

## بررسی رفتار رئولوژیکی رنگ خودرو

اشکان معصومی\*

**چکیده:** بررسی و کنترل رئولوژی رنگ‌ها در صنایع خودروسازی از اهمیت بسزایی برخوردار است و در فرآیندهای مختلف رنگ مانند اختلاط، پمپاژ، انتقال، فیلتراسیون و ته‌نشینی رنگ، شناسایی رفتار رئولوژیکی رنگ ما را در خصوص چگونگی جاری شدن رنگ یا واکنش‌های آن در برابر نیروهای مکانیکی وارده راهنمایی می‌نماید. در این مقاله سعی شده بیشتر نسبت به رفتار رئولوژیکی رنگ‌ها، مخصوصاً رنگ خودرو پرداخته شود. این رفتار در زمان اختلاط در مخزن‌ها، انتقال به دستگاه‌های پاشش، انتقال از نازل به بدنه خودرو و ایجاد فیلم یکنواخت روی بدنه خودرو از مهمترین عوامل شناسایی رنگ از حیث رئولوژیکی می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** رئولوژی، رفتار رئولوژیک، رنگ

### ۱. مقدمه

لغت رئولوژی از ریشه کلمه یونانی رئوس<sup>۱</sup> به معنی جریان می‌باشد و علم رئولوژی روی چگونگی جریان یافتن سیالات و واکنش آن‌ها در برابر نیروی مکانیکی بحث می‌کند. بررسی رئولوژی و کنترل آن در ساخت محصولات تولیدی در صنایعی مانند رنگ‌سازی، مواد غذایی، مواد پلاستیکی و لوازم آرایشی اهمیت بسزایی دارد. در پروسه‌هایی مثل اختلاط، فیلتراسیون، انتقال، ته‌نشینی یا رسوب کردن این‌گونه محصولات، خواصی وجود دارند که بستگی به خاصیت رئولوژی آن‌ها دارد. علم رئولوژی شاخه‌ای از علوم ریاضی و فیزیک محسوب می‌شود و کلیه متغیرهای مربوط به آن از روابط ریاضی به دست می‌آیند. در این مقاله بیشتر به متغیرهای مؤثر در رئولوژی رنگ‌ها پرداخته شده است.

### ۲. واکنش مواد در برابر اعمال نیروی خارجی

مواد مختلف در برابر نیروی مکانیکی خارجی یا همان تنش<sup>۲</sup> سه واکنش متفاوت نشان می‌دهند:

- جریان برگشت‌ناپذیر که ویژه مواد غیر قابل انعطاف یا غیر الاستیک<sup>۳</sup> می‌باشد.
- جریان برگشت‌پذیر که ویژه مواد انعطاف‌پذیر یا الاستیک<sup>۴</sup> می‌باشد.
- مخلوط دو جریان که ویژه مواد نیمه منعطف یا ویسکوالاستیک<sup>۵</sup> می‌باشد.

برای مثال اگر با چکش به یک قطعه فولاد ضربه وارد شود در اثر این تنش در قطعه تغییر شکلی ایجاد می‌گردد که برگشت‌ناپذیر است و در نتیجه فولاد را می‌توان در گروه مواد ویسکوز قرار داد. یا برای مثال آب پس از بهم زدن به حالت اولیه خود باز می‌گردد بنابراین آب یک سیال الاستیک می‌باشد. ولی بسیاری از مواد در بین این دو گروه قرار می‌گیرند و چنانچه نیروی خارجی به آنها وارد گردد، تنها بخشی از تغییر شکل به حالت اولیه خود باز می‌گردد. این مواد جزو گروه مواد ویسکوالاستیک قرار می‌گیرند که رنگ‌ها در این گروه می‌باشند.

### ۳. تنش برشی<sup>۶</sup>

فرض کنید دو صفحه موازی مسطح با سطح مقطع A به فاصله h از یکدیگر قرار دارند که فاصله آنها با مایعی پر شده است. در صورتی که صفحه بالایی را با نیروی F بکشیم لایه‌ای از مایع که با صفحه در تماس است نیز کشیده خواهد شد و این لایه نیز به نوبه خود باعث کشیده شدن لایه زیرین خود می‌شود. به همین طریق عمل کشیده شدن، به کلیه لایه‌های مایع انتقال می‌یابد تا به لایه‌ای برسد که در تماس با صفحه زیرین است. این عمل کشیده شدن لایه‌ها، همان تنش برشی می‌باشد.

