



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ



نشریه علمی

مطالعات در دنیای رنگ

با مجوز وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۱۳ شماره ۴ (۵۱) زمستان ۱۴۰۲ فصلنامه

- ۳۳۱-۳۴۲ پسندهای محیطی و عوامل انتخاب رنگ در منظر شبانه نمونه موردی: محور باغ فردوس تا تجریش
مائده پورفتح‌اله
- ۳۴۳-۳۵۸ ارزیابی روش‌های تخمین عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل یادمان‌های تاریخی
مهدی رازانی، لیلی نعمانی خیاوی
- ۳۵۹-۳۷۵ مروری بر مواد رنگزای آلی - معدنی برای کاربرد در دیوذهای آلی نورتاب
مژگان حسین‌نژاد، سهراب نصیری
- ۳۷۷-۴۰۶ سلول‌های خورشیدی چاپی، چاره غیرقابل انکار بحران جهانی انرژی
محسن محمد رائی نائینی، مجتبی جلیلی، سعید باستانی، سارا خمسه
- ۴۰۷-۴۲۰ مروری بر عملکرد و کاربردهای پالس الکتریکی در استخراج مواد رنگزای طبیعی
مهديه قمری، زهرا صالحی
- ۴۲۱-۴۳۶ مروری بر توسعه نانوپوشش‌های مبتنی بر نانوذرات اکسید روی با روش اکسیدشدن پلاسمای الکتروشیمیایی
بر روی زیرلایه منبیزی AZ31B و خواص ضدخوردگی و باکتریایی آن
طاها قیم حسن‌خانی، مهرناز قراگوزلو، سعید رضا اله‌کرم



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

پژوهشگاه رنگ



نشریه علمی
مطالعات در دنیای رنگ

Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

مطالعات در دنیای رنگ

نشریه علمی

جلد ۱۳ فصلنامه ۱۴۰۲

صاحب امتیاز: پژوهشگاه رنگ

مدیر مسئول: دکتر زهرا رنجبر

سرمدبیر: دکتر زهرا رنجبر

مدیر اجرایی: دکتر شهره روحانی

ویراستار: دکتر بهزاد شیرکوند هداوند

طراح و صفحه آرا: فاطمه اوشنی

نام چاپخانه: چاپ دیجیتال ایران کهن

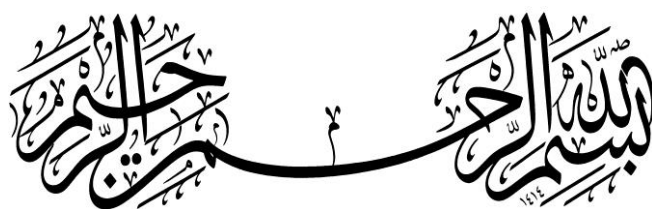
ضریب تاثیر نشریه: ۰/۶۲۵

رتبه در سامانه ارزیابی نشریات: الف

نشانی دفتر نشریه: بزرگراه صیاد شیرازی شمالی، خروجی لویزان، میدان حسین آباد، خیابان وفامنش، نبش کوچه شمس، پلاک ۵۵

صندوق پستی: تهران - ۶۵۴-۱۶۷۶۵ ، تلفن / نمابر: ۲۲۹۴۷۳۵۸

پیام نگار: jscw@icrc.ac.ir ، وبگاه: www.jscw.icrc.ac.ir



نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

پژوهشگاه رنگ با یاری خداوند متعال، نسبت به انتشار نشریه علمی با نام "مطالعات در دنیای رنگ" اقدام نموده است. هدف این نشریه، ترویج شاخه‌های مرتبط با علوم و فناوری رنگ در جامعه علمی و صنعتی کشور می‌باشد. بدیهی است مشارکت فعال و گسترده پژوهشگران و صنعتگران محترم در تحقق اهداف تعیین شده موثر و ارزشمند خواهد بود. این نشریه در تاریخ ۹۰/۳/۲۵ طی حکمی در نامه شماره ۳/۱۱/۵۳۱۴۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری مجوز علمی را دریافت نموده است.

هیات تحریریه

ranjbar@icrc.ac.ir	مدیر مسئول) - دکترای مهندسی پلیمر - صنایع رنگ - (استاد) - پژوهشگاه رنگ	دکتر زهرا رنجبر
ranjbar@icrc.ac.ir	سر دبیر) - دکترای مهندسی پلیمر - صنایع رنگ - (استاد) - پژوهشگاه رنگ	دکتر زهرا رنجبر
ataeefard-m@icrc.ac.ir	مدیر اجرایی) - دکترای شیمی تجزیه - (دانشیار) - پژوهشگاه رنگ	دکتر شهره روحانی
moradian@aut.ac.ir	(استاد) - دکترای فیزیک رنگ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر سیامک مرادیان
hamirsha@aut.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی نساجی/فیزیک رنگ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر سید حسین امیر شاهی
a.yousefi@ippi.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی شیمی - پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران	دکتر علی اکبر یوسفی
gharanjig@icrc.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی شیمی نساجی - پژوهشگاه رنگ	دکتر کمال الدین قرنجیگ
Saeid baghshahi@yahoo.com	(استاد) - دکترای مهندسی مواد/سرامیک - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	دکتر سعید باغشاهی
Akbar.shojaei@sharif.edu	(استاد) - دکترای مهندسی پلیمر - دانشگاه صنعتی شریف	دکتر اکبر شجاعی
a_shams@guilan.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی نساجی - دانشکده فنی مجتمع آموزشی دانشگاه گیلان	دکتر علی شمس ناتری
e-mohajerani@sbu.ac.ir	(استاد) - دکترای فیزیک/ اتمی مولکولی - دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر عزالدین مهاجرانی
a.khosravi@aut.ac.ir	(دانشیار) - دکترای مهندسی پلیمر/صنایع رنگ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر علیرضا خسروی
sabbagh_alvani@aut.ac.ir	(دانشیار) - دکترای مهندسی پلیمر/صنایع رنگ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر علی اصغر صباغ الوانی
eghasemi@icrc.ac.ir	(دانشیار) - دکترای مهندسی مواد/سرامیک - پژوهشگاه رنگ	دکتر ابراهیم قاسمی
a.r.tehrani@gmail.com	(دانشیار) - دکترای مهندسی نساجی - دانشگاه بیروت	دکتر علیرضا تهرانی بقا
rouhani@icrc.ac.ir	(دانشیار) - دکترای شیمی تجزیه - پژوهشگاه رنگ	دکتر شهره روحانی
ataeefard-m@icrc.ac.ir	(دانشیار) - دکترای مهندسی پلیمر - صنایع رنگ - پژوهشگاه رنگ	دکتر مریم عطایی فرد
bastani@icrc.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی پلیمر/صنایع رنگ - پژوهشگاه رنگ	دکتر سعید باستانی
shjafari@ut.ac.ir	(استاد) - دکترای مهندسی پلیمر - دانشگاه تهران	دکتر سید حسن جعفری
salem@sut.ac.ir	(دانشیار) - دکترای مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی سهند تبریز	دکتر امین سالم

مطالب ارائه شده در مقاله‌ها لزوماً نظرات هیات تحریریه را منعکس نمی‌کند.

نشانی دفتر نشریه: بزرگراه صیاد شیرازی شمالی، خروجی لویزان، میدان حسین آباد، خیابان وفامنش، نبش کوچه شمس، پلاک ۵۵

صندوق پستی: تهران-۶۵۴-۱۶۷۶۵، تلفن/نمابر: ۲۲۹۴۷۳۵۸

پیام نگار: jscw@icrc.ac.ir، وبگاه: www.jscw.icrc.ac.ir

ارسال مقاله تنها از طریق پذیرش الکترونیک در وبگاه www.jscw.icrc.ac.ir امکان پذیر است.

نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

جلد ۱۳، شماره ۴، ۱۴۰۲

فهرست مطالب

فراخوان

مقالات

- ۳۳۱-۳۴۲ • پسندهای محیطی و عوامل انتخاب رنگ در منظر شبانه نمونه موردی: محور باغ فردوس تا تجریش
مائده پورفتح‌اله
- ۳۴۳-۳۵۸ • ارزیابی روش‌های تخمین عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل یادمان‌های تاریخی
مهدی رازانی، لیلی نعمانی خیاوی
- ۳۵۹-۳۷۵ • مروری بر مواد رنگزای آلی-معدنی برای کاربرد در دیودهای آلی نورتاب
مژگان حسین‌نژاد، سهراب نصیری
- ۳۷۷-۴۰۶ • سلول‌های خورشیدی چاپی، چاره غیر قابل انکار بحران جهانی انرژی
محسن محمد رائی نائینی، مجتبی جلیلی، سعید باستانی، سارا خمسه
- ۴۰۷-۴۲۰ • مروری بر عملکرد و کاربردهای پالس الکتریکی در استخراج مواد رنگزای طبیعی
مهدیه قمری، زهرا صالحی
- ۴۲۱-۴۳۶ • مروری بر توسعه نانوپوشش‌های مبتنی بر نانوذرات اکسیدروی با روش اکسیداسیون پلاسمای الکتروشیمیایی
بر روی زیرلایه منیزیمی AZ31B و خواص ضدخوردگی و باکتریایی آن
طاها قییم حسن‌خانی، مهرناز قراگوزلو، سعید رضا اله‌کرم

۴۳۷

واژه‌نامه

راهنمای ارسال مقالات

فرم عضویت

Environmental Preferences and Color Selection Factors in the Night Scene Case Study: Ferdous Garden Axis to Tajrish

Maedeh Pourfathollah¹

Department of Architecture, Faculty of Architecture and Art, University of Guilan, P. O. Box: 1841, Rasht, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19- 06- 2023

Accepted: 05-09-2023

Available online: 30-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.1.9

Keywords:

Color of light

Lighting

Night view

User experience

Ferdous garden to Tajrish

ABSTRACT

Nowadays, the use of new lighting technologies has led to considering light color as one of the influential factors in urban space planning and design. Due to the extensive dimensions and the impact of light color on humans and the environment, various considerations must be considered when deciding and choosing light colors. In these environments, focusing solely on humans can have detrimental effects on the environment. This article analyses three scenarios for the Ferdous Garden to Tajrish axis, considering environmental preferences for color and expert considerations in choosing light colors. The results show that the best definition to obtain the best results for increasing the visual experience and non-visual factors is two different design scenarios for the early and late hours of the night. Finally, proposed steps for color selection based on environmental preferences and considerations are presented.



پسندهای محیطی و عوامل انتخاب رنگ در منظر شبانه نمونه موردی: محور باغ فردوس تا

تجربش

مآنده پورفتح‌اله

استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و هنر دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۱۸۴۱.

چکیده

امروزه، بهره‌گیری از فناوری‌های جدید نورپردازی، موجب شده است تا رنگ نور به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار در برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای شهری، در نظر گرفته شود. به دلیل ابعاد گسترده و تاثیرات رنگ نور بر انسان و محیط‌زیست، عوامل مختلف در تصمیم‌گیری و انتخاب رنگ نور باید صورت گیرد. در این محیط‌ها توجه صرف به انسان می‌تواند آثار زیان‌باری برای محیط‌زیست داشته باشد. در این مقاله، سه سناریو رنگ نور مبتنی بر پسندهای محیطی و نظر متخصصان برای نورپردازی محور باغ فردوس تا تجربش تحلیل می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد، برای کسب بهترین نتایج در راستای ارتقا تجربه دیداری و توجه به عوامل غیردیداری، بهترین انتخاب تعریف دو سناریو طراحی مختلف، برای ساعت‌های اولیه و پایانی شب است. در پایان، مدل پیشنهادی برای انتخاب رنگ بر اساس پسندهای محیطی و ملاحظات مورد نظر ارائه می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.1.9

واژه‌های کلیدی:

رنگ نور

نورپردازی

منظر شبانه

تجربه کاربری

باغ فردوس تا تجربش



۱- مقدمه

منظر شبانه و تاثیر بر تجربه زیست شبانه می‌شود. نورپردازی و متغیرهای فنی آن می‌تواند منظر شبانه را شکل داده و بر هویت آن، تاثیرگذار باشد (۳). رنگ نور به عنوان یکی از این متغیرها، بر ادراک منظر و تجربه دیداری مخاطب اثر گذاشته (۴) و یکی از ساده‌ترین و موثرترین عناصر منظر شهری در ارتقا سرزندگی است (۵).

در این میان مطالعاتی در حوزه تحلیل رنگ، به عنوان یکی از عناصر شکل‌دهنده طرح و تجربه مخاطب، از مقیاس‌های خرد چون عناصر معماری (۷، ۶)، محورها (۸) تا شهر (۹) صورت گرفته است. پالت رنگ مناسب می‌تواند در کوچک‌ترین ابعاد، ویژگی‌های معماری را برجسته کند (۱۰) و در ابعاد کلان، بر برنامه‌ریزی شهری و تعریف سیاست‌هایی برای استفاده از رنگ در شهر، تاثیر گذاشته (۱۱) و در قالب طرح جامع پالت رنگ (۱۲) تعریف شود.

امروزه، استفاده از فناوری‌های جدید نورپردازی موجب شده است تا رنگ نور به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار در برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای شهری مورد توجه قرار گیرد. نورپردازی شهری، به عنوان یک روش برای بهبود زیبایی و ایجاد امنیت در فضاهای شهری، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از نورپردازی مناسب، می‌توان جلوه‌های دیداری جذاب و همچنین محیط‌های امن و دوستانه را برای ساکنان و بازدیدکنندگان شهرها فراهم کرد.

اما چگونه می‌توان رنگ‌های مناسب برای شب را انتخاب کرد؟ قبل از هر چیز، موضوع ترجیح دیداری افراد در انتخاب رنگ، به عنوان یک برنامه مشارکتی و مخاطب محور، اهمیت دارد (۱۳). این در حالی است که برخی از اصول فنی و ملاحظه‌ها، نیازمند دانشی است که تنها متخصصان بر آن اشراف دارند (۴). ابعاد رنگ نور فراتر از رنگ است. رنگ در منظر شبانه مبتنی بر نور بوده و طیف رنگ نور، دارای حساسیت‌های محیط‌زیستی، از جمله تاثیر بر فیزیولوژی گیاهان و حیوانات (۱۴، ۱۱) و ابعاد انسانی (۱۵) می‌باشد. همچنین، زمینه و ویژگی‌های فضایی می‌تواند در روند تصمیم‌گیری تاثیر بگذارد (۱۰). حتی انتخاب رنگ سفید یا سفید مایل به زرد برای روشنایی عمومی می‌تواند بر ادراک تاثیرگذار باشد (۱۶). این تاثیر، بر عوامل انسانی، موضوعی است که در مطالعات مختلفی به آن پرداخته شده است (۱۸، ۱۷) رنگ نور و طیف آن بر عملکرد گیاهان تاثیرگذار بوده و باعث تغییر در فوتوسنتز شده، همچنین بر حیوانات و گونه‌های جانوری (۱۹) از این رو جنبه‌های محیط‌زیستی آن بیشتر از ملاحظات رنگ در روز است (۱۹). در خصوص انسان رنگ نور علاوه بر تاثیرات روانشناختی و رفتاری (۲۰، ۱۶) بر فیزیولوژی بدن انسان و ریتم ۲۴ ساعته نیز تاثیرگذار است. در نتیجه سلامت انسان در ارتباط با انتخاب طیف رنگ نور مناسب است.

در نظر گرفتن این تاثیرات در محیط‌های بیرونی با چالش‌هایی روبه‌رو است. در این محیط‌ها توجه صرف به انسان می‌تواند آثار زیان باری برای محیط‌زیست داشته باشد. همچنین روش‌های یا متغیرهای فنی نورپردازی مانند رنگ، می‌تواند تجربه دیداری را افزایش داده و در عین حال به آسایش دیداری کاربر توجه کند. در نتیجه، انتخاب پالت رنگی مناسب برای منظره شبانه مستلزم بررسی دقیق عوامل مختلفی از جمله ترجیح افراد، معنا، توجه به سلامت از جمله خطر نور آبی و محیط‌زیست و تأثیر طراحی نور بر درک رنگ است. در این مطالعه، موضوع رنگ و ملاحظات آن در منظر شبانه مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی بهترین روش‌ها و معیارهای انتخاب رنگ نور در فضاهای شهری، نمونه موردی محور باغ فردوس تا تجریش در نظر گرفته شد. این محور، یکی از فضاهای مهم و پرتردد در شهر می‌باشد و انتخاب رنگ نور مناسب در آن می‌تواند تأثیر زیادی بر تجربه و احساسات افراد و همچنین زیبایی و زندگی شبانه شهر داشته باشد. سپس ترجیح دیداری مردم درباب رنگ در کاربری‌های مختلف مورد سنجش قرار گرفت. در پایان سه سناریو رنگ نور برای بخشی از محور باغ فردوس مدل‌سازی و مورد آزمون قرار گرفت.

نوآوری این پژوهش در تک بعدی ندیدن انتخاب رنگ در منظر شبانه است. در این مقاله یک مدل تصمیم‌گیری انتخاب رنگ نور در فضاهای شهری، ارائه می‌شود که به ملاحظات مختلف در کنار پسندهای محیطی توجه شده است. این ملاحظات شامل اثرات رنگ نور بر انسان، تأثیرات زیست‌محیطی، پسندهای محیطی و نیز تجربه کاربری افراد است. با در نظر گرفتن این ملاحظات، می‌توان طرح‌های نورپردازی مناسبی را برای فضاهای شهری طراحی کرد که بهره‌وری بالا و همچنین حفاظت از محیط‌زیست را به همراه داشته باشد. در نهایت اهداف زیر برای این تحقیق در نظر گرفته شده است:

- بررسی عوامل موثر در استفاده از رنگ نور در منظر شبانه از دید متخصصان و تحلیل رابطه میان متغیرها
- بررسی ترجیح دیداری مخاطبان و پسندهای محیطی از رنگ در فضاهای مختلف شهری
- تعریف سناریوهای مختلف رنگ در نمونه موردی و آنالیز آن از بعد روانشناختی
- ارائه یک مدل تصمیم‌گیری برای انتخاب رنگ در منظر شبانه

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و روش

این پژوهش یک پژوهش کیفی است برای دریافت پسندهای محیطی منظر شبانه مجموعه‌ای از نظرات شهروندان و متخصصان را در تعریف سناریوهای مختلف به کار می‌برد. متغیرهای روانشناسی بر اساس مدل پسندهای محیطی منظر کاپلن استفاده شد (۲۰) نظریه

جهت رسیدن به یک مدل مفهومی، رابطه میان متغیرهای مختلف مورد سنجش قرار گرفت. در این راستا از مدل ارائه شده دکورت (۲۱) در بررسی نور و پاسخ‌های انسانی ایده گرفته شد. بر اساس مدل دکورت، نورپردازی انسان-محور به طور هم‌زمان تأثیرات دیداری و غیردیداری نور را در جهت کاهش آثار نامطلوب و افزایش اثرات مطلوب برای انسان در نظر می‌گیرد. در نتیجه علاوه بر تاثیرگذاری نور بر واکنش‌های غیردیداری در انسان و پاسخ‌های شبانه‌روزی، اعصاب و غدد عصبی برای سلامت انسان این واکنش‌ها حیوان‌ها و گیاهان (۲۴) را نیز درگیر می‌کند. این تاثیرگذاری بر واکنش‌های غیردیداری چون ریتم سیرکادین بیشتر متوجه طیف رنگ نور می‌باشد. بر مبنای این پژوهش‌ها این عوامل را به طور کلی در دو دسته سازوکارهای دیداری و غیر دیداری تقسیم بندی می‌شود. عواملی چون سلامت و محیط‌زیست به سازوکار غیردیداری و سایر عوامل چون متغیرهای روانشناسی به عوامل دیداری و زیر مجموعه‌های آن شامل تجربه دیداری، آسایش دیداری و عملکرد دیداری مربوط می‌شود.

برای رسیدن به روابط میان این متغیرها و تعیین مدل مفهومی جهت سناریونویسی، این متغیرها با متخصصان مورد مصاحبه و آنالیز از طریق پرسش نامه قرار گرفت. این متخصصان ده نفر با تخصص نورپردازی بودند که فعالیت حرفه‌ای یا دانشگاهی، در حوزه طراحی و اجرا پروژه‌های نورپردازی، داشته و در انجمن‌های علمی و تخصصی روشنایی عضویت داشتند.

پس از فرض یک مدل مفهومی، داده‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. در نتیجه رابطه میان متغیرهای دیداری و غیردیداری نور با سایر معیارهای ارائه شده در این تحقیق سنجیده شد. پس از مشخص کردن متغیرهای درون‌زا و برون‌زا، تحلیل مسیر در نرم افزار ایموس و به روش الگوسازی روابط ساختاری انجام گردید. داده‌ها نشان داد که هیچ رابطه مستقیمی میان متغیرهای دیداری و غیر دیداری مشاهده نشد که با مدلی که از پیش ارائه شده بود، تطابق داشت. (شکل ۱) در نتیجه از دید متخصصان توجه به متغیرهای دیداری و غیردیداری از طریق این مدل در ادامه پژوهش در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نحوه انتخاب رنگ در آزمون

نسل جدید چراغ‌های ال ای دی امکان استفاده از طیف رنگ‌های مختلفی را فراهم نموده است. (۱۶) در فضاهای داخلی این فناوری به کاربر، این امکان را می‌دهد تا مطابق با پسند خود، رنگ یا دمای رنگ نور محیط را تغییر دهد. اگر این امکان برای کاربران فضاهای شهری فراهم شود، در یک منظر شهری چه پالت رنگی را ترجیح می‌دهند؟

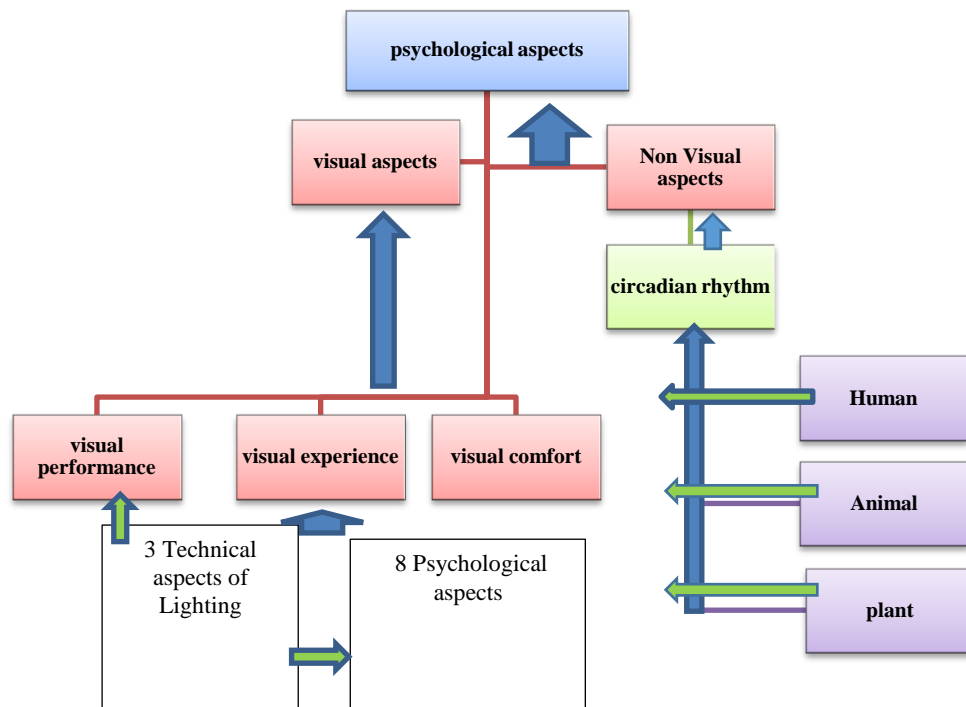
کاپلان‌ها بیان می‌دارد که مردم برای برقراری ارتباط با محیط پیرامونشان به فهمیدن محیط و کشف کردن آن نیاز دارند و از این نوع ارتباط با محیط چهار متغیر شکل گرفته که انسجام، پیچیدگی، خوانایی و رازآمیزی نام دارد. (۹) رابطه این متغیرها و سایر عوامل از دیدگاه متخصصان مورد بررسی قرار گرفت و در قسمت مبانی نظری و دیدگاه متخصصان شرح داده شد.

