



## عیوب مکانیکی متداول خطکشی‌های اجرا شده با رنگ‌های ترافیکی بادوام در معابر شهری

شهلا پازکی فرد<sup>\*</sup>، مرتضی بهزادنسب

استادیار، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرآیند، گروه رنگ و روکش‌های سطح، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵.

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۰۹ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۶/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۰۲ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۶/۰۸/۰۷

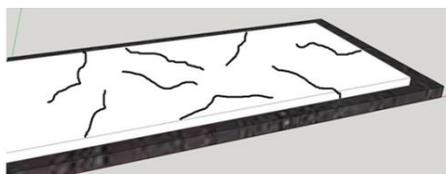
### چکیده

در سال‌های اخیر پوشش‌های ترافیکی یا به اصطلاح متداول، رنگ‌های ترافیکی بادوام در دو نوع "ترموپلاستیک گرم بر پایه رزین‌های هیدروکربنی" و "پلاستیک سرد بر پایه رزین‌های اکریلیک دو جزئی"، در اجرای خطکشی‌های ترافیکی شهر تهران کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. علی‌رغم برخورداری از ضخامت و دوام بالا و همچنین گسترده‌ی کاربرد، مشاهده سه نوع عیب اساسی و قابل توجه پس از گذراندن یک چرخه گرمایش/سرمایش در زمان سرویس‌دهی در این نوع خطکشی‌ها، منجر به تردید مجریان خطکشی در استفاده از رنگ‌های بادوام و در برخی موارد جایگزینی آنها با رنگ‌های سرد کم‌دوام گردیده است. سه عیب مکانیکی اصلی مشاهده شده در اینگونه خطکشی‌ها، عبارتند از ترک خوردگی رنگ یا پوشش، جدایش ورقه‌ای خطوط از سطح آسفالت، و نهایتاً تخریب آسفالت در زیر و یا لبه‌های خطکشی. دلیل اصلی بروز این عیوب چالش برانگیز به ترتیب عبارتند از: ایجاد تنش‌های مختلف (تنش مکانیکی، تنش داخلی در پوشش و تنش ناشی از شرایط جوی)، چسبندگی ضعیف رنگ بر بستر آسفالت‌شده و در نهایت ضعف هم‌چسبی در روکش سطحی آسفالت. در این مقاله با به تصویر کشیدن عیوب مذکور و تکیه بر تعاریف فنی و تئوری‌های مربوط به پدیده تنش، چسبندگی و استحکام هم‌چسبی یا پیوستگی، دلایل بروز این عیوب بیان شده و راه کارهای مناسب برای جلوگیری از بروز عیوب نامبرده به تفکیک ارائه شده است.

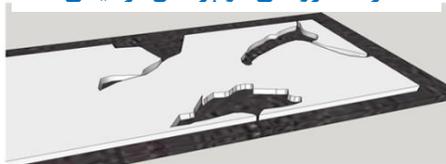
### واژه‌های کلیدی

پوشش ترافیکی، جدایش ورقه‌ای، ترک خوردگی، تنش، چسبندگی.

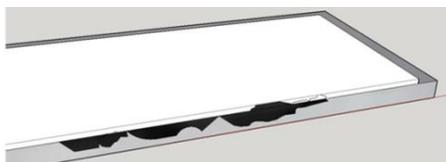
### چکیده تصویری



ترک خوردگی در پوشش ترافیکی



جدایش ورقه‌ای پوشش ترافیکی بادوام از سطح



تخریب آسفالت در کناره‌ها و زیر ناحیه  
خطکشی‌های بادوام



## Causes of Common Mechanical Defects of Durable Road Markings in Urban Roads

Shahla Pazokifard\*, Morteza Behzadnasab

<sup>1</sup>Department of color and surface coatings, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O.Box: 14975-112, Tehran, Iran.

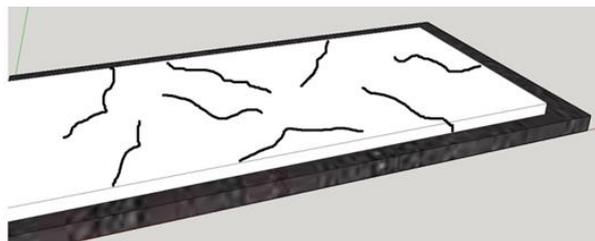
### Abstract

In recent years, durable traffic road markings including hydrocarbon resins based on hot melt thermoplastics, and cold plastic paints based on 2K acrylics have been widely used in urban roads (particularly in Tehran). Durable road markings, in spite of high thickness, appropriate durability in comparison to solvent based cold plastics, and widespread application worldwide, suffer from three main mechanical failures during their service life, especially in the first year after a freeze thaw cycle, in which have given rise to doubts toward replacing these coatings with lower durable traffic paints (i.e. solvent and water based paints). The main failures are paint cracking, delamination of road markings from the surface, and asphalt degradation next to or under the markings. The main causes would be various forms of stresses (i.e. mechanical stress, internal stress, and weathering stress), insufficient adhesion of road markings to asphalt, and failing in cohesive strength of asphalt, respectively. The failures can have different causes, for example problems in paint formulation (e.g. incorrect filler content or wrong choice of resin), improper application of paint or even substrate conditions. In this article, each failure modes specific to durable road markings, will be discussed from scientific views and the rolls of internal and external stress as well as adhesion, and cohesion strength of paint and substrate will be explained. Future more, some remedies to prevent the failures will be suggested.

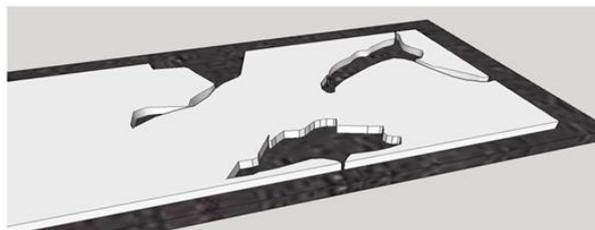
### Keywords

Road markings, Delaminating, Cracking, Stress, Adhesion.

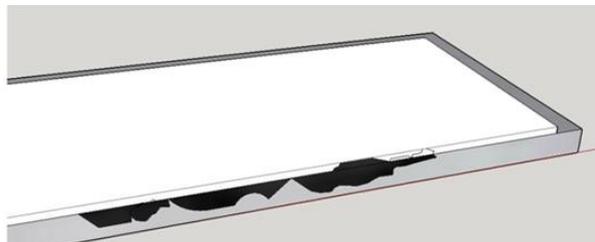
### Graphical abstract



Surface cracking of durable road markings



Delamination of road markings from surface of asphalt



Asphalt degradation next to or under the markings

## ۱- مقدمه

(شامل اکسترژن، اسکرید و افشانش)، طرح و الگوی خط‌کشی مورد نظر بین ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ میکرون متغیر می‌باشد. عموماً از این پوشش‌ها جهت خط‌کشی خطوط محوری در بزرگراه‌ها استفاده می‌شود.

رنگ پلاستیک سرد یا رنگ‌های دو یا سه جزئی، رنگ‌های مایعی هستند که در اثر واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی منومرها و الیگومرهای موجود در فرمول‌بندی رزین و افزایش وزن مولکولی رزین، سخت شده و جامد می‌شوند. از این نوع پوشش‌ها با توجه به اجرای دستی (توسط کاردک)، عمدتاً در خط‌کشی خطوط عرضی عابر پیاده، خطوط جناقی در حاشیه بزرگراه‌ها و سرجزیره‌ها، و علائم افقی شامل خط‌نوشته‌ها، پیکان‌های جهت‌نما استفاده می‌شود. رنگ‌های پلاستیک سرد اغلب بر پایه رزین‌های اکریلیک بر پایه منومرهای اکریلاتی می‌باشند. جزء اول عموماً مخلوطی از الیگومرها و منومرهای اکریلاتی، رنگ‌دانه‌ها، مواد افزودنی و ترکیبات شتاب‌دهنده و جزء دوم شامل آغازگر پلیمریزاسیون رادیکالی (معمولاً پودر بنزوئیل پراکساید) می‌باشد که با نام سخت‌کننده نیز توسط مجریان خط‌کشی شناخته می‌شود. پراکساید، یک آغازگر واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی است که در دماهای بالای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود، اما برای تجزیه در دمای معمولی نیاز به استفاده از یک ماده شتاب‌دهنده دارد [۴] (شکل ۱-الف). در برخی موارد ترکیب شتاب‌دهنده به صورت مجزا و به عنوان جزء سوم توسط تولیدکننده رنگ ارائه می‌گردد. با افزودن بنزوئیل پراکساید به جزء اول، در حضور شتاب‌دهنده، واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی در دمای محیط انجام شده و با افزایش وزن مولکولی پلیمر و شبکه‌ای شدن جزئی [۵] (شکل ۲-ب)، رنگ پس از اجرا بر سطح آسفالت سخت می‌شود.