<sup>1</sup> Rheos  
<sup>2</sup> Stress  
<sup>3</sup> Viscous  
<sup>4</sup> Elastic  
<sup>5</sup> Viscoelastic  
<sup>6</sup> Shear stress

\* کارشناس مسئول مدیریت مهندسی تولید  
آدرس پست الکترونیک: masoumi\_a@saipacorp.com

#### ۸. کاربرد رئولوژی در رنگ خودرو

یک رنگ بسته به نوع کاربرد باید قابلیت قلم خوری، هم خوردن، مخلوط شدن، پمپ شدن، اسپری شدن و لخته زدایی را داشته باشد. به طور کلی برای اعمال رنگ روی خودرو با سه بخش متوالی روبرو هستیم:

۱. انتقال رنگ از مخزن به دستگاه پاشش رنگ
  ۲. انتقال رنگ از دستگاه به سطح بدنه خودرو
  ۳. ایجاد فیلم یکنواخت روی بدنه و تخیخ حلال‌ها
- در هر کدام از این مراحل، رئولوژی رنگ‌ها اثر کنترل‌کنندگی مهمی دارد. اغلب رنگ‌ها رفتار شبه پلاستیک از خود نشان می‌دهند یعنی ویسکوزیته آن‌ها با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد که به آن "رقت برشی" می‌گویند. در صنعت رنگ برای بررسی و اصلاح خواص رئولوژیکی محصول از یک مرجع استفاده می‌کنند، یعنی رنگی را که دارای خواص رئولوژیکی مناسبی است به عنوان مرجع یا شاهد قرار داده و هم‌زمان با نمونه رنگ مربوطه، آزمایش می‌کنند و سپس با مقایسه نمودارهای جریان اقدام به اصلاح نمونه رنگ می‌نمایند.

#### ۹. رفتار رئولوژیکی رنگ قبل از اعمال

برای انتقال رنگ به ابزار رنگ‌آمیزی، لازم است که ساختمان رئولوژیکی رنگ در اثر تنش کم به سرعت خرد شود که این تنش توسط غوطه‌ور کردن قلم مو در رنگ یا کشیدن غلطک در سینی حاوی رنگ یا حتی پمپ کردن آن ایجاد می‌شود. خرد شدن ساختمان رنگ به نفوذ آن در سطح کمک می‌کند. ویسکوزیته مناسب رنگ با توجه به روش اعمال آن متفاوت است. برای اغلب رنگ‌ها قابلیت نگهداری در انبار برای مدت طولانی و عدم ته‌نشینی بسیار مهم است. هرچه مخلوط رنگ هموزن تر باشد، پایداری آن در برابر ته‌نشینی بیشتر است. همچنین هرچه شبکه ساختمانی یک رنگ قوی‌تر باشد، نقطه تسلیم آن افزایش یافته و در نتیجه مقاومت آن در برابر ته‌نشینی افزایش می‌یابد.

#### ۱۰. رفتار رئولوژیکی رنگ پس از اعمال

پس از اعمال یک رنگ روی سطح بدنه، با استفاده از خواصی مانند یکنواختی سطح، براقیت، چسبندگی، ضخامت و عدم شره می‌توان کیفیت پوشش را مشخص نمود. به این جهت، پس از اعمال رنگ ساختمان داخلی آن باید در مدت زمان مناسبی شکل گیرد و این مدت زمان باید برای خروج حباب‌های هوا از داخل لایه رنگ کافی باشد. رفتارهای رنگ پس از اعمال را می‌توان به سه بخش ذیل تقسیم کرد:

#### ۴. سرعت برشی<sup>۷</sup>

اگر سرعت بالاترین لایه مایع برابر  $V$  و ضخامت کل مایع برابر  $h$  باشد، سرعت برشی از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\text{سرعت برشی} = V/h$$

#### ۵. گرانروی یا ویسکوزیته<sup>۸</sup>

گرانروی<sup>۹</sup> یک سیال، مقاومت آن در مقابل جریان یافتن و جاری شدن می‌باشد. رفتار یک سیال در مقابل نیروی خارجی و نحوه جریان یافتن آن با نمودارهای گرانروی نشان داده می‌شود و محدوده گرانروی انواع سیالات از میلی پاسکال ثانیه تا صدها پاسکال ثانیه متغیر می‌باشد.

#### ۶. کرنش<sup>۱۰</sup>

دو صفحه را به فاصله  $h$  در نظر می‌گیریم که مایعی بین آن‌ها می‌باشد. اگر صفحه بالایی با نیروی کشیده شده و به اندازه  $S$  جابجا شود، کرنش از فرمول ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\text{کرنش} = S/h$$

در واقع کرنش میزان جابجایی به ازای واحد ارتفاع است، یعنی هرچه جابجایی سیال در اثر نیرو بیشتر باشد کرنش آن بیشتر خواهد بود.