در نهایت پرسش‌نامه‌ای شامل متغیرهای خوانایی، انسجام، راز آمیزی، پیچیدگی، نشاط و سرزندگی، حس امنیت، انگیزه حضور پذیری و هویت‌مندی در راستای سنجش ویژگی‌های محیطی در رنگ نورهای مختلف طراحی گردید. هدف این پرسشنامه دستیابی به بهترین گزینه برای نورپردازی و انتخاب رنگ نور مناسب برای کاربری‌های متنوع حد فاصل باغ فردوس تا میدان تجریش است. تعداد کل پرسش‌ها ۴۵ سوال بوده که از سوال ۱۰ الی ۴۵ مربوط به عوامل روانشناسی و نظریه کاپلان می‌باشد. سوال‌های مربوط به این قسمت با سه تصویر متفاوت که هر کدام به نوعی متفاوت از دیگری نورپردازی شده است پرسیده شده تا پاسخ‌های آنها با یکدیگر مقایسه شود.

داده‌های مربوط به متغیر وابسته، برای گروه‌های مختلف شامل پاسخ‌های مخاطبان به سوالات مربوط به عوامل روانشناسی و نظریه کاپلان، جمع آوری گردید. سپس، با استفاده از روش آزمون آنوا، میانگین‌های گروه‌ها مقایسه و تفاوت معناداری بین آنها مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲- مدل راهبردی و دیدگاه متخصصان

تصمیم‌گیری درخصوص رنگ نور در منظر شبانه با پیچیدگی‌ها و چالش‌هایی مواجه است. تعداد شاخص‌های تصمیم‌گیری، تنوع معیارهای کمی و کیفی و لزوم در نظر گرفتن هم‌زمان آن‌ها، بر پیچیدگی تصمیم‌ها می‌افزاید. روش‌ها و فنون تصمیم‌گیری چند معیاره (۲۱) و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌توانند در اولویت بندی و ارائه نتایج کمک کند. دیدگاه یک متخصص در خصوص مولفه‌های موثر در انتخاب رنگ در منظر شبانه (۲۲)، نشان از الگوی ذهنی وی دارد. این الگوی ذهنی نظری مبتنی بر اصولی صریح و آگاهانه است که در ذهن، سامان و میزان تاثیرگذاری ابراز می‌شود. بررسی الگوی ذهنی و اولویت‌های متخصصین در خصوص عوامل تاثیرگذار بر رنگ در منظر شبانه، نشان می‌دهد که انسان محور بودن به تنهایی کافی نمی‌باشد. علاوه بر آن، عوامل انسانی نیز شامل متغیرهای گوناگونی هستند که توجه به همه آنها در یک زمان میسر نیست. در نتیجه اولویت‌بندی عوامل در محدوده‌های مختلف شهری می‌تواند راه‌حل موثری در حل تعارضات و ارتقا عوامل انسانی دارای اولویت باشد.



شکل ۱: مدل مفهومی اولیه مطابق با مبانی نظری تحقیق منبع: نگارنده ۱۴۰۲

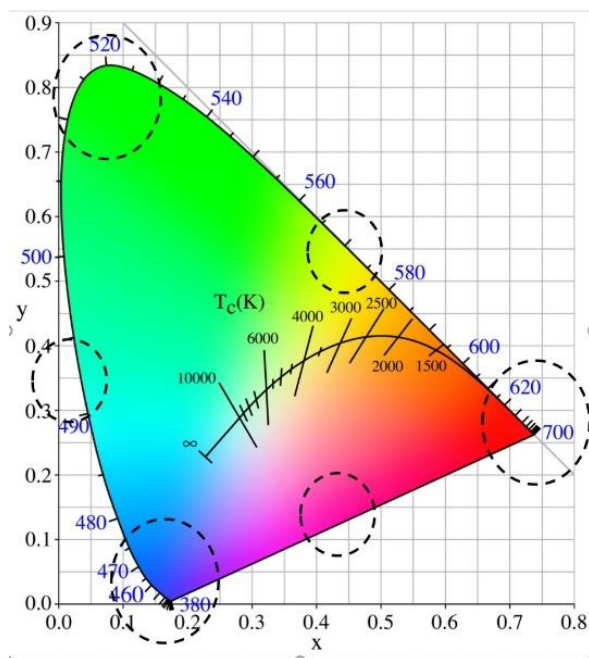
Figure 1: The initial conceptual model according to the theoretical foundations of the research

الکتریکی در اختیار شهروندان قرار گرفته تا برای هر گونه از منظر شبانه شهر تهران ترجیح دیداری خود را از ۱ تا ۳ گزینه انتخاب کنند.

برای انتخاب طیفی از رنگ نور از نمودار فام-نابی xy بهره گرفته شد و ۳ رنگ اصلی که در چراغ‌های ال ای دی عامل تولید رنگ‌های مختلف هستند یعنی سبز، آبی و قرمز مبتنی بر رنگ نور این فناوری از نمودار فام-نابی به عنوان رنگ پایه انتخاب گردید.

در ادامه با توجه به اینکه فناوری‌های نورپردازی قادر به ایجاد رنگ نورهای متفاوت از طریق ترکیب سه رنگ اصلی می‌باشند؛ سه رنگ فرعی در نقطه وسط هر یک از دو طیف اصلی انتخاب شد (شکل ۲).

جهت تعریف پالت رنگی برای سنجش رنگ مورد پسند از دید شهروندان، از نرم‌افزار Color explorer که مبتنی بر الگوریتم Color matching می‌باشد، استفاده گردید. به این نحو که بر مبنای سیستم رنگ سه رنگ قرمز، آبی و سبز و سه رنگ فرعی در فاصله میانی رنگ‌های اصلی، به عنوان رنگ‌های پایه، انتخاب و سایر رنگ‌های هماهنگ از طریق الگوریتم تکی ایجاد گردید. در ادامه با توجه به اینکه دمای رنگ نور نیز محدوده خطی از نمودار فام-نابی، است که معمولاً روشنایی عمومی بر مبنای آن شکل می‌گیرد، دو طیف دمای رنگ نور در نقطه ۳۰۰۰ کلوین و ۱۰۰۰۰ کلوین از این منحنی، انتخاب گردیدند. تصاویر زیر (شکل ۳)، به ترتیب سه رنگ فرعی، سه رنگ اصلی و پالت دمای رنگ نور و کد اختصاصی هر رنگ در پالت نمایش داده شده است. سپس این ۸ پالت رنگ در یک پرسش‌نامه



شکل ۲: نحوه انتخاب رنگ نور از نمودار فام-نابی xy منبع: نگارنده ۱۴۰۲.

Figure 2: the light color choose from the chromatic curve.

#0000FF RGB: 0 / 0 / 255	#00FFFF RGB: 0 / 255 / 255	#FF00FF RGB: 255 / 0 / 255	#04FF00 RGB: 4 / 255 / 0
#0000CC RGB: 0 / 0 / 204	#00CCCC RGB: 0 / 204 / 204	#CC00CC RGB: 204 / 0 / 204	#03CC00 RGB: 3 / 204 / 0
#000099 RGB: 0 / 0 / 153	#009999 RGB: 0 / 153 / 153	#990099 RGB: 153 / 0 / 153	#039900 RGB: 3 / 153 / 0
#3333FF RGB: 51 / 51 / 255	#33FFFF RGB: 51 / 255 / 255	#FF33FF RGB: 255 / 51 / 255	#36FF33 RGB: 54 / 255 / 51
#6666FF RGB: 102 / 102 / 255	#66FFFF RGB: 102 / 255 / 255	#FF66FF RGB: 255 / 102 / 255	#69FF66 RGB: 105 / 255 / 102
#3D3D99 RGB: 61 / 61 / 153	#3D9999 RGB: 61 / 153 / 153	#993D99 RGB: 153 / 61 / 153	#3F993D RGB: 63 / 153 / 61
#FFFF00 RGB: 255 / 255 / 0	#FF0000 RGB: 255 / 0 / 0	#C1E2FA RGB: 193 / 226 / 250	#FFFFFF RGB: 255 / 255 / 255
#CCCC00 RGB: 204 / 204 / 0	#CC0000 RGB: 204 / 0 / 0	#C1E2FA RGB: 193 / 226 / 250	#F8CB29 RGB: 248 / 203 / 41
#999900 RGB: 153 / 153 / 0	#990000 RGB: 153 / 0 / 0	#D9ECFA RGB: 217 / 236 / 250	#FFC905 RGB: 255 / 201 / 5
#FFFF33 RGB: 255 / 255 / 51	#FF3333 RGB: 255 / 51 / 51	#FFFFFF RGB: 255 / 255 / 255	#FF8C00 RGB: 255 / 140 / 0
#FFFF66 RGB: 255 / 255 / 102	#FF6666 RGB: 255 / 102 / 102	#99D0F7 RGB: 153 / 208 / 247	#FFA500 RGB: 255 / 165 / 0
#99993D RGB: 153 / 153 / 61	#993D3D RGB: 153 / 61 / 61		

شکل ۳: طیف پالت رنگ نورهای انتخاب شده مبتنی بر الگوریتم انتخاب رنگ منبع: نگارنده ۱۴۰۲.

Figure 3: Color palette spectrum of selected lights based on color matching algorithm.

۲-۴- محدوده مورد مطالعه

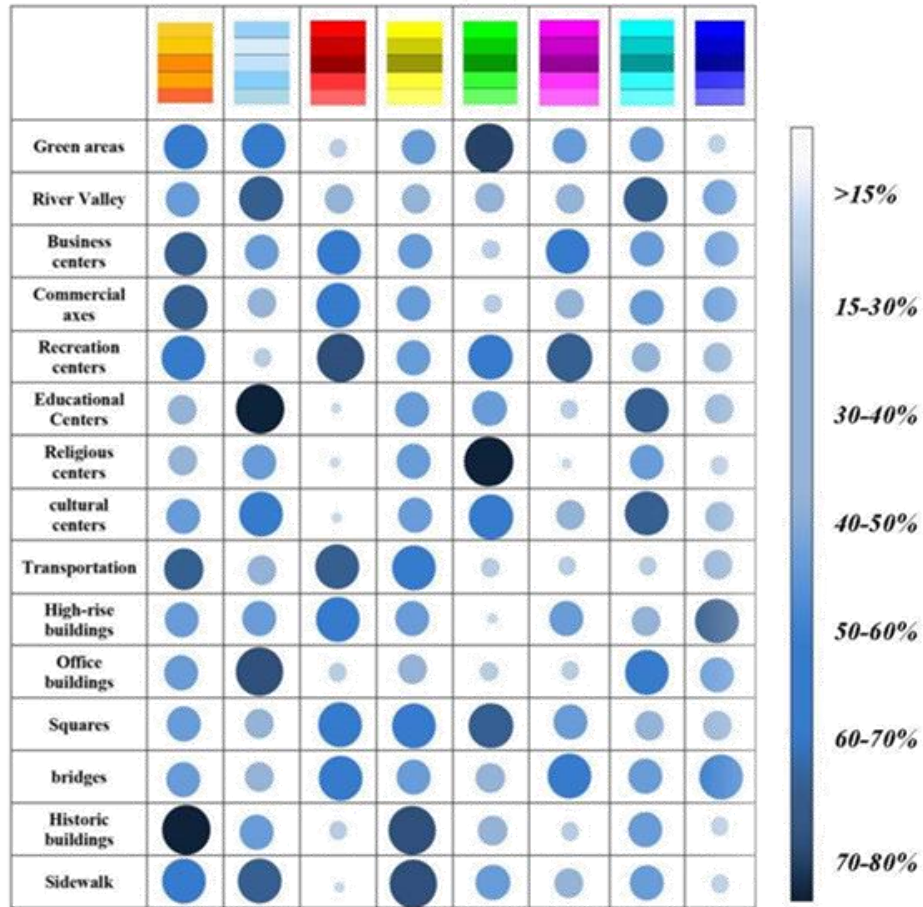
محدوده مورد مطالعه، بخشی از پیاده راه محور باغ فردوس تا تجریش است. مساحت کل محور، در حدود ۲۲۰۰۰ مترمربع است. از این میزان مسیر سواره‌رو دو طرفه با ۶ لاین، بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. در تصویر زیر، مسیرهای دسترسی فرعی، پیاده‌راهها و مسیر اصلی سواره‌رو نشان داده شده است. عرض مسیر پیاده‌رو به طور متوسط ۳ تا ۳.۵ متر بوده و مساحت آن در حدود ۶۲۰۰ متر مربع است. جنس مسیر عموماً از سنگفرش بتنی مربع شکل است. درخت‌های چنار در داخل جوی آب و در کنار آن ردیف دیگری برای درختچه‌ها دیده می‌شود. تجهیزات روشنایی، سطل زباله و مکان‌هایی برای نشستن بعد از این دو ردیف پوشش گیاهی قرار دارد (شکل ۵).

۲-۵- تعریف سناریوها

برای درک بهتر مخاطب از تجربه فضایی، عکس‌برداری از مسیر مورد مطالعه صورت گرفت. استفاده از دوربین تلفن همراه می‌تواند با کالیبره کردن در مقاصد مختلف از جمله طیف‌سنجی مورد استفاده قرار گیرد (۲۵).

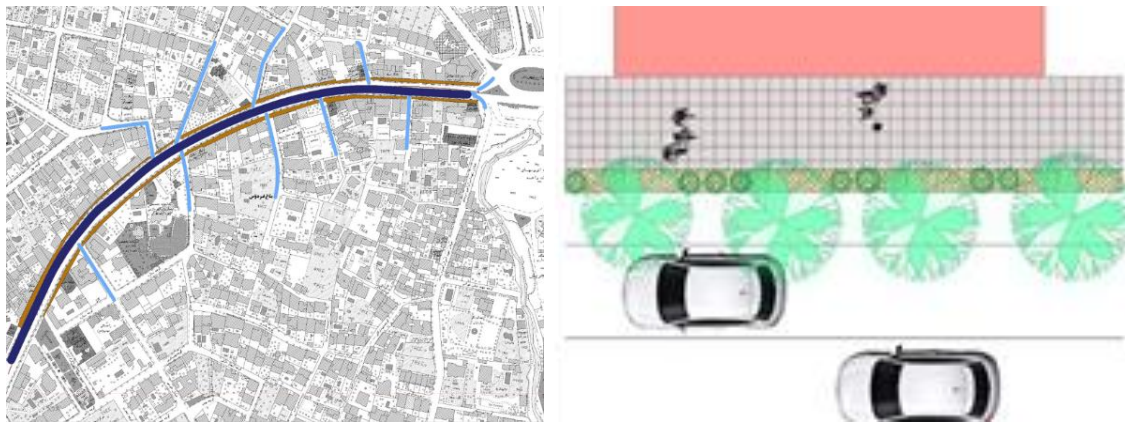
۵۰۰ نفر این پرسشنامه را ملاحظه کرده و ۳۸۰ نفر طبق آن رنگ نور مورد پسند برای هر پهنه را مشخص کردند. در نهایت درصد انتخاب هر پالت رنگ از کل انتخاب‌ها و برای هر گونه فضایی مشخص گردید. در جداول زیر مجموعه ترجیح دیداری شهروندان و اولویت‌های آن‌ها برای استفاده از رنگ در پهنه‌های مختلف شهر تهران مشخص شده است (شکل ۴). بزرگی و کوچکی دایره‌ها و میزان رنگ آن‌ها مشخص‌کننده میزان اهمیت آن پالت رنگی (درصد بالاتر انتخاب) در هر کدام از پهنه‌ها می‌باشد.

در نتیجه، اولویت‌بندی رنگ‌ها در هر پهنه مشخص شده است. برای مثال در پهنه سبز سه اولویت اول انتخاب پالت رنگ نور رنگ‌های سبز، زرد و نارنجی و در رود دره‌ها، سه اولویت اول، پالت رنگ نور آبی روشن، فیروزه‌ای یا طیف نارنجی (مرتبط با دمای رنگ نور) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در منطقه تفریحی شبانه رنگ‌هایی مانند قرمز و بنفش که زنده‌تر و پرنرژی‌تر هستند انتخاب شده‌اند. این ترجیح صرف نظر از ابعاد روش و جنبه‌های دیداری و غیردیداری از دیدگاه متخصصان تا حدودی در ارتباط با تعریف مکان، اطلاعات مناسبی ارائه می‌دهد.



شکل ۴: اولویت‌بندی رنگ بر اساس ترجیح مردم در هر یک از کاربری‌ها و محدوده‌های شهری منبع: نگارنده ۱۴۰۲.

Figure 4: Color prioritization based on people's preference in each of the uses and urban zones.



شکل ۵: محدوده مورد مطالعه و سلسه مراتب عرصه پیاده، جداره شهری و خیابان. منبع: نگارنده ۱۴۰۲.

Figure 5: analysis of the studied case and the hierarchy of the pedestrian arena, the urban wall and the street.

عناصر طبیعی منظر شبانه، جایگاه مهمی در هویت بخشی شهر و محورهای شهری دارند، (۲۶) در این سناریو درختان چنار خیابان ولی‌عصر به عنوان پهنه سبز در نظر گرفته شد. در ادامه، جداره‌های تجاری به عنوان پهنه تجاری و پیاده راه به عنوان یک هویت مستقل،

این تصاویر قبل از شروع پرسش‌نامه به افراد نمایش داده شد و یک تصویر کالیبره شده جهت تعریف سناریوها انتخاب گردید. در سناریو اول اولویت رنگ بر مبنای پسندهای محیطی منظر، که در پرسش‌نامه پالت رنگ بررسی شده بود، صورت گرفت. از آنجایی که

می‌توان در نظر گرفته شود، کاملاً خاموش است. همچنین با توجه به اهمیت حس امنیت در پیاده راه و شاخست بودن ساختمان‌های تجاری، از دو رنگ سفید و آفتابی استفاده گردید (شکل ۷). این دو رنگ مبتنی بر مطالعات نظری پژوهش باعث ارتقا حس امنیت و شاخص شدن ساختمان‌ها در شب می‌شود.

در سناریو سوم، مطابق طرح تفصیلی و گونه بندی فضایی، این محور به صورت یک محور تجاری در نظر گرفته شد. بر این مبنا طیف دمای رنگ نور آفتابی که در آزمون پسندهای محیطی منظر بیشترین امتیاز را برای محورهای تجاری کسب کرده بود، در نورپردازی کلیه المان‌های فضایی از جمله جداره‌ها، پیاده‌راهها و درختان در نظر گرفته شد. از ویژگی‌های این سناریو، ارائه یک هویت جدید و مستقل در شب می‌باشد (شکل ۸). در واقع نورپردازی فضایی کاملاً متفاوت از روز را ایجاد می‌کند. همچنین تنوع رنگی در این فضا بسیار محدود و وابسته به یک طیف رنگ نور است.

مد نظر قرار گرفت. در نتیجه ترجیح دیداری مربوط به سه پهنه در یک تصویر به نمایش گذاشته شد. بر این مبنا رنگ یا دمای رنگی که بیشترین امتیاز را از دید نظرسنجی عموم کسب کرده است، مورد استفاده قرار گرفت.

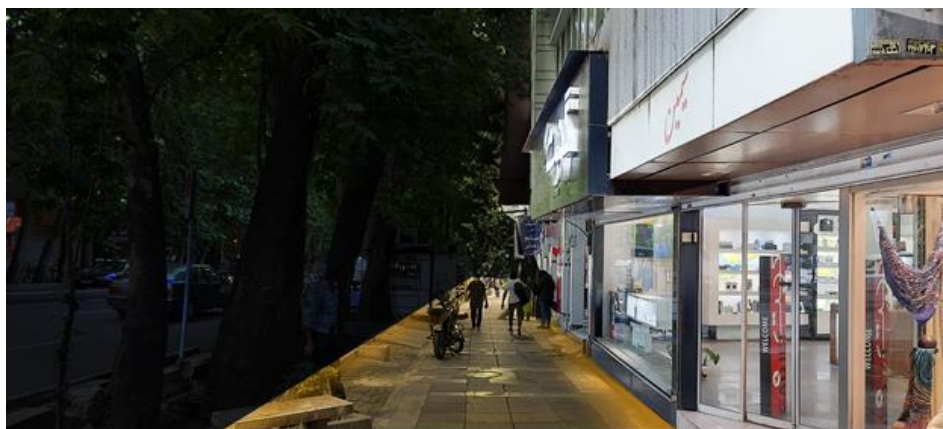
در این سناریو، درختان با نور سبز، جداره تجاری با نور آفتابی و کف‌سازی پیاده‌راه با نور زرد مدل‌سازی شد. از ویژگی‌های این سناریو می‌توان به نزدیک‌تر شدن پالت شبانه به پالت روز که در آن سبز رنگ بارز است اشاره نمود. همچنین بر مبنای این سناریو، مدل‌سازی فقط بر اساس یک گونه بندی فضایی صورت نگرفت و ویژگی‌های بارز این محور به عنوان یک پهنه و یا یک گونه از منظر شبانه در نظر گرفته شد (شکل ۶).

در سناریو دوم با توجه به نظر متخصصان، به خیابان ولی عصر (عج) به عنوان یک محور مهم زیست‌محیطی توجه گردید. بر این اساس در پهنه‌های سبز، محیط‌زیست و سلامت، اولین اولویت است. در نتیجه چهارهای خیابان ولی عصر (عج) که به عنوان پهنه سبز



شکل ۶: تصویر محور ولی عصر حد فاصل باغ فردوس تا تجریش در سناریو اول (منبع: نگارنده ۱۴۰۲).

Figure 6: The image of Valiasr axis in scenario 1.



شکل ۷: تصویر محور ولی عصر حد فاصل باغ فردوس تا تجریش در سناریو دوم (منبع: نگارنده ۱۴۰۲).

Figure 7: The image of Valiasr axis in scenario 2.



شکل ۸: تصویر محور ولی عصر حد فاصل باغ فردوس تا تجریش در سناریو سوم (منبع: نگارنده ۱۴۰۲).

Figure 8: The image of Valiasr axis in scenario 3.

بالاتر است. تصویر ۲ که با بیشترین ملاحظات زیست‌محیطی صورت گرفت، کمترین امتیاز را در متغیرهای روانشناسی که همه آنها به نوعی متغیرهای دیداری به حساب می‌آیند کسب نموده است (شکل ۹). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حوزه رنگ، سناریو اول که بر اساس اولویت رنگ بر مبنای پسندهای محیطی منظر صورت گرفته است، بالاترین امتیاز را کسب نموده است. در این سناریو محدوده مطالعه به عنوان یک کل واحد (پهنه تجاری) در نظر گرفته نشد. در این سناریو درختان چنار خیابان ولی عصر (عج) به عنوان پهنه سبز، جداره های تجاری به عنوان پهنه تجاری و پیاده راه به عنوان یک هویت مستقل صورت گرفت. در نتیجه ترجیح دیداری مربوط به سه پهنه در نظر گرفته شد. این تفکیک فضایی و یکپارچه ندیدن فضا به عنوان تجاری می‌تواند همان رویکرد مختلطی که در فضای پیاده راه دیده می‌شود را در شب به همراه داشته باشد. در نتیجه درختان با نور سبز، جداره تجاری با نور آفتابی و کف‌سازی پیاده‌راه با نور سفید مایل به زرد و در مرحله دوم رنگ آفتابی است. از ویژگی‌های این سناریو می‌توان به نزدیک‌تر شدن پالت شبانه به پالت روز که در آن سبز رنگ بارز است اشاره نمود. از طرفی تک رنگ در نظر گرفتن فضا با یک رنگ قالب مبتنی بر روشنایی عمومی نیز امتیاز بالایی را کسب نموده است. این روش برای کاهش هزینه‌ها و نشان دادن یک منظر یکپارچه می‌تواند، پیشنهاد داده شود. این نتایج با مدل ارائه شده در بخش مبانی نظری و دیدگاه متخصصان به خصوص مدل ارائه شده توسط دکورت (۲۱)، منطبق است. نتایج سایر مطالعات صورت گرفته در این حوزه نیز بر مسائلی چون، توجه به عوامل محلی و فرهنگی هر کشور و شهر (۲۷) در انجام طرح‌های نورپردازی و تأثیر دمای رنگ نور در فضاهای باز شهری، بر عوامل روانشناختی و فیزیولوژیکی انتخاب رنگ مناسب اشاره دارد (۲۸). که می‌تواند به طور ویژه‌ای در مطالعات آتی مورد بحث قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

در نهایت ۶۴ نفر این تصاویر را مشاهده و به پرسش نامه پاسخ دادند. با توجه به تخصص افراد پاسخگو، خروجی این پرسش نامه ۵۷/۸۱ درصد متخصصین و ۴۲/۱۹ درصد افراد عادی بودند. از آنجایی که نمونه مدل‌سازی شده است و فرد در محیط واقعی قرار نمی‌گیرد، پرسش نامه فقط برای کسانی که با این محدوده آشنایی داشتند ارسال شد. علاوه بر آن، عکس‌های روز این محدوده که به طور متوالی تصویربرداری گردیده بود، در فایل گوگل درایو برای این افراد ارسال گردید تا پیش از شروع پاسخگویی محدوده را مرور کنند. برای این افراد توضیح داده شد، هرچند یک تصویر را در حالت‌های مختلف مشاهده می‌کنید اما هدف در نظر گرفتن این حالت‌ها در کل مسیر است.