عیوب مشاهده شده در خط‌کشی‌های انجام شده صرف نظر از مشکلات ناشی از اجرای خط‌کشی، در رنگ‌های مختلف بسته به ماهیت رنگ متفاوت می‌باشند. به طور مثال ثبات سایشی ضعیف، قیرزدگی و زمان خشک شدن طولانی از جمله عیوب متداول در رنگ‌های کم دوام سرد، و ترک خوردگی رنگ، جدایش ورقه‌ای خطوط از سطح آسفالت، و تخریب آسفالت در زیر و یا لبه‌های خط‌کشی [۶]، از جمله عیوب متداول در خط‌کشی با رنگ‌های بادوام می‌باشند.

## ۳- دلایل کارایی مناسب پوشش‌ها

عوامل متعددی بر کارایی پوشش اعمال شده بر روی یک زیرآیند تأثیر دارد. از جمله این موارد می‌توان فرمول‌بندی پوشش (یا کیفیت پوشش) و یا استحکام هم‌چسبی و تراوایی پوشش، چسبندگی پوشش بر زیرآیند، تر شونده‌گی (فرآیندی که یک مایع بر روی زیرآیند پهن یا گسترده شده و در تماس کامل با سطح زیرآیند قرار می‌گیرد) را نام برد [۷-۹]. در ادامه به منظور ارزیابی عیوب و دلایل افت خواص خط‌کشی‌ها در زمان سرویس‌دهی و با این دیدگاه که یک خط‌کشی بادوام صرف نظر از نوع آن پوششی پلیمری است که بر روی زیرآیندی از جنس آسفالت قرار گرفته است، به توضیح تئوری‌های چسبندگی پوشش بر سطح، استحکام هم‌چسبی پوشش، استحکام هم‌چسبی آسفالت، تراوایی و مقاومت پوشش در برابر شرایط جوی پرداخته می‌شود.

خط‌کشی در معابر شهری از جمله الزامات هدایت مسیر، ایجاد ایمنی و نظم‌دهی در رانندگی است. دوام و ماندگاری خط‌کشی‌های ترافیکی نه تنها از لحاظ ایمنی، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز حائز اهمیت می‌باشد. یکی از متداول‌ترین روش‌های خط‌کشی، استفاده از پوشش‌های ترافیکی یا به اصطلاح متداول رنگ‌های ترافیکی است. رنگ‌های ترافیکی در دو دسته خط‌کشی‌های کم دوام با ضخامت کم و خط‌کشی‌های بادوام با ضخامت بیشتر در خط‌کشی معابر بکار می‌روند [۱، ۲]. رنگ ترافیکی بادوام پس از اجرای خط‌کشی را می‌توان لایه‌ای ضخیم از یک پوشش پلیمری در نظر گرفت که بر روی زیرآیندی از جنس آسفالت قرار گرفته است. عموماً زمانی پوشش پلیمری قرار گرفته بر روی یک زیرآیند (سطحی که پوشش روی آن قرار می‌گیرد) از کارایی مناسب برخوردار خواهد بود که چسبندگی<sup>۱</sup> مناسبی بر سطح زیرآیند داشته، از پیوستگی یا استحکام هم‌چسبی<sup>۲</sup> خوبی برخوردار بوده، در برابر شرایط جوی و تخریب ناشی از مواد شیمیایی و آلاینده‌ها مقاومت داشته، از خواص فیزیکی و استحکام مکانیکی مناسب برخوردار بوده و با توجه به شرایط کاربرد از نفوذ عوامل مخرب ممانعت نماید [۳]. در این مقاله برخی عوامل اصلی که در عملکرد مناسب پوشش‌های ترافیکی مؤثر بوده و یا برعکس منجر به بروز عیوب متداول در خط‌کشی‌های اجرا شده با آنها می‌شوند، توضیح داده خواهد شد.

## ۲- انواع رنگ‌های ترافیکی

انواع رنگ‌ها یا پوشش‌های ترافیکی را می‌توان در دو دسته خط‌کشی‌های "کم دوام" و "بادوام" طبقه‌بندی نمود. منظور از پوشش‌های کم دوام، پوشش‌های حلال پایه و آب پایه بوده که با عنوان رنگ سرد شناخته شده و ضخامت فیلم خشک آنها پس از اجرا ۳۵۰ تا ۶۰۰ میکرون می‌باشد. طول عمر این پوشش‌ها در زمان سرویس‌دهی براساس نوع و میزان تردد خودروها، بین ۳ تا ۱۲ ماه پیش‌بینی می‌شود. حال آنکه پوشش‌های بادوام آن دسته از پوشش‌ها هستند که با ضخامت حداقل ۱۵۰۰ میکرون و حداکثر ۶۰۰۰ میکرون اجرا شده و طول عمر مفید آنها بین ۳ تا ۵ سال پیش‌بینی می‌شود. از جمله پوشش‌های بادوام می‌توان به دو نوع ترموپلاستیک گرم<sup>۳</sup> و پلاستیک سرد<sup>۴</sup> اشاره نمود.

رنگ ترموپلاستیک گرم، رنگی جامد به شکل پودر، گرانول و یا بلوکی شکلی است که از رزین هیدروکربنی و یا الکید، رنگ‌دانه، مواد افزودنی، دانه‌های شیشه‌ای پیش‌مخلوط و گاهی ترکیبات مجتمع‌کننده<sup>۵</sup> یا مصالح دانه‌ای تشکیل شده است. این رنگ در مخزن پیش‌گرم‌کن ماشین اجرای خط‌کشی، به صورت مذاب درآمده و پس از اجرا بر سطح آسفالت سرد شده و جامد می‌شود. ضخامت خط‌کشی با رنگ گرم، بسته به روش اجرا

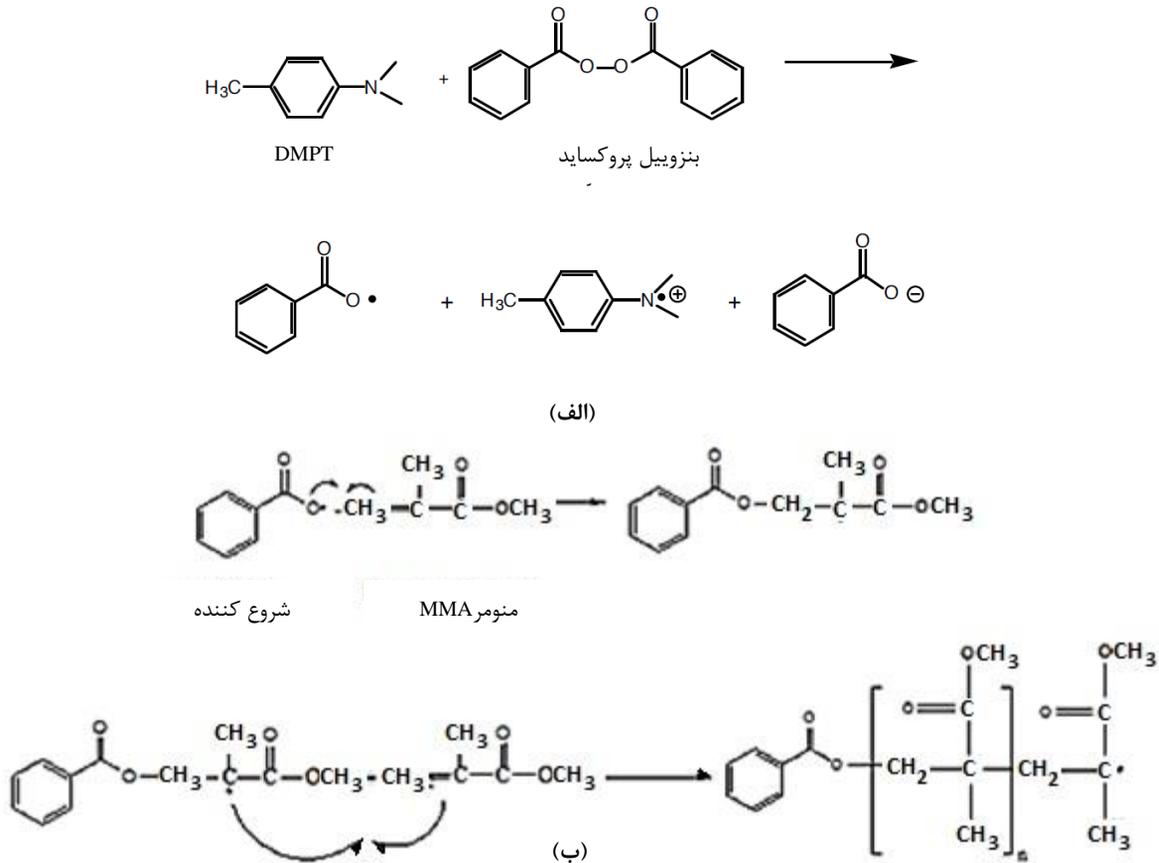
<sup>1</sup> Adhesion

<sup>2</sup> Cohesion Strength

<sup>3</sup> Hot melt thermoplastic road marking

<sup>4</sup> Cold plastic road marking

<sup>5</sup> Aggregates



شکل ۱- (الف) تجزیه بنزوپروکساید و تشکیل رادیکال آزاد در دمای محیط با استفاده از مواد شتاب‌دهنده (*N,N*-دی‌متیل‌پارا‌تولوئیدین) و (ب) واکنش پیشرفت پلیمریزاسیون منومرهای اکریلاتی از طریق پلیمریزاسیون رادیکالی در سطح خط‌کشی [۴، ۵].