#### ۷. انواع سیالات

سیالات بر اساس رفتارشان در برابر جریان به پنج گروه تقسیم می‌شوند:

- ۱-۷. **سیالات نیوتونی<sup>۱۱</sup>**: سیالاتی هستند که با تغییر سرعت برشی اعمال شده بر آن‌ها، ویسکوزیته شان تغییر نکرده و ثابت می‌ماند.
- ۲-۷. **سیالات منبسط شونده<sup>۱۲</sup>**: سیالاتی هستند که ابعاد مولکول و ویسکوزیته آنها با افزایش تنش، افزایش می‌یابد مانند رنگ‌های High Solid، مواد سرامیکی، نشاسته و پلاستیزول‌ها. جابجایی این سیالات از آنجا مشکل است که در هنگام پمپ کردن گرانروی آن‌ها افزایش یافته و حرکت آن‌ها سخت صورت می‌گیرد.
- ۳-۷. **سیالات شبه پلاستیک<sup>۱۳</sup>**: سیالاتی هستند که با افزایش سرعت برشی اعمال شده، گرانروی آن‌ها کاهش می‌یابد. اغلب رنگ‌ها در این گروه قرار دارند.
- ۴-۷. **سیالات پلاستیک<sup>۱۴</sup>**: این گروه همان سیالات شبه پلاستیک هستند با این تفاوت که این سیالات دارای نقطه تسلیم<sup>۱۵</sup> می‌باشند. نقطه تسلیم حداقل میزان تنش برشی است که در سیال ایجاد جریان می‌کند. مانند کرم‌های دست که تا حد مشخصی از تنش را تحمل کرده و کاهش ویسکوزیته ندارند و زمانی که تنش از آن حد افزایش یافت، گرانروی کاهش خواهد یافت.
- ۵-۷. **سیالات تیکسوتروپیک<sup>۱۶</sup>**: موادی هستند که ساختمان داخلی آن‌ها بر اثر تنش خرد شده و ویسکوزیته شان کاهش می‌یابد و وقتی که تنش قطع شد، پس از مدتی ساختمان داخلی سیال ترمیم شده و به شکل اولیه باز می‌گردد. لذا گرانروی به مقدار اولیه بر خواهد گشت.

<sup>7</sup> Shear rate

<sup>8</sup> Viscosity

<sup>9</sup> Viscosity profiles

<sup>10</sup> Strain

<sup>11</sup> Newtonian

<sup>12</sup> Dilatant

<sup>13</sup> Pseudoplastic

<sup>14</sup> Plastic

<sup>15</sup> Yield value

<sup>16</sup> Thixotropic

### ۱-۱۰. اندازه گیری تیکسوتروپی

خواص تیکسوتروپی رنگ بر روی سایر رفتارهای آن مانند یکنواختی سطح، شره کردن و ضخامت فیلم تر اثر مستقیم دارد. روش های متعددی برای اندازه گیری خاصیت تیکسوتروپیک وجود دارد که در طول زمان پیشرفت چشمگیری داشته است. این روش ها عبارتند از: **الف) روش اندازه گیری مقدار نسبی تیکسوتروپی<sup>۱۷</sup>**: روش اندازه گیری مقدار نسبی تیکسوتروپی به طور اختصار TV نامیده می شود که در این شیوه سرعت برشی ثابت در دو زمان متفاوت، بر نمونه رنگ اعمال شده و سپس ویسکوزیته آن اندازه گیری می شود. TV برابر خارج قسمت ویسکوزیته زمان کوتاه تر بر ویسکوزیته زمان بلندتر است و بدون واحد می باشد.

**ب) روش آزمون دو مرحله ای:** این آزمون برای تعیین تیکسوتروپی رنگ به کار می رود. مرحله اول این آزمون با بار تنش زیاد و مرحله بعد با حداقل تنش انجام می گردد. در مرحله اول ساختمان داخلی رنگ خرد می شود و مرحله دوم برای تشکیل مجدد ساختمان آن می باشد. با اعمال تنش به این سیال و افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش می یابد و سپس با کاهش سرعت برشی، ویسکوزیته افزایش پیدا می کند. در سیالات تیکسوتروپیک چون برای بازسازی ساختمان سیال به زمان زیادی نیاز می باشد، بین دو منحنی فاصله ایجاد می شود، ولی در سیالات پلاستیک و شبه پلاستیک این دو منحنی روی هم قرار می گیرند.

**ج) اندازه گیری تیکسوتروپی به روش دورانی سه مرحله ای:** در این آزمون ابتدا نمونه رنگ را تحت یک سرعت برشی ثابت و بسیار کم (حدود صفر) قرار می دهند و در مرحله دوم همان نمونه رنگ تحت تاثیر سرعت برشی بالا قرار گرفته تا تخریب ساختمانی آن بررسی گردد و مرحله سوم نیز همانند مرحله اول اجرا می شود. مقدار ویسکوزیته در انتهای مرحله اول به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود و با ویسکوزیته انتهای مرحله سوم مقایسه می شود. اگر دو مقدار برابر باشند، سیال تیکسوتروپ نامیده می شود. مدت زمانی که طول می کشد این دو مقدار با هم برابر شوند بسته به نوع پوشش رنگ و کاربرد آن متفاوت است و می تواند از ۱۵ ثانیه تا ۱۵ دقیقه به طول انجامد.

