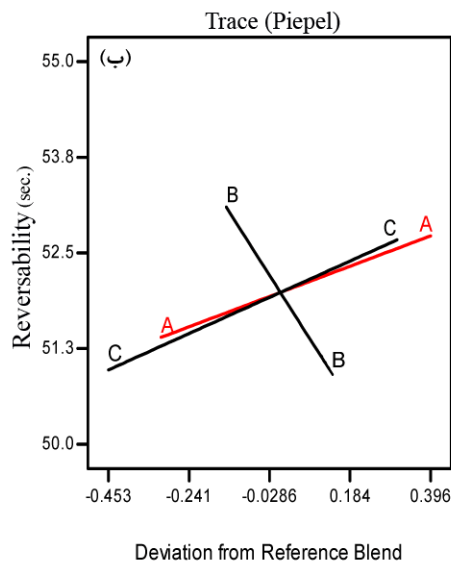
چسبندگی همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، رزین بیشترین تأثیر را در چسبندگی داشته و رابطه‌ای مستقیم با آن دارد ولی دو عامل دیگر تأثیری معکوس داشته که تأثیر آب بیشتر بوده است که دلایل آن در بخش مرکب قرمز ذکر شده است.

### برگشت پذیری

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش آب زمان برگشت پذیری سریعاً کاهش می‌یابد، ولی با افزایش رزین و مقدار رنگدانه زمان افزایش می‌یابد زیرا با کاهش آب برهمکنش‌های متقابل رنگدانه - رزین،



شکل ۱۲: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر چسبندگی.



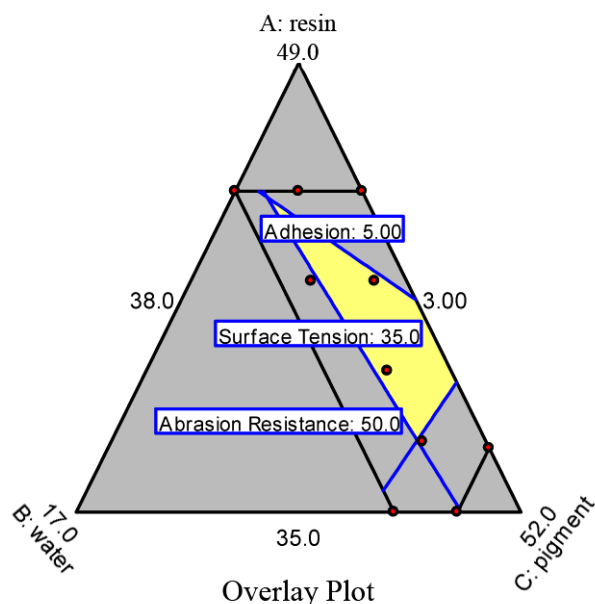
شکل ۱۳: (الف) سطح پاسخ و (ب) تأثیر فاکتورها بر برگشت پذیری.

جدول ۸: سطح فاکتورها و پاسخ‌های مربوطه در بهینه‌سازی عددی.

ردیف	رزین X <sub>1</sub>	آب X <sub>2</sub>	رنگدانه X <sub>3</sub>	گرانروی (mPa.s)	کشش سطحی (mN/m)	براقیت	مقاومت سایشی (Cycles No.)	چسبندگی (ASTM D3359)	برگشت پذیری (s)
۱	۴۵	۵,۸۴	۳۹,۲	۱۲۲	۳۴,۹	۷۰,۴	۸۰	۵	۵۱

جدول ۹: محدوده بهینه پاسخ‌ها.

پاسخ	گرانروی (mPa.s)	کشش سطحی (mN/m)	براقیت	مقاومت سایشی (Cycles No.)	چسبندگی (ASTM D3359)	برگشت پذیری (s)
محدوده بهینه	۱۱۳-۱۵۲	۳۴,۵-۳۵,۵	۶۵-۷۲	۵۰-۱۰۰	۴B-۵B	۵۰-۵۵



شکل ۱۴. نمودار بهینه‌سازی گرافیکی.

#### بهینه‌سازی گرافیکی

دامنه خواص فیزیکی مطلوب مرکب که باعث چاپی با خصوصیات بهینه می‌شود در جدول ۹ گزارش شده که مطابق با آن بهینه‌سازی گرافیکی صورت گرفته است.

شکل ۱۴ در واقع بیانگر محدوده‌ای از فاکتورها است که تمامی پاسخ‌ها در محدوده بهینه ذکر شده در جدول ۸ می‌باشند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش طراحی آزمایش ناحیه بهینه در هر دو نوع نمونه مرکب با توجه به پاسخ‌های اندازه‌گیری شده تعیین شد که وابسته به نوع مرکب این نواحی کاملاً با یکدیگر متفاوت هستند. با بررسی برخی خواص نمونه‌های مرکب زرد و قرمز مشاهده می‌شود که با توجه به یکسان بودن نوع رزین و حلال، نوع رنگدانه تأثیر متفاوتی ایجاد کرده است (به طور مثال در گرانروی و زمان برگشت‌پذیری) که ناشی از اثرات متقابل این جزء در حضور سایر اجزاء و دخالت خواص فیزیکی-شیمیایی رنگدانه می‌باشد.

#### ۵- مراجع

1. P. Laden, Chemistry and technology of water based inks. Blackie A & P, London. 1997, 1-11.
2. K. Jackson, Recent advances in water-borne protective coatings. *Surf. Coat. Int., B, Coat. Trans.* 82(1999), 340-343.
3. R. H. Leach, R. J. Pierce, E. P. Hickman, The printing ink manual. Blueprint, London. 1993.
4. M. Rentzhog, A. Fogden, Print quality and resistance for water-based flexography on polymer-coated boards: Dependence on ink formulation and substrate pretreatment. *Prog. Org. Coat.* 57(2006), 183-194.
5. A. Peters, P. Honen, A. Overbeek, S. Griffioen, T. Annable, A new generation of water-borne ink binders for packaging films and paper (I). *Surf. Coat. Int., B, Coat. Trans.* 84(2001), 189-195.

6. A. Peters, P. Honen, A. Overbeek, S. Griffioen, T. Annable, A new generation of water-borne ink binders for packaging films and paper (II). *Surf. Coat. Int., B, Coat. Trans.* 84(2001), 249-253.
7. M. F. Farahani, S. Moradian, S. Bastani, Study of properties and formulation of water based flexographic ink on treated polyethylene. *Amirkabir J.* 17(2006), 7-14.
8. H. Gecol, J. F. Scamehorn, Sh. D. Christian, B. P. Grady, F. Riddell, Use of surfactants to remove water based inks from plastic films. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 189(2001), 55-64.
9. S. Fatemi, M. K. Varkani, Z. Ranjbar, S. Bastani, Optimization of the water-based road-marking paint by experimental design, mixture method. *Prog. Org. Coat.* 55 (2006), 337-344
10. R. R. Roesler, How to bake the perfect cake. *Paint. Coat. Ind.* 50(2004), 98-104.
11. D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments, Fourth Ed., John Wiley & Sons, New York, 1994, 372-469.
12. M. Rostami, M. M. Attar, S. Moradian, S. Bastani, Surface treatment of pigment red 3 for improving properties in water base media. *Amirkabir J.* 16(2005), 53-69.