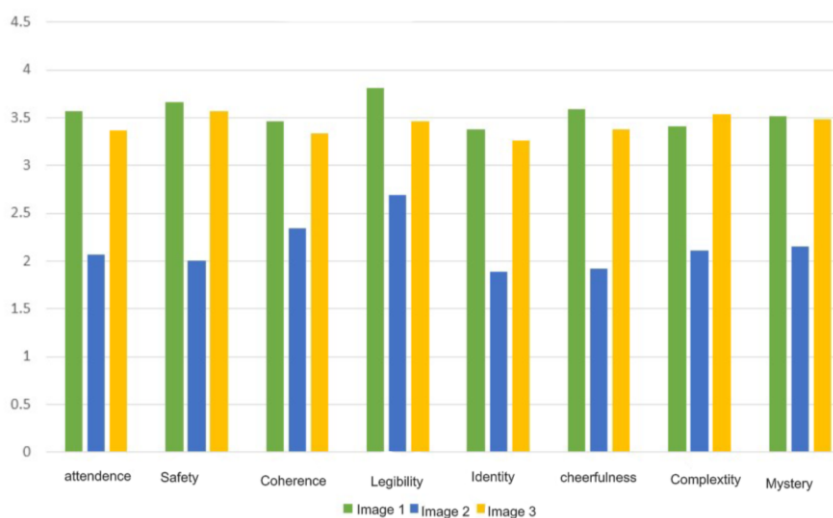
این پرسش‌نامه بر اساس طیف ۵ تایی لیکرت در بازه ۱-۵ (بسیار زیاد تا بسیار کم) طراحی گردید. برای بررسی میانگین متغیرهای مختلف، در سه تصویر، از آزمون آنوا استفاده شد. آزمون آنوا یا تحلیل واریانس یک طرفه برای آزمون مقایسه میانگین یک متغیر کمی در بین بیش از دو گروه مستقل استفاده می‌شود. در حقیقت این آزمون تعمیم یافته همان آزمون T دو نمونه مستقل است و دارای همان پیش فرض‌ها می‌باشد و تنها تفاوت این است که میانگین متغیرهای کمی در بیش از دو گروه مستقل با هم مقایسه می‌شوند. در نتیجه مقایسه معناداری، میان اختلاف میانگین عوامل روانشناسی برای تصاویر (سناریوهای مختلف صورت گرفت) بر این اساس فرض صفر رد و مشخص شد، بین میانگین گروه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی داری وجود دارد (جدول ۱).

جهت دست‌یابی به سناریو بهینه که در آن عوامل روانشناسی بیشترین امتیاز را کسب نموده است، میانگین امتیازهای کسب شده برای عوامل مختلف و به تفکیک سه تصویر مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، سناریو اول بیشترین امتیازها را در بیشتر عوامل روانشناختی کسب کرده است. پس از آن سناریو سوم امتیاز بالایی را به خود اختصاص داده که در آن در متغیر پیچیدگی، از همه سناریوها

جدول ۱: آزمون آنووا مبتنی بر متغیرهای روانشناختی در هر تصویر.

Table 1: ANOVA Test based on psychological variables in each image.

	-	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
attendance	Between Groups	85.69	2	42.848	47.83	.00
	Within Groups	169.30	189	0.896	-	-
	Total	255.00	191	-	-	-
safety	Between Groups	110.30	2	55.152	70.65	.00
	Within Groups	147.52	189	0.781	-	-
	Total	257.82	191	-	-	-
coherence	Between Groups	47.96	2	23.980	28.84	.00
	Within Groups	157.11	189	0.831	-	-
	Total	205.07	191	-	-	-
legibility	Between Groups	41.76	2	20.884	25.76	.00
	Within Groups	153.21	189	0.811	-	-
	Total	194.97	191	-	-	-
Identity	Between Groups	87.59	2	43.797	43.63	.00
	Within Groups	189.71	189	1.004	-	-
	Total	277.31	191	-	-	-
cheerfulness	Between Groups	105.69	2	52.849	57.06	.00
	Within Groups	175.04	189	0.926	-	-
	Total	280.74	191	-	-	-
complexity	Between Groups	79.34	2	39.672	39.54	.00
	Within Groups	189.60	189	1.003	-	-
	Total	268.95	191	-	-	-
Mystery	Between Groups	77.07	2	38.536	36.70	.00
	Within Groups	198.40	189	1.050	-	-
	Total	275.47	191	-	-	-



شکل ۹: مقایسه میانگین هر یک از عوامل روانشناختی در سناریوهای مختلف منبع: نگارنده ۱۴۰۲.

Figure 9: Comparison of the average of each psychological factor in different scenarios.

۴- نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در انتخاب رنگ در منظر شبانه، ترکیبی از ملاحظه‌های روانشناختی و زیست‌محیطی می‌تواند با پهنه‌بندی و تعریف سناریوهای مختلف؛ مورد توجه قرار گیرد. سناریوهای مختلف در محور مورد مطالعه (باغ فردوس تا تجریش) نشان داد که بهترین سناریو، در نظر گرفتن ویژگی‌های بارز فضا و تک بعدی ندیدن گونه‌بندی فضاهای شبانه است. درختان خیابان ولی عصر (عج) به عنوان یک عنصر شاخص می‌توانند به عنوان گونه‌ای مجزا از فضای پیاده‌راه در نظر گرفته شده و ترجیح دیداری رنگ نور آن مبتنی بر گونه‌بندی پهنه‌های سبز در نظر گرفته شود.

نتایج مطالعه بر روی این محور نشان داد که توجه صرف به تاثیرات غیردیداری نور که بر سلامت انسان و حفظ محیط‌زیست تاثیرگذار است، باعث کاهش اثرات دیداری نور و عوامل روانشناسی می‌شود. در نتیجه برای استفاده از رنگ در منظر شبانه مبتنی بر پسندهای مخاطبین و ملاحظات پیشنهاد می‌شود از چند سناریو در ساعات مختلف شب بهره‌گیری شود. شدت روشنایی و تابش نور در محدوده درختان چنار در ساعات پایین شب باید محدود گردد. در نتیجه پیشنهاد می‌شود دو سناریو نورپردازی یکی برای ساعت ابتدایی شب و یکی برای ساعت پایانی شب در نظر گرفته شود. سناریو ۲ که در آن عمده بدنه‌های تجاری و نورپردازی درختان خاموش است می‌تواند برای ساعات پایانی شب در نظر گرفته شود. در نتیجه ساعات اولیه شب دارای تنوع رنگی در محدوده جهت ارتقا عوامل روانشناختی است و در ساعات پایانی شب نوری تقریباً یکنواخت و تک رنگ (سناریو دوم)، پیشنهاد می‌شود.

پیشنهادات و مطالعات آتی

- با توجه به آنالیزهای صورت گرفته، فرآیند زیر می‌تواند به عنوان مدلی برای انتخاب رنگ در منظر شبانه برای گونه‌های فضایی مختلف، در نظر گرفته شود:
- شناخت محدوده مورد مطالعه و به دست آوردن گونه‌بندی فضایی، مطابق با طرح جامع و شناخت ویژگی‌های محیطی
- تعیین ملاحظات و مهم‌ترین اولویت‌ها

۵- مراجع

- تعیین پالت رنگی که بیشتر مورد ترجیح دیداری افراد است
- تعریف سناریو مبتنی بر گونه‌بندی فضایی و و انتخاب پالت رنگ
- در نظر گرفتن سناریو رنگی مجزا برای ساعات پایانی شب، با بیشترین ملاحظات زیست‌محیطی که حضور مخاطبان کمتر است.
- مطالعات آتی می‌توانند از فناوری‌ها و ابزارهای نوین در بررسی تاثیر رنگ نور در محیط شهری استفاده کنند. به عنوان مثال، استفاده از حسگرهای رنگی و دستگاه‌های اندازه‌گیری فیزیولوژیکی می‌تواند به تحقیقات این زمینه ابعاد جدیدی بدهد.
- تحقیقات می‌توانند بر روی تاثیر رنگ نور در موقعیت‌های خاصی مانند فضاهای عمومی، محل‌های کار، فضاهای خدمات بهداشتی و درمانی (از جمله بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی) و فضاهای تفریحی و توریستی تمرکز کنند. این تحقیقات می‌توانند به طراحان شهری کمک کنند تا در طراحی و بهینه‌سازی نورپردازی این مکان‌ها از دانش بدست آمده استفاده کنند.
- با توجه به روند پایدارسازی و هوشمندسازی شهرها، تحقیقات می‌توانند به بررسی تاثیر رنگ نور در محیط‌های پایدار و هوشمند اختصاص یابد. به‌عنوان مثال، استفاده از سیستم‌های روشنایی هوشمند که قابلیت تنظیم رنگ نور را دارند، می‌تواند به بهبود کارایی انرژی و پایداری مبتنی بر ترجیحات دیداری کمک کند.

تشکر و قدردانی

نویسنده از مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران برای حمایت از این پژوهش که در قالب طرح پژوهشی با عنوان "تبیین اصول و سیاست های رنگ در منظر شبانه شهر بیدار" صورت گرفته است؛ تشکر می‌نماید.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

1. Nazari A, Torabi M, Identification and Prioritization of Quality Indicators for Building Facade Design; Using a Fuzzy Approach, JIAU, 2023, 13(2), 281-295. <https://doi.org/10.30475/isau.2022.235394.1436> (In persian).
2. Taghipour A, Hasanzadeh Baghi B, Ahmadi Dehrashid P. Evaluation of the influencing factors on the quality of pedestrian zones from the perspective of citizens (Case study: Two phases of Pedestrian Zone in Rasht). Geography and

Planning, 2023;27(83):27-38.

<https://doi.org/10.22034/gp.2023.15142> (In persian).

3. Pourfathollah M, Mahdavejad M. Viewerphilic nightscape based on correlated color temperature. Color Res Appl. 2020; 45: 120-128. <https://doi.org/10.1002/col.22450>.
4. Mahdavejad M, Pourfathollah M. New Lighting Technologies and Enhancement in Sense of Belonging

- (Case Study: Tehran Buildings). *Human Geography Research*, 2015; 47(1): 131-141. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2015.51238> (In persian).
5. Davarinezhad Moghadam M, Shabani M. Colour Psychology and it's Application in Cities. *J Stud Color World*, 2013; 3(4): 25-35. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1392.3.4.4.2> (In persian).
 6. Avaznejad F, Sheibani H. Study of Color in the Architecture of Nasir Al-Molk Mosque in Shiraz. *J Stud Color World*, 2021; 11(1): 23-34. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1400.11.1.3.1> (In persian).
 7. Habib S, Mostaghni A, Rahmani N. Color palette in Houses of Qazvin during Qajar Epoch Case Study: House of Amini-ha. *J Architecture and Urban Planning*, 2014; 6(12): 97-115. 10.30480/aup.2014.104 (In persian).
 8. Zabetian, E., Kheiroddin, R. Evaluation of Fixed Color Scape Perception in Urban Spaces, Case Study: Imam Hossein Square in Tehran. *MANZAR, the Scientific J landscape*, 2020; 12(50): 28-39. 10.22034/manzar.2020.119396.1741 (In persian).
 9. Pakzad J, Einollahi K. Color Palette as a Landscape Design Technique: City Designing. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 2017; 9(17): 163-172 (In persian).
 10. Bista D, Bista A, Shrestha A, Doulos LT; Bhusal P, Zissis G, Topalis F, Chhetri BB. Lighting for Cultural and Heritage Site: An Innovative Approach for Lighting in the Distinct Pagoda-Style Architecture of Nepal. *Sustainability*. 2021, 13, 2720. <https://doi.org/10.3390/su13052720>.
 11. Pourfathollah M, Ghasemi Z, Shams Dolatabadi HS, Alilou M. The Significance of Environmental Factors in Human-Centred Lighting Policy. *J Environ Assess Policy Manag*. 2022;24(04):2250037. <https://doi.org/10.1142/S1464333222500375>
 12. Sharifi M, Sheibani H, Bayat Beheshti Fard S. S, Studying and Reviewing the Comprehensive Plan of the Color Palette of the City. *J Stud Color World*, 2023; 13(1): 33-49. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.1.3.5> (In persian).
 13. Avaznejad F, Sheibani H. Studying and Reviewing the Color in Urban Placemaking. *J Stud Color World*, 2022; 12(1): 71-86. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1401.12.1.5.0> (In persian).
 14. Maia CM, Volpato GL. Environmental light color affects the stress response of Nile tilapia. *Zoology (Jena)*. 2013;116(1):64-6. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2012.08.001>.
 15. Pourfathollah M, Mahdavinejad M, shams solatabadi, hosna, arabab, matyam. User-oriented nightscape lighting (UONL). *Int J Sustain Light*. 2021;23(1):42-5.
 16. Lu Y, Li W, Xu W, Lin Y. Impacts of LED dynamic white lighting on atmosphere perception. *Light Res Technol*. 2019;51(8):1143-58. <https://doi.org/10.1177/1477153518823833>.
 17. Barzegari Naeini F, Soltanzadeh H, Mirshahzade S, Moosavi Mohamadi S Z. Investigating the compatibility of the effect of light from the stained glass windows of traditional Iranian architecture with the human eye sensitivity curve and the biological clock of the human body. *J Archit Hot Dry Climate*. 2023; 10(16): 52-65. <https://doi.org/10.22034/ahdc.2022.16923.1566>(In persian).
 18. Wang D, Liang S, Chen B, Wu C. Investigation on the impacts of natural lighting on occupants' wayfinding behavior during emergency evacuation in underground space. *Energy Build*. 2022;255:111613. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111613>
 19. Pauwels J, Le Viol I, Azam C, Valet N, Julien JF, Bas Y, et al. Accounting for artificial light impact on bat activity for a biodiversity-friendly urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2019;183:12-25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.030>
 20. Kaplan S. The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *J Environ Psychol*. 1995;15(3):169-82. [https://doi.org/10.1016/0272-4944\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0272-4944(95)90001-2).
 21. de Kort YAW, Veitch JA. From blind spot into the spotlight: Introduction to the special issue 'Light, lighting, and human behaviour'. *J. Environ. Psychol*. 2014;39:1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.06.005>
 22. Mohammadian A, Ghasemi P, Shojaei A, Presenting an approach for analyzing multi criteria decision making using the method of discovering additional utility functions, *J Decis Eng*. 2016; 2(6).
 23. Mahdavinejad M, Nikoudel F. Interaction between Visual Beauty and New Lighting Technologies for Nightscape of Buildings Facades. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 2016; 8(15): 131-143 (In persian).
 24. Gawne TJ, Ward AH, Norton JT. Long-wavelength (red) light produces hyperopia in juvenile and adolescent tree shrews. *Vision Research*. 2017;140:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.07.011>
 25. Vaziri A, Ghnabari F, Gorji Bandpay M. Using camera of a cell phone as a spectrophotometer in the outdoor usage. *J Color Sci Tech*. 2022; 15(4): 255-269. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1400.15.4.1.2> (In persian).
 26. Madias E-ND, Christodoulou K, Androvitsaneas VP, Skalkou A, Sotiropoulou S, Zervas E, et al. The effect of artificial lighting on both biophilic and human-centric design. *J. Build. Eng*. 2023;76:107292. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107292>
 27. Peña-García A, Hurtado A, Aguilar-Luzón MC. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*. 2015;78:142-8. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.009>
 28. Chen R, Tsai M-C, Tsay Y-S. Effect of Color Temperature and Illuminance on Psychology, Physiology, and Productivity: An Experimental Study. *Energies*. 2022;15:4477. <https://doi.org/10.3390/en15124477>.

How to cite this article:

Pourfathollah M. Environmental Preferences and Color Selection Factors in the Night Scene Case Study: Ferdous Garden Axis to Tajrish. *J Stud color world*. 2023;13(4):331-342. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.1.9> [In Persian].

Evaluation of Methods for Estimating the Penetration Depth of Consolidant Material in Porous Materials of Historical Monuments

Mehdi Razani^{1*}, Leyli Nemani Khiavi²

1- Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, P.O. Code: 5164736931, Tabriz, Iran.

2- Faculty of Conservation and restoration, Isfahan Art University, P.O. Code: 8173887681, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06- 04- 2023

Accepted: 09- 10-2023

Available online: 30 -12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0

Keywords:

Conservation and restoration

Consolidating

Coating

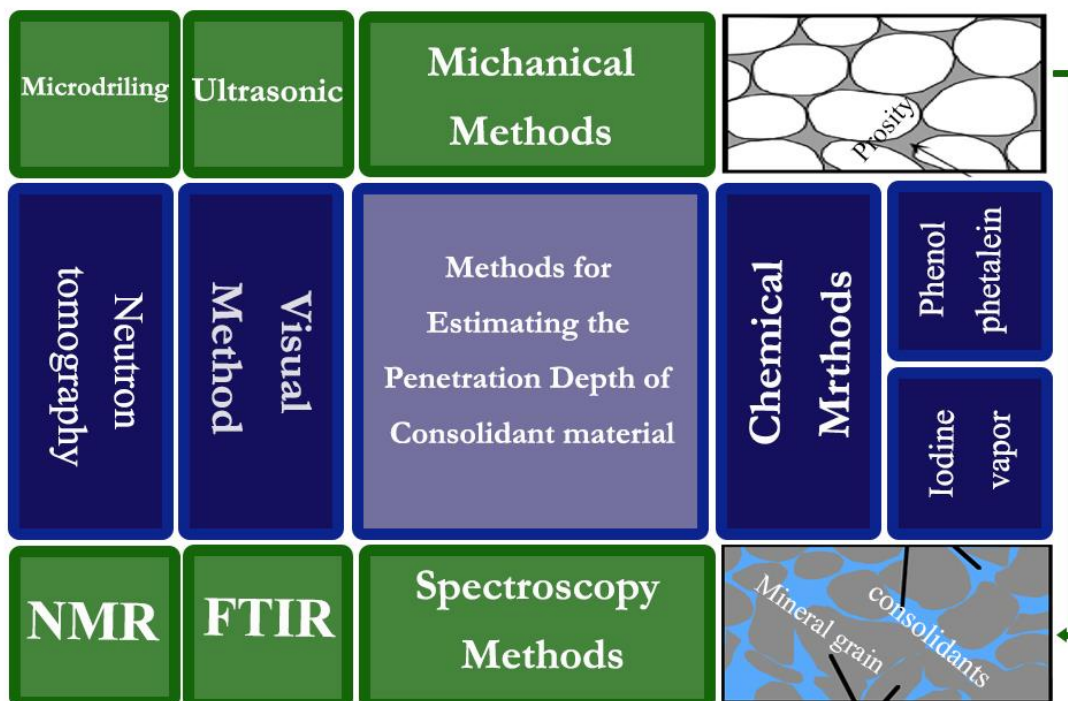
Materials

Porosity

Penetration depth

ABSTRACT

Consolidation is one of the most important processes for conservation and restoration, particularly for historical monuments. It is typically made of porous, heterogeneous, and complex materials such as stones, bricks, and mortars. The effectiveness of the consolidation process depends on various factors, including the inherent properties and degree of damage to the material, as well as the condition and method of application of the consolidating material. However, achieving sufficient penetration depth of the reinforcing material is a challenge and can negatively impact the efficiency and effectiveness of the used materials. This research investigates conventional methods for measuring the penetration depth of consolidating materials in porous substrates. This research investigates imaging and spectroscopy techniques for measuring the penetration depth of consolidating materials in porous substrates.



Corresponding author: m.razani@tabriziau.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



ارزیابی روش‌های تخمین عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل یادمان‌های تاریخی

مهدی رازانی^{۱*}، لیلی نعمانی خیایوی^۲

۱- دانشیار، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسالمی تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، کدپستی: ۸۱۷۳۸۸۷۶۸۱.

چکیده

استحکام‌بخشی از مهم‌ترین اقدامات حفاظتی و مرمتی است که برای پایدارسازی آثار آسیب‌دیده و به‌خصوص یادمان‌های تاریخی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمدتاً سنگ‌ها، آجرها و ملاط‌ها مصالحی متخلخل ناهمگن و از لحاظ ترکیب شیمیایی پیچیده هستند و فرآیند استحکام‌بخشی آن‌ها به متغیرهای زیادی همچون خواص ذاتی، میزان آسیب‌دیدگی، ماده استحکام‌بخش و شرایط و روش اعمال ماده وابسته است. از طرفی مسئله عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش چالشی در استفاده از مواد و بررسی کارایی و اثربخشی آن‌ها است. در این پژوهش روش‌های معمول برای سنجش میزان عمق نفوذ ماده پس از درمان ماده استحکام‌بخش در آثار متخلخل با رویکرد توصیفی-تحلیلی و با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله به بررسی روش‌های مختلف شیمیایی، مکانیکی، تصویری و طیف‌سنجی برای اندازه‌گیری عمق نفوذ مواد تثبیت‌کننده در مواد و مصالح متخلخل می‌پردازد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0

واژه‌های کلیدی:

حفاظت و مرمت

ماده استحکام‌بخش

پوشش دهی

مصالح

تخلخل

عمق نفوذ



۱- مقدمه

استحکام‌بخشی در دانش حفاظت و مرمت، اقدامی است که به منظور بازیابی و تقویت خواص مکانیکی ازدست‌رفته، با استفاده از پوشش‌های استحکام‌بخش^۱ انجام می‌گیرد. استحکام‌بخش‌ها، هر ماده (آلی یا معدنی) است که برای مقاوم‌سازی و استحکام دادن به لایه‌های متخلخل، شکننده و فرسوده‌ی یک ماده‌ی دیگر افزوده می‌شود (۱). استحکام‌بخشی فرآیندی در جهت تقویت آثاری است که انسجام آن‌ها ازدست‌رفته یا کاهش یافته است. پوشش دادن در حفاظت و مرمت آثار فرهنگی و تاریخی به‌ویژه مصالح متخلخل همانند: سنگ، آجر، بدنه‌های سرامیکی، نقاشی‌های دیواری و غیره سابقه‌ای نسبتاً طولانی دارد؛ مفهوم دقیق این عملکرد، تجدید پیوند میان ذراتی است که تضعیف شده، دچار ریزترک شده و یا توسط دیگر سازوکارهای تخریبی و هوازگی ازدست‌رفته‌اند (۲). تخریب مواد متخلخلی مانند سنگ‌ها، عمدتاً مربوط به فرآیندهای شیمیایی - فیزیکی است و نقطه‌ی آغاز تخریب‌ها زمانی است که آب (به شکل مایع یا بخار به درون ساختار وارد می‌شود و آب نفوذی عموماً در مرحله بعدی در ترکیب با سایر عوامل مخرب به‌صورت پیش‌رونده عمل می‌کند؛ می‌توان ماده استحکام‌بخش را درمان عمقی سنگی که پیوستگی و انسجام آن ازدست‌رفته و موجودیت فیزیکی آن به خطر افتاده تعبیر کرد. به‌نحوی که این درمان در مواردی اشباع کردن سطح سنگ هوازده و بخش قابل توجهی از لایه محکم زیرین است (۳) تا مجدداً با استفاده از مواد استحکام‌بخش به هسته سالم سنگ اتصال یابد و یکپارچگی خود را به دست آورد، در این صورت است که فرآیند استحکام‌بخشی موفقیت‌آمیز ارزیابی می‌شود (۱۳-۴). مصالح متخلخل، معمولاً دارای ساختاری ناهمگن و پیچیده هستند که در قسمت تخریب‌شده از نظر قابلیت جذب، تخلخل، ترکیب و غیره با بخش سالم تفاوت دارند. انتخاب ماده استحکام‌بخش مناسب، الزامی بااهمیت بالا در روند درمان محسوب می‌شود، که به‌خوبی در قسمت‌های آسیب‌دیده نفوذ کند و به‌طور همگن در داخل ماتریکس آسیب‌دیده، توزیع شود (۵، ۱۶-۱۴) اگر به مسئله استحکام‌بخشی از منظر حفاظت نگاه شود، یوکیلهتو در باب آثار فرهنگی، حفاظت را مفهومی کلیدی، حاکی از فرآیندی که مشتمل بر انواع عملیات لازم برای صیانت از میراث فرهنگی است، دانسته و معتقد است، حیطة این قبیل عملیات ممکن است بسته به نوع میراث (اثر، سازه، محوطه) تغییر کند (۱۷). پیش اقدام لازم برای حوزه‌ی حفاظت سنگ شامل شناخت ویژگی‌های ساختاری سنگ، شناخت گونه‌ی آسیب و عوامل آن، توسعه درمان‌های حفاظتی، اقدام پیشگیرانه، ارزیابی اثربخشی درمان‌ها و موضوعات دیگر تقسیم‌بندی می‌شود و این مشکلات و مسائل موجود، یافتن راه‌حل و متغیرها را ضروری می‌گرداند. می‌توان گفت مهم‌ترین اقدام قبل از مداخلات حفاظتی تشخیص است و هر اقدام بعدی، نشئت‌گرفته از آن خواهد بود (۱۸، ۱۵).