**د) ترکیب آزمون های دورانی و نوسانی در سه مرحله:** در این روش، سه مرحله همانند روش قبل وجود دارد. در مرحله دوم سرعت برشی زیاد و ثابت استفاده می شود و در مراحل سکون (مراحل ۱ و ۳) تنش نوسانی در محدوده کرنش و جابجایی اعمال می شود. محدوده کرنش باید قبلاً تعیین شده باشد. برتری این روش آن است که متغیرهای بیشتری را اندازه گیری می کند. بنابراین خصوصیات نمونه بهتر شناخته می شود.

### ۱-۲. یکنواختی سطح و شره کردن

پس از اعمال رنگ روی سطح، ویسکوزیته باید تا مدتی پایین باقی بماند تا رنگ بتواند روی سطح توزیع شده و ناهمواریهای آن را بپوشاند. توزیع رنگ و شره کردن روی سطوح عمودی در سرعت های برشی بسیار کم و در ۰.۰۱ تا ۰.۱ بر ثانیه اتفاق می افتد. پس رنگ باید در این رنج سرعت برشی مورد بررسی قرار گیرد، زیرا موادی که

در سرعت های برشی بالا ویسکوزیته همانند دارند، ممکن است در سرعت های پایین تر کاملاً متفاوت باشند.

### ۱-۳. ضخامت فیلم تر

پس از اعمال یک پوشش رنگ، باید لایه ای به ضخامت مناسب روی سطح باقی بماند. هر چه نقطه تسلیم رنگ بیشتر باشد، ضخامت لایه باقیمانده بر روی سطح بیشتر است. در واقع پس از اعمال رنگ اگر ساختمان داخلی آن با سرعت زیاد بازسازی گردد یکنواختی سطح ضعیف خواهد بود، ولی چنانچه سرعت بازسازی در حد مناسب باشد، بین خصوصیات یکنواختی سطح و شره رنگ تناسب وجود دارد و سطح یکنواخت تر خواهد شد. اگر باز یافت ساختمان داخلی به کندی صورت گیرد، شره رنگ زیاد شده و برخی از قسمت ها دارای ضخامت بیشتر و بعضی دارای ضخامت کمتر می گردد.

### ۱۱. اثر افزودنی های رنگ<sup>۱۸</sup> بر رئولوژی آن

اغلب افزودنی های مورد استفاده در صنعت رنگ سازی مانند پرکننده ها، پخش کننده ها، مرطوب کننده ها، همتراز کننده ها، ضد رسوب و کلیه مواد شیمیایی که کشش سطحی رنگ را تغییر می دهند در گروه افزودنی های رئولوژی قرار می گیرند. از آن جهت که رفتار رنگ های حلالی با سیستم های امولسیون متفاوت است، لذا افزودنی مناسب هر کدام باید انتخاب گردد. به عنوان مثال، عملکرد افزودنی ضد رسوب به شکل زیر است:

ماده افزودنی با ایجاد یک ساختمان رئولوژیکی در اطراف رنگدانه ها می تواند از رسوب آنها جلوگیری کند. نقطه تسلیم سیال باید به اندازه ای بالا باشد که بتواند با نیروی جاذبه در حالت سکون و یا نیروی ارتعاشی در هنگام حمل نقل مقابله کند. یعنی هر چه ساختمان رنگ قوی تر باشد، نقطه تسلیم آن عدد بزرگتری است. افزودنی ضد رسوب از لخته شدن و اجتماع رنگدانه ها در یک منطقه جلوگیری می کند و از طرفی نیز باعث عدم ته نشینی رنگدانه ها می گردد.

### ۱۲. نتیجه گیری

کنترل رئولوژی رنگ ها از این جهت اهمیت دارد که در فرآیندهایی مثل اختلاط، پمپاژ، انتقال، فیلتراسیون و ته نشینی رنگ چگونگی رفتار آن در برابر نیروهای مکانیکی مشخص می گردد. در این مقاله سعی شده بیشتر نسبت به رفتار رئولوژیکی رنگ خودرو پرداخته شود. این رفتار در زمان اختلاط در مخزن ها، انتقال به دستگاه های پاشش، انتقال از نازل به بدنه خودرو و ایجاد فیلم یکنواخت روی بدنه خودرو از مهمترین عوامل شناسایی رنگ از حیث رئولوژیکی می باشند.

### منابع

- [1] Lambourne, Woodhead ; Paint & Surface Coatings, 1999.  
[2] Rheox-Rheology Handbook

<sup>17</sup> Thixotropy

<sup>18</sup> value Additives