Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۳ (۱۳۹۲) ۵۶-۴۷
Journal of Studies in Color World, 3 (1392)/ 47-56

مروری بر مواد الکتروکرومیک وکاربردهای آن

وحیده یکه فلاح[۱]، آتشه سلیمانی گرگانی[*۲]، شهره روحانی[۳،۴]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
۲-استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
۳-دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴
۴- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۴ تاریخ بازبینی: ۹۲/۴/۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۸

چکیده

مواد الکتروکرومیک مواد هوشمندی هستند که در اثر قرار گرفتن در یک پتانسیل مخصوص دچار تغییر رنگ بازگشت‌پذیر می‌شوند. این مواد به دو دسته کلی مواد معدنی و مواد آلی تقسیم می‌شوند. مواد معدنی شامل اکسیدهای برخی از فلزات مانند اکسید تنگستن، اکسید تیتان، اکسید کبالت و مواد آلی شامل پلیمرهای رسانا، متالو پلیمرها، متالوفتالوسیانین، وایولوژن می‌باشند. ساختار اصلی یک وسیله الکتروکرومی، یک سل الکتروشمیایی دو الکترودی در یک آرایش ساندویچی از لایه‌های نازک است. آرایش این لایه‌ها بستگی به کاربرد وسیله الکتروکرومی به عنوان عبوردهنده یا انعکاسی دارد. در لایه الکتروکرومی بین دو الکترود رسانا (نیمه رسانا)، توسط جریان الکتریسیته، واکنش اکسایش- کاهش، رخ داده و منجر به تغییر رنگ آن می‌شود. به دلیل کاربردهای گستردهِ مواد الکتروکرومیک، گرایش به آن‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است. از دستگاه‌های نوری گرفته تا پنجره‌های هوشمند (در بخش معماری ساختمان و خودرو) و نمایشگرها، با مواد الکتروکروم در ارتباط هستند. از مزیت‌های دستگاه‌های الکتروکرومیک، مصرف انرژی کم، عدم نیاز به نور پس زمینه، ارزان قیمت بودن، عکس‌العمل سریع مواد در مقابل اعمال ولتاژ، باقی‌ماندن رنگ پس از قطع ولتاژ و ادغام رنگ بدون نیاز به فیلترهای رنگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

مواد الکتروکرومیک، پنجره‌های هوشمند، نمایشگر، اکسید فلزات، پلیمرهای رسانا، وایولوژن.

*Corresponding author: asoleimani@icrc.ac.ir

۱- مقدمه

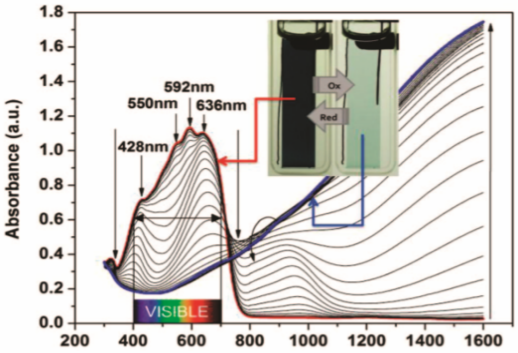
موادی که در صورت اعمال ولتاژ خارجی قابلیت تغییر رنگ برگشت‌پذیر را دارند، مواد الکتروکروم نامیده می‌شوند. تئوری الکتروکرومی اولین بار در سال ۱۹۶۱ توسط پلات[1] مطرح شد [۱]. عامل تغییر رنگ، انتقال الکترون در اثر اکسایش - کاهش می‌باشد. بسیاری از مواد الکتروکروم انتقال الکترون را در ناحیه طیفی مرئی/ فرابنفش از طیف امواج الکترومغناطیس انجام می‌دهند. تغییر رنگ‌ها بین حالت شفاف (بی‌رنگ) و حالت جذب در ناحیه فرابنفش می‌باشند [۲ ،۱]. همان‌طور که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است، جذب در ناحیه مرئی منجر به تولید رنگ قابل روئیت می‌شود، که این رنگ در اثر احیا در ماده الکتروکروم بی‌رنگ، به‌وجود آمده است. در برخی مواد الکتروکروم، امکان اکسید - احیا، بیشتر از یک بار وجود دارد و در هر اکسید - احیا، رنگ خاصی تولید می‌شود. در این صورت به این مواد پلی الکتروکروم و به رنگ‌های تولیدی مولتی کالر[2] اطلاق می‌شود [۱].

[1] J. R. Platt
[2] Multicolor

۱-۱- اجزا و عملکرد دستگاه‌های الکتروکرومیک

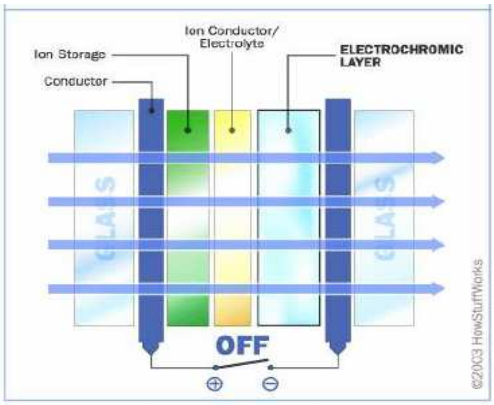
عملکرد دستگاه الکتروکروم مانند یک سل الکتروشیمیایی می‌باشد. دارای دو الکترود رسانا (نیمه رسانا) است که در درصورت اتصال آن‌ها به یک منبع اختلاف پتانسیل خارجی، نقش آند و کاتد را پیدا می‌کنند (غالباً جنس الکترود "ایندیوم اکسید قلع[3]" است). همان‌طور که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است، بین دو الکترود، لایه‌های متفاوتی وجود دارد. لایه هدایت یونی (لایه زرد رنگ)، یک الکترولیت است که امکان حرکت یون‌ها از لایه ذخیره یونی (لایه سبز رنگ) به لایه الکتروکروماتیکی را فراهم می‌کند که منجر به اکسید - احیا ماده الکتروکروم و تغییر رنگ آن می‌شود. لایه الکتروکرومی قبل از وصل جریان (شکل ۳) حال بی رنگ و شفاف را داشته است که پس از وصل جریان حالت کدری (لایه خاکستری رنگ، شکل ۴) پیدا کرده است. از شیشه و یا پلاستیک شفاف برای محافظت از لایه‌های داخلی نیز استفاده می‌شود. البته با پوشاندن سطح بیرونی یکی از لایه‌های شیشه یا پلاستیک شفاف، این وسیله خاصیت انعکاسی پیدا کرده و تبدیل به آینه‌ای الکتروکرومی می‌شود. عملکرد دستگاه الکتروکروم در اثر اعمال ولتاژ اندکی، معادل ۱/۵ تا ۲ ولت است.