آن‌چنان‌که واضح و مبرهن است، استحکام‌بخشی مداخله‌ای برگشت‌ناپذیر است و اگر ماده استحکام‌بخش در عمق مناسب نفوذ نکند، خطر تخریب سریع و از بین رفتن آثار تاریخی ارزشمند وجود دارد (۷، ۶). اهمیت و نقش کلیدی نظارت بر عمق نفوذ در ارزیابی کارکرد استحکام‌بخشی سنگ به دنبال این توصیف مشخص خواهد شد. با توجه به اهمیت میراث تاریخی و فرهنگی، اقدامات درمانی به‌ویژه مبتنی بر استحکام‌بخشی و تثبیت برای اطمینان از بقای آثار روبه‌زوال مانند مواد متخلخل موردتوجه قرار می‌گیرند (۱۲-۹). روش‌های غیرتهاجمی و غیر مخرب، که قادر به بررسی ساختارهای متخلخل و مشخص‌سازی محل عامل ماده استحکام‌بخش باشند، برای ارزیابی وضعیت حفاظت و کارایی درمان‌ها موردنیاز است. در یک مفهوم گسترده، گزارش‌شده است که درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی، زمانی مؤثرتر هستند که مقدار نسبتاً زیادی پلیمر بتواند نفوذ کند و در ساختار به‌طور یکنواخت باقی بماند (۲۰، ۱۹). در ارزیابی کارایی ماده استحکام‌بخش برای سنگ‌های تاریخی به‌ویژه انواع کربناته که به علت فراوانی و سهولت در شکل‌پذیری، بیشترین تعداد آثار تاریخی سنگی را شامل می‌شود و به‌مراتب بیشتر از سایر سنگ‌ها موردپژوهش قرار می‌گیرد، در تعیین عمق نفوذ ماده، مشکلاتی وجود دارد و برطرف کردن این معضل، امری ضروری در موضوع استحکام‌بخشی و درمان سنگ است چراکه این مسئله میزان موفقیت درمان را مشخص خواهد نمود. هدف این مقاله مقایسه و شرح روش‌هایی است که بر اساس آن می‌توان تخمینی نسبتاً دقیق از عمق نفوذ مواد در بدنه‌های متخلخل به دست آورد و بر این مبنا کارایی، قابلیت اطمینان و اهمیت روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در درمان سنگ‌های یادمان متخلخل را تشریح نمود.

۲- عوامل تأثیرگذار بر عمق نفوذ و ضرورت سنجش

میزان نفوذ

آنچه در امر حفاظت اهمیت دارد، آشنایی با ساختار ماده مورد مرمت، آسیب‌شناسی، عوامل ایجاد آسیب و عملیات درمان است. بدیهی است که قبل از هرگونه اقدام درمانی، ضروری است تا آسیب‌شناسی صورت پذیرفته و در ادبیات این مبحث که شامل شناخت آسیب و تعیین عمق آسیب است، دقیق شد (۲۱) تخریب شامل دو نوع درونی و بیرونی است که هرکدام شامل چند زیر بخش اعم از عوامل ذاتی، ویژگی سازه‌ای، عوامل مرتبط با اتمسفر و فعالیت‌های انسانی هستند (۳) تخریب‌ها معمولاً در دو گروه ماکرو و میکرو قائل تقسیم‌بندی هستند که بدون چشم مسلح و با چشم مسلح قابل مطالعه‌اند و شیوه برخورد و مطالعه‌ی هرکدام از آن‌ها منحصره‌فرد است. یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سنگ‌ها که از

¹ Consolidant coating

ویژگی‌های ذاتی (بافت، ساخت، ترکیب کانی‌شناسی، میزان تخلخل، شکل پذیری و غیره)، موقعیت زمین‌شناسی (شیب، ارتفاع محل از سطح دریا، ویژگی‌های توپوگرافی منطقه)، شرایط اقلیمی و آب و هوایی و همچنین عوامل انسانی بر آن مؤثرند (۲۸-۲۶). گراسجر (۲۹-۳۱) در بررسی آخرین تئوری‌های هوازدهی می‌نویسد برخی تأثیرات جداگانه در گروه‌های هوازدهی فیزیکی، شیمیایی، یا بیولوژیکی مدنظر هستند اما مهم‌ترین سازوکارها دارای عواملی چندگانه و به همدیگر وابسته‌اند با این تفاسیر، عوامل ذکر شده باعث افزایش خلل و فرج بیشتر درون بافت سنگ شده و عواملی مانند آب و نمک‌های محلول درون بافت سنگ و نفوذپذیری سنگ را افزایش می‌دهد (شکل ۱).

۲- روش اعمال مواد ماده استحکام‌بخش در سطوح متخلخل

برای اعمال ماده استحکام‌بخش روش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند، که اثرات گوناگونی روی بدنه تحت درمان دارند و باید هنگام اتخاذ شیوه اعمال، با در نظر گرفتن عوامل مختلف و با پیش‌بینی‌های لازم انتخاب کرد. برای مثال روش اعمال مویرگی، هنگامی که ماده استحکام‌بخش از سطح زیرین اثر وارد آن می‌شود، تأثیر منفی در ظاهر آن ایجاد نمی‌کند اما ممکن است به‌صورت نامحسوس باعث افزایش وزن اثر شود و دوام شیمیایی آن نیز در وهله اول به‌صورت تئوری قابل پیش‌بینی است اما نتایج دقیق نیازمند انجام مراحل آزمایشگاهی است. اما آنچه واضح و مبرهن است، مسئله قابلیت درمان مجدد و برگشت‌پذیری است که این عمل تقریباً به‌طور کامل اقدامی برگشت‌ناپذیر بوده و در صورت اقدام برای خروج ماده استحکام‌بخش به احتمال زیاد آسیب جدی به سطح تحت درمان وارد خواهد شد لذا باید قبل از هر اقدامی به‌طور کامل مطالعه و بررسی انجام داد. همچنین روشی مانند پاشش، باعث کدورت سطح یا تزئینات احتمالی موجود خواهد شد که می‌تواند به‌عنوان آسیب جانبی حین حفاظت محسوب گردد (جدول ۱).

۳- روش‌های سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش

حفاظت و مرمت آثار و اشیاء سنگی اغلب با آغشته‌سازی با مواد استحکام‌بخش آغاز می‌شود عمق اشباع دهی مواد استحکام‌بخش عاملی کلیدی برای ارزیابی کارایی درمان است و بسته به ساختار داخلی مواد سنگی و خواص محصولات حفاظتی متفاوت خواهد بود (۳۲). با این حال، برای ارزیابی اثربخشی چنین درمان‌هایی، باید حرکت و توزیع مواد در داخل سنگ مشخص شود. روش‌های اندازه‌گیری که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عمدتاً به دلیل نیاز به ابزار دقیق یا به دلیل ناکارآمدی آن‌ها در مورد برخی از ماده استحکام‌بخش‌ها به‌طور گسترده در تحقیقات فنی و عملیات حفاظتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند (۲۳).

سطحی‌ترین نقطه آن شروع شده و در طول ساختار پیش می‌رود، تخمین میزان پیشرفت هوازدهی است که در بحث درمان و ماده استحکام‌بخش (در صورت لزوم) بسیار ضروری خواهد بود. این مطالعه عمدتاً در دو گروه کمی و کیفی قابل انجام است که به ترتیب شامل اندیس‌های شیمیایی، خصوصیات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی، بررسی میدانی^۱ و آزمون‌های کیفی درجا و مطالعات کانی‌شناسی است (۲۲، ۲۳).

در برخی منابع برای تخمین و اندازه‌گیری میزان هوازدهی رابطه ۱ پیشنهاد شده است (۲۴).

$$TWD = aCWD + bPWD (\%) \quad (1)$$

aCWD: درجه هوازدهی شیمیایی و وزن آن و bPWD: درجه هوازدهی فیزیکی و وزن آن را مشخص می‌نماید.

با توجه به آنکه هوازدهی فیزیکی و شیمیایی سنگ هم‌زمان اثراتی را بر خواص مکانیکی بر جای می‌گذارند از این برآیند می‌توان با محاسبه موارد فوق در سنگ نرخ هوازدهی کلی سنگ را تعیین نمود و با در نظر داشتن فرآیند تخریب و هوازدهی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تخریب حوزه آثار سنگی، دریافت که شناخت سازوکار آن گامی مهم در جهت تعیین و انتخاب روش حفاظتی است. با اینکه در طی دهه‌های گذشته سازوکارهای مختلفی برای حفاظت آثار سنگی طراحی و اجرا شده است اما همچنان حفاظت آثاری که در فضای باز قرار دارند امری ضروری و چالش‌برانگیز است. اگر بتوان اعمال ماده استحکام‌بخش را به‌عنوان یک درمان حفاظتی نگریست، می‌توان عوامل تأثیرگذار در میزان نفوذ ماده را در موارد زیر تعریف کرد:

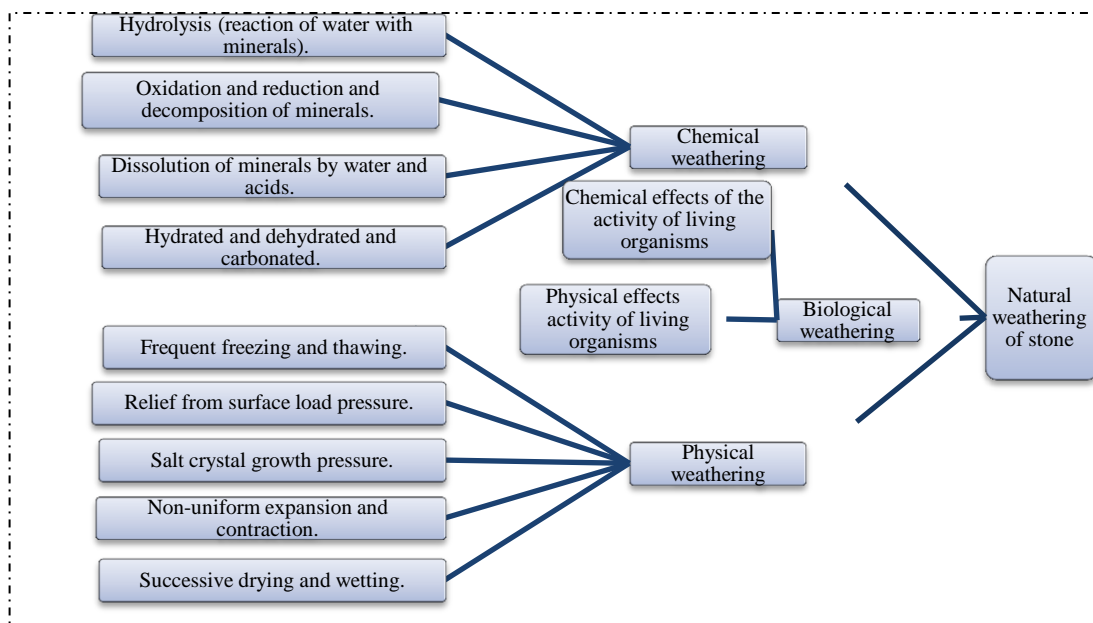
۱- تخلخل و تراکم و ساختار لوله‌های موئین

اندازه منافذ و توزیع ذرات سنگ، گرچه عمدتاً در تعیین پایداری و مقاومت سنگ مؤلفه‌های مهمی به شمار می‌آید اما میزان تخلخل می‌تواند در میزان نفوذ دادن یک ماده یا امکان تبخیر آب موجود در ساختار، یک ویژگی مثبت نیز به شمار آید (۱۵). یکی از مهم‌ترین علل تخریب سنگ‌ها، برهم‌کنش آب موجود در منافذ و تخلخل‌ها با ساختار سنگ است که می‌توان با خارج کردن آب موجود از ساختار و جایگزینی با ماده استحکام‌بخش، به چرخه‌ی تخریب خاتمه داد. میزان موفقیت نفوذ ماده در سنگ‌های متخلخل را می‌توان با نسبت جذب آب و انتقال آن توجیه کرد زیرا که طبق پژوهش‌های ودکاینند و همکارانش، میزان جذب و انتقال در سنگ، به میزان تخلخل کلی و تخلخل مؤثر و میزان توزیع و شعاع حفرات وابسته است (۱۵).

۲- میزان و نوع هوازدهی و عمق تخریب

سرعت و میزان هوازدهی در نقاط مختلف سنگ، متفاوت است و

¹ Field survey



شکل ۱: مهم‌ترین گونه‌های هوازدگی طبیعی در سنگ (۳۰).

Figure 1: The most important types of natural weathering in stone (30).

جدول ۱: مقایسه روش‌های مختلف اعمال مواد استحکام‌بخش.

Table 1: Comparison of different methods of applying strengthening materials.

Reversibility	Chemical durability	Physical effects	Appearance	Method of application
Irreversibility	It varies depending on the type of substance and the depth of penetration and concentration	Slight weight gain	Possible color change	Capillary absorption
Irreversibility	It varies depending on the type of substance and the depth of penetration and concentration	Slight weight gain	Surface opacity	brush
Possible reversibility without direct intervention	Due to coating with a coating such as cotton, the rate of penetration is higher and as a result, it lasts longer.	The possibility of the substance remaining on the decorations	Remaining traces of the applied material on the reinforced body	poultice
Irreversibility	There is a possibility of more surface evaporation.	Distortion of possible surface decorations	Surface opacity	Spray or sprinkle
Irreversibility	Due to the depth of the actions, the stability is more.	Visual damage and weight gain	Creating holes on the treated body	Injection
Irreversibility	Placing all aspects of the effect inside the material makes the action last longer.	Weight gain and substance remaining on the body	Remaining of the reinforcing material on the reinforced body	Immersion
Irreversibility	Due to the complete penetration inside the samples, the depth of penetration is high.	Slight weight gain	Polishing and layer formation on the surface	Immersion with vacuum suction

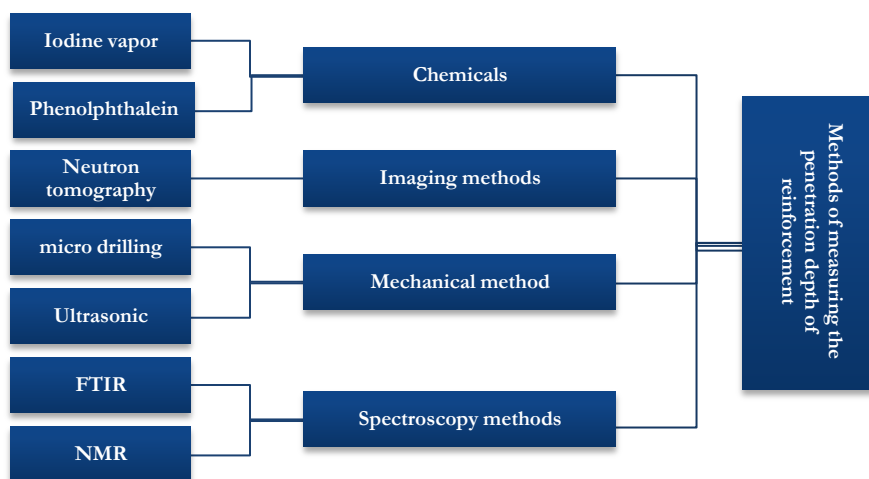
می‌گذارد. با توجه به این ویژگی بخار ید، تصور می‌شد که در صورت حفاظت سنگ، ممکن است بتوان محل ماده استحکام‌بخش‌ها را در سنگ تجسم کرد. از آنجایی که بخار ید جذب نشده و با سنگ‌آهک واکنش نشان نمی‌دهد، جذب بخار ید روی پلیمرهایی که اغلب برای نواحی یکپارچه استفاده می‌شوند، به صورت رنگ زرد یا قهوه‌ای روشن ظاهر می‌گردد و ناحیه استحکام بخشی نشده را بدون تغییر می‌گذارد و می‌توان بسیاری از مشکلات مربوط به تخمین محل ماده استحکام‌بخش‌ها در سنگ‌آهک و احتمالاً انواع دیگر سنگ‌های متخلخل را نیز حل کرد.

مهم‌ترین روش‌های گزارش شده در بخش عمق نفوذ در شکل ۲ آمده است که در ادامه به صورت مجزا شرح داده خواهند شد.

۳-۱- مواد شیمیایی

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از بخار ید

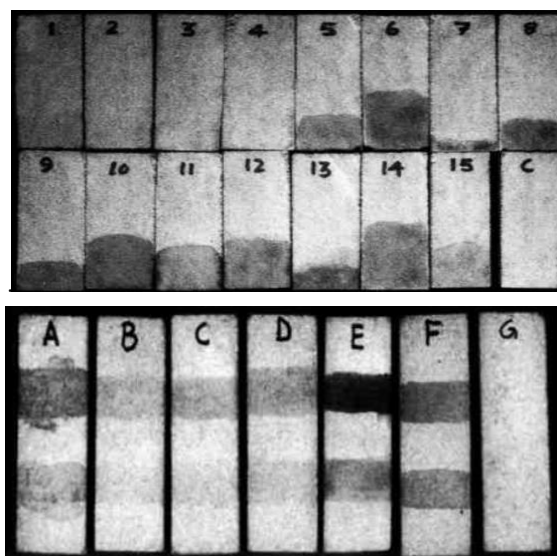
بخار ید، اغلب در زمینه کروماتوگرافی لایه‌نازک برای شناسایی ترکیبات آلی استفاده می‌شود. از نظر فیزیکی روی سطح بسیاری از ترکیبات آلی جذب شده و رنگ زرد یا قهوه‌ای روشن تولید می‌کند. کمپلکس رنگی که تشکیل می‌شود عموماً برگشت پذیر است و پس از تجزیه کمپلکس و تبخیر ید، ماده را بدون تغییر شیمیایی باقی



شکل ۲: نمودار تقسیم‌بندی روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل (نگارندگان).

Figure 2: Classification diagram of different methods of measuring the penetration depth of the reinforcing material in porous materials.

ماده می‌توان در علوم میراث فرهنگی نیز بهره جست و برای شناسایی میزان عمق نفوذ استحکام‌بخش‌هایی که خاصیت قلیایی دارند، بسیار کاربردی است. به عنوان مثال، می‌توان از نمونه‌های مطالعاتی خاویر بسرا و همکارانش (۳۵) یاد کرد که با ماده کلسیم هیدروکسید، تحت عمل استحکام‌بخشی قرار گرفته‌اند و برای سنجش میزان عمق نفوذ، آزمایش در دو مرحله ابتدای درمان و ۲۰ روز پس از درمان انجام گرفته است.



شکل ۳: الف) میزان نفوذ استحکام‌بخش سنجیده شده با روش بخار ید ب) طیف رنگی ایجاد شده مربوط به غلظت‌های مختلف استحکام‌بخش اعمال شده روی سنگ (۳۴).

Figure 3: a) The amount of reinforcement penetration measured by the iodine vapor method, b) The created color spectrum related to different concentrations of the reinforcement applied on the stone (34).

نتایج آزمایش انجام شده برای سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در سنگ آهک با استفاده از بخارید توسط کومار و گینل در سال ۱۹۹۷ نشان داد که روش پیش رو در مقایسه با سایر روش‌های ممکن، برای تعیین عمق نفوذ یک ماده کارا تر باشد. برای بیشترین اثربخشی، سنگ مورد آزمایش باید رنگ روشن داشته باشد و غلظت تثبیت شده در سنگ باید حداقل ۱ درصد وزنی باشد. مشاهدات تجربی گزارش شده نشان می‌دهد که روش بخارید سریع، ساده برای استفاده، قابل اتکا، ارزان و دقیق برای تعیین عمق نفوذ و توزیع استحکام‌بخش در سنگ نسبت به روش‌های در حال استفاده است. روش کار این‌گونه است که پس از تبخیر حلال‌ها و عمل‌آوری مواد ماده استحکام‌بخش، نمونه‌ها به موازات جهت جذب مویرگی برش داده شده و بر روی پایه در محفظه شیشه‌ای در داخل هود بخار قرار می‌گیرند. سپس بلورهای ید با دقت در پایین محفظه شیشه‌ای قرار داده شده و درب شیشه‌ای محفظه محکم بسته می‌شود تا بخارید خارج نشود. نمونه‌ها به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه در محفظه بخارید باقی‌مانده و در هر قسمتی از نمونه که جذب صورت گرفته، در عرض ۲-۵ دقیقه رنگ زرد ظاهر می‌شود. در اینجا ذکر این نکته مهم است که زمان قرار گرفتن در معرض ید باید برای برخی از غلظت‌های ماده استحکام‌بخش کمی طولانی‌تر باشد. اگر زمانی که آزمایش انجام می‌شود یک ماده تثبیت‌کننده به‌طور کامل جذب نشود، ممکن است رنگ زرد برای مدت طولانی‌تری باقی بماند (شکل ۳) (۳۴).