### ۱-۳-چسبندگی

منظور از چسبندگی، استحکام اتصال رنگ با سطح لایه رویه معبر آسفالت‌شده است. هرچند فقدان یا ضعف در چسبندگی تنها عامل در افت بازده یک پوشش نیست، اما در صورت چسبندگی مناسب پوشش بر زیرآیند، احتمال افت خواص و کارایی در اثر سایر عوامل در زمان سرویس‌دهی پوشش کمتر خواهد شد.

بطور کلی چسبندگی حاصل تجمیع عواملی مانند پیوند شیمیایی اولیه<sup>۱</sup>، پیوند ثانویه یا قطبی<sup>۲</sup> و پیوند مکانیکی<sup>۳</sup> می‌باشد [۱۰]. پیوند شیمیایی اولیه با استحکام‌ترین پیوندهاست که اتم‌ها را در یک مولکول در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و پیوندهای یونی و کووالانسی را شامل می‌شود. پیوندهای یونی بر اساس نیروهای الکتریکی استوار بوده و یون‌های با بار منفی (مانند آنیون کلراید) را در کنار یون‌های با بار مثبت (مانند کاتیون سدیم) نگه می‌دارد. این نیروها بسیار قوی بوده و غلبه بر آنها بدون استفاده از حلال‌های قطبی مشکل است، پیوندهای کووالانسی با به

اشتراک گذاشتن الکترون‌ها به جای انتقال کامل آنها بین اتم‌ها تشکیل می‌شوند. اغلب پیوندهای بین ترکیبات آلی از این نوع پیوندها هستند. پیوند شیمیایی ثانویه بر اثرات متقابل قطبی از قبیل پیوند هیدروژنی و نیروهای واندروالس استوار است. چنین نیروهایی بر اساس توزیع ناهمگون بار الکتریکی درون مولکول‌های دوقطبی‌ها ایجاد می‌شوند. بخش انتهایی مولکول که دارای بار جزئی مثبت می‌باشد، با قسمتی از مولکول مجاور خود که دارای بار جزئی منفی است، جذب می‌شود. پوشش‌های دارای گروه‌های عاملی متشکل از اتم‌های با الکترون‌گاتیویته کاملاً متفاوت مانند گروه‌های هیدروکسیل (OH) و آمین (NH)، تمایل بیشتری به تشکیل پیوندهای قطبی با زیرآیند دارند. اگر زیرآیند کاملاً خنثی باشد، چنین اتصال شیمیایی رخ نخواهد داد. نیروهای مکانیکی سومین عامل مداخله‌کننده در چسبندگی محسوب می‌شوند. عموماً پوشش‌ها بر روی سطوح زبر بهتر از سطوح صاف می‌چسبند. دلیل آن درگیری‌های مکانیکی ساده‌ای است که بین زنجیرهای پلیمری دو جسم چسبنده ایجاد می‌شود.

در چسبندگی یا اثر متقابل یک رنگ ترافیکی بر سطح معبر آسفالت، عمدتاً نیروهای ثانویه و مکانیکی توأم دخالت دارند. چسبندگی یک پدیده بین سطحی است که از مشخصات فیزیکی و شیمیایی هر دو جزء

<sup>1</sup> Primary chemical bonding

<sup>2</sup> Secondary or polar bonding

<sup>3</sup> Mechanical bonding

در سطح و افزایش میزان سیلیکای موجود در آنها عبارتند از: مرمر<sup>۱۰</sup>، سنگ آهک<sup>۱۱</sup>، بازالت<sup>۱۲</sup>، دولومیت<sup>۱۳</sup>، ماسه<sup>۱۴</sup> و گرانیت<sup>۱۵</sup> و در نهایت کوارتزیت<sup>۱۶</sup> که سنگ آهک به دلیل برخورداری از گروه‌های عاملی قلیایی در سطح بیشترین اثرمتقابل را با آسفالت‌های اسیدی دارد. مکان‌های فعال با خواص اسیدی یا قلیایی موجود در سطح سنگدانه‌ها اغلب باردار بوده یا بطور جزئی باردار می‌باشند و به همین دلیل هم می‌توانند جذب اجزاء قطبی موجود در آسفالت شده و یا با آنها واکنش دهند. آزمون‌های اتوگرافی انجام شده توسط راس<sup>۱۷</sup> در ۱۹۹۱ حضور گروه‌های فعال در سطح سنگدانه‌ها را ثابت کرده است [۱۴]. عاملیت قطبی موجود در سطح تماس بین آسفالت و سنگدانه منجر به پیوندهای واندروالس، پیوند هیدروژنی و نیروهای الکتروستاتیک می‌شوند [۱۴]. بدین ترتیب شیمی سطح معابر آسفالت‌شده به عنوان زیرآیندی برای رنگ ترافیک ثابت نبوده و با توجه به نسبت وزنی آسفالت به سنگدانه، نو یا کهنه بودن معبر و میزان پیرشدگی در آسفالت متغیر خواهد بود. در تحقیق انجام شده توسط اسکات<sup>۱۸</sup> در ۱۹۷۸ حضور گروه‌های اکسیژن‌دار آسفالتین به عنوان عاملی در جذب سطحی آسفالت بر سطح سنگدانه‌ها اثبات شد. وجود سایر گروه‌های عاملی قطبی در آسفالتین در همان سال توسط پاپیرر<sup>۱۹</sup> و فریتچی<sup>۲۰</sup> نیز گزارش شده است. تحقیقات بعدی در زمینه ارزیابی استحکام چسبندگی آسفالت به سنگدانه‌ها، حضور گروه‌های قطبی در آسفالت و سطح سنگدانه‌ها و ایجاد پیوندهای شیمیایی را تأیید کرده است. لذا پُر واضح است که حضور گروه‌های قطبی مختلف و اجزاء آلی فلزی در آسفالت و قطبیت‌های مختلف در سطح سنگدانه‌ها از یک طرف و زبری سطح معبر و خلل و فرج موجود در سطح سنگدانه‌ها از طرف دیگر، به ترتیب منجر به ایجاد نیروهای ثانویه و درگیری‌های مکانیکی و در نتیجه چسبندگی یا اثر متقابل یک رنگ ترافیکی بر معبر آسفالت‌شده می‌شوند. گروه‌های اسید کربوکسیلیک موجود در ساختار مولکولی قیر نیز که در اثر پیرشدگی آسفالت طی فرآیند اکسیداسیون در ساختار آن تشکیل می‌شوند، در کنار سایر گروه‌های قطبی مانند کتون‌ها، سولفایدها و بازهای نیتروژن‌دار منجر به تقویت پیوندهای شیمیایی پوشش پلیمری با آسفالت شده و بدین ترتیب در چسبندگی پوشش بر سطح آسفالت از طریق سازوکار پیوند شیمیایی اولیه ایفای نقش می‌کنند [۱۴، ۱۶، ۱۷]. هر چه گروه‌های قطبی موجود در آسفالت کمتر باشد (مثلاً هیدروکربن‌های آروماتیک در آسفالت بیشتر

چسبنده یعنی هم رنگ و هم سطح معبر آسفالت‌شده اثر می‌پذیرد. لازم به ذکر است که معبر آسفالت‌شده<sup>۱</sup> و آسفالت<sup>۲</sup> که به اشتباه مصطلح در متون فارسی هر دو آسفالت نامیده می‌شوند، به لحاظ فنی با یکدیگر تفاوت دارند [۱۱، ۱۲]. یک معبر آسفالت‌شده از لایه‌های مختلفی تشکیل شده و همواره سطح لایه سطحی<sup>۳</sup> آن که از ترکیب آسفالت، مجتج شده<sup>۴</sup> یا سنگدانه و مواد افزودنی مختلف تشکیل شده، در تماس با رنگ ترافیکی قرار دارد. لذا شیمی هر یک از اجزاء سازنده این لایه سطحی در چسبندگی رنگ ترافیکی نقش دارد. آسفالت ماده‌ای است که اساساً از تصفیه یا خالص‌سازی نفت خام بدست می‌آید، مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات آلی است که ثابت‌های فیزیکی و ترکیب شیمیایی ثابتی ندارد. اجزاء عمومی آسفالت عبارتند از: ۲۵-۵ درصد وزنی آسفالتین‌ها<sup>۵</sup> (ترکیبات آروماتیک تراکم یافته و قطبی با وزن مولکولی ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰) و مالتین‌ها<sup>۶</sup> که خود شامل ۳۰-۱۵ درصد وزنی رزین‌ها (ترکیبات آروماتیک قطبی با وزن مولکولی بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰۰)، ۴۵-۴۰ درصد وزنی آروماتیک‌ها (ترکیبات آروماتیک غیرقطبی با وزن مولکولی ۲۰۰ تا ۳۰۰۰)، و ۲۰-۵ درصد وزنی مواد اشباع (هیدروکربن‌های آروماتیک و ترکیبات حلقوی دارای استخلاف آلکیل با وزن مولکولی ۲۰۰ تا ۵۰۰۰) می‌باشند. نوع و ساختار مولکولی آسفالت با توجه به مقدار هیدروکربن‌های موجود در آن، از یک منبع به منبع دیگر متفاوت است. عناصر موجود در آسفالت عمدتاً عبارتند از کربن، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، گوگرد، وانادیم، آهن و نیکل [۱۳-۱۴]. از منظری دیگر آسفالت از قیر (مخلوط ترکیبات هیدروکربنی مختلف) تشکیل شده که شامل سه جزء اصلی آسفالتین‌ها<sup>۷</sup> [۱۵]، پیوندها<sup>۸</sup> و روغن‌ها<sup>۹</sup> می‌باشد و با قرارگیری در حلال‌های قطبی، جزء آسفالتین آن به صورت نامحلول و پیونده و روغن آن به صورت محلول در می‌آیند. بدین ترتیب آسفالت حاوی گروه‌های غیرقطبی و قطبی (گروه‌های اسیدی شامل انیدریدها و اسیدهای کربوکسیلی) با عدد اسیدی بین صفر تا ۴ mg KOH/g) است [۱۳، ۱۶، ۱۷]. سنگدانه‌ها نیز به عنوان جزئی دیگر از معبر آسفالت‌شده گاهی در تماس با رنگ ترافیکی قرار می‌گیرند (به ویژه در معابر آسفالت‌شده فرسوده). عموماً سطح سنگدانه‌ها از لحاظ بافت سطحی نامتجانس و با یکدیگر متفاوت می‌باشند. دلیل نامتجانس بودن آنها حضور مکان‌های با ترکیب درصدهای مختلف و میزان فعالیت‌های مختلف در سطح سنگدانه‌ها می‌باشد. سنگدانه‌های مصرفی در تهیه معابر آسفالت‌شده به ترتیب بر اساس تغییر از خاصیت قلیایی به اسیدی