[3] Indiom tin oxide

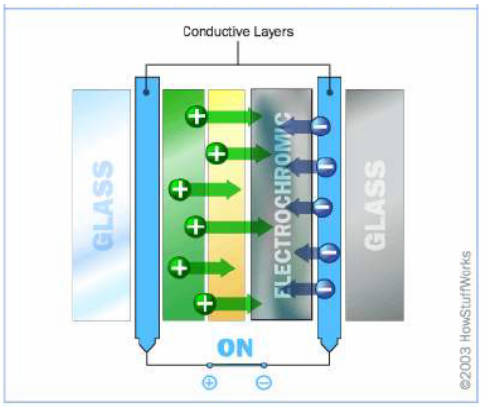


شکل ۱- الکتروطیف نگاری یک نمونه ماده (پلیمری) الکتروکروم [۲].

شکل ۲- یک نمونه شیشه الکتروکروم.



شکل ۳- ساختار دستگاه الکتروکروم قبل از اعمال ولتاژ [۲].



شکل ۴- ساختار دستگاه الکتروکروم بعد از اعمال ولتاژ [۲].

۲-۱- عوامل مهم در عملکرد دستگاه الکتروکروم

عملکرد یک دستگاه الکتروکرومیکی، ناشی از عوامل متفاوتی می‌باشد. از جمله این عوامل، نوع ماده الکتروکروم به‌کار رفته در آن دستگاه، روش تهیه فیلم الکتروکروم، میزان ولتاژ اعمال شده، نوع الکترودها و الکترولیت و غیره هستند. ماده الکتروکروم به فراخور ویژگی‌های ذاتی خود، می‌تواند زمان تغییر رنگ در اثر اعمال ولتاژ (سوئیچینگ[1])، بازده رنگی[2]، حافظه نگهداری رنگ[3]، درصد کنتراست رنگی[4] و پایداری چرخه رنگی[5] متفاوتی را ایجاد کند [۳].

- زمان تغییر رنگ (سوئیچینگ): مدت زمانی که طول می‌کشد پس از اعمال ولتاژ، ماده الکتروکروم تغییر رنگ دهد.
- بازده رنگی: بازده رنگی (η) عبارت است از چگالی تغییر رنگ (ΔOD) در ازای شارژ الکتریکی (Q) وارد شده به ماده الکتروکروم. منظور از چگالی تغییر رنگ، لگاریتم درصد انتقال در حالت بی‌رنگ (T_b) به درصد انتقال در حالت رنگی (T_c)، در بیشینه طول موج، است به عبارت دیگر، میزان سطح تغییر رنگ داده شده در یک لایه از فیلم الکتروکروم، در اثر اعمال یک واحد بار الکتریکی. واحد بازده رنگی، سانتی‌متر مربع بر کولن[6] است (رابطه ۱)

$$\eta(\lambda) = \Delta OD / Q \quad , \quad \Delta OD = \log [T_b/T_c] \qquad (۱)$$

- حافظه نگهداری رنگ: عبارت است از، مدت زمان باقی‌ماندن حالت رنگی ماده الکتروکروم، پس از قطع ولتاژ. مثلاً وقتی شیشه از بی‌رنگ به رنگ آبی در می‌آید و ناگهان برق قطع شود، حدود ۲ روز طول می‌کشد تا رنگ آن از بین برود. سپس برای تغییر مجدد رنگ شیشه (به تیره‌تر و یا شفاف‌تر) باید مجدداً ولتاژ مورد نیاز را در جهت اولیه (یا بر عکس) اعمال کرد.
- درصد کنتراست رنگی: بیشترین درصد اختلافی که بین حالت بی‌رنگی (T_b) و رنگی (T_c)، در یک طول موج، پیش آید، کنتراست رنگی نامیده می‌شود و از آن می‌توان به، اختلاف بین رنگی‌ترین و بی‌رنگ‌ترین بخش یک ماده الکتروکروم، تحت طول موج خاص، تعبیر کرد (رابطه ۱)

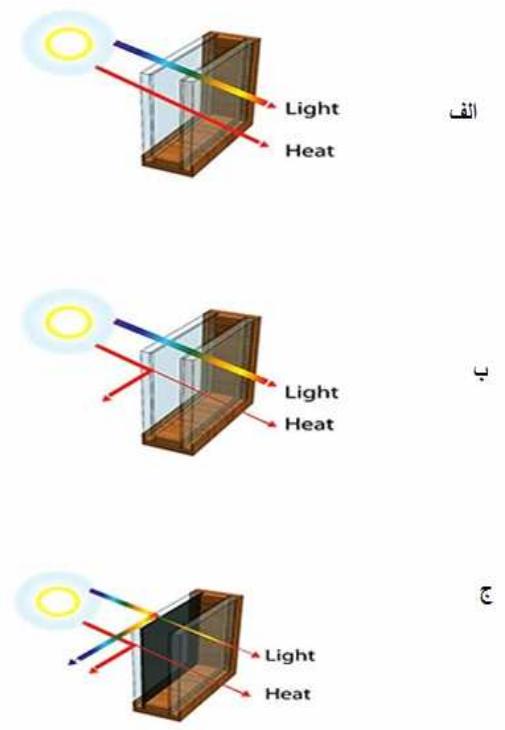
$$\Delta\%T = T_b(\lambda) - T_c(\lambda) \qquad (۲)$$

- پایداری چرخه رنگی: حفظ حالت رنگی ماده الکتروکروم، در اثر تکرار چرخه‌های متوالی اکسایش - کاهش.