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از فنل فتالئین

فنل‌فتالئین، نوعی شناساگر است که برای شناسایی محیط اسیدی از بازی به کار می‌رود. به طوری که اگر چند قطره از این ماده در محیط‌های بازی اضافه شود، بلافاصله رنگ آن تبدیل به ارغوانی می‌شود و اگر در محیط اسیدی باشد، بی‌رنگ باقی می‌ماند. از این

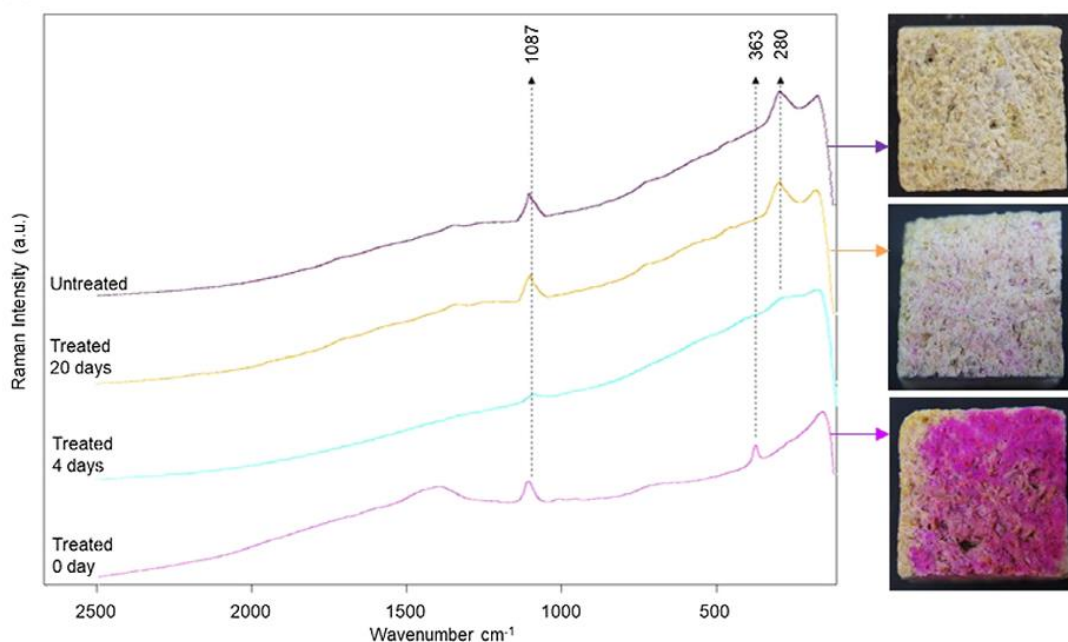
سنگ‌های متخلخل، آجر یا چوب است. روش توموگرافی نوترونی معمولاً شامل ثبت رادیوگرافی نوترونی با زمان نمایش مشخص (با واحد ثانیه) است که نمونه‌ها در امتداد محور عمودی می‌چرخند. می‌توان چنین بیان کرد، که این روش رویکردی روش‌شناختی جدید برای ارزیابی درمان‌های حفاظتی است. اثربخشی این رویکرد برای ارائه اطلاعات در مورد مقدار فازهای تازه تشکیل شده و توزیع آن‌ها در یک فضای سه‌بعدی نشان داده می‌شود. این ارزیابی کمی، با سایر روش‌های تحلیلی تاکنون به دست نیامده است. می‌توان گفت اساس آن، به دست آوردن اطلاعات در مورد یک تیمار خاص متمرکز نیست، اما نشان‌دهنده اثبات مفهومی در مورد امکان ارزیابی اثرات نفوذ یک تیمار معدنی در یک سنگ متخلخل، میزان فازهای تازه تشکیل شده و عمق به‌دست‌آمده آن‌ها است (۳۸، ۳۹). کاربرد دیگر این روش در تخمین میزان هوازدگی سنگ‌های آسیب‌دیده با استفاده از میزان نفوذ آب است که در مطالعات رانری و همکارانش، انجام شده است. آن چنان‌که از نتایج این مطالعه مشخص است، عمق نفوذ آب در سنگ‌هایی که دچار هوازدگی نشده‌اند، نسبت به نمونه هوازده بیشتر است اما سرعت نفوذ آب در نمونه متخلخل و هوازده بسیار بیشتر گزارش شده است. شکل ۵ نتایج حاصل از نفوذ آب در ساختار سنگ را نشان می‌دهد که با استفاده از روش توموگرافی نوترونی به‌دست‌آمده است (۴۰).

هنگامی که ماده به‌تازگی روی سطح اعمال شده بود، به علت بازی بودن محیط ماده کاملاً به رنگ ارغوانی تغییر می‌کند و پس از گذشت ۲۰ روز و اعمال مجدد فنل فتالین، تغییر رنگ محسوسی روی سطح رخ نمی‌دهد که نشان‌دهنده نفوذ ماده به داخل بافت سنگ بوده است. (شکل ۴) (۳۶-۳۳). پژوهش دیگری که توسط باغبانان و همکارانش در بهبود خواص استحکام‌بخش‌ها در سنگ‌های ضعیف جهت استفاده در موج‌شکن‌ها انجام شده است، برای ارزیابی میزان نفوذ آب‌آهک در سنگ لوماشل، پس از اعمال فنل فتالین، سطح سنگ‌های درمان شده را با آب مقطر مرطوب کرده و سپس از جهت مقطع عرضی به فنل فتالین آغشته نمودند که میزان تغییر رنگ فنل فتالین به رنگ ارغوانی، میزان نفوذ ماده را نشان می‌دهد (۳۷).

۲-۳- روش‌های تصویری

-تخمین عمق نفوذ با روش توموگرافی نوترونی

نوترون‌ها به‌طور قابل‌توجهی با عناصر سبک برهم‌کنش می‌کنند و عمدتاً توسط هیدروژن پراکنده می‌شوند و به تصاویر قابل‌تشخیص کنتراست می‌دهند. مشخص شده است که این ویژگی برای تجسم محصولات حاوی هیدروژن در داخل یک بستر متخلخل بسیار مفید هستند. تصویربرداری نوترونی، یک دید کلی از انتشار محصولات و بینش عمیق در مورد تعامل بین محصول و بستر بلوری ارائه می‌کند و ابزار مؤثری برای تعیین جذب و توزیع آب در داخل ماده و همچنین شناسایی عمق نفوذ محصولات حفاظتی غنی از هیدروژن در



شکل ۴: طیف رامان از سطح سنگ‌آهک تیمار نشده و با نانو ذرات $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ (A) و تصاویر آزمایش فنل فتالین انجام‌شده بر روی نمونه سنگ‌آهک تیمار نشده و تیمار شده با نانو ذرات $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ در ۰ و ۲۰ روز خشک شدن (B) (۳۵).

Figure 4: Raman spectra of the limestone surface untreated and treated with $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ nanoparticles (A), and pictures of the phenolphthalein test performed on a limestone sample untreated and treated with $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ nanoparticles at 0 and 20 days of drying (B) (35).

سیستم اندازه‌گیری نیروی دریل زن ("XE سیستم اندازه‌گیری نیروی دریل‌زنی")^۱ نیز مشهور است یک روش مفید با حداقل تخریب ("XE تخریب") برای ارزیابی وضعیت سنگ و ماده استحکام‌بخش سنگ است (۴۶، ۴۴-۴۲، ۱۶). این سیستم شامل یک مته قابل حمل، یک سر مته سرامیکی و یک حسگر برای اندازه‌گیری نیروی لازم برای پیشروی سر مته (در سنگ) به مقدار معین است.

در مطالعه گرازیانی و همکارانش، توموگرافی نوترونی برای تعیین عمق نفوذ و همگنی توزیع یک ماده تثبیت‌کننده معدنی مبتکر بر اساس تشکیل هیدروکسی آپاتیت استفاده شد و توزیع مواد به‌طور همگن در بستر سنگ تحت درمان اثبات گردید. شکل ۵ و ۶ رادیابی ماده فسفاتی درون ساختار سنگ را نمایش می‌دهد (۳۹).

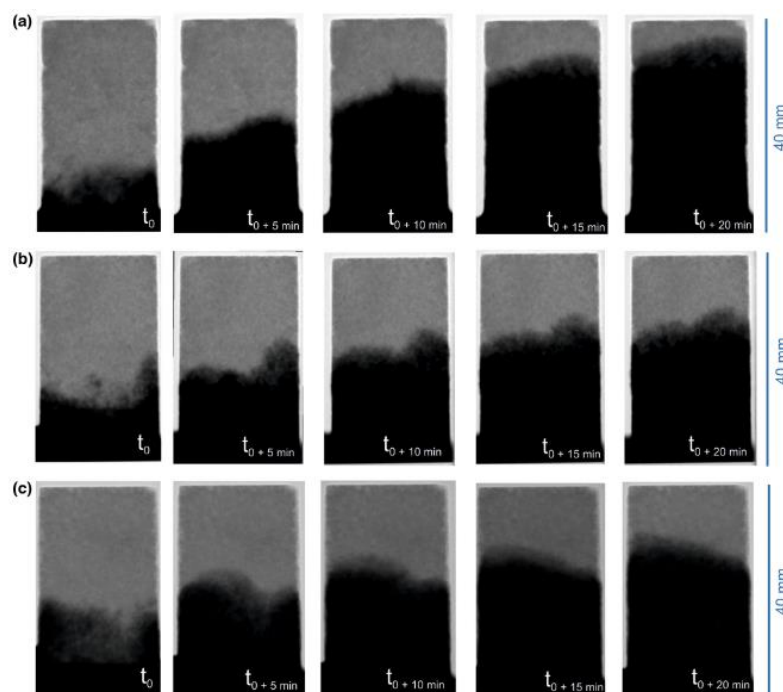
۳-۳- روش مکانیکی

-تخمین عمق نفوذ با روش میکرو دریل

توسعه و کاربرد سیستم اندازه‌گیری مقاومت سنجی سنگ توسط دریل زنی ("XE مقاومت‌سنجی سنگ توسط دریل‌زنی")^۱ که به

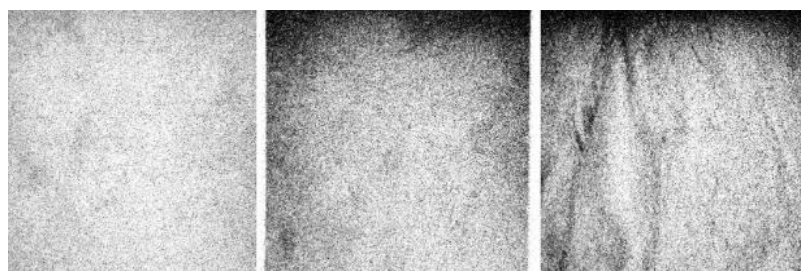
¹ Drilling Resistance Measurement System (DRMS)

² Drilling Force Measurement System (DFMS)



شکل ۵: نمونه‌هایی از توموگرافی نوترونی نرمال شده در مراحل زمانی انتخاب‌شده در طول جذب آب مویرگی توسط سنگ‌های ماسه سنگ‌آهکی محوطه تاریخی سابوسینا: یک نمونه بدون هوازدگی (a) و نمونه‌هایی که در معرض چرخه‌های هوازدگی مصنوعی b8 و c15 قرار گرفتند. مناطق خاکستری روشن شرایط خشک را نشان می‌دهد، در حالی که مناطق خاکستری تیره شرایط اشباع را نشان می‌دهد (۳۹).

Figure 5: Examples of normalized neutron tomography at selected time steps during capillary water absorption by calcareous sandstones of the Sabusina historical site: an unweathered sample (a) and samples subjected to artificial weathering cycles b8 and c15. Light gray areas indicate dry conditions, while dark gray areas indicate saturated conditions (39)

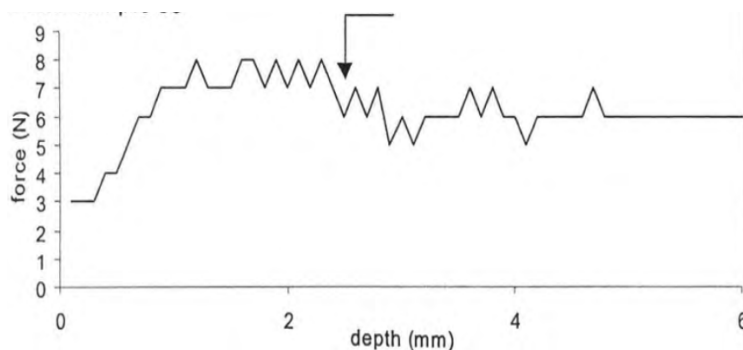


شکل ۶: مناطق تیره‌تر مربوط به تضعیف نوترون است و حضور محصول تثبیت‌کننده غنی از هیدروژن را اثبات می‌کند (۳۹).

Figure 6: Darker areas are related to neutron attenuation and prove the presence of hydrogen-rich stabilization product (39).

ρ = تخلخل را نشان می‌دهد، $M1$ = وزن سنگ درمان‌نشده را نشان می‌دهد، $M2$ = وزن سنگ درمان شده را مشخص می‌کند، $M3$ = وزن سنجش شده حین استحکامبخشی را مشخص می‌کند. در نتیجه مطالعات انجام شده می‌توان بیان کرد که این روش، نتیجه صحیح و قابل‌اعتمادی از عمق نفوذ ماده استحکامبخش در سنگ‌های مختلف ارائه می‌دهد.

از پژوهش‌های انجام شده می‌توان به پروژه‌ی یک گروه اروپایی که به ارزیابی تعدادی از روش‌های استحکامبخشی از جمله هیدروکسید باریم پرداخته است اشاره کرد که نشان می‌دهد در سنگ‌های متخلخل آهکی که با هیدروکسید باریم درمان شده‌اند مقاومت دریل زنی به عمق ۲ سانتیمتر ارتقا یافته است که این امر بدان معنی است که استحکامبخش حداقل تا ۲ cm تحکیم لایه‌ها را در پی داشته است (۴۶). روش سنجش با مقاومت حفاری، اگرچه مخرب است، اما مزیت بزرگی که دارد، در محل بدون نمونه‌برداری از هسته اثر قابل‌اجرا است. پژوهش‌های انجام گرفته توسط دلگادو رودریگز و همکارانش، در حوزه مقاومت سنجی با استفاده از دریل زنی میکرو، موارد قابل توجهی از سنجش میزان مقاومت آثار سنگی و ملاط هستند. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی مقاومت حفاری نمونه ملاط آهکی درمان شده با نانو آهک در مقابل نمونه درمان‌نشده را نشان می‌دهد و میزان مقاومت بیشتر نمونه درمان شده در عمق ۲ تا ۵ میلی‌متری به وضوح قابل‌مشاهده است (۴۲). شکل ۱۰ نیز نشان‌دهنده میزان مقاومت سنگ‌های درمان شده آهکی با استفاده از اتیل سیلیکات را در مقابل سنگ‌های درمان‌نشده نشان می‌دهد (۴۷).



شکل ۸: مقایسه بین نیروی ایجاد شده با میزان عمق نفوذ را نشان می‌دهد و همچنان‌که مشخص است قسمت فلش، ایجاد خمش در مغز استحکامبخشی نشده را نشان داده است. (۴۲)

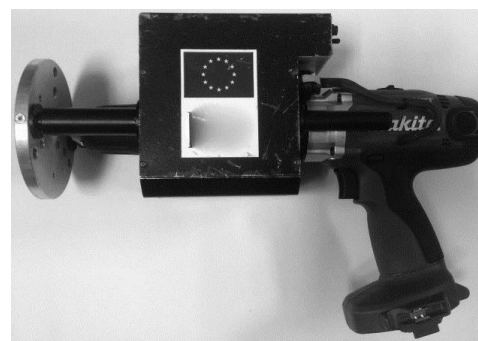
Figure 8: It shows the comparison between the created force and the depth of penetration, and as it is clear, the arrow part has shown the creation of bending in the unreinforced brain (42).

در اصل، سیستم DFMS ("XE سیستم DFMS") یک روش میدانی است که با کمترین تخریب (یک سوراخ ۳ میلی‌متری) می‌تواند عمق آسیب و عمق نفوذ ("XE عمق نفوذ") مواد ماده استحکامبخش را اندازه‌گیری کند. (شکل ۷). اساس کار به این صورت است که رابطه بین مقاومت در مقابل حفاری (DR) سنگ و تخلخل آن بررسی می‌شود.

نتیجه این مطالعه، به صورت محاسبه یک رابطه مشتق ریاضی به دست می‌آید و عدد حاصل میزان تخلخل موجود در سنگ را نشان می‌دهد. در اجرای آزمایشگاهی این روش مکعب‌های $5 \times 5 \times 5$ cm سنگ‌برش داده شده و تحت حفاری با میکرو دریل قرار می‌گیرند. از آنجایی که مقاومت حفاری سنگ متأثر از سختی مواد معدنی تشکیل‌دهنده آن است (۴۴).

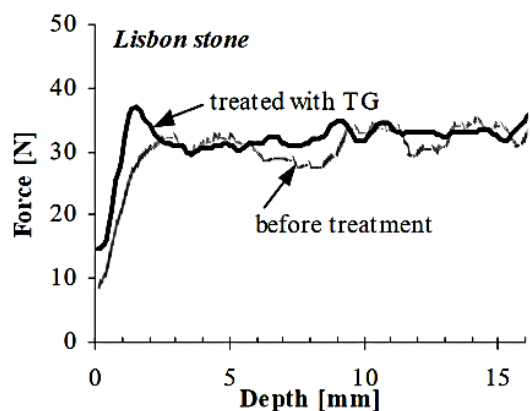
می‌توان میزان تخلخل بستر را سنجید و اهمیت آن حین استحکامبخشی به این شکل مشخص می‌شود که ماده استحکامبخش بانفوذ به درون بافت متخلخل، باعث پر شدن منافذ موجود شده و مقاومت سنگ را در مقابل حفاری ارتقا می‌بخشد. فرمول محاسبه میزان تخلخل به شکل نشان داده شده در فرمول ۲ است که در حالت مقایسه‌ای بین دو نوع سنگ درمان شده و درمان‌نشده مورد سنجش قرار می‌گیرد (شکل ۸).

$$\rho = \left(\frac{M2-M1}{M2-M3} \right) 100 \quad (45)$$



شکل ۷: اندازه‌گیری مقاومت سنجی سنگ توسط سیستم دریل زنی (۵۸).

Figure 7: Measurement of rock resistivity by drilling system (58).



شکل ۱۰: مقاومت میکرو حفاری توسط اتیل سیلیکات قبل و بعد از اعمال با برس بر روی سنگ لیسبون (۴۷).

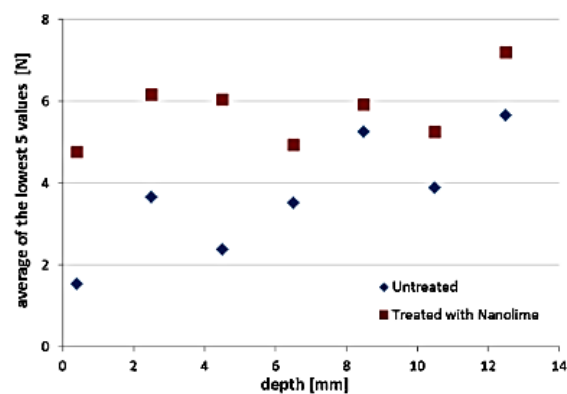
Figure 10: Micro-drilling resistance by ethyl silicate before and after brush application on Lisbon stone (47).

تخلخل وجود دارد و سرعت پالس فراصوت از نظر ساختار و بافت نشانگر خوبی برای آسیب سنگ‌های کربناته است (۵۰). ارتباط تغییرات در خواص سنگ در نتیجه تخریب با سرعت مافوق صوت می‌تواند نظام‌های طبقه‌بندی را برای ارزیابی میزان تخریب سنگ فراهم کند. سرعت امواج فراصوت در سنگ تحت تأثیر درجه اشباع آب منافذ است. این اندازه‌گیری‌ها اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های فضای منافذ و تراکم ترک‌های باز سنگ ارائه می‌کنند. ناهمسانگردی نمونه‌های سنگ بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود (شکل ۱۱).

$$A = \frac{(V_{p_{max}} - V_{p_{min}})}{V_{p_{max}}} \times 100 \quad (3)$$

A: سرعت ناهم‌سان‌گرد، $V_{p_{max}}$: بیشینه سرعت فراصوت در سه جهت و $V_{p_{min}}$: حداقل سرعت فراصوت در سه جهت را مشخص می‌کند.

این روش می‌تواند وضعیت هوازگی سنگ‌های کربناته را با حالت مقایسه‌ای بین داده‌های مواد جدید با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سنگ‌های قدیمی منعکس کند، حتی زمانی که اثرات تخریب چندان مشهود نیست و آسیب محدود به تشکیل ریزترک‌ها در داخل سنگ است. مهم‌تر از همه می‌توان با امواج فراصوت تغییرات جزئی در تخلخل سنگ و تغییرات حجمی را که برای چشم قابل‌مشاهده نیست و نشان‌دهنده آغاز فرآیند زوال است را نیز تشخیص داد. در واقع یک همبستگی منفی قوی بین سرعت موج P و تخلخل برای هر دو نمونه تحت گرمایش و سرمایش مکرر ایجاد می‌شود که برای اهداف پیشگیرانه و نظارتی بسیار مفید و ابزاری قدرتمند در طراحی آزمایش خواهد بود (۵۰-۵۲).

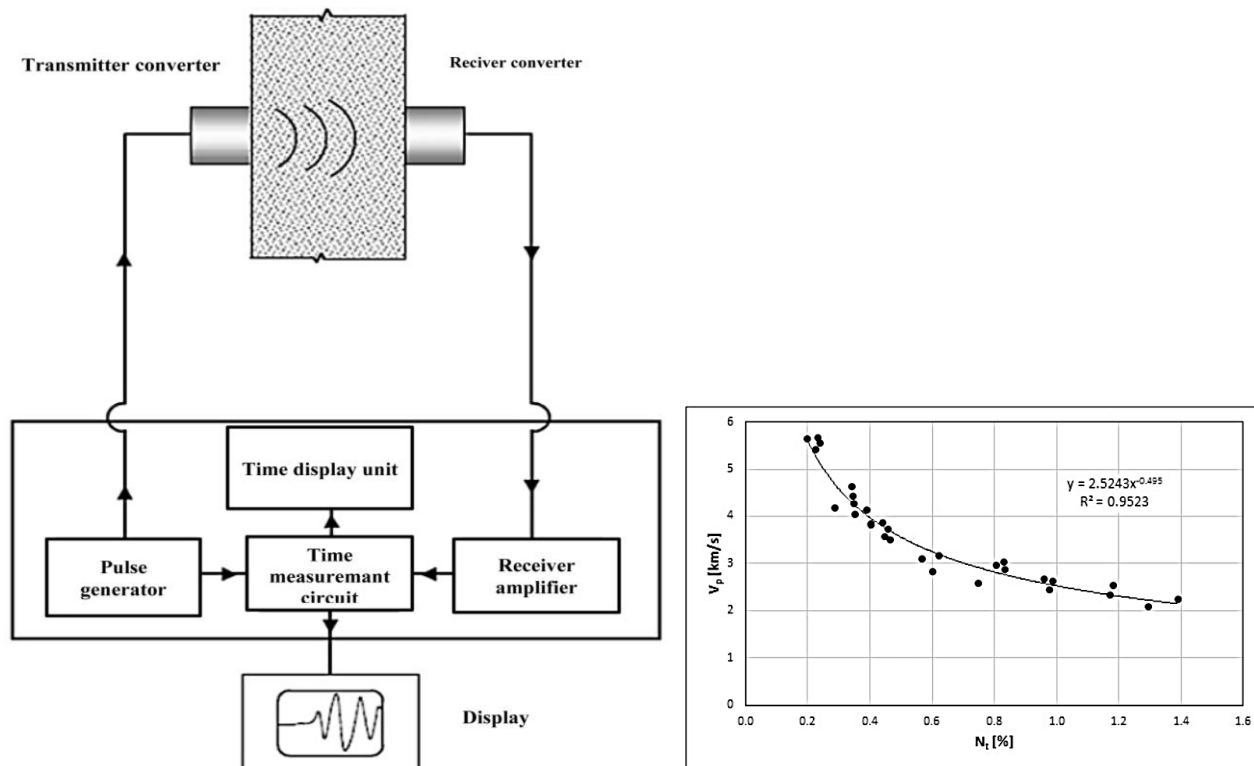


شکل ۹: مقاومت دریل زنی در ملاط آهک قبل و بعد از درمان با نانو آهک (۴۲).

Figure 9: Drilling resistance in lime mortar before and after treatment with nanolime (42).