10 Marble  
11 Limestone  
12 Basalt  
13 Dolomite  
14 Sandstone  
15 Granite  
16 Quartzite  
17 Ross  
18 Scott  
19 Papirer  
20 Fritschy

1 Pavement asphalt  
2 Asphalt  
3 Surface layer  
4 پرکننده‌های دانه درشت در اشکال گرد یا گوشه‌دار  
5 Asphaltenes  
6 Maltenes  
7 Asphaltenes  
8 Resins  
9 Oils

پلیمر، امکان در هم تنیدگی و گره خوردگی زنجیرهای پلیمری با یکدیگر بیشتر شده و بدین ترتیب مقاومت مکانیکی پوشش و در نتیجه هم‌چسبی پوشش افزایش می‌یابد. افزایش چگالی پیوندهای عرضی رزین نیز اثر مشابهی داشته و افزایش تعداد پیوندهای عرضی، موجب افزایش استحکام هم‌چسبی پوشش می‌شود. در اثر برقراری پیوندهای شیمیایی بین زنجیرهای مجاور یک شبکه در هم تنیده پلیمری ایجاد شده و استحکام هم‌چسبی بالایی ایجاد خواهد شد. دلیل افزایش این استحکام، انرژی بسیار زیادی است که برای غلبه بر تعداد زیاد پیوندهای عرضی ایجاد شده مورد نیاز خواهد بود. هرچند از لحاظ استحکام هم‌چسبی، افزایش پیوندهای عرضی امری مطلوب است اما این امر از طرف دیگر موجب کاهش مقاومت در برابر ضربه پوشش شده و پوشش حاصله در اثر برخورد ناگهانی اجسام سخت، راحت‌تر از پوشش‌های حاوی پلیمرهای با زنجیر منعطف‌تر و یا چگالی پیوندهای عرضی پایین‌تر خرد می‌شود [۸]. استحکام هم‌چسبی در رنگ گرم ترافیکی، عمدتاً به ساختار شیمیایی و وزن مولکولی رزین مصرفی و همچنین غلظت حجمی رنگدانه در فرمول‌بندی پوشش‌ها و در رنگ پلاستیک سرد با توجه به وجود پیوندهای عرضی جزئی، علاوه بر موارد مذکور به حضور پیوندهای عرضی احتمالی نیز وابسته است [۱۸]. لذا انتخاب رزین نامناسب و ضعف در فرمول‌بندی اینگونه پوشش‌های ترافیکی می‌تواند منجر به شکسته شدن و یا ترک خوردگی خط‌کشی‌های اجرا شده با رنگ‌های ترافیک گرم و پلاستیک سرد در زمان سرویس‌دهی آنها شود. لازم به ذکر است استحکام هم‌چسبی روکش آسفالت نیز به عنوان زیرآیند و سطح زیر خط‌کشی، از ساختار شیمیایی و ترکیب درصد اجزاء در فرمول‌بندی و اجرای روکش آسفالت اثر می‌پذیرد [۱۹]. ضعف در ساختار، انتخاب اجزاء و ترکیب درصد نادرست اجزاء در تهیه روکش آسفالت منجر به افت استحکام هم‌چسبی و در نتیجه ترک خوردگی در آن می‌شود.

### ۳-۳- تراوایی<sup>۴</sup>

کلیه پوشش‌ها تا حدی تراوا هستند. به بیان دیگر هیچ پوششی نیست که بطور کامل و صددرصد ناتراوا باشد [۲۰، ۸]. پوشش‌های محافظ در مقابل خوردگی با ایجاد ممانعت در برابر تراوایی آب، اکسیژن و نمک‌ها، سطوح زیرین به خصوص فلزات را در برابر تخریب محیطی مخصوصاً خوردگی محافظت می‌کنند، حال آنکه پوشش‌های بادوام ترافیکی به ویژه رنگ‌های دوجزئی، به دلیل فشردگی و ضخامت بالا عموماً ناتراوا بوده و این ناتراوایی نتایج نامطلوبی را در بسیاری موارد به همراه خواهد داشت. به بیان دیگر با توجه به ناتراوایی و ممانعت پوشش‌های ترافیکی بادوام از خروج آب از سطح معبر آسفالت‌شده، تجمع آب و رطوبت و تشدید جدا شدگی سنگدانه از آسفالت در زیر لایه رنگ (رخداد پدیده جدایش<sup>۵</sup>) [۲۲، ۲۱]. تخریب آسفالت در زیر لایه رنگ در زمان سرویس‌دهی اتفاق می‌افتد. از جمله عوامل اصلی در تراوایی یک پوشش، می‌توان نسبت رنگدانه به پیونده،

باشند)، تمایل ذاتی کمتری برای چسبندگی آسفالت به سنگدانه یا رنگ ترافیکی وجود خواهد داشت. حال آنکه در چسبندگی رنگ گرم نقش نیروهای مکانیکی پررنگ‌تر از نیروهای شیمیایی به نظر می‌رسد. زیرا اجرای رنگ گرم مذاب در دمای بالا (حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) منجر به نفوذ مواد مذاب به داخل خلل و فرج و ناهمواری‌های سطحی آسفالت، نرم شدن آسفالت در ناحیه فصل مشترک پوشش و آسفالت و متعاقباً درگیری مکانیکی جزء پلیمری پوشش با اجزاء آسفالت در فصل مشترک و ایجاد چسبندگی می‌شود. به همین دلیل اجرای رنگ گرم مذاب در دمای اختلاط پایین (مانند ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و هوای سرد (که دمای سطح آسفالت پایین است)، به دلیل عدم نفوذ مناسب رنگ در سطح آسفالت، عموماً منجر به افت چسبندگی در زمان بهره‌برداری خط‌کشی می‌شود. همانطور که توضیح داده شد، شیمی سطح آسفالت نیز در ایجاد پیوند شیمیایی اولیه موثر است [۱۱، ۱۲]. لازم به ذکر است که در آسفالت‌های فرسوده (با قیر کمتر و بیرون‌زدگی سنگدانه)، به منظور بهبود چسبندگی پوشش با آسفالت، عموماً استفاده از آستر مناسب قبل از اجرای رنگ گرم امکان برقراری پیوندهای شیمیایی با آسفالت را مهیا می‌سازد. در چسبندگی رنگ پلاستیک سرد بر سطح آسفالت نیز پیوندهای شیمیایی و مکانیکی نقش اصلی را بر عهده دارند. اهمیت اجرای آماده‌سازی سطح قبل از اعمال رنگ بر سطح آسفالت ناشی از همین موضوع است. حضور آلاینده‌های روغنی و ذرات گرد و غبار بر سطح آسفالت، به دلیل ممانعت از تشکیل پیوندهای مذکور منجر به افت استحکام و چسبندگی می‌شود. در اعمال رنگ‌های کم دوام بر سطح آسفالت، به دلیل ضخامت کمتر رنگ اجرا شده تمیز کردن و زدودن سطح از ذرات آلاینده و گرد و غبار قبل از اجرای خط‌کشی از اهمیت نسبتاً بیشتری برخوردار است.