۲-کاربردهای مواد الکتروکرومیک

۲-۱-پنجره‌های هوشمند

مهم‌ترین دستگاه‌های الکتروکروم، پنجره‌های هوشمند می‌باشند و در معماری مدرن و انرژی کارآمد مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه در روزهای آفتابی تابستان پنجره‌هایی با شیشه‌های دودی برای کنترل‌کردن گرما و نور اتاق با استفاده از الکتروکروماتیک‌ها استفاده می‌شود. این شیشه‌ها دارای مواد الکتروکروم هستند که رنگ آن‌ها در اثر جریان الکتریکی تغییر می‌کنند. جریان الکتریسته با ایجاد واکنش شیمیایی سبب تغییرات خصوصیات مواد می‌شود و کاری می‌کند تا آن‌ها نور را جذب یا منعکس کنند. جریان الکتریکی سبب می‌شود تا یون‌ها در ساختار دستگاه الکتروکرومیک، از لایه ذخیره یونی به سمت لایه هدایت یونی حرکت کرده و به لایه الکتروکروماتیکی رجعت‌کنند و شیشه را کدر و تیره نمایند. با قطع الکتریسته فرآیند برعکس عمل کرده و شیشه مجدداً شفاف می‌شود. یکی از ویژگی مواد الکتروکروماتیکی قابلیت تنظیم رنگ آن‌هاست، به‌طوری که می‌توان شدت کدری آن‌ها را با تغییر مقدار جریان تنظیم کرد. با توجه به شکل ۳، دیده می‌شود، استفاده شیشه‌های الکتروکرومیکی در ساختمان، باعث کنترل گرما و نور ورودی به داخل شده و منجر به صرفه‌جویی در انرژی سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع ساختمان می‌شود. در جدیدترین تولیدات، پنجره‌های هوشمند باعث کاهش گرما و بهبود هوای مطبوع ساختمان تا ۲۵٪ و کاهش بار دستگاه‌های خنک‌کننده تا ۲۰٪ و کاهش هزینه‌های روشنایی تا ۶۰٪ شده است [۴].



شکل ۵- پنجره الکتروکروم در حالت الف- شفاف ب - رنگی (مقاوم در برابر گرما) ج- رنگی (مقاوم در برار نور و گرما) [۴].

[1] Switching time
[2] Electrochromic efficiency
[3] Color memory
[4] Chromatic contrast
[5] Color cycle
[6] cm^2/q

۲-۲-آینه‌های الکتروکرومیک

آینه‌های الکتروکرومیک با خاصیت بازتابش متغیر برای جلوگیری از تابش نور خیره‌کننده به هنگام رانندگی در شب به کار می‌رود. اگر نور شدید و خیره‌کننده به آینه الکتروکرومیک برخورد کند، مواد الکتروکروماتیکی آینه به حالت رنگی درآمده و با جذب نور خیره‌کننده از شدت آن می‌کاهد، در این صورت، در شرایط حداکثر عبور نور، آینه بی‌رنگ می‌باشد. این سیستم برای آینه‌های دید عقب در اتومبیل یا کامیون برای بهبود دید در طول رانندگی استفاده می‌شوند.

شکل ۶- کاربرد آینه الکتروکرومیک در اتومبیل.

۲-۳- نمایشگرها

امروزه ده‌ها و یا شاید صدها نوع از انواع مختلف نمایشگرها وجود دارد، که برخی از معروفترین‌ها عبارتند از نمایشگرهای پرتو کاتدی[۱]، بلور مایع[۲]، الکتروفورتیک[۳] یا مرکب الکترونیکی[۴]، دیودهای نورانی[۵] و دیودهای نورانی آلی[۶]. یکی دیگر از نمایشگرهای مورد استفاده، نمایشگرهای الکتروکرومیک[۷] می‌باشند. از جدیدترین نمایشگرهای الکتروکرومیک نوع انعطاف‌پذیر[۸] از آن و کاغذهای الکترونیکی[۹] هستند. استفاده‌های دیگر از مواد الکتروکروم در لامپ‌های تزئینی، استفاده از نوار الکتروکرومی به عنوان شاخص باتری، عینک‌های آفتابی، برچسب قیمت‌ها، چترهای کنترلی هواپیما، حسگرها برای نظارت بر سلامت مواد غذایی منجمد، حسگرهای مورد استفاده در پزشکی، استتار مواد و کنترل حرارتی فضاپیما و غیره [۵] و به تازگی در نمایشگرهای بلور مایع، دیودهای نورانی، و سلول‌های خورشیدی[۱۰] [۶] نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از خصوصیات دستگاه الکتروکروم می‌توان به توان بالای نوردهی رنگ‌ها وحافظه نگهداری رنگ، احتیاج به اعمال ولتاژکم ،بدون نیاز به نور پس زمینه، آماده‌سازی آسان، قابلیت انعطاف، زاویه دید گسترده و مصرف بسیار کم انرژی اشاره کرد [۷].

[1] Cathode Ray Tube (CRT)
[2] Liquid Crystal Display (LCD)
[3] Electrophoretic
[4] Electronic ink (E- ink)
[5] Light emitting diode (LED)
[6] Organic light emitting diode (OLED)
[7] Electrochromic display
[8] Flexible
[9] Electronic paper (E-paper)
[10] Solar cell

شکل ۷- نمایشگر و کاغذ الکترونیکی.