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از روش فراصوت

اطلاعات به‌دست‌آمده حاصل از روش تصویربرداری سه‌بعدی، برای توصیف فرآیندهای دینامیکی داخلی (به‌عنوان مثال، مشخص نمودن حرکت آب و نمک، تأثیر تغییرات دما و/یا رطوبت نسبی) در سنگ، ملاط، آجر و بتن کاربرد دارد. درک شبکه منافذ سه‌بعدی (مورفولوژی، تخلخل باز یا بسته، اندازه، اتصال و غیره) در داخل سنگ‌ها و تعیین کمیت چنین شبکه‌هایی نه‌تنها برای توصیف سنگ‌ها بلکه برای ارزیابی میزان زوال آن بسیار حائز اهمیت است. (۴۸) روش سنجشی فراصوت مبنی بر تصویرسازی سه‌بعدی، یک روش غیر مخرب است که معمولاً برای ارزیابی غیرمستقیم برخی از عوامل ژئومکانیکی سنگ‌های طبیعی به کار می‌رود. انتشار پالس موج در مواد سنگی نه‌تنها به خواص فیزیکی (چگالی، کشش، تخلخل و محتوای آب) بستگی دارد بلکه بر روی عناصر و آرایش آن‌ها، توزیع فضایی و جهت‌گیری ترجیحی آن‌ها نیز مؤثر است. در مقابل، سرعت امواج فراصوت می‌تواند وضعیت حفاظت از سنگ را در مقایسه با داده‌های مواد تازه و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مواد تخریب‌شده منعکس کند (۵۲-۵۰). از دهه پنجاه میلادی قرن گذشته، از شیوه غیر مخرب فراصوت به‌طور گسترده‌ای برای بررسی و ارزیابی وضعیت سنگ، استفاده‌شده است (۵۶). روش عمدتاً مبتنی بر انتشار امواج فراصوت از طریق سنگ و اندازه‌گیری سرعت حرکت آن‌ها است. سرعت امواج فراصوت به خواص اینرسی و کشسانی سنگ بستگی دارد. دومی تا حد زیادی تحت تأثیر اثرات زوال مانند توسعه ترک‌ها، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت مکانیکی قرار می‌گیرد (۴۹). نتایج تجربی نشان داده است که سرعت پالس فراصوت با افزایش آسیب سنگ تحت فرآیندهای سریع پیرسازی کاهش می‌یابد: یک همبستگی منفی قوی بین سرعت موج P و



شکل ۱۱: الف) تصویر شماتیک عملکرد دستگاه ایجادکننده فراصوت، ب) رابطه بین سرعت پالس فراصوت و میزان تخلخل (۵۶).

Figure 11: a) Schematic illustration of the operation of the ultrasonic generating device, b) Relationship between ultrasonic pulse speed and porosity (56).

موجی $4100-500 \text{ cm}^{-1}$ و با وضوح 4 cm^{-1} و در 64 میکرومتر ثابت شدند که وضوح فضایی حدود 50 متر مربع بود. پس از اعمال استحکام‌بخش مورد نظر، آنالیزهای FTIR برای بررسی عمق نفوذ بسترهای سیلیکاته انجام شد. که بهترین نتیجه در محدوده عدد موجی 2800 تا 3000 cm^{-1} قابل مشاهده بود. در بین طیف‌هایی که از این طریق به دست آمد، در محدوده‌ی 2978 ، 2930 و 2894 طیف نوارهای استحکام‌بخش بلافاصله بعد از اعمال ماده قابل مشاهده است. نقطه b نشان داده شده در شکل ۱۴ نیز در محدوده موجی 1300 تا 1500 cm^{-1} سیگنال‌های واضحی را نشان می‌دهد. به عبارتی با این روش آنالیز، می‌توان از طیف‌های به‌دست آمده به حضور و یا عدم حضور استحکام‌بخش در نمونه درمان شده در محل موردنظر دسترسی پیدا کرد در این مطالعه علاوه بر روش FTIR از طیف‌سنجی رامان نیز استفاده شده است که نشان می‌دهد این روش می‌تواند برای پیگیری عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش کربنات کلسیم در بسترهای مبتنی بر کربنات کلسیم استفاده شود (۵۳).

- تخمین عمق نفوذ با روش رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR)

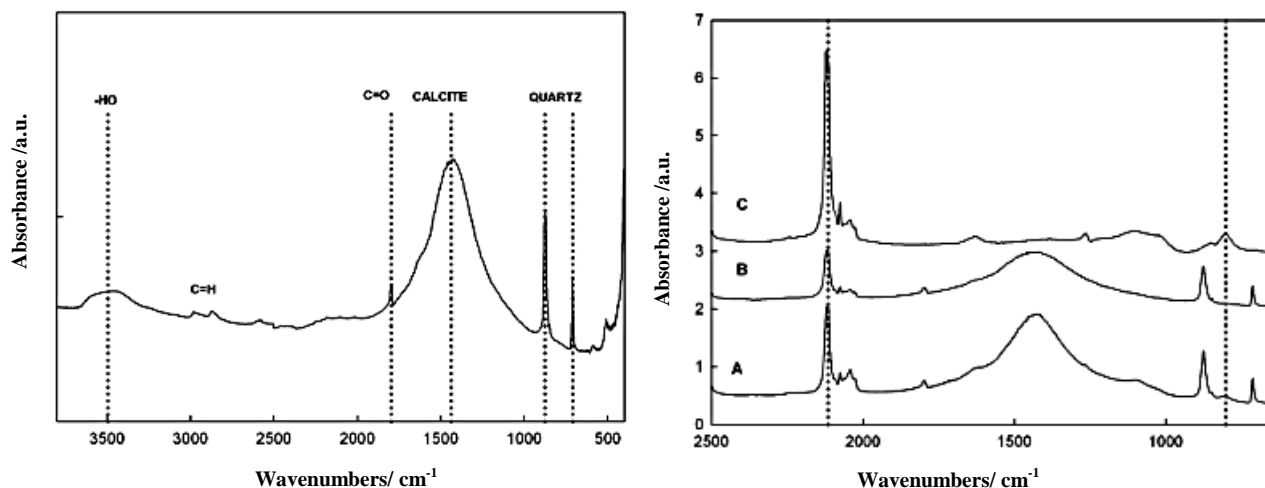
امروزه NMR به‌عنوان روش سنجش در حفاظت آثار تاریخی، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۳-۴- روش‌های طیف‌سنجی

-تخمین عمق نفوذ با روش طیف‌سنجی فراسرخ (FTIR)

تجزیه و تحلیل FTIR را می‌توان در انتقال با عبور تابش IR از نمونه بیان کرد. این روش از بازده انرژی و حساسیت بالا بهره می‌برد. نمونه‌ها در مواد پودری غیرفعال IR پراکنده شده و به‌صورت گلوله یا لایه‌های نازک بین پنجره‌های شفاف IR تهیه می‌شوند. نمونه‌های مات را می‌توان بدون هیچ گونه آماده سازی در بازتاب آنالیز کرد. این روش بر این اصل استوار است که وقتی یک پرتو تابشی از دو محیط مختلف عبور می‌کند، با توجه به نسبت ضریب شکست دو ماده به پرتوهای بازتابی و ارسالی در نسبت‌های مختلف تقسیم می‌شود از مطالعاتی که در این حوزه انجام شده است، می‌توان به پژوهش‌های آل‌مورایمت گیل و همکارانش اشاره کرد که بر روی تعیین کمی نفوذ ماده استحکام‌بخش سیلیسی بر روی سنگ آهک انجام شده است که یک روش تحلیلی مستقیم و بدون معرف برای تعیین کمیت تثبیت‌کننده تعریف شده است. طبق نمودار شکل ۱۲ و ۱۳ نتیجه فرآیند، همبستگی و حساسیت رضایت بخشی را نشان داد (۵۱).

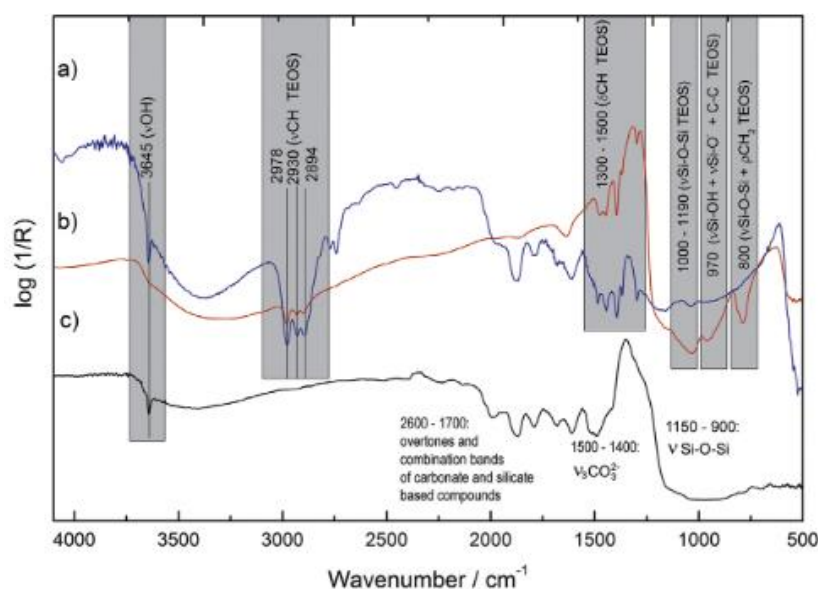
در پژوهش دیگری که در قالب پروژه Heromat FP7 برای ارزیابی عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در سنگ‌های کربناته از روش FTIR استفاده شد که طیف‌ها در حالت بازتابی در محدوده عدد



شکل ۱۲: جذب طیف فروسرخ سنگ تیمار نشده در برومید پتاسیم (۵۱).

Figure 12: Infrared spectrum absorption of untreated stone in potassium bromide (51).

شکل ۱۳: نماینده طیف جذب فروسرخ فریسیانید پتاسیم و سنگ تثبیت‌شده، (B) سنگ و (C) ماده استحکام‌بخش در برمید پتاسیم (۵۱).
Figure 13: Representative infrared absorption spectra of potassium ferricyanide and (A) stabilized stone, (B) stone and (C) consolidating agent in potassium bromide(51).



شکل ۱۴: طیف FTIR از (الف) استحکام‌بخش سیلیکاتی مخلوط شده با بستر سیلیکات، (ب) استحکام‌بخش خالص، و (ج) بستر سیلیکات (۵۳).

Figure 14: FTIR spectra of (a) silicate consolidant mixed to silicate substrate, (b) pure consolidant, and (c) silicate substrate (53).

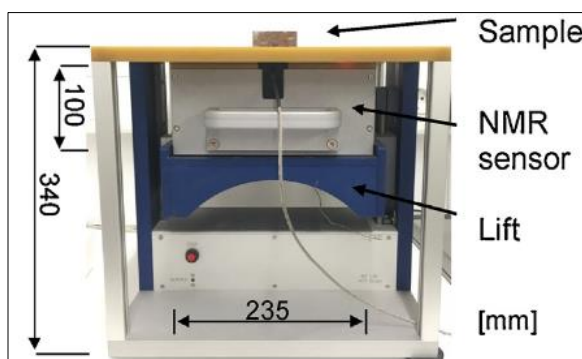
اطلاعاتی در مورد کارایی عوامل آب‌گریز اعمال‌شده بر روی سنگ به صورت غیر مخرب و وابسته به عمق دریافت کرد. علاوه بر این، فرآیندهای انتقال آب از سطح به قسمت‌های داخلی سنگ را می‌توان تخمین زد. با این کار می‌توان بررسی کرد که منطقه دافع آب تا چه مدت از جذب آب جلوگیری می‌کند و لایه آب‌گریز در طول زمان چقدر کارآمد است (۵۴). در واقع، NMR می‌تواند خواصی مانند تخلخل، توزیع اندازه منافذ و ترشوندگی سطح را قبل و بعد از

این شیوه یک روش اندازه‌گیری غیرمخرب و غیرتهاجمی است که از مولکول‌های آب به عنوان شاخصی برای بررسی مصالح ساختمانی متخلخل و میزان ورود عامل استحکام‌بخش در بستر، برای ارزیابی وضعیت حفاظت و کارایی تیمارها استفاده می‌کند. از آنجایی که آب یکی از فراوان‌ترین ترکیبات شیمیایی در مواد متخلخل است، با تکنیک NMR می‌توان سست شدن هسته‌های هیدروژن را در داخل منافذ سنگ‌های طبیعی بررسی کرد. به همین دلیل می‌توان

که در آن N تعداد انتقال دامنه در عمق است و xk و $wk/2$ به ترتیب طول و مختص مؤلفه k در نقطه عطف هستند، Δk نصف عرض انتقال دامنه از پایین است. به ارزش بالا طول در نقطه عطف xk عمق نفوذ درمان است. مقدار xk پایین مربوط به عمق نفوذ کم تیمار است، درحالی‌که مقدار xk بالا مربوط به عمق نفوذ زیاد تیمار است (شکل ۱۵) (۵۴، ۵۵).

۳- مقایسه روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ

روش‌های مختلف ارزیابی سنجش عمق نفوذ طبق عوامل مختلفی قابل تقسیم‌بندی هستند که می‌توانند در شرایط ویژه انتخاب و یا رد شوند. برآیند نهایی نشان می‌دهد که برای هر یک از بافت‌های مواد و متخلخل و عمدتاً سنگی، طبق شرایط ویژه خود، می‌تواند یک یا چندین روش از آن‌ها را درگیر کند که در این خصوص متغیرهای فراوانی نظیر نوع ماده استحکام‌بخش، نوع بافت بستر، انجام پذیر بودن و قابلیت دسترسی و سنجش، تعیین‌کننده شرایط هستند. جدول ۲ خلاصه‌ای از این تقسیم‌بندی را به صورت مختصر ارائه نموده است.



شکل ۱۵: حسگر NMR در تنظیمات آزمایشگاهی (۵۴).
Figure 15: NMR sensor in laboratory setup (54).

عملیات حفاظتی بررسی کند. به‌طور خاص، سیگنال H-NMR می‌تواند به مقدار آب در فضای منافذ و در شرایط مساعد، به‌اندازه منافذی که مولکول‌های آب در آن محدود شده‌اند، مرتبط باشد. با استفاده از گرادیان میدان مغناطیسی، NMR همچنین می‌توان خود انتشار مولکولی مولکول‌های مایع را به‌صورت عمده و محدود به منافذ مطالعه کرد. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، قابلیت انجام در محیط آزمایشگاه و هم در محل با ابزار فشرده، قابل حمل و کم‌هزینه است (۵۴، ۸۰). والریا دی. تولیو و همکارانش و کیین و همکارانش (۵۴، ۵۵) به‌طور مجزا بر روی عمق نفوذ عوامل درمانی، اثر آب‌گریز و تغییرات در تخلخل باز ناشی از تیمارها مطالعه کرده و ناهمگنی‌های فیزیکی و شیمیایی بین لایه‌های درمان شده توف و لایه‌های زیرین نیز شناسایی نمودند و برای سنجش میانگین شعاع منافذ و اتصال متقابل منافذ به‌دست‌آمده با عوامل درمانی، از اندازه‌گیری‌های انتشار NMR برای مقایسه اثرات تیمارهای مختلف تثبیت‌کننده و/یا محافظ بر روی سنگ استفاده کردند و جنبه‌های مربوط به مقدار آب جذب‌شده، تحرک آب و توزیع و انتشار آب در ساختار متخلخل را مورد بررسی قرار داده و تقویت خواص آب‌گریز را مشاهده نمودند. در این روش برای بررسی اثر درمان بر جذب مویرگی آب در زمان t_i به‌عنوان درجه حفاظت توسط مویرگی (PD_{ci}) تعریف شده است و مطابق با استاندارد EN 16581:2013 مطابق رابطه ۴ قابل محاسبه است:

$$PD_{ci}(100) = 100 (Q_{b,t_i} - Q_{a,t_i}) / Q_{b,t_i} \quad (4)$$

Q_{b,t_i} مقدار آب جذب‌شده توسط سنگ بکر، Q_{a,t_i} مقدار آب جذب‌شده توسط سنگ درمان شده و t_i واحد زمان را مشخص می‌کند.

عوامل شیمیایی- فیزیکی مانند بازده آب‌گریز (HE)، عمق نفوذ x_{kr} و شیب در نقطه عطف طبق فرمول ۵ محاسبه خواهند شد:

$$f(x) = \sum_{k=1}^n \frac{wk}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{xk-x}{\sqrt{2\Delta k}} \right] + q_0 \quad (5)$$

جدول ۲: مقایسه روش‌های سنجش عمق نفوذ.

Table 2: Comparison of penetration depth measurement methods.

Depth measurement method	Interpretability	Accuracy in measurement	Time	Cost
Iodine vapor	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in a short time	Affordable
Phenolphthalein	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in a short time	Affordable
FTIR	Need operator	A little more detailed result	Results in a short time	Average cost
NMR	Need operator	A little more detailed result	Results in a short time	High cost
Neutron tomography	Need operator	Qualitative and more detailed result	Results in relatively high time	High cost
Ultra Sonic	Need operator	Qualitative and more detailed result	Results in relatively high time	Average cost
Microdrill	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in relatively high time	Average cost

آن است. مهم‌ترین تقسیم‌بندی برای روش‌های موجود را می‌توان در چهار دسته طیف‌سنجی، تصویربرداری مینا، مکانیکی و استفاده از مواد شیمیایی خلاصه نمود. روش‌هایی مبنی بر سینکروترون نیز، می‌تواند با توجه به دقت سنجشی بالا در طیف‌سنجی و تصویربرداری متمرکز باشند که شامل چند طیف برای اهداف مختلف است. بر طبق معرفی و تشریح‌های انجام‌شده از هر روش، به نظر می‌رسد می‌توان با محاسبه میزان عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش کمک شایانی به حفاظت از این‌گونه میراث فرهنگی در راستای اولویت‌بندی حفاظتی نمود زیرا عدم دقت بر این موارد و نبود چنین اولویت‌هایی موجب بروز ایرادات و مشکلات بسیاری در امر حفاظت و مرمت خواهد گردید. در نهایت بر آیند مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد (۱) مبحث سنجش میزان عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در یادمان‌های متخلخل، در بحث عملی و تئوری نیازمند مطالعاتی بیشتری است و فارغ از مباحث تئوری مرتبط با ماده و نفوذ می‌تواند در رابطه با مباحث مربوط به مبانی نظری مرمت از آثار فرهنگی و تاریخی ورود کرده و با تدقیق این موضوع در رابطه با کنترل عمق نفوذ نسبت به کارهایی و بهره‌برداری بهینه از آنها اقدام نمود بخصوص اینکه مباحثی مانند تجدد و درمان مجدد نیز می‌توانند زیر این موضوع طرح گردیده و به عنوان فازهای مطالعاتی جدید مورد بررسی قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه هنر اصفهان و دانشگاه هنر اسلامی تبریز به انجام رسیده است از این‌رو از دست‌اندرکاران این دو موسسه علمی سپاسگزاری می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

دسته‌ای از این روش‌ها امکان اجرای سریع‌تر، در دسترس‌تر و قابل اجرا در محیط غیرآزمایشگاهی و تخصصی را ارائه می‌دهند اما بالطبع میزان دقت اندازه‌گیری و سنجش آن‌ها نیز با خطای بیشتری مواجه است. استفاده از معرف‌ها و مواد شیمیایی در این دسته قرار می‌گیرند. سایر موارد سنجش عمق نفوذ که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی انجام می‌شود علی‌رغم هزینه‌بر بودن داده‌های قابل استنادی را ارائه می‌کنند. به علاوه شایان ذکر است برخی روش‌ها هر آزمون نیازمند تکرار در سطوح مختلف است که خود منجر به افزایش نرخ نهایی آنالیز خواهد شد. جدول ارائه‌شده و روش‌های معرفی شده، نماینده تمام روش‌های موجود نبوده و تنها به معرفی و مقایسه‌ی روش‌هایی پرداخته شده است که بیشترین استفاده و تکرار را در بین پژوهش‌های انجام‌شده داشته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

ارائه راهکار مناسب درمانی، از مهم‌ترین مسائل موردتوجه در رابطه با حفاظت از آثار، سازه‌ها و یادمان‌های با مصالح متخلخل است؛ اما آنچه در پس تمامی اقدامات نهان است، ارزیابی، سنجش و پایش اقدامات انجام‌گرفته است از این‌رو شناخت انواع روش‌های سنجشی و سازوکارهای آن که هرکدام با نتایج متفاوتی ظهور می‌یابند، گام مهمی در جهت درمان آثار محسوب می‌گردد. در طی چند دهه گذشته روش‌های متعددی برای سنجش میزان نفوذ ماده معرفی و به کار گرفته شده است که مبنای تقسیم‌بندی آن‌ها نوع ابزار یا مواد مورد استفاده و یا نوع نتیجه‌ی نهایی حاصله از آن است. تعدد و تنوع روش‌های معمول در ارزیابی سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در آثار سنگی، برای حفاظت گران، چالش بزرگی را ایجاد کرده است که در پی آن، ضرورت معرفی و مقایسه هر یک از روش‌های موجود مشخص می‌شود. علاوه بر آن متخصصان همواره به دنبال راهی برای حصول بهترین و کارآمدترین نتیجه هستند. مهم‌ترین معیار در انتخاب یک روش برای سنجش میزان نفوذپذیری، غیرمخرب بودن

۵- مراجع

1. Xarrié i Poveda M. El llenguatge de la conservació-restauració d'obres d'art. 2015.
2. ASTM, E2167-01, 2008 Ginell, ASTM International, Wessel WSD, Searles C. Standard Guide for Selection and Use of Stone Consolidants. West Conshohocken, PA, 2008.
3. Amoroso J, Fasina J, stone wear and protection, atmospheric pollution, cleaning, strengthening and protection. 1983, Translator: Rasul vatan-Dost, Tehran: Cultural Heritage (In Persian)
4. Slavíková M, Krejčí F, Žemlička J, Pech M, Kotlík P, Jakůbek J. X-ray radiography and tomography for monitoring the penetration depth of consolidants in Opuka—the building stone of Prague monuments. J Cult Herit. 2012;13(4):357-64. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.01.010>
5. Bayer K. Možnosti hodnocení efektivity konsolidace porézních anorganických materiálů. Padesát let používání organokřemičitanů na území České republiky, Proceedings of ICOMOS. 2008:35-42.
6. Pinto AF, Rodrigues JD. Stone consolidation: The role of treatment procedures. J Cult Herit. 2008;9(1):38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>.
7. Sneathlge R, Wendler E. Chemical conservation of stone structures. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry electronic release 2001.
8. Brizi L, Camaiti M, Bortolotti V, Fantazzini P, Blümich B, Haber-Pohlmeier S. One and two-dimensional NMR to evaluate the performance of consolidants in porous media with a wide range of pore sizes: Applications to cultural heritage. Microporous and Mesoporous Materials. 2018 1:269:186-90. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.08.014>