### ۳-۲- استحکام هم‌چسبی

یکی از اشکالات مرسوم در سامانه‌های پوششی، ترک خوردن پوشش در زمان سرویس‌دهی می‌باشد. به این پدیده نقص هم‌چسبی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. نسبت وزنی پرکننده به رزین، وزن مولکولی رزین مصرفی و چگالی پیوندهای عرضی ایجاد شده پس از پخت در پوشش از مهم‌ترین عوامل هستند که در بروز این نقص نقش دارند. نسبت وزنی پرکننده به رزین تأثیر فراوانی بر خواص نهایی پوشش دارد. در غلظت‌های حجمی رنگدانه<sup>۲</sup> (PVC) نزدیک به غلظت حجمی بحرانی رنگدانه<sup>۳</sup> (CPVC)، قدرت هم‌چسبی افت قابل توجهی کرده و پوشش‌های حاوی حجم بالایی از پرکننده اغلب هم‌چسبی ضعیفی دارند و شایع‌ترین دلیل بروز نقص در اینگونه پوشش‌ها، ضعف در هم‌چسبی پوشش است. در پلیمرهای با ساختار خطی و یا با دانسیته اتصالات عرضی پایین، وزن مولکولی بیشتر موجب بهبود خواص هم‌چسبی می‌گردد. با افزایش اندازه زنجیرهای

<sup>1</sup> Cohesive Failure

<sup>2</sup> Pigment Volume Concentration, PVC

<sup>3</sup> Critical Pigment Volume Concentration, CPVC

<sup>4</sup> Permeability

<sup>5</sup> Stripping

نوع رنگدانه مصرفی در پوشش، ساختار پوشش و چگالی شبکه‌های شدن در پوشش را نام برد.

تراوایی معمولاً در محدوده کمتر از CPVC کم بوده و در بالای آن به شدت افزایش می‌یابد. دلیل آن هم وجود مقدار ناکافی از پیونده برای پرکردن منافذ میکروسکوپی یا حفرات موجود بین ذرات رنگدانه است. اگرچه که این روند صرف نظر از نوع رنگدانه مصرفی همواره صحیح است، اما در یک درصد وزنی یکسان از رنگدانه‌ها، رنگدانه‌های با شکل ورقه‌ای یا صفحه‌ای شکل مانند میکا، آلومینیم و اکسید آهن میکایی نسبت به رنگدانه‌های کروی شکل از خواص ممانعتی بهتر و تراوایی کمتری برخوردار می‌باشند. رزین‌های گرماسخت با چگالی شبکه‌ای بالا، مانند اپوکسی‌های پخت‌شونده با آمین‌ها، ناتراواتر از پیونده‌های خطی یا پیونده‌های با چگالی شبکه‌ای کمتر می‌باشند. این یک پدیده فیزیکی ساده است، چراکه چگالی شبکه‌ای بیشتر خود به معنای فضای کمتر برای نفوذ مواد شیمیایی است. میزان تراوایی در پوشش‌های مختلف بسته به کاربرد آنها می‌تواند در کارایی پوشش موثر باشد. در پوشش‌های حفاظتی اعمال شده بر روی فلزات، کمترین میزان تراوایی نسبت به رطوبت، گازها و عوامل شیمیایی خورنده مد نظر است، حال آنکه در برخی دیگر از پوشش‌ها مانند پوشش‌های ترافیکی اجرا شده بر روی آسفالت، هرچند تراوایی زیاد به دلیل احتمال جذب آلودگی نامطلوب است اما به دلیل نیاز به دفع رطوبت و آب تجمع یافته در زیر لایه خط‌کشی برخوردار از تراوایی در حد بهینه الزامی است. رنگ‌های ترافیکی بادوام عموماً به دلیل برخوردار از ضخامت بالا، تراوایی کمتری نسبت به پوشش‌های با ضخامت کمتر در رنگ‌های ترافیکی کم دوام دارند. ضخامت بیشتر همواره به معنی بهتر بودن کیفیت و دوام یک پوشش نمی‌باشد. ضخامت بالای پوشش نه تنها منجر به ایجاد و تجمع تنش<sup>۱</sup> (نیرو بر واحد سطح) در پوشش می‌شود [۲۳]، بلکه منجر به دیرتر سرد شدن رنگ‌های گرم پس از اجرا و بیش از حد گرم شدن رنگ‌های دوجزیبی (به دلیل گرمازا بودن واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی) در خط‌کشی شده که خود می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در کیفیت پوشش مورد نظر شود.

#### ۴-عیوب فیزیکی مکانیکی مشاهده شده در خط‌کشی‌های ترافیکی بادوام

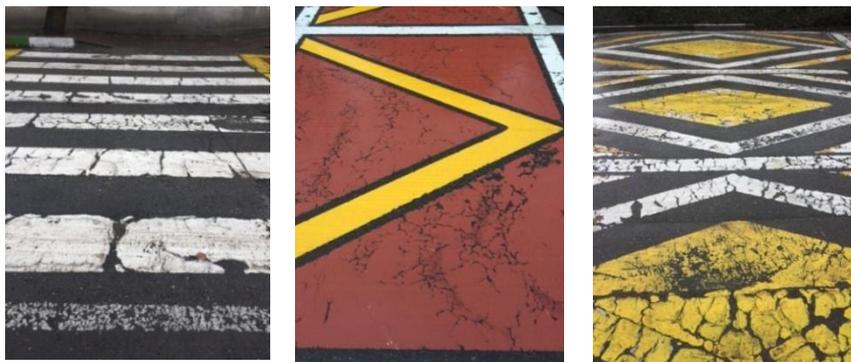
در سال‌های اخیر پوشش‌ها یا به اصطلاح متداول، رنگ‌های ترافیکی بادوام در دو نوع "ترموپلاستیک گرم بر پایه رزین‌های هیدروکربنی" و "پلاستیک سرد بر پایه رزین‌های اکریلیک دو جزیبی"، در اجرای خط‌کشی‌های ترافیکی در معابر شهر تهران کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. همانگونه که گفته شد، علی‌رغم انتظار دوام بالا و گستردگی کاربرد، سه نوع عیب اساسی و چالش برانگیز در زمان سرویس‌دهی خط‌کشی‌های اجرا شده با این رنگ‌ها در معابر شهر تهران مشاهده شده

است. سه عیب اصلی فیزیکی مکانیکی مشاهده شده در این‌گونه خط‌کشی‌ها پس از گذراندن یک چرخه گرمایش/سرمایش فصلی به ترتیب عبارتند از: ترک‌خوردگی رنگ یا پوشش (شکل ۲)، جدا شدن ورقه‌ای رنگ از سطح آسفالت (شکل ۳)، و در نهایت تخریب آسفالت در زیر و یا لبه‌های خط‌کشی (شکل ۴). همین امر منجر به تردید مجریان خط‌کشی در استفاده از رنگ‌های بادوام و حتی در برخی موارد جایگزینی با رنگ‌های سرد کم‌دوام گردیده است.

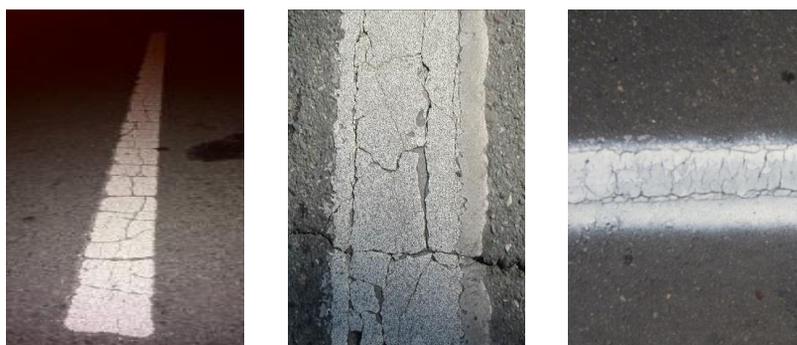
#### ۴-۱-دلائل بروز عیوب

همواره این سوال مطرح می‌شود که چرا یک پوشش در زمان سرویس‌دهی کارایی خود را از دست می‌دهد؟ کیفیت نامناسب پوشش، روش اجرای نادرست، انتخاب نادرست پوشش، و یا قرارگیری در معرض شرایط محیطی غیرمنتظره از جمله دلائل افت کارایی یک پوشش می‌باشند. اگر دلیل بروز عیوب در پوشش یکی از عوامل نامبرده یا ترکیبی از آنها باشد، این واقعیت وجود دارد که پوشش وقتی کارایی خود را از دست می‌دهد که در معرض تنش قرار گرفته باشد. تنش نیروی اعمال شده بر واحد سطح است که منجر به کشش یا کشیده‌شدن، تغییر اندازه یا تغییر شکل یک جسم می‌شود. اگرچه که تنش می‌تواند منشأهای متفاوتی از قبیل فشارهای فیزیکی و مکانیکی، حمله شیمیایی، تخریب با پرتو فرابنفش (UV) و یا حتی تمایل پوشش به دفع انرژی‌های ذخیره شده داخلی داشته باشد، اما پاسخ پوشش به هر نوع تنشی، تمایل به تغییر شکل در پوشش است. به منظور بررسی دلائل بروز عیوب در خط‌کشی‌های ترافیکی و نشان دادن نقش تنش در بروز عیوب نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۴، تصویر نمادین این عیوب در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف، ترک خوردگی پوشش بدون جداشدگی از سطح آسفالت نشان داده شده است. این مشکل عمدتاً به دلیل استحکام هم‌چسبی ضعیف پوشش بوده و می‌تواند از ضعف در فرمول‌بندی پوشش و یا کیفیت نامناسب پوشش و در نتیجه عدم مقاومت پوشش در برابر تنش وارده ناشی شود. در شکل ۵-ب، جدایش ورقه‌ای پوشش از سطح آسفالت نشان داده شده است. این مشکل ناشی از ضعف در چسبندگی پوشش به آسفالت بوده به گونه‌ای که نیروهای ضعیف چسبندگی تاب مقاومت در برابر تنش‌های حاصل از انبساط و انقباض ناشی از گرمایش و سرمایش‌های فصلی را نیاورده و در نهایت جداشدگی پوشش از سطح را به دنبال دارد. در شکل ۵-ج، تخریب آسفالت در کناره‌ها و زیر ناحیه خط‌کشی نشان داده شده است. این مشکل اساساً به ضعف در استحکام هم‌چسبی لایه سطح آسفالت و عدم توانایی روکش آسفالت در مقابله با تنش‌های حاصل از تغییرات دما در فصول مختلف و تفاوت در ضرائب انبساط/انقباض حرارتی پوشش و آسفالت مربوط بوده و در ضخامت زیاد پوشش نیز تشدید می‌گردد. با توجه به نقش پدیده‌ی تنش در بروز عیوب و افت کارایی خط‌کشی‌ها در ادامه به توضیح انواع تنش پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Stress