شکل ۸- نوار الکتروکرومی شاخص باتری، سلول‌های خورشیدی، عینک‌های الکتروکروم آفتابی، برچسب الکتروکرومی برای بسته‌بندی.

۳- مواد الکتروکرومیک

مواد الکتروکروم به دو دسته کلی: آلی و معدنی تقسیم می‌شوند.

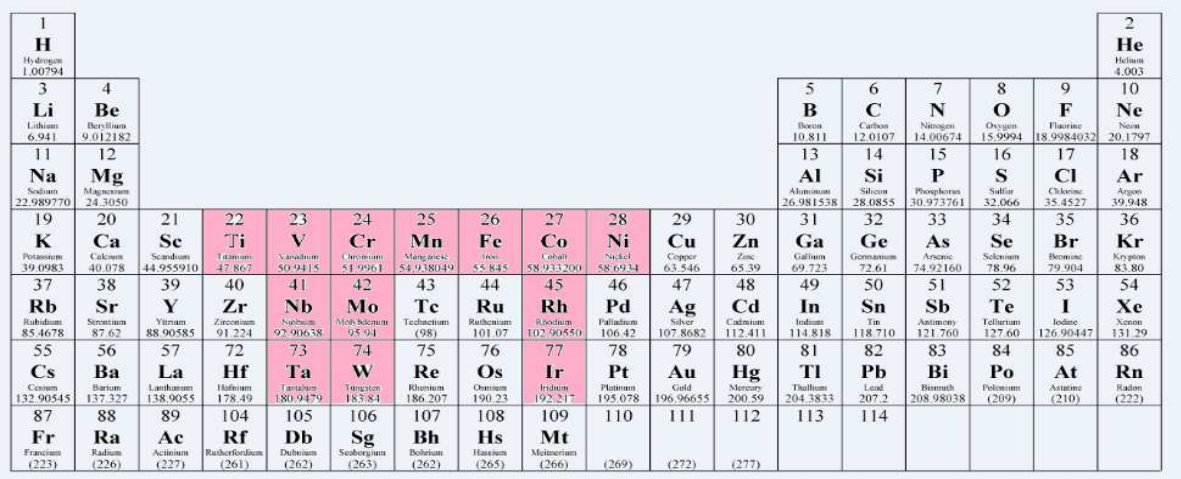
۳-۱-مواد الکتروکروم معدنی

اکسید فلزات واسطه مانند: وانادیوم، تنگستن، تیتان، روی، کبالت، نیکل، آهن و غیره نمونه‌هایی از مواد الکتروکروم معدنی هستند [۶]. از گسترده‌ترین زمینه‌هایی که مورد مطالعه واقع شده، اکسید تنگستن است که خاصیت الکتروکرومیکی آن برای اولین بار در سال ۱۹۶۹گزارش شده است [۸]. مهم‌ترین آن‌ها تری اکسید تنگستن (WO_3) است که در ناحیه مرئی رفتار الکتروکرومیکی از خود نشان می‌دهد.

در جدول شماره ۱، رنگ‌های حاصل از اکسایش - کاهش مهم‌ترین اکسید فلزات گزارش شده است. فلزات واسطه‌ای که ترکیبات آن‌ها رفتار الکتروکرومیکی نشان می‌دهند، شامل دو دسته‌اند. دسته‌ای که در ناحیه آندی رنگی هستند یعنی در اثر اکسید تغییر رنگ می‌دهند و دسته‌ای که در ناحیه کاتدی رنگی هستند یعنی در اثر احیا تغییر رنگ می‌دهند. در جدول شماره ۱ مشخص شده‌اند. آماده‌سازی مواد الکتروکروم معدنی، با روش‌های پیچیده مثل تبخیر خلا، تجزیه حرارتی و غیره انجام می‌پذیرد، بنابراین برای مصارف خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثلاً در جایی که رسانایی الکتریکی فیلم الکتروکروم مورد اهمیت باشد، با توجه به برتری اکسیدهای فلزی نسبت به مواد پلیمری در رسانایی، استفاده اکسیدهای فلزی ارجحیت پیدا می‌کند .در ادامه به مقایسه‌های بیشتری راجع به مواد الکتروکروم آلی و معدنی اشاره شده است. این مواد در حالت عادی جامد بوده و به شکل جامد نیز در دستگاه الکتروکرومیک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲-مواد الکتروکروم آلی

مواد الکتروکروم آلی، شامل پلیمرهای رسانا، متالو پلیمرها، متالوفتالوسیانین‌ها، وایولوژن و غیره می‌باشند [۱]. امروزه، مواد الکتروکروم آلی، بیشتر مورد توجه هستند و از دلایل اهمیت آن‌ها، عکس‌العمل نشان دادن سریع (سوئیچینگ سریع) این مواد است تمام پلیمرهای رسانا، توانایی بروز خاصیت الکتروکرومیکی را دارند.