9. Striegel MF, Guin EB, Hallett K, Sandoval D, Swingle R, Knox K, Best F, Fornea S. Air pollution, coatings, and cultural resources. Progress in organic coatings. 2003 1;48(2-4):281-8. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.05.001>
10. Cai H, Liu X. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores. Cement and concrete research. 1998;28(9):1281-7. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00103-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00103-3)
11. Hutchinson AJ, Johnson JB, Thompson GE, Wood GC, Sage PW, Cooke MJ. Stone degradation due to wet deposition of pollutants. Corros Sci. 1993;34(11):1881-98. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90025-C](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90025-C)
12. Sanjurjo-Sánchez J, Alves C. Decay effects of pollutants on stony materials in the built environment. Environ Chem Lett. 2012; 10:131-43. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0346-y>
13. Vallet JM, Gosselin C, Bromblet P, Rolland O, Vergès-Belmin V, Kloppmann W. Origin of salts in stone monument degradation using sulphur and oxygen isotopes: First results of the Bourges cathedral (France). J Geochem Explor. 2006; 88(1-3):358-62. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.075>
14. Scherer GW, Wheeler GS. Silicate consolidants for stone. In Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2009.
15. Doehene E, Price CA. Stone Conservation – An overview of current research. Second edition. Getty Publications; the Getty Conservation Institute: Los Angeles (CA), 2010.
16. Pinto AF, Rodrigues JD. Stone consolidation: The role of treatment procedures. J Cult Herit. 2008;9(1):38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>
17. Jokilehto J. History of architectural conservation. Routledge; 2007.
18. Rodrigues JD. Basic steps in conservation interventions Multidisciplinary and interdisciplinary requirements, Charisma international course in stone conservation Lisbon, May 7th- 18th, 2012.
19. Kamke FA, Lee JN. Adhesive penetration in wood—a review. Wood and Fiber Science. 2007 27:205-20.
20. Christensen M, Kutzke H, Hansen FK. New materials used for the consolidation of archaeological wood—past attempts, present struggles, and future requirements. J Cult Herit. 2012;13(3):S183-90. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.013>
21. Abdullahi M, Asgharizadeh S, Razani M. A review of the use of synchrotron radiation in archaeological sciences. Archaeological research. 6 (1). 2019. 155-174. <https://doi.org/10.29252/jra.6.1.155> (In Persian).
22. Ceryan S, Tudes S, Ceryan N. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. Environ Geol. 2008; 55:1319-36. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1080-4>
23. Topal T, Sözmen B. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. Engineering Geology. 2003;68(3-4):201-23. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00228-4)
24. Razani M, Baghbanan A, Emami SMA. A review of the methods of determining the rate and estimation of weathering depth in volcanic tuffs, the 11th conference on the restoration of historical and cultural monuments and decorations related to architecture, March 2013. Historical and Cultural Monuments Restoration Research Institute Cultural Heritage Research Institute and Tabriz University of Islamic Art (In Persian)
25. López-Doncel R, Wedekind W, Dohrmann R, Siegesmund S. Historical building stones of Guanajuato, Mexico: weathering, properties and restoration. In 12th International Conference on the deterioration and conservation of Stones, Extend abstracts book 2012.
26. Feyz niya. S, Dastourani J, Ahmadi H, Ghoddousi J. Investigating sensitivity to erosion and sediment yield of formations in Gorgan Drainage basin Journal of the Iranian Natural Res., Vol. 61, No. 1, 2008, pp. 13-27 (In Persian)
27. Memariyan H. Geology and geotechnical engineering. Tehran University: Tehran. 2013 (In Persian)
28. Hunt RE. Geotechnical engineering investigation handbook. Crc Press; 2005 Apr 12.
29. Grassegger G. Decay mechanisms of natural building stones on monuments-A review of the latest theories. Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Hamburgo, Libri BOD. 1999:54-81.
30. Sedaghat MH. Physical geology (first volume: external processes). Tehran: Payam Noor University (in Persian).
31. Razani M, Nemani khiyavi L. A Review of Consolidation of Stone with Nanotechnology. JI Stud Color World, 2022; 10(3), 55-64. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1399.10.3.5.0> (In Persian).
32. Cnudde V, Dierick M, Vlassenbroeck J, Masschaele B, Lehmann E, Jacobs P, Van Hoorebeke L. Determination of the impregnation depth of siloxanes and ethylsilicates in porous material by neutron radiography. J Cult Herit. 2007 1;8(4):331-8. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.08.001>
33. Tamer T. The use of methylene blue adsorption test to assess the clay content of the Cappadocian tuff. In 8th= eighth international congress on deterioration and conservation of stone, Berlin, 30 Sept.-4 Oct. 1996: proceedings 1996 (pp. 791-799).
34. Kumar R, Ginell WS. A new technique for determining the depth of penetration of consolidants into limestone using iodine vapor. Journal of the American Institute for Conservation. 1997 Jan 1;36(2):143-50. <https://doi.org/10.1179/019713697806373181>
35. Becerra J, Ortiz P, Martín JM, Zaderenko AP. Nanolimes doped with quantum dots for stone consolidation assessment. Construction and Building Materials. 2019 28;199:581-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.077>
36. Borsoi G, Lubelli B, van Hees R, Silva AS. Optimization of nanolime solvent for the consolidation of coarse porous limestone. Appl. Phys. A. 2016;122:1-0. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0382-3>.
37. Bakhshi B, Mohammadi M, Al-hosseini H. Investigation of different improvers on the properties of weak stones. Marine engineering scientific-research journal. 2018 10;13(26):35-45 (In Persian)
38. Possenti E, Conti C, Gatta GD, Merlini M, Realini M, Colombo C. Synchrotron radiation μ X-ray diffraction in transmission geometry for investigating the penetration depth of conservation treatments on cultural heritage stone materials. Anal Methods. 2020;12(12):1587-94. <https://doi.org/10.1039/D0AY00010H>
39. Conti C, Colombo C, Festa G, Hovind J, Cippo EP, Possenti E, Realini M. Investigation of ammonium oxalate diffusion in carbonatic substrates by neutron tomography. J Cult Herit. 2016;19:463-6. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.005>
40. Raneri S, Barone G, Mazzoleni P, Rabot E. Visualization and quantification of weathering effects on capillary water uptake of natural building stones by using neutron imaging. Appl. Phys. A. 2016;122:1-9. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0495-8>
41. Lotzmann S, Sasse HR. Drilling resistance as an indicator for effectiveness of stone consolidation. Astm Special Technical Publication. 1999; 1355:77-89.
42. Leroux L, Vergès-Belmin V, Costa D, Delgado Rodrigues J, Tiano P, Sneathlage R, et al. Measuring the penetration depth of consolidating products: comparison of six methods. In Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 2000 Jun 19 (pp. 19-24).
43. Rodrigues JD, Costa D. A new interpretation methodology for microdrilling data from soft mortars. J Cult Herit. 2016;22:951-5. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.06.010>
44. Pamplona M, Kocher M, Sneathlage R, Aires Barros L. Drilling resistance: overview and outlook. Zeitschrift-Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. 2007; 158(3):665. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2007/0158-0665>
45. Al-Naddaf M, Wakid F, Abu Alhassan Y. Micro-Drilling Resistance Measurement: A new technique to Estimate the porosity of A building Stone. Mediterranean Archaeology & Archaeometry. 2013;13(1).
46. Pinto AP, Rodrigues JD, Bracci S, Sacchi B. The action of APTES as coupling agent of ethylsilicate for limestone and marble consolidation. Proceedings of the International Symposium Stone consolidation in cultural heritage, research and practice, Lisbon. 2008:71-9.
47. Kouli M, Zezza F, Kouli D, editors. 10th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin: Natural and Anthropogenic Hazards and Sustainable Preservation. Springer; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78093-1>
48. Cnudde V, De Kock T, Boone M, De Boever W, Bultreys T, Van Stappen J, Vandevoorde D, Dewanckele J, Derluyn H, Cárdenes V, Van Hoorebeke L. Conservation studies of cultural heritage: X-ray imaging of dynamic processes in building materials. European Journal of Mineralogy. 2015;27(3):269-78. <https://doi.org/10.1127/ejm/2015/0027-2444>.
49. Gomez M, Cardu M, Mancini R. Nondestructive testing for soundness

- of stone architectural pieces. In Science, Technology and European Cultural Heritage 1991 Jan 1 (pp. 583-586). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-0237-2.50095-2>
50. Fioretti G, Andriani GF. Ultrasonic wave velocity measurements for detecting decay in carbonate rocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2018;51(2):179-86.
51. Gil MA, Luna M, Zarzuela R, García-Moreno MV. Quantitative determination of the penetration of a silica-based consolidant in a limestone by FTIR spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*. 2020;110:103109. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103109>
52. Vasanelli E, Calia A, Luprano V, Micelli F. Ultrasonic pulse velocity test for non-destructive investigations of historical masonries: an experimental study of the effect of frequency and applied load on the response of a limestone. *Materials and Structures*. 2017 Feb;50:1-1. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0892-7>
53. Ropret P, Legan L, Retko K, Špec T, Pondelak A, Škrlep L, Škapin AS. Evaluation of vibrational spectroscopic techniques for consolidants' penetration depth determination. *Journal of Cultural Heritage*. 2017; 23:148-56. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.07.004>
54. Braun F, Orlowsky J. Non-destructive detection of the efficiency of long-term weathered hydrophobic natural stones using single-sided NMR. *J Cult Herit*. 2020;41:51-60. <https://doi.org/10.1080/00393630.2021.2001263>
55. Keine S, Holthausen RS, Raupach M. Single-sided NMR as a non-destructive method for quality evaluation of hydrophobic treatments on natural stones. *J Cult Herit*. 2019;36:128-34. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.012>
56. Di Tullio V, Cocca M, Avolio R, Gentile G, Proietti N, Ragni P, Errico ME, Capitani D, Avella M. Unilateral NMR investigation of multifunctional treatments on stones based on colloidal inorganic and organic nanoparticles. *Magnetic Resonance in Chemistry*. 2015;53(1):64-77. <https://doi.org/10.1002/mrc.4136>
57. Ahmad A, Pamplona M, Simon S. Ultrasonic testing for the investigation and characterization of stone—a non-destructive and transportable tool. *Studies in Conservation*. 2009;54(sup1):43-53. <https://doi.org/10.1179/sic2009.54.Supplement-1.43>
58. Drms – drilling resistance measurement system [Internet]: sint technology S.R.L [cited 2021 Aug 20]. Available from: https://sint-technology.com/wp-content/uploads/2016/08/MG_4674-1500x1000.jpg

How to cite this article:

Razani M, Nemani Khiavi, Evaluation of Methods for Estimating the Penetration Depth of Consolidant Material in Porous Materials of Historical Monuments. *J Stud color world*. 2023;13(4): 343-358. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0> [In Persian].

Review on Organometallic Dyes for Light-Emitting Diodes

Mozhgan Hosseinezhad^{*1}, Sohrab Nasiri²

1- Department of Organic Colorants; Institute for Color Science and Technology, P. O. Box. 16765-654, Tehran, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Kaunas University of Technology, P.O. Box: 51373, Kaunas, Lithuania.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19- 07- 2023

Accepted: 26- 09- 2023

Available online: 31-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.5.3

Keywords:

Organic light-emitting diodes

Organometallic emitter

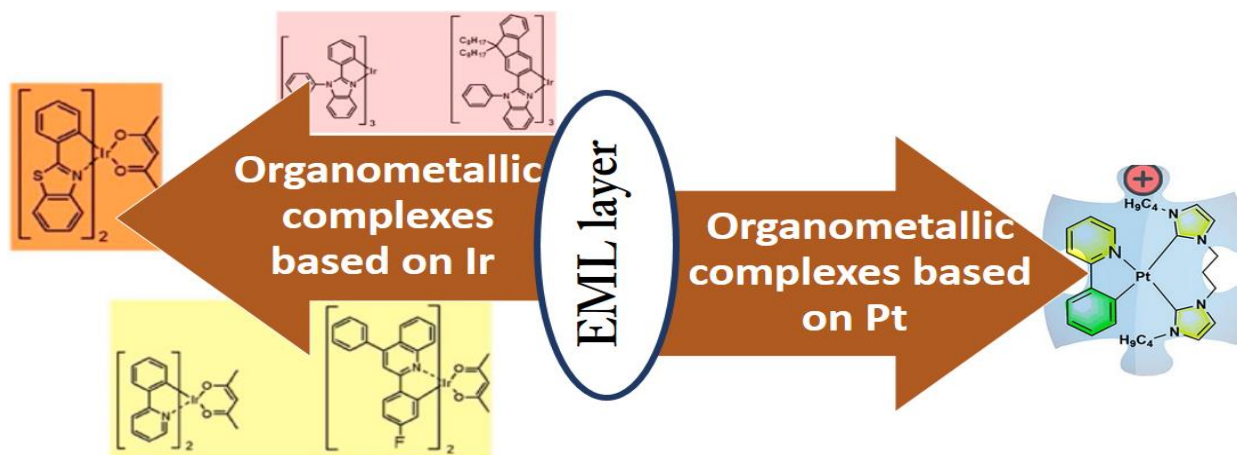
Iridium

Platinum

Display

ABSTRACT

In new technology fields, organic light emitting diodes (OLED) and the optimization of its components are of great interest. Organometallic complexes contain heavy metals, leading to the mixing of single and triple manifolds and increasing emission efficiency. For OLEDs to be useful in display applications, true red, green, and blue emissions of sufficient luminous efficiencies and proper chromaticity are required. The transition metals used to prepare emitting organometallic complexes are iridium, platinum, osmium and zinc (II). The development of these compounds depends on substitutions and organic structural units that are used as ligands. The results show that platinum and iridium have the best performance in preparing luminous organometallic complexes. In this article, a review of the recent progress in the development of organometallic compounds used in organic light-emitting diodes is highlighted. The preparation of optimal structure to achieve color purity and the development of the application of organometallic compounds will also be investigated.



Corresponding author: hosseinezhad-mo@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



مروری بر مواد رنگزای آلی- معدنی برای کاربرد در دیودهای آلی نورتاب

مژگان حسین نژاد^{۱*}، سهراب نصیری^۲

۱- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۲- محقق ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کایوناس، لیتوانی، صندوق پستی ۵۱۳۷۳.

چکیده

در حوزه های جدید فناوری، دیودهای نورتاب آلی و بهینه سازی اجزای آن بسیار مورد توجه می باشد. کمپلکس های آلی- معدنی دارای فلزات سنگین بوده که منجر به اختلاط منیفلوهای یگانه و سه گانه شده و بازده انتشار را افزایش می دهد. برای اینکه دیودهای نورتاب آلی در کاربردهای نمایشگر مفید باشند، انتشار واقعی قرمز، سبز و آبی با بازده نور کافی و رنگی مناسب مورد نیاز است. فلزات واسطه که برای تهیه کمپلکس های آلی- معدنی نشرکننده مورد استفاده قرار می گیرد عبارتند از: ایریدیم، پلاتین، اسمیم و روی (II). توسعه این ترکیبات وابسته به استخلافها و واحدهای ساختاری آلی بوده که به عنوان لیگاند، مورد استفاده قرار می گیرند. تحقیقات نشان می دهد که پلاتین و ایریدیم بهترین عملکرد را در تهیه کمپلکس های آلی- معدنی نورتاب دارند. در این مقاله، مروری بر پیشرفت های اخیر در توسعه ترکیبات آلی- معدنی مورد استفاده در دیودهای نورتاب آلی انجام می شود. نحوه تهیه ساختار بهینه برای دستیابی به خلوص رنگ و توسعه کاربرد ترکیبات آلی- معدنی نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.5.3

واژه های کلیدی:

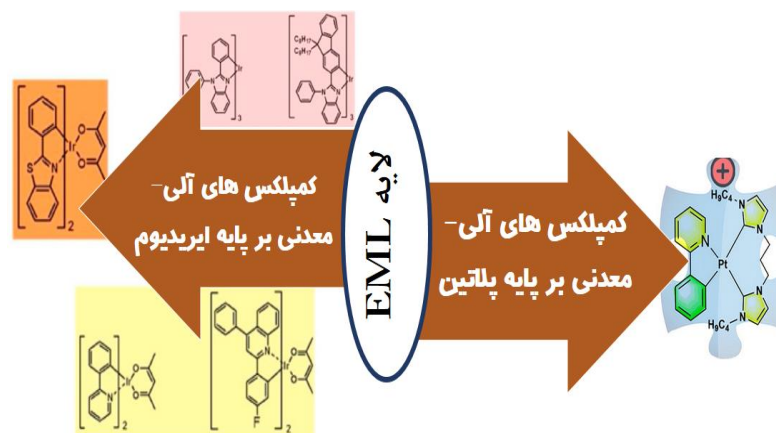
دیودهای نورتاب آلی

تابنده های آلی- معدنی

ایریدیم

پلاتین

نمایشگر



۱- مقدمه

برای مولکول‌های ناخالص قرمز یک مشکل اجتناب‌ناپذیر در چنین سیستم‌های میزبان-میهمان به ویژه در غلظت‌های بالای دوپینگ است. بنابراین، از دیدگاه عملی، راه حل مسائل بالا بر اساس طراحی مواد یا/و بهینه‌سازی دستگاه قابل حصول است (۵، ۴).

در این مقاله، هدف معرفی مواد رنگزای آلی-فلزی مورد استفاده در ابزارهای آلی نورتاب است. برای این منظور انواع راهبردهای طراحی مولکولی مورد بررسی قرار گرفته و رابطه ساختاری، خواص فوتوفیزیک و الکترولومینسانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان چالش‌ها و مزایای این نوع ترکیبات ارائه می‌گردد.

۲- چیدمان و معماری دیودهای نورتاب آلی

دیودهای نورتاب آلی، افزاره‌های فیلم نازک آلی بوده که با استفاده از فرایند الکترولومینسانس عمل می‌کنند. در این دستگاه‌ها، الکترون‌ها از یک کاتد تزریق شده و به یک لایه شفاف از یک نیمه‌هادی مانند اکسید ایندیم-قلع، تزریق می‌گردد. تحت میدان الکتریکی اعمال شده، حامل‌ها در لایه نورتاب دستگاه به یکدیگر نزدیک می‌شوند. اگر هر دو بار به یک مولکول منفرد یا، به طور کلی، به یک جفت مولکول با فاصله نزدیک وارد شوند، ممکن است حالت‌های برانگیخته تک مولکولی یا دو مولکولی تشکیل شود. فروپاشی تابشی آنها نور الکترولومینسانس (EL) را تولید می‌کند (شکل ۱). در این افزاره شکل ۱، ETL لایه آلی انتقال‌دهنده الکترون، EML لایه نورتاب، HTL لایه آلی انتقال حفره و ITO لایه اکسید قلع ایندیوم معدنی که به عنوان آند رسانا و شفاف در برابر تابش‌های فرابنفش، مرئی و نزدیک قرمز است. نور EL داخل حفره ضعیفی که توسط الکتروود فلزی بالایی با بازتاب بسیار بالا و یک رابط ITO/شیشه با بازتاب کمتر تشکیل شده است، ایجاد می‌شود. نور EL را می‌توان به حالت‌های تابشی خارجی، یا به حالت‌های جانبی موج‌بر که در سطح لایه‌های تشکیل دهنده ساختار دستگاه منتشر می‌شود، منتقل کرد. علاوه بر این، کسری از تابش EL از طریق انتقال دوقطبی-فلز غیرتابشی و تحریک پلاسمون‌های سطحی به کاتد فلزی از دست می‌رود. کسر دیگری که در کاتد منعکس می‌شود، می‌تواند به حالت‌های تابشی خارجی یا جانبی کمک کند (۶). مهم‌ترین ویژگی یک دیود نورتاب آلی بازده تبدیل انرژی (η) و بازده کوانتومی تابش الکترولومینسانس (ELφ) است که با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\phi_R}{U_i} \quad (1)$$

$$\phi_{EL} = \frac{e\phi_{EL}}{j} = \frac{eU}{h\nu} \eta (\text{photon/carrier}) \quad (2)$$

در اینجا، φR شار انرژی نور تابشی بر حسب وات، Ui توان الکتریکی، e بار الکترون، φEL شار کوانتومی الکترولومینسانس در واحد سطح، j فوتوجریان و U ولتاژ اعمالی است.

از زمان اولین تجاری‌سازی دیودهای نورتاب آلی^۱ (OLED) در سال ۱۹۹۷ توسط شرکت‌های پیشگام در ژاپن، تهیه نمایشگرهای صفحه تخت در دستور کار قرار گرفت. دیودهای آلی نورتاب، به دلیل بازده بالا، ولتاژ پایین، رنگ کامل^۲ و سهولت تهیه، یک گزینه بسیار مناسب برای جایگزینی نمایشگرهای بلور مایع و صفحات نمایش پلاسما هستند (۱). افزاره‌های OLED بر پایه کمپلکس‌های آلی-معدنی دارای فلزات واسطه بسیار مورد توجه می‌باشند، زیرا ویژگی‌های الکترولومینسانس^۳ (EL) آن‌ها در مقایسه با افزاره‌های مبتنی بر ترکیبات آلی بسیار بالاتر است. مطالعات نشان می‌دهد که مقدار EL فلوروفورهای کوچک مولکول، دارای بیشینه بازده کوانتومی ۲۵٪ است اما این مقدار برای ترکیبات آلی-معدنی تا ۱۰۰٪ قابل حصول است. این دستاورد به دلیل امکان استفاده از اکسایتون‌های^۴ سه‌گانه و یگانه برای مشارکت در نشر است. فلزات واسطه که برای تهیه کمپلکس‌های آلی-معدنی نشرکننده مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: ایریدیم (II)، پلاتین (II) و (III)، اسمیم و روی (II). توسعه این ترکیبات وابسته به استخلاف‌ها و واحدهای ساختاری آلی بوده که به عنوان لیگاند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲). در این میان، کمپلکس‌های آلی-معدنی ایریدیم سیکلومتاله شده (II) به دلیل خواص انتشار بسیار کارآمد، طول عمر نسبتاً کوتاه حالت برانگیخته و قابلیت تنظیم رنگ عالی در کل طیف مرئی، جایگاه اصلی را در زمینه نمایشگرهای آلی به دست آورده‌اند. به‌ویژه، اخیراً تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای برای دستیابی به افزاره‌های نورتاب با بازده بالا و رنگ سفید فسفری انجام شده است. زیرا آن‌ها برای تهیه نورتاب‌های تماماً جامد قابل استفاده هستند. انتشار سفید را می‌توان با مخلوط کردن سه رنگ اصلی (قرمز، سبز و آبی) یا دو رنگ از یک نشر نارنجی همراه با یک نشر آبی به دست آورد (۳). برای تهیه OLED های سفید با بازده بالا، تقاضای زیادی برای فسفرهای قرمز رنگ کارآمد و روشن وجود دارد. به دلیل قانون شکاف انرژی، تهیه نورتاب‌های قرمز نسبت به سایر رنگ‌ها دشوارتر می‌باشد. بسیاری از نورتاب‌های قرمز دارای بازده پایین و یا رنگ ناخالص هستند. نشر قرمز در ناحیه طیفی قرار دارد که حساسیت چشم در آن پایین بوده و به همین دلیل درخشندگی کمتری از این افزاره‌ها درک می‌شود. از طرف دیگر، تفاوت قابل توجهی در سطوح HOMO و LUMO سیستم‌های میزبان-میهمان^۵ در افزاره‌های نشرکننده قرمز وجود دارد. بنابراین، مولکول‌های میهمان به عنوان تله‌های عمیق برای الکترون‌ها و حفره‌های لایه گسیل‌کننده عمل می‌کنند و باعث افزایش ولتاژ محرک دستگاه می‌شوند. علاوه بر این، خود خاموش شدن یا نابودی سه‌گانه

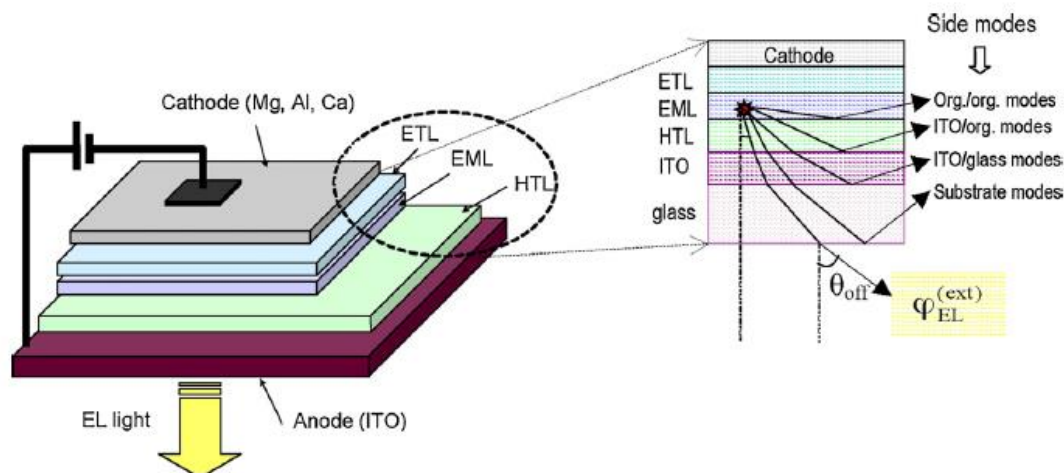
¹ Organic light-emitting diodes (OLEDs)

² Full Color

³ Electroluminescence (EL)

⁴ Excitons

⁵ Host-guest systems



شکل ۱: اجزای اصلی یک دیود نورتاب آلی سه‌لایه (۶).