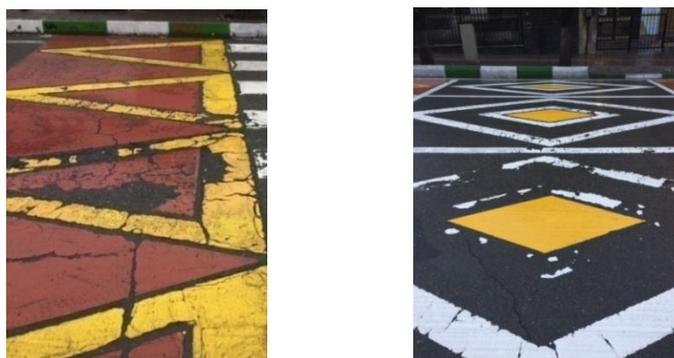


(الف)



(ب)

شکل ۲- تصاویر واقعی از ترک‌خوردگی خط‌کشی‌های بادوام در تهران: (الف) رنگ پلاستیک سرد خطوط عابر پیاده و (ب) خطوط محوری اجرا شده با رنگ گرم.



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصاویر واقعی از جدایش ورقه‌های خط‌کشی از آسفالت در تهران: (الف) خط‌کشی محل سرعت‌کاه و (ب) خطوط محوری اجرا شده با رنگ گرم.

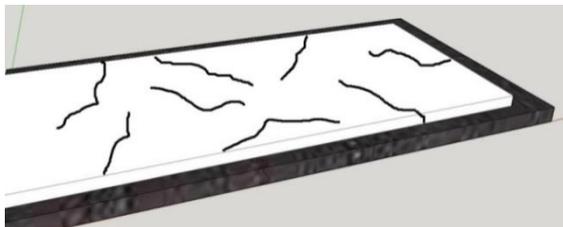


(الف)

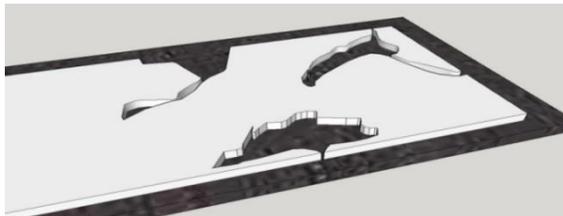


(ب)

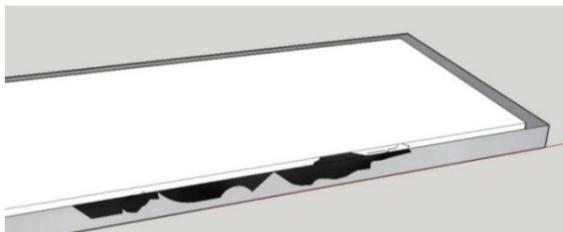
شکل ۴- تصاویر واقعی از تخریب آسفالت در کناره و یا محل خط‌کشی: (الف) خطوط جناقی کناره بزرگراه با رنگ پلاستیک سرد و (ب) خطوط محوری اجرا شده با رنگ گرم.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- نمایش نمادین: (الف) ترک خوردگی پوشش ترافیکی، (ب) جدایش ورقه‌ای پوشش ترافیکی از سطح آسفالت و (ج) تخریب آسفالت در کناره‌ها و زیر ناحیه خط‌کشی.

#### ۴-۱-۱- تنش فیزیکی یا مکانیکی

تنش فیزیکی به روش‌های مختلفی می‌تواند به یک پوشش وارد شود، از جمله این روش‌ها می‌توان انبساط/انقباض حرارتی، ارتعاش و یا تغییر شکل زیرآیند به دلیل قرارگیری وزن یک ماشین، ضربه‌ی ناشی از اجسام پرتاب شونده و یا تنش اعمالی در لحظه‌ای که خودرو از حالت سکون به حرکت در می‌آید، اشاره کرد [۸، ۱۷]. این تنش باید آزاد شود و این که یک پوشش چگونه این تنش را آزاد می‌کند، تعیین‌کننده‌ی نوع عیوب ایجاد شده در پوشش می‌باشد. یک پوشش خشک را می‌توان یک جامد ویسکوالاستیک در نظر گرفت. به عبارت دیگر پوشش‌ها از هر دو خاصیت ویسکوز (رفتاری شبیه مایعات) و الاستیک (رفتاری شبیه جامدات) برخوردارند. وقتی نیرویی بر یک ماده اعمال می‌شود، اگر ماده بدون مقاومت تغییر شکل داده و یا به عبارتی جاری شود (مانند مایعات) در آن صورت رفتار آن ماده، کاملاً ویسکوز خواهد بود. در مواد با رفتار الاستیک، انرژی وارد شده در درون ماده ذخیره شده و ماده از خود تغییر شکل نشان نمی‌دهد (مانند جامدات). در مواد ویسکوالاستیک قسمتی از انرژی صرف تغییر شکل ماده شده و قسمتی دیگر درون ماده ذخیره می‌گردد. میزان سهم هر یک از این رفتارها به ماهیت ماده وابسته است. پوشش در حین سخت شدن، به تدریج از مایع به جامد ویسکوالاستیک تغییر ماهیت می‌دهد. رفتار ویسکوالاستیک مواد علاوه بر ماهیت و ساختار شیمیایی، به دما و همچنین ماهیت و سرعت تنش وارد شده نیز وابسته است.

شکست (یا ترک خوردگی) پوشش مهم هستند. استحکام کششی، مقدار تنش را نشان می‌دهد که در آن میزان تنش نمونه شکسته می‌شود، حال آنکه افزایش طول در نقطه شکست، درصد افزایش طول در نقطه شکست نمونه است [۲۴، ۲۱، ۸].

بطور مثال پوششی از نوع ب در شکل ۶ (با دمای انتقال شیشه‌ای پایین و برخورداری از یک نقطه تسلیم) را در نظر بگیرید. وقتی زیرآیند در اثر تنش‌های مختلف منبسط و منقبض می‌شود، بدین ترتیب پوشش هم منبسط و منقبض می‌شود.

در این صورت اگر میزان انقباض و انبساط پوشش (رنگ ترافیکی بادوام) با زیرآیند (روکش آسفالت) یکسان نباشد، فشار مضاعفی به اتصال بین رنگ و زیرآیند اعمال شده و در نتیجه رنگ باید از استحکام چسبندگی بالایی برخوردار باشد تا بر تنش وارده غلبه نماید و ورقه‌های شدن یا جدایش ورقه‌ای پوشش از سطح زیرآیند رخ ندهد.

در چنین مواردی تا زمانی که انبساط لایه زیرین به مقداری نباشد که از نقطه تسلیم پوشش بگذرد مشکلی ایجاد نخواهد شد، در غیراین صورت پوشش تغییر شکل دائم و غیرقابل برگشت پیدا خواهد کرد. البته در صورتی که زیرآیند پس از انبساط به حالت اولیه برنگردد این رفتار پوشش مطلوب خواهد بود. زیرا همراه با تغییر شکل زیرآیند پوشش نیز تنش ایجاد شده را با تغییر شکل برگشت‌ناپذیر دفع کرده و در نتیجه از روی زیرآیند جدا نخواهد شد.