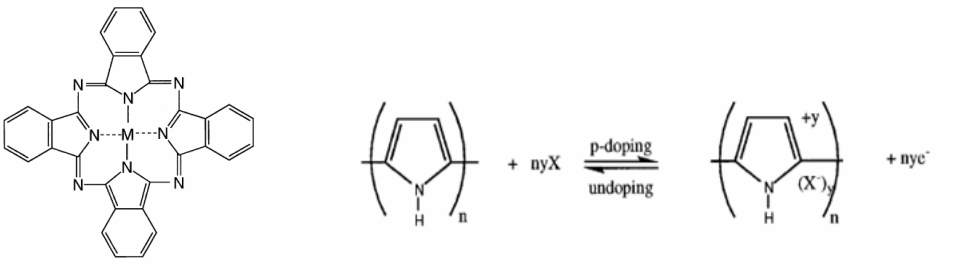
شکل ۹- فلزات فعال برای شرکت در واکنش‌های اکسیداسیون - احیا [۶]

جدول ۱- تغییر رنگ اکسید فلزات الکتروکروم [۸]

ردیف	رنگ در حالت اکسید	رنگ در حالت احیا	رنگ در حالت طبیعی	ماده الکتروکروم
۱	-	آبی	شفاف	MoO_3
۲	-	آبی - سیاه	زرد	V_2O_5
۳	-	آبی	زرد	Nb_2O_5
۴	-	آبی	شفاف	WO_3
۵	آبی - سیاه	-	شفاف	$Ir(OH)_3$
۶	قهوه‌ای مایل به قرمز	-	شفاف یا سبز کمرنگ	$Ni(OH)_2$

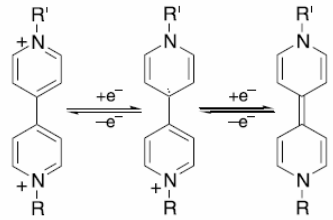
برای مثال یک پلیمر رسانای خوب می‌توان از پلی‌پیرول[1] (شکل ۱۰) نام برد که در حالت اکسید شده به رنگ آبی/ بنفش و در حالت طبیعی رنگ زرد/ سبز دارد. در پلیمرهای رسانا، پلی‌تیوفن[2] و پلی‌آنیلین[3] مورد توجه زیادی قرار می‌گیرند. محدوده تغییر رنگ پلی‌تیوفن از قرمز تا آبی و تغییر رنگ پلی‌آنیلین بین زرد شفاف تا سبز می‌باشد. متالو پلیمرها نیز نتیجه تشکیل کمپلکس فلز و لیگاند آلی هستند. مشاهده شده است که بیش از ۳۰ نوع فلز می‌تواند با فتالوسیانین ترکیب شودکه این فلز می‌تواند در مرکز یک حلقه فتالوسیانین یا بین دو حلقه فتالوسیانین قرار بگیرد [۸, ۹]. آن چه پلیمرهای الکتروکرومیک را از سایر موادالکتروکرومیک غیر آلی متمایز می‌کند، بازده رنگی بالای آن‌ها و تسریع تغییر رنگ در آن‌ها به واسطه انعطاف‌پذیری زنجیره‌های پلیمری است. این امر باعث صرفه‌جویی در انرژی به‌کار گرفته برای تغییر رنگ می‌باشد. یکی دیگر از مواد الکتروکروم آلی، وایولوژن است که نیتروژن آن می‌تواند به گروه‌های جانبی متفاوتی متصل شود. وایولوژن در حالت دوکاتیونی بی رنگ است و در اثر احیا و دریافت الکترون تبدیل به حالت کاتیون رادیکالی می‌شود که به شدت رنگی است و رنگ آن آبی مایل به بنفش است. در صورت احیای دوم و تولید حالت دو رادیکالی، شدت رنگ تولیدی بسیار کم و تقریباً بی‌رنگ خواهد بود. گروه‌های جانبی متصل به نیتروژن، در اثر ایجاد رزونانس، منجر به تولید سطح انرژی متفاوتی برای مولکول می‌شوند و تولید رنگ‌های متفاوتی می‌کنند. انتخاب صحیح گروه‌های جانبی متصل به نیتروژن اجازه تولید رنگ مورد دلخواه را خواهند داد، برای نمونه در صورت اتصال گروه‌های آلکیلی، قابلیت تولید رنگ بنفش/ آبی در وایولوژن[4] ایجاد می‌شود و یا اتصال گروه‌های آریلی مثل ۴- سیانوفنیل، منجر به تولید رنگ سبز می‌شود [۱, ۱۰] با اینکه سنتز مشقات وایولوژن و پلی وایولوژن‌ها وقت‌گیر است اما به‌دلیل اهمیت و کاربرد آنان به اشکال متفاوتی تولید می‌شوند [۱۲]. مثلاً دیمر وایولوژن [۱]، هپتیل وایولوژن [۱]، پلی وایولوژن [۱, ۱۱, ۱۲]، مشتق وایولوژن با ساختار ستاره و درختی [۱۳-۱۵] و دیگر مشتقات وایولوژن که بسته به خصوصیات مورد نیاز، استفاده می‌شوند [۱۶-۲۰]. مواد الکتروکروم آلی به شکل محلول بوده و پس از اعمال ولتاژ در ساختار دستگاه الکتروکرومیک یا به جامد تبدیل شده و یا به همان شکل محلول باقی می‌مانند.

[1] Polypyrrole
[2] Polythiophene
[3] Polyaniline
[4] Viologen

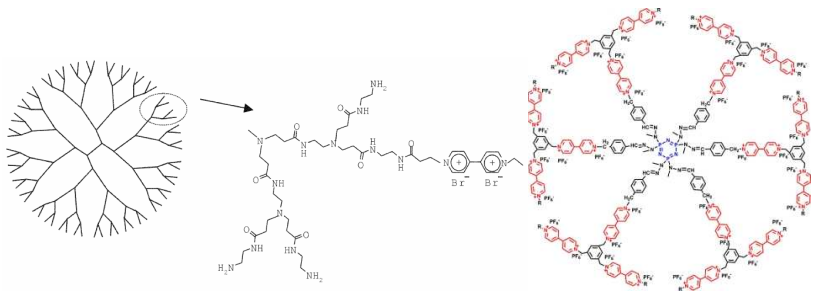


شکل ۱۰- پلی پیرول [۱].

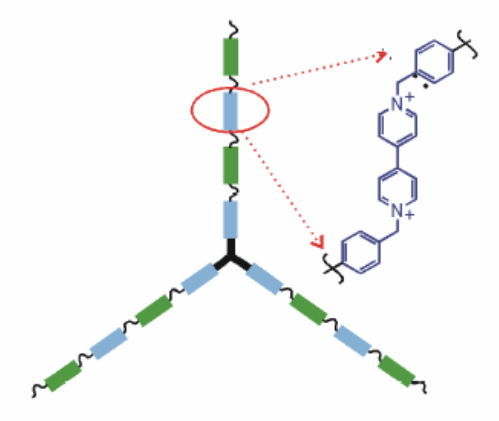
شکل ۱۱- متالوفتالوسیانین [۱].



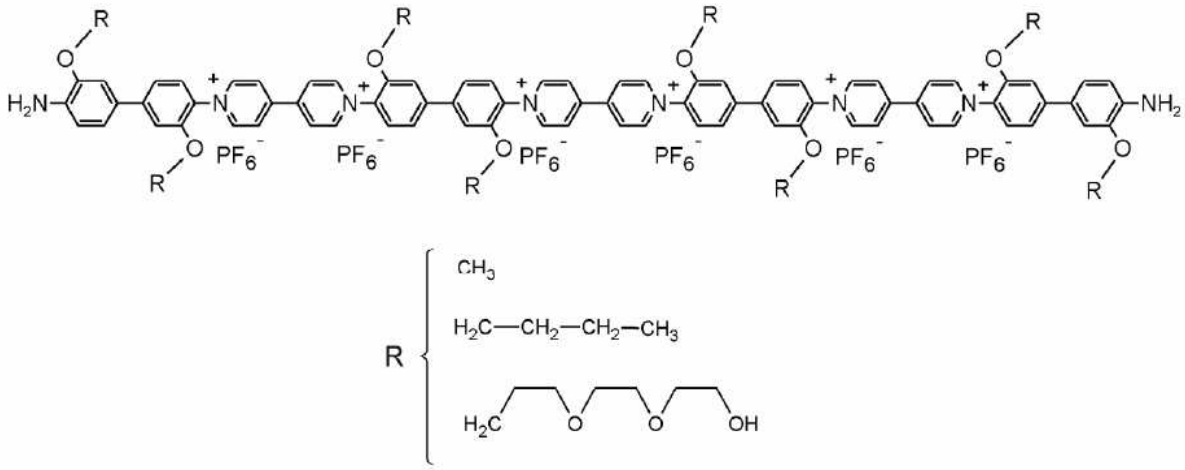
شکل ۱۲- وایولوژن (۴ و ۴ بی پیریدین) [۱].



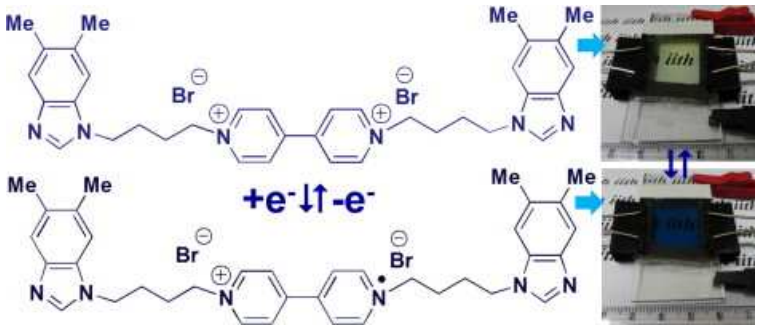
شکل ۱۳- انواع وایولوژن درختی [۲۱].



شکل ۱۴- وایولوژن ستاره‌ای [۲۲].



شکل ۱۵- پلی وایولوژن با گروه‌های عرضی متفاوت [۲۲].



شکل ۱۶- مشتقات وایولوژن [۱۷].

فیلم الکتروکروم به روش های متفاوتی از قبیل تبخیر خلا[1]، اسپری[2]، الکتروپوشانش[3]، سل ژل[4]، پوشش دورانی[5]، چاپ اسکرین[6] و چاپ جوهرافشان[7] (فقط مورد استفاده برای مواد آلی است) تهیه می شود [۸].

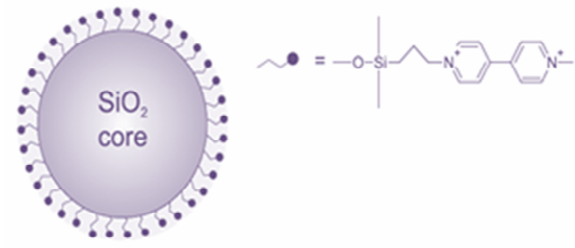
۵- روش‌های بهبود خواص دستگاه‌های الکتروکرومیک

مواد و یا روش‌ها و اصلاحاتی که باعث کاهش زمان تغییر رنگ در اثر اعمال ولتاژ (سوئیچینگ)، افزایش بازده رنگی و افزایش درصد کنتراست و غیره شوند باعث بهبود کیفیت دستگاه خواهند شد. استفاده از مواد الکتروکروم و مشتقاتی از آن‌ها که سیستم‌های رزونانسی بیشتری را فراهم کنند، باعث بهبود خواص می‌شوند [۲۳, ۲۴]. هم چنین به کار بردن نانو ذراتی مانند نقره یا سیلیسیم دی اکسید به همراه ماده الکتروکروم به شکل نانو کامپوزیت[8] (شکل۱۷) [۲۵] و یا استفاده از فیلم نانو ذرات روی الکترود (شکل۱۸) [۲۶] نیز باعث افزایش بازده رنگی و کنتراست بیشتری می‌شوند. از جدیدترین دستاوردها هم می‌توان به استفاده از نانو لوله‌های کربنی اشاره کرد [۲۷]، به طوری که استفاده از فیلم نانولوله کربنی تک دیواره روی پلی اتیلن ترفتالات، به عنوان یک الکترود انعطاف‌پذیر، در دستگاه الکتروکروم عمل می‌کند و برای تولید دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر مناسب می‌باشد. از دستاوردهای آن می‌توان به درصد کنتراست بالاتر و پایداری سیکل رنگی بیشتر اشاره کرد.