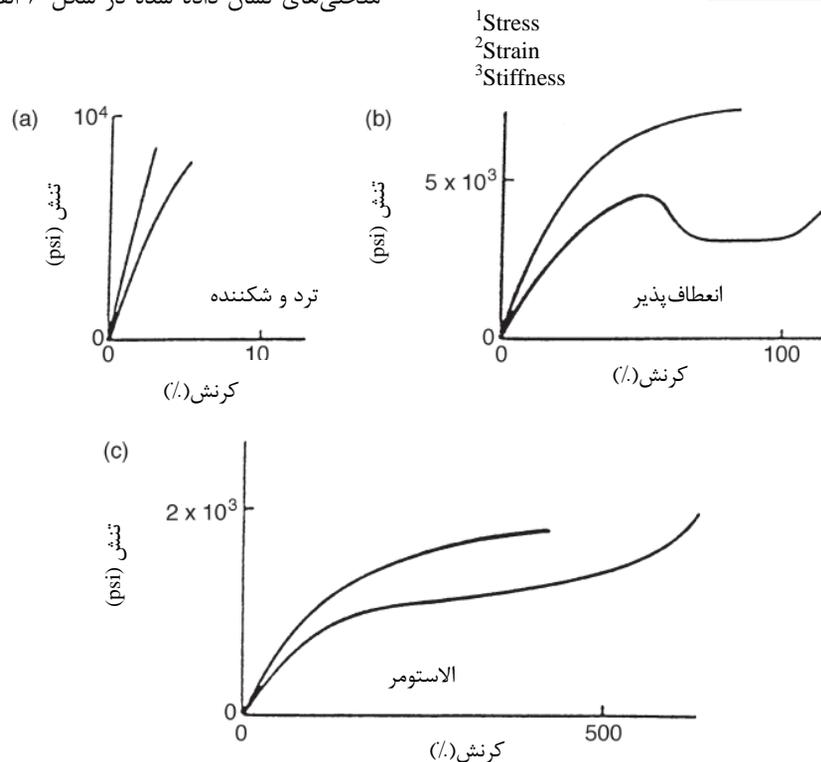
حال پوششی را در نظر بگیرید که منحنی تنش-کرنش آن مشابه منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۶ الف با دمای انتقال شیشه‌ای

بطور مثال یک پوشش ترافیکی ممکن است در فصل زمستان، در دمای پایین در برابر تنش رفتاری کاملاً الاستیک داشته و حتی با افزایش تنش بشکند، در حالیکه در فصل تابستان تحت تأثیر همان میزان از تنش، رفتاری ویسکوز از خود نشان داده و با جاری شدن و تغییر شکل تنش وارده را دفع نماید.

سرعت اعمال تنش نیز می‌تواند بازخورد متفاوتی در پوشش ایجاد کند. بطور مثال حرکت لاستیک خودرو در سرعت بالا بر روی خط‌کشی و اعمال ناگهانی مقدار مشخصی از فشار بر پوشش می‌تواند موجب شکست آن شود، حال آنکه پوشش می‌تواند در مقابل اعمال تدریجی همان میزان از تنش (خط کند رو) مقاومت کرده و نقصی در آن ایجاد نشود.

میزان نیروی وارده بر سطح، تنش<sup>۱</sup> و میزان تغییر شکل نسبت به شکل اولیه، کرنش<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. پاسخ پوشش به تنش، در نمودارهای تنش-کرنش منعکس می‌شود. در شکل ۶ سه نمودار فرضی تنش-کرنش از سه نوع پوشش مختلف، (الف) ترد و شکننده، (ب) انعطاف‌پذیر، و (ج) الاستومری، نشان داده شده است.

نسبت تنش به کرنش مدول نامیده می‌شود و معیاری از چقرمگی<sup>۳</sup> ماده است. بدین معنا که هر چه مدول ماده بیشتر باشد، ماده مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد. علاوه بر مدول عوامل دیگری همچون افزایش طول در نقطه تسلیم، افزایش طول در نقطه شکست، تنش تسلیم و استحکام کششی نیز در پیش‌بینی رفتار



شکل ۶- منحنی‌های تنش-کرنش برای انواع مختلف پوشش‌ها: (الف) ترد و شکننده، (ب) انعطاف‌پذیر، و (ج) الاستومری. اعداد نشان داده شده بر روی

محورها، بزرگی مقادیر را نشان می‌دهند [۷].

کمتراز فاصله بین مولکولهای همجوار قبل از واکنش آنها، خواهد بود. در مراحل اولیهی تبخیر حلال و یا شبکه‌ای شدن، غالباً پوشش در بالای دمای انتقال شیشه‌ای خود بوده و زنجیرهای پلیمری به اندازه کافی تحرک دارند که بتوانند دچار جمع‌شدگی بشوند. با این وجود وقتی تشکیل فیلم از طریق تبخیر حلال یا شبکه‌ای شدن پیوسته پیش می‌رود، دمای انتقال شیشه‌ای مرتباً افزایش یافته، تحرک زنجیرهای پلیمری کاهش یافته و در نتیجه کاهش توانمندی پوشش در جمع‌شدگی بیشتر، تنش داخلی در ساختار پوشش ایجاد خواهد شد. در صورت افزایش تنش به میزان بیش از تنش بحرانی، پوشش رفتاری مشابه آنچه در بالا گفته شد از خود نشان می‌دهد.

اگر بر روی زیرآیند یک آستر وجود داشته باشد یعنی در حقیقت پوشش بر روی یک بستر پلیمری اعمال شود با صرف‌نظر از پیچیدگی‌های آستر که رفتار تنش-کرنش خود را دارد ممکن است ترک‌خوردگی پوشش رویه و یا جدایش ورقه‌ای پوشش رویه از آستر رخ دهد. با این وجود، اگر آستر استحکام هم‌چسبی ضعیفی داشته باشد، راه دیگر رهایش تنش، آن است که آستر از داخل خود تکه‌تکه شود. در یک سامانه پوشش چند لایه ای آثار تنش در لایه با حداقل استحکام چسبندگی یا هم‌چسبی بروز می‌کند. بنابراین اگر یک اتصال ضعیف هم‌چسبی<sup>۳</sup> یا پیوستگی<sup>۴</sup> وجود داشته باشد، آن اتصال نقطه یا مکانی برای بروز عیوب ناشی از تنش خواهد بود. حال اگر پوشش از لحاظ هم‌چسبی به اندازه‌ی کافی قوی باشند و چسبندگی در تمام فصل مشترک‌ها نیز مناسب باشد، ممکن است تنش به طور تدریجی از طریق جهت‌گیری مجدد داخلی مولکول‌های به هدر رود. این پدیده تحت عنوان خزش شناخته می‌شود. قابلیت پوشش‌های ویسکوالاستیک در برگشت به شکل اولیه‌ی خود وقتی که تنش برداشته می‌شود، تابع جزء الاستیک آن می‌باشد. در آزمون‌های کلاسیک خزش، افزایش طولی بر نمونه‌ی مورد آزمون وارد شده و سپس تغییر تنش با گذشت زمان اندازه‌گیری می‌شود. برای ماده‌ای در انتهای محدوده‌ی الاستیک در زنجیره‌ی ویسکوالاستیک، تنش نسبت به زمان ثابت باقی مانده و خزشی وجود نخواهد داشت. چنین حالتی غالباً در مورد یک سامانه شبکه‌ای شده صادق است. برای یک ماده در انتهای محدوده‌ی ویسکوز زنجیره‌ی ویسکوالاستیک (مایع نیوتنی)، تنش وجود نخواهد داشت. زیرا ماده به طور دائم جریان یافته یا تغییر شکل می‌دهد. یک پوشش ترموپلاستیک یا گرمانرم تمایل دارد چنین رفتاری از خود نشان دهد. برای نمونه‌های ویسکوالاستیک با ویژگی در حد فاصل بین دو حد انتهایی ویسکوز کامل و الاستیک کامل، تنش در ابتدا بالا بوده و با گذشت زمان به مقادیر پائین‌تر افت می‌کند، به بیان دیگر با گذشت زمان در نمونه خزش رخ می‌دهد.

بالا و دارای نقطه شکست) باشد. اگر پوشش در معرض تنش کافی ناشی از انبساط و انقباض زیرآیند قرار گیرد، تنش به یکی از دو روش می‌تواند آزاد شود: پوشش یا ترک می‌خورد یا به صورت ورقه‌ای از سطح آسفالت جدا می‌شود. ترک خوردگی زمانی رخ خواهد داد که چسبندگی پوشش بر سطح بالا باشد. در این حالت تنها راهی که تنش می‌تواند آزاد شود، از طریق ترک خوردن پوشش است (عیب تری و شکنندگی). از طرف دیگر اگر چسبندگی به زیرآیند ضعیف باشد، تنش از طریق جدایش ورقه‌ای پوشش از سطح زیرآیند آزاد می‌شود. علاوه بر موارد فوق تنش‌های دوره‌ای، حتی در صورت کمتر بودن از میزان بحرانی، می‌تواند موجب تضعیف چسبندگی و در نهایت جدایش پوشش از لایه زیرین گردد. شکل‌دیگری از تنش خارجی، تورم فیلم پوشش توسط آب، حلال‌ها یا سایر مواد شیمیایی است. اگر تورم به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، تنش ناشی از انبساط حجمی می‌تواند منجر به جدایش ورقه‌ای گردد. این توضیحات بر پاسخ سامانه پوششی به تنش خارجی تمرکز داشته اما قابل ذکر است که سامانه‌های پوششی نیز می‌توانند به تنش داخلی هم عکس‌العمل نشان دهند.