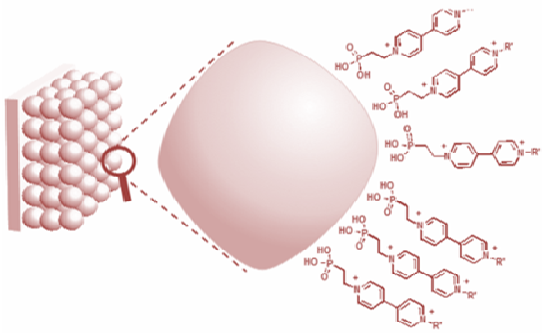
[1] Vacuum evaporation
[2] Spray deposition
[3] Electrodeposition
[4] Sol-gel
[5] Spin coating
[6] Screeen
[7] Ink jet
[8] Nano Composite

جدول ۲- مقایسه بین مواد الکتروکروم آلی و معدنی [۸].

ویژگی	معدنی	پلیمری (آلی)
آماده‌سازی	نیاز به روش‌های پیچیده مثل تبخیر خلا، تجزیه حرارتی و ...	آماده‌سازی مواد با روش‌های ساده شیمیایی مثل پلیمریزاسیون الکتروشیمی و آماده‌سازی فیلم به روش‌های ساده‌ای مثل پوشش دورانی، چاپ اسکرین و چاپ جوهرافشان
هزینه ساخت نهایی	بالا (در مقایسه با پلیمری‌ها)	پایین (درمقایسه با معدنی‌ها)
رنگ حاصل‌شده	از یک ماده تعداد محدودی رنگ به دست می‌آید	رنگ حاصل به درصد اکسید - احیا، انتخاب مونومر، اختلاف پتانسیل اعمال شده و غیره بستگی دارد، در نتیجه از یک ماده رنگ‌های زیادی می‌تواند حاصل شود.
کنتراست رنگی	متوسط	بسیار بالا
زمان سوئیچینگ	۱۰ - ۷۵۰ میلی ثانیه	۱۰ - ۱۲۰ میلی‌ثانیه
پایداری چرخه رنگی	$۱۰^{۳}$-$۱۰^{۵}$ سیکل	$۱۰^{۴}$-$۱۰^{۶}$ سیکل
رسانایی الکتریکی	بالا	پایین – متوسط



شکل ۱۷- نانو ذرات سیلیس [۲۵].



شکل ۱۸- فیلم نانو ذرات TiO_2 [۲۶].

۶-مزایا و معایب سیستم‌های الکتروکرومیک

در اوایل پیدایش مواد الکتروکروم مشکلاتی از قبیل طولانی‌بودن عکس‌العمل ماده الکتروکروم نسبت به ولتاژ اعمال شده به آن، وجود داشت .مثلاً وایولوژن با اینکه یک ماده الکتروکروم با خصوصیات بسیار عالی است اما به دلیل مشکل مذکور، قابلیت استفاده در سطح گسترده را نداشت اما پس از گذشت چند سال و با سنتز و یا کشف مواد جدید و مشتقات وایولوژن این مشکل به کلی حل شده است تا جایی که زمان سوئیچینگ به میلی‌ثانیه رسیده است. از مزایای سیستم‌های الکتروکرومیک می‌توان به موارد: مصرف انرژی کم و صرفه‌جویی در هزینه‌های روشنایی و گرمایشی/ سرمایشی، باقی‌ماندن رنگ پس از خاموش‌شدن دستگاه، احتیاج نداشتن به نور پس زمینه، ارزان قیمت بودن و جلوه‌ها و تنوع زیبایی آن اشاره کرد. نکته قابل توجه، محدودیت‌های ساخت دستگاه الکتروکروم با ابعاد بزرگ است. این محدودیت‌ها عبارتند از، ساخت رسانای شفاف با ابعاد بزرگ، نوع الکترولیت، احتمال نشت الکترولیت، عدم یکنواختی رفتار الکتروکرومی در تمامی نقاط با ابعاد بزرگ.

۷- نتیجه‌گیری

مواد الکتروکروم به دو دسته کلی آلی و معدنی تقسیم‌بندی می‌شود. مواد الکتروکروم آلی به دلایل آماده‌سازی ساده‌تر، هزینه نهایی کمتر، تولید رنگ‌های بیشتر، کنتراست بالاتر و زمان ماندگاری بیشتر رنگ، نسبت به مواد الکتروکروم معدنی دارای مزیت هستند. از طرفی مواد الکتروکروم معدنی یا همان اکسیدهای فلزی به دلیل ماهیتی که دارند دارای رسانایی بیشتری هستند. هم چنین حساسیت مواد پلیمری به نور و حرارت، در برخی موارد موجب محدودیت کاربرد آنان می‌شود. از مهم‌ترین مواد الکتروکروم آلی، وایولوژن است و به شکل گسترده‌ای از وایولوژن و مشتقات آن در دستگاه‌های الکتروکروم استفاده می‌شود. فیلم الکتروکروم به روش‌های متفاوتی از قبیل تبخیر خلا، پاشش، الکتروپوشانش، سل ژل، پوشش دورانی، چاپ اسکرین و چاپ جوهرافشان (فقط برای مواد آلی) تهیه می‌شود. عملکرد دستگاه الکتروکروم مانند یک سل الکتروشیمیایی می‌باشد و جریان الکتریکی متصل شده به آن سبب می‌شود تا یون‌ها از لایه ذخیره یونی به سمت لایه هدایت یونی حرکت کرده به لایه الکتروکروماتیکی رجعت کنند و ماده الکتروکروم رنگی شود. استفاده از مواد الکتروکروم و مشتقاتی از آن‌ها که سیستم‌های رزونانسی بیشتری را فراهم کنند باعث بهبود خواص آن از قبیل سوئیچینگ سریع‌تر، بازده رنگی بیشر، کنتراست بالاتر و غیره می‌شوند. هم‌چنین به‌کار بردن نانو ذرات به همراه ماده الکتروکروم و یا استفاده از فیلم نانو ذرات روی الکترود نیز باعث بهبود خواص می‌شوند. از مزایای سیستم‌های الکتروکرومیک می‌توان به: مصرف انرژی کم، صرفه‌جویی در هزینه‌های روشنایی و گرمایشی/ سرمایشی، باقی‌ماندن رنگ پس از خاموش شدن دستگاه، احتیاج نداشتن به نور پس زمینه، ارزان قیمت بودن وجلوه‌ها و تنوع زیبایی آن اشاره کرد.

۸- مراجع

1. R. J. Mortimer, "Organic electrochromic materials", Electrochim. Acta 44, 2971-2981, **1991**.
2. N. Leventis, "Electrochromic devices", in: McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 8th, 6, McGraw-Hill, New York,pp. 153-156, **1997**.
3. A. A. Argun, "Multicolored electrochromism in polymers: structures and devices", Chem. Mater. 16, 4401-4412. **2004**.
4. "Method of making an ion-switching device without a separate lithiation step" http: // www .asknature. org / product/ 02f1efba126 122650d1691e800739a78, **2011**.
5. R. J. Mortimer, "Electrochromic organic and polymeric materials for display applications", Displays 27. 2-18.**2006**.
6. P. M. S. Monk, R. J. Mortimer, D. R. Rosseinsky, "Electrochromism: fundamentals and Applications", New York, Basel, Cambridge, Tokyo: VCH, **1995**.
7. S. Kim, "Development of novel electrochromic hyperbranched polymer for displays", Electrochem. Soc., Abstract 3921, Honolulu PRiME, **2012**.
8. P. R. Somani, S. Radhakrishnan, "Electrochromic materials and devices: present and future", Mater. Chem. Phys. 77, 117-133, **2002**.
9. C. C. Lezno, A. B. P. Lever (Eds), "Phthalocyanines: Properties and Applications", J. Wiley and Sons, New York, vol. 1, 1989; vol. 2, 1993, vol. 3, 1993, vol. 4, **1996**.
10. M. J. Małachowski, "New organic electrochromic materials and theirs applications", journal of in materials and manufacturing angineering, 48, issue 1, septamber, 14-23, **2011**.
11. T. Sakano, F. Ito, T. Ono, "Synthesis and electrochromic properties of a highly water-soluble hyperbranched polymer viologen", Thin Solid Films, 519, 1458-1463, **2010**.
12. M. O. Liu, "Microwave-assisted synthesis of viologens and polyviologens and their preliminary electrochromic effects", Mater. Lett. 61, 5227-5231, **2007**.
13. G. Wang, X. Fu, J. Huang, Ch. Wu, L. Wu, Q. Du, "Synthesis of a new star-shaped 4, 40-bipyridine derivative and its multicolor solid electrochromic devices", Org. Electron. 12, 1216-1222, **2011**.
14. S. Kim, A. Tanaka, T. Nagamura, "Development of novel electrochromic hyperbranched polymer for displays", Honolulu PRiME 2012, The Electrochemical Society, Abstract 3921, **2012**.
15. Mi-Kyung Oh, "Synthesis, Characterization, and Electrochemical Behavior of Viologen-Functionalized Poly (Amidoamine) Dendrimers", Bull. Korean Chem. Soc. 25, 715-720, **2004**.
16. X. Tu, X. Fu, Q. Jiang, Zh. Liu, G. Chen, "The synthesis and electrochemical properties of cathodice-anodic composite electrochromic materials", Dyes Pigm. 88, 39-43, **2011**.
17. R. Sydam, "A novel 1, 1-bis [4-(5, 6-dimethyl-1H-benzimidazole-1-yl) butyl] -4, 40-bipyridinium dibromide (viologen) for a high contrast electrochromic device", Org. Electron., **2013**.
18. A. Kelaidopoulou, A. G. Kokkinidisa, E. Coutouli-Argyropouloub, "Electrochemical behaviour of N-methyl-N'- (3-indol-1-yl-propyl)-4, 4'-bipyridinium. Anodic polymerization and redox properties of the viologen unit of monomer and polymer film", Electrochim. Acta, 43, 987-997, **1998**.
19. Sh. Zhang, Hong-Lei Wang, M. Chen, Dong-Jin Qian, "Monolayers and Langmuir–Blodgett films of Fe^{2+}-mediated polyelectrolyte with

viologen derivatives as linkers at the air–water interface", Phys. Eng. A., 384, 561-569, **2011**.
20. H. Cho Ko, J. Yom, B. Moon, H. Lee, "Electrochemistry and electrochromism of a poly (cyclo penta dithiophene) derivative with a viologen pendan", Electrochim. Acta 48, 4127-4135, **2003**.
21. V. V-Alina Constantin, "Viologen Stars and Rods: Synthesis, electrochemical Investigations and Polymerization", ph. D. thesis, **2012**.
22. J-H, Ryua, J-H. Lee, "Influence of viologen lengths on the response time of the reflective electrochromic display prepared by monodisperse viologen-modified polymeric microspheres", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 315, 31-37, **2008**.
23. Y. Rong, "New effective process to fabricate fast switching and high contrast electrochromic device based on viologen and Prussian blue/antimony tin oxide nano-composites with dark colored state", Electrochimica Acta 56, 6230-6236, **2011**.
24. F. Campus, P. Bonhôte, M. Grätzel, S. Heinen, L. Walder, Sol Energ. Mat. Sol. C. 56, 281-297, **1999**.
25. M. Nikolou, A. L. Dyer, "Dual n- and p-Type Dopable electrochromic devices employing transparent carbon nanotube electrodes", American Chemical Society, October 6, **2009**.