عامل دیگری که در کاهش استحکام هم‌چسبی تاثیر دارد مقاومت در برابر پرتو فرا بنفش (UV) است. رزین مورد استفاده در فرمول‌بندی رنگ ترافیکی بادوام به خصوص رنگ‌های ترموپلاستیک سرد دو جزئی، هرچند به ذات از مقاومت جوی نسبتاً خوبی برخوردارند، ولیکن همانند سایر رزین‌های آلی به پرتو فرا بنفش حساس بوده و در اثر قرارگیری دراز مدت در برابر آن تخریب می‌شود. سازوکار تخریب بدین صورت است که پرتو فرابنفش موجب ایجاد رادیکال و شکستن پیوندهای به نسبت ضعیف‌تر در ساختار رزین می‌شود. در اثر این اتفاق فام رنگ به زردی گراییده و خواص فیزیکی مکانیکی رنگ کاهش می‌یابد. هرچند افزودن پرکننده‌های معدنی مناسب همچون دی‌اکسید تیتانیم در کاهش این اتفاق تاثیر بسزایی دارند اما بهتر است از مواد جاذب پرتو فرابنفش و یا جاذب رادیکال آزاد در فرمول‌بندی رنگ استفاده نمود تا جلوی این اتفاق گرفته شود. اغلب در پوشش‌های ترافیکی از تلفیق دو نوع جاذب پرتو فرابنفش و پایدارکننده‌های نوری آمین‌های استتار شده (HALS) در مقادیر کم برای به تاخیر انداختن تخریب نوری رزین استفاده می‌شود [۹].

#### ۴-۱-۲- تنش داخلی

اغلب در طی فرآیند پلیمریزاسیون که اصطلاحاً به آن پخت یا سخت‌شدن<sup>۱</sup> نیز اطلاق می‌شود، کاهش حجم یا به عبارتی جمع‌شدگی<sup>۲</sup> اتفاق می‌افتد. جمع‌شدگی در اثر از دست دادن حلال در طی فرآیند خشک‌شدن و یا توسط شبکه‌ای شدن در طی فرآیند پخت ایجاد می‌شود. وقتی پوشش‌های گرماسخت پخت می‌شوند، طول پیوندهای کووالانسی

<sup>3</sup> Cohesive  
<sup>4</sup> Adhesive

<sup>1</sup> Cure  
<sup>2</sup> Shrink

## ۵- نتیجه‌گیری

خطوط از سطح آسفالت اساساً به چسبندگی ضعیف پوشش به سطح آسفالت مربوط می‌باشد. با توجه به سازوکار چسبندگی رنگ بر سطح آسفالت، این چسبندگی ضعیف می‌تواند ناشی از حضور روغن‌ها و آلاینده‌ها عمدتاً در اثر روغن‌ریزی خودروها بوده که با تمیزکردن سطح قبل از اجرای خط‌کشی و زدودن آلاینده‌ها توسط مجریان خط‌کشی می‌توان تا حد قابل توجهی از بروز این عیب جلوگیری نمود و مشکل را تقلیل داد. تخریب آسفالت در زیر و یا لبه‌های خط‌کشی اساساً به استحکام و هم‌چسبی ضعیف لایه رویه آسفالت مربوط بوده به‌گونه‌ای که روکش آسفالت تنش‌های وارده را تحمل نکرده و در نتیجه جدا شدن خط‌کشی از آسفالت توأم با تخریب آسفالت می‌شود. برطرف کردن این مشکل اساساً با اصلاح و بهینه‌سازی فرمول‌بندی روکش آسفالت مصرفی و توجه خاص به اجرای صحیح روکش آسفالت امکان‌پذیر می‌باشد.

پوشش‌ها یا رنگ‌های ترافیک بادوام عموماً در اجرای خط‌کشی‌های ترافیکی در ضخامت‌های متداول ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ میکرون در طرح‌های مختلف عرضی (عابر پیاده) و طولی (محوری) بر سطح آسفالت اجرا می‌شوند. از جمله مهمترین عیوب مشاهده شده در زمان سرویس‌دهی خط‌کشی‌های ترافیکی انجام شده با اینگونه رنگ‌ها پس از گذر از یک چرخه گرمایش/سرمايش، می‌توان (۱) ترک خوردگی خط‌کشی، (۲) جداشدن ورقه‌ای خطوط از سطح آسفالت و در نهایت (۳) تخریب آسفالت در زیر و یا لبه‌های خط‌کشی را نام برد. دلیل اصلی در بروز ترک‌خوردگی در خط‌کشی‌ها استحکام ضعیف پوشش در برابر انبساط/انقباض ناشی از تغییرات دمای فصلی و ایجاد تنش در پوشش است. با اصلاح و بهینه‌سازی فرمول‌بندی رنگ مصرفی توسط رنگ‌ساز می‌توان تا حد زیادی این مشکل را برطرف نمود. دلیل جداشدن ورقه‌ای

## ۶- مراجع

- J. Taek, T. L. Maleck, and W. C. Taylor, "Pavement making material evaluation study in Michigan", ITE J., 69, 44-53, 1999.
- U. S. DoT, "Manual on uniform traffic control devices (MUTCD)", Washington DC., Federal Highway Administration, section 3A, 347-348, 2009.
- R.R. Blakey, "Evaluation of paint durability-Natural and accelerated", Prog. Org. Coat., 13, 279-296, 1985.
- TY. Kwon, R. Bagheri, YK. Kim, KH. Kim and M.F. Burrow, "Cure mechanisms in materials for use in esthetic dentistry", J. Investig. Clin. Dent., 3, 3-16, 2012.
- P. L. Lai, L.H. Chen, W.J. Chen, and I.M. Chu, "Chemical and physical properties of bone cement for vertebroplasty", Biomed. J., 36, 162-167, 2013.
- M. Harrington, and J. Iaquina, "Investigation into road markings for use in hot arid environments", Project Report PPR569, Transport Research Laboratory, 2011.
- J. V. Koleske, "Paint and coating testing manual", American Society for Testing and Materials (ASTM), 741-747, 513-624, and 585-599, 1995.
- D. G. Weldon, "Failure Analysis of Paints and Coatings", Revised Edition, John Wiley & Sons, USA, 9-34, 2009.
- Z.W. Wicks Jr, F.N. Jones, S.P. Pappas, and D.A. Wicks, "Organic coatings: science and technology", John Wiley & Sons, 194-196 & 666-667, 1999.
۱۰. س. قدرتی، م. محسنی بزرگی، س. گرجی کندی، "رابطه چسبندگی پوشش و بعد فرکتالی سطح"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۱۷-۳، ۱۳۹۴.
- J. Murali Krishnan, "The physical and chemical structure of asphalt: with a brief history of their usage and availability", Department of Civil Engineering, IIT Madras, Sept. 25, 2006.
- R. E. Robertson, J. F. Branthaver, H. Plancher, J. J. Duvall, E. K. Ensley, P. M. Harnsberger, and J. C. Petersen. "Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance", No. SHRP-A/UWP-91-510. Washington DC, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1991.
- F.L. Roberts, P.S. Kandhal, E.R. Brown, D.Y. Lee and T.W. Kennedy. "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction", 2nd edition, NAPA Education Foundation, Landham, Maryland, 1996.
- C.W. Curtis, K. Ensley, and J.A. Epps. "Fundamental properties of asphalt aggregate interactions including adhesion and absorption", Final report SHRP A-341, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC., 2001.
۱۵. و. حدادی، ع. الف. یوسفی، ع. ر. معینی، م. تقی گنجی، م. خسروی، "آمیخته‌های قیری مختلف جهت کاربردهای پوشش مختلف"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۱، ۱۸-۷، ۱۳۸۶.
- H. Plancher, S. M. Dorrance and J. C. Petersen, "Identification of chemical types in asphalts strongly adsorbed at the asphalt-aggregate interface and their relative displacement by water", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 46, 151-175, 1977.
- R. Moraes, R. Velasquez, H. Bahia. "Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2209, 70-81, 2011.
- C.D. Gaughen, "Investigation into acrylic paint cracking (APC) on asphaltic pavements". Technical Memorandum (No. TM-2328-SHR), Naval Facilities Engineering Service Center, California, January, 2000.
- M. Marasteanu, W. Buttler, H. Bahia, C. Williams, K.H. Moon, E.Z. Teshale, A.C. Falchetto, M. Turos, E. Dave, G. Paulino, S. Ahmed, "Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements", National Pooled Fund Study-phase II, 2012.
- N. L. Thomas, "The barrier properties of paint coatings", Prog. Org. Coat., 19 (2), 101-121, 1991.
- M. Solamian, T.W. Kennedy, W.E. Elmore, "Long term evaluation of stripping and moisture damage in asphalt pavements treated with line and anti-stripping agents", Research report No. 1286-1F, University of Texas, Austin, Center for Transportation Research, 1993.
- B.D. Shah, "Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes", M.S. Thesis, Texas A & M University, 2003.
۲۳. س. م. میرعابدینی، م. اسفنده، "خواص فیزیکی مکانیکی پوشش‌های پلیمری"، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ۱۳۹۵.
۲۴. ن. طهماسبی، "تاثیر رفتار تنش-کرنش پوشش‌های رویه خودرو بر مقاومت به خش‌پذیری آن‌ها طی کارواش"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۱۰-۳، ۱۳۹۱.