Figure 1: Fundamental architecture of a three-layer OLED (6).

است. در یک ساختار ایده‌آل، تمام سطوح انرژی HOMO و LUMO مولکول‌ها در یک سطح بوده و حرکت بار فقط وابسته به ساختار مولکولی و فاصله بین مولکولی است. پدیده "انتقال متقاطع"^۲ الکترون-حفره تابشی بین مولکول‌های هم‌جوار در رقابت با پدیده بازترکیب بار روی یک مولکول بسیار بی‌اثر است. بنابراین، تابش از اکسایون‌های مولکولی (الکتروفلورسانس یا الکتروفوسفرسانس) و احتمالاً از اکسایمرهای یگانه و سه‌گانه حاصل می‌شود. در ساختارهای نامنظم دارای نقص شبکه، زمان پخش بسیار طولانی‌تر می‌شود زیرا یک مانع اضافی (E) برای پخش شارژ می‌تواند به دلیل نقص‌های موضعی ظاهر شود. سپس "انتقال متقاطع" تشعشی ممکن است در محدوده طول موج بلند انتشار ایجاد شود که چنین جفت‌های الکترون-حفره‌های گسیلی «آماده‌شده»^۳ الکترومر نامیده می‌شوند. آنها را می‌توان در مولکول‌های ساده مانند آنتراسن و مولکول‌های پیچیده‌تر مشاهده کرد. نمونه‌هایی از انتشار الکترومر با تفکیک خوب در شکل ۲ نشان داده شده است. در ترکیبات دو جزئی متشکل از یک واحد الکترون دهنده و یک بخش الکترون گیرنده، تشکیل حالت‌های برانگیخته با انتقال الکترون از واحد الکترون دهنده به بخش الکترون گیرنده بسیار تسهیل می‌شود. در سیستم‌های تک جزئی، آن‌ها اکسی‌پلکس^۴ و الکتروپلکس^۵ نامیده می‌شوند. اکسی‌پلکس یک اجتماع برانگیخته یگانه و یا سه‌گانه از یک مولکول می‌باشد (۸، ۶).

در تابش‌های هم سطح، تنها بخشی از نور ساطع شده در دسترس است، زیرا مقدار زیادی از آن در مدهای زیرآیند شیشه تلف می‌شود. این به دلیل اختلاف در ضریب شکست شیشه، لایه‌های آلی و ITO است. این تلفات باعث می‌شود که بازده کوانتومی تابش الکترومینیسانس اندازه‌گیری شده از مقدار محاسباتی کمتر باشد (شکل ۱). اثرات ایجاد شده در فصل مشترک لایه‌ها به دلیل بازتاب، براساس ثابت‌های نورتابی از اجزای دیود نورتاب آلی در نظر گرفته می‌شوند. می‌توان انتظار داشت که بازده کوانتومی تابش الکترومینیسانس افزاره OLED، با افزایش ضریب شکست مواد آلی، کاهش یابد (۷).

حالت‌های برانگیخته مولکول‌ها در وضعیت لایه‌نشانی شده، منتج از خواص مولکول‌ها منفرد است. با این وجود، برهم‌کنش‌های مولکولی در حالت‌های متراکم سبب ایجاد یک پاسخ و اثر جمعی می‌گردد. اگر به دلایلی، مثلاً تبادل انرژی یا بار، یک مولکول با مولکول مجاور درگیر شود تا حالت برانگیخته ایجاد کند، یک حالت برانگیخته دو مولکولی ایجاد می‌شود. در نتیجه، ویژگی‌های جدیدی در طیف انتشار رخ می‌دهد یا واپاشی غیرتشعشی به اکسیتون‌ها تحمیل می‌شود و بازده نورتابی سیستم کاهش می‌یابد. حالت‌های برانگیختگی مختلفی، توسط بازترکیب الکترون-حفره در مواد آلی ایجاد می‌شوند. الکترون‌های آزاد و حفره‌های وارد شده در الکترودهای مناسب به یکدیگر نزدیک می‌شوند و می‌توانند حالت‌های اکسایمر^۱ یا گسیل مولکولی را تشکیل دهند. آنها باید یک مرحله میانی از جفت‌های الکترون-حفره همبسته کولمبیک ($e...h$) را بگذرانند. براساس آمار چرخش‌ها، احتمال تشکیل جفت‌های سه‌گانه سه‌برابر حالت یگانه است. نکته مهم دیگر کیفیت ساختار مواد نورتاب

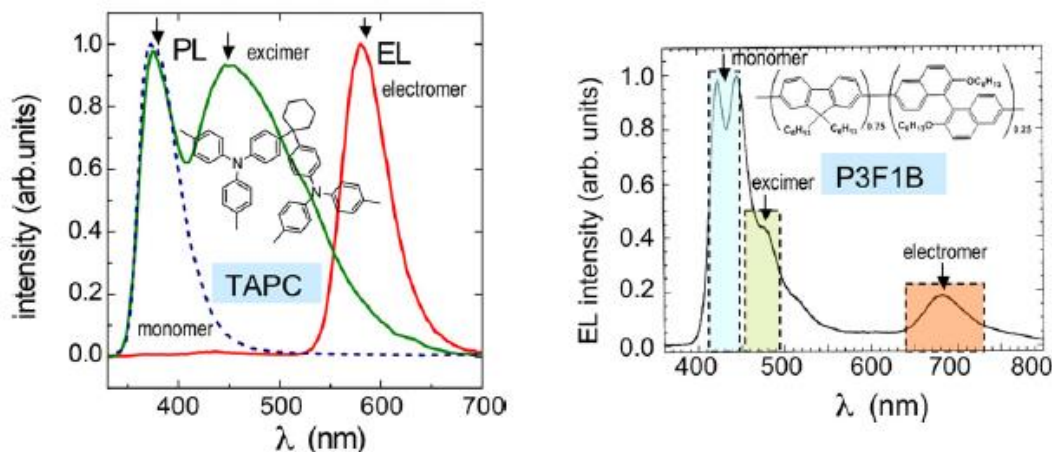
² Cross transition

³ Prepared

⁴ Exciplex

⁵ Electroplex

¹ Excimer



شکل ۲: طیف نشری دو مولکول الکترونورتاب (۶).

Figure 2: Emission spectra of two electroluminescence molecule (6).

گرفته شوند، بنابراین مخفف دیگر، FLOREDS، شاید مناسب‌تر باشد. دیودهایی که گسیل از حالت‌های مولکولی سه‌گانه برانگیخته را آشکار می‌کنند، دیودهای نورتاب آلی فسفری (PHOLED)^۲، نامیده می‌شوند. نمونه‌های زیادی از این افزاره‌ها برپایه مواد مختلف فسفری تهیه شده است. بسیاری از کمپلکس‌های آلی-معدنی تهیه شده با اتم‌های فلزی سنگین مستعد تولید کاربرد در این نوع دیودها هستند. یکی از قدیمی‌ترین نمونه‌ها پلاتین-پورفورین می‌باشد. واضح است که تمام کمپلکس‌های آلی-معدنی ایریدیم و پلاتین در این دسته از OLEDها و از نوع انتشار از حالت‌های سه‌گانه تک مولکولی قرار می‌گیرند. ویژگی متمایز OLEDها این است که قادر به تولید رنگ‌های مختلف براساس نشر ترکیبات آلی مختلف هستند. البته بیشتر تحقیقات بر انتشار نور در محدوده مرئی متمرکز شده است. با این حال، کاربردهای ویژه دیودهای نورتاب آلی، مثلاً در پزشکی زیستی و یا ارتباطات نوری، سبب شده که افزاره‌های نورتاب در ناحیه فروسرخ نیز مورد توجه باشند. تهیه این افزاره و تولید مواد نورتاب در ناحیه فروسرخ نزدیک، چالش مهمی برای دانشمندان و مهندسان است. روش‌های مختلفی برای ایجاد نشر فروسرخ در دیودهای نورتاب آلی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از کمپلکس‌های حاکی کمیاب و پلیمرهای کوچک با شکاف نوری مورد توجه قرار گرفته است، زیرا یون‌های لانتانید دارای نشر در محدوده فروسرخ بوده که نشر پلیمرها را تا طول موج ۱۰۰۰۰ نانومتر، گسترش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های دیودهای نورتاب آلی در این محدود، بازده کوانتومی پایین و توان خروجی کم آن‌ها است. برای بهبود بازده، نانوبلورهای معدنی برپایه آرسنید ایندیم در پلیمرهای مزدوج، معرفی شده است که بازده را تا حدود ۰/۵ درصد افزایش می‌دهد. اخیراً

مکان و عرض نواحی نوترکیبی الکترون-حفره در ساختار مواد الکترومینیسانس، برای بهبود عملکرد OLED اهمیت بسیار زیادی دارد. پهنای ناحیه نوترکیب ممکن است به عنوان مسافت طی شده توسط حامل‌های بار در زمان نوترکیب تعریف شود. اینکه منطقه نوترکیب چگونه با میدان الکتریکی اعمال شده تغییر می‌کند یا نه، به سرعت حرکت حامل‌ها و ویژگی جریان عبوری از نمونه بستگی دارد. علاوه بر منطقه نوترکیبی، اصطلاح منطقه انتشار الکترومینیسانس هنگام مشخص کردن منبع نور استفاده می‌شود. نوترکیب و نواحی انتشار الکترومینیسانس، گاهی با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند، اما نگاهی دقیق‌تر به آنها نشان می‌دهد که به دلیل تحرک حالت‌های انتشاری برانگیخته، بازجذب و اثرات هدایت نور متفاوت هستند. بنابراین انتظار می‌رود که ناحیه نوترکیب بخشی از ناحیه انتشار باشد. البته گاهی اوقات، توزیع غیرهمگون اکسایتون و بار در این ارتباط موثر است (۶).

۳- طبقه‌بندی دیودهای نورتاب آلی

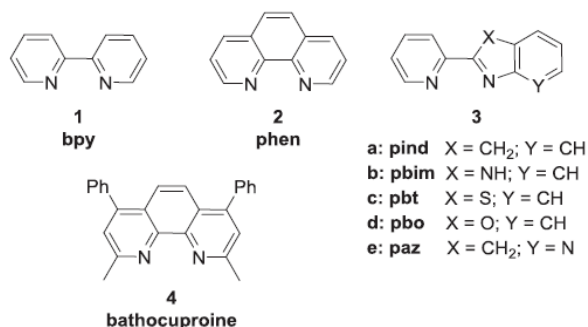
معیارهای مختلفی برای طبقه‌بندی OLEDها وجود دارد. آن‌ها عمدتاً بر اساس ماهیت حالت‌های منتشر کننده درگیر در انتشار نورتاب طبقه‌بندی می‌شوند، اما رنگ انتشار یا هدف و کاربرد نیز می‌تواند برای طبقه‌بندی OLEDها مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، OLEDهایی که از حالت‌های برانگیخته مولکولی منفرد ناشی می‌شوند را می‌توان دیودهای نورتاب آلی فلورسنت^۱ (FOLED) نامید که یک نمونه معمولی آن یک OLED مبتنی بر Alq3 به عنوان ماده نورتاب است. چنین OLEDهایی نباید با "FOLED" منسوب به OLEDهای ساخته شده بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر (F) اشتباه

² Phosphorescent OLEDs (PHOLEDs)

¹ Fluorescent OLEDs (FOLEDs)

در تهیه ترکیبات آلی-معدنی بوده که دارای کاربردهای مختلفی هستند. در تولید ترکیبات نورتاب، لیگندهای دی‌ایمین، مشتق شده از ۱،۱۰-فنانترولین (Phen)^۳، ۲،۲۰-بای‌پیریدین (bpy)^۴، ۲(۲۰-هتروآریل)پیریدین^۵ مانند ۲-پیریدیل ایندول^۶، ۲-پیریدیل بنزیمیدازول^۷ و مانند آن، بسیار مناسب هستند (شکل ۳) (۹).

لیگاند bpy هم یک σ -اهدانکننده و هم یک π -گیرنده است. مشتقات ۴،۴'، ۵،۵' و ۶،۶' استخلاف شده ترکیب bpy در تهیه ترکیبات آلی-معدنی و سوپرمولکول‌ها استفاده می‌شوند و دارای پایداری اکسایش و احیا قوی می‌باشند. آنها معمولاً با یون‌های فلزات نرم، به‌ویژه یون‌های فلزات واسطه، در حالت‌های اکسیدشدن کم، شبکه می‌شوند. ترکیبات برپایه پیریدین، به دلیل تحرک الکترونی بالا، برای کاربرد در لایه‌های انتقال دیودهای نورتاب آلی قابل استفاده هستند. مشتقات ۱،۱۰-فنانترولین هندسه صلب‌تری را در مقایسه با بدنه ۲،۲۰-بای‌پیریدین نشان می‌دهند. از طرف دیگر این ترکیبات به دلیل اوربیتال‌های ضدپیوندی پایین‌تر، دارای ویژگی‌های الکترون گیرندگی خوبی هستند. جایگزینی متقارن سیستم‌های آروماتیک بر توزیع سطوح الکترونیکی تأثیر می‌گذارد، بنابراین تنظیم خواص نورتاب لیگاند و کمپلکس فلزی نهایی امکان‌پذیر است. به طور خاص، جایگزینی متقارن با استخلاف‌های حلقوی یا با سایر گروه‌های عاملی در موقعیت‌های ۲،۹ و ۴،۷ رایج است. ترکیب BCP (شکل ۳، مشتق ۴)، یک ترکیب خاص بوده که دارای دو استخلاف متیل‌دار در موقعیت ۲ و ۹ و دو استخلاف فنیل‌دار در موقعیت ۴ و ۷ می‌باشد. این ترکیب به طور گسترده در دیودهای نورتاب و افزاره‌های فوتولتائیک آلی به عنوان بخش سدکننده حفره و در لایه‌های انتقال قابل استفاده است.



شکل ۳: ساختارهای کلی لیگندهای میتنی بر دی‌ایمین (۹).

Figure 3: General structures of chelating diimine-based ligands (9).

³ 1,10-phenanthroline (phen)

⁴ 2,2'-bipyridine (bpy)

⁵ 2(20-heteroaryl)pyridine

⁶ 2-pyridylindole

⁷ 2-pyridylbenzimidazole

کمپلکس‌های سه‌دندانه از پلاتین تهیه شده است که می‌تواند بازده کوانتومی در حدود ۱۰ درصد را نشان دهد. دیودهای نورتاب آلی سفید را می‌توان با استفاده از ترکیبات آلی فلورسانس و فسفرسانس تهیه کرد. دیودهای نورتاب آلی سفید فسفری، عمدتاً پرکاربردتر هستند. نوع خاصی از دیودهای نورتاب آلی تهیه شده با نشر در ناحیه مشخص که با طیف فرآیند فتوسنتز مطابقت دارد (لامپ‌های رشد). این افزاره‌ها برای کنترل و بهبود رشد گیاهان و ارائه بهترین نتیجه، بسیار مناسب هستند. در این زمینه، باید به دستگاه‌های جریان متناوب لایه نازک الکترومینیسانس^۱ (ACTFEL) اشاره کرد زیرا می‌توانند یک روش نورپردازی نوآورانه و صفحه‌های نمایش آموزنده را تحقق بخشند. دستگاه‌های ACTFEL اساساً فقط خازن‌هایی با یک لایه شبتاب پودری هستند که ویژگی مشترک الکترومینیسانس‌های پودری، ایجاد میدان‌های الکتریکی محلی بالا است که امکان تزریق بار را در سطح مشترک ذرات ماده رسانا و درخشان ایجاد می‌کند. اغلب این افزاره‌ها برپایه ترکیبات معدنی هستند. آخرین طبقه‌بندی، دیودهای نورتاب شفاف^۲ (TOLED) می‌باشند. فتالوسیانین مس پوشیده شده با فیلمی از اکسید قلع ایندیم، به عنوان یک کاتد شفاف بدون فلز برای یک OLED بر اساس تابش Alq3 گزارش شده است. اخیراً، دستگاه‌هایی که در سراسر طیف مرئی شفاف هستند، با استفاده از اکسید روی گالیم ایندیم به عنوان الکتروود بالایی تهیه شده‌اند. آنها می‌توانند تباین رنگی را تا حد زیادی بهبود بخشند و مشاهده نمایشگرها را در نور شدید خورشید بسیار آسان تر می‌کنند. از آنجایی که TOLEDها هنگام خاموش شدن ۷۰ درصد شفاف هستند، ممکن است در شیشه جلو اتومبیل، پنجره‌های ساختمان و عینک استفاده شوند (۶).

۴- مواد نورتاب آلی - معدنی

باتوجه به اینکه تعدد ترکیبات شیمیایی آلی برای تهیه مواد رنگزای آلی-معدنی وجود دارد، در این بخش به طبقه‌بندی اصلی لیگندها و ویژگی‌های شیمیایی لیگاند-فلز در تهیه کمپلکس‌های آلی-معدنی مورد استفاده در دیودهای نورتاب آلی پرداخته می‌شود. بسته به ساختار لیگاند و ماهیت هسته فلزی، مواد آلی-فلزی نورتاب را می‌توان تهیه کرد و در OLED استفاده کرد.

۴-۱- لیگاندها

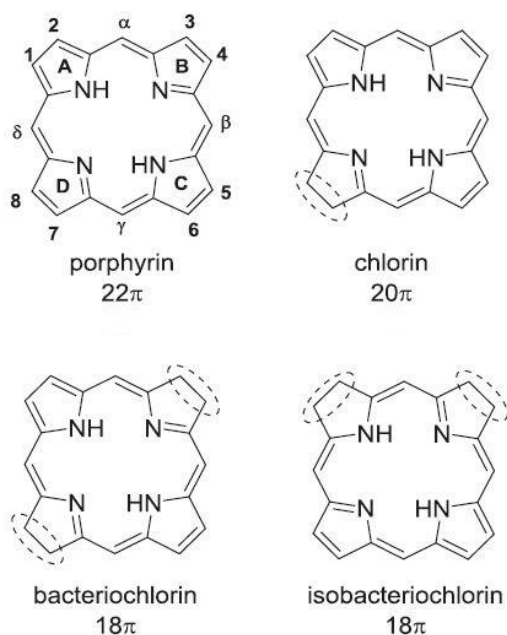
برای طراحی یک تهیه کمپلکس‌های آلی-معدنی مناسب، انتخاب لیگاند اهمیت زیادی دارد، زیرا این گروه‌ها در ایجاد نورتابی و همچنین ایجاد رنگ‌های خاص اثربخشی مهمی دارند. لیگندهای حلقوی دودندانه حاوی گروه C=N یکی از مهم‌ترین لیگندهای مورد استفاده

¹ Alternating-current thin-filmelectroluminescent (ACTFEL)

² Transparent OLEDs (TOLEDs)

منگنر (II) بوده که دارای ویژگی‌های نشری است. سازوکار ادغام فلز در این لیگاندها نسبتاً پیچیده است، چهار اتم نیتروژن با پیکربندی مربع-مسطح و بسیار محکم چیده شده‌اند. به دلیل حالت دی‌آنیونی پورفیرین‌ها، فلزات یک تا سه ظرفیتی قابل استفاده هستند. مشتقات تتراپیرول پورفیرین‌ها با عنوان پورفیرینوئیدها تهیه شده که در آنها ساختارهایی با اتم‌های غیرفلزی جایگزین یک یا چند اتم نیتروژن شده‌اند. سایر مشتقات مهم شامل کورول و تتراآزاپورفیرین است. روش استاندارد سنتز پورفیرین، جایگزینی آروماتیک الکترون دوستی در موقعیت پیرول با آلدئیدهای یا الکل‌ها و سپس اکسیداسیون می‌باشد. بسیاری از محصولات جانبی از جمله مشتقات N-confused و لیگومرها تشکیل می‌شوند که بازه مورد نظر را به شدت کاهش می‌دهند. بازه بیش از ۵۰ درصد در بین شیمیدانان پورفیرین، عالی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به سیستم بسیار مزدوج، پورفیرین‌ها نوارهای جذب قوی را نشان می‌دهند، یکی در ناحیه نزدیک UV ناشی از انتقال $S_0 \rightarrow S_1$ و چهار نوار جذبی در ناحیه مرئی به دلیل انتقال $S_0 \rightarrow S_1$ و باند Q که سبب گستردگی کاربرد این ترکیبات افزاره‌های نورتاب شده است (۹).

سایر لیگاندهای مورد استفاده در ترکیبات آلی-معدنی عبارتند از: فتالوسیانین‌ها، استخلاف‌های حلقوی دارای هترواتم نیتروژن، ۸-هیدورکسی کوئینولین‌ها، لیگاندهای نوع سالن، ساختارهای کربومتالیزه شده، کتن‌ها و β -دی‌کربونیل‌ها. این لیگاندها با انواع فلزات قابل ترکیب بوده که خواص نشری متنوعی و گاه شدیدی دارند.



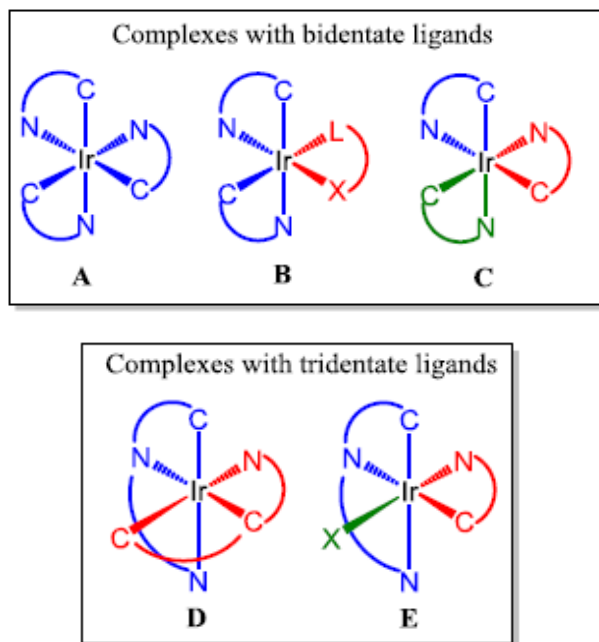
شکل ۴: ساختار مزدوج پورفیرین و مشتقات اشباع آن (۹).

Figure 4: Structure of the conjugated porphyrin and its saturation derivatives (9).

مشتقات فناترولین، با بسیاری از کاتیون‌های فلزی دارای اوربیتال d و f شبکه می‌شوند. اما فلزاتی با هندسه شبه چهاروجهی مانند مس (I) و نقره (I) اولویت دارند. ترکیبات حلقوی α -دی‌ایمین (مشتق ۳، شکل ۳) دارای یک حلقه پنج عضوی بوده که می‌تواند با یون‌های فلزی، شبکه شود اما موقعیت اتم نیتروژن آن نسبت به Phen و bpy کمتر مطلوب است. ترکیب ۷-آزایندول پروتون‌زدایی شده، معمولاً دو مرکز فلزی را با پل زدن ایجاد می‌کند و کمپلکس‌های دو هسته‌ای را تشکیل می‌دهد اما قابلیت چند هسته‌ای شدن نیز دارند. یک کمپلکس آلی-معدنی نورتاب با جایگزینی یک حلقه پیریدیل در موقعیت ۲ (ساختار paz در شکل ۳) همراه با یک فلز مرکزی به دست می‌آید (۹).

آلکین‌ها یکی دیگر از لیگاندهای مرسوم در تهیه ترکیبات آلی-معدنی بوده که اولین بار در سال ۱۹۵۳ معرفی شدند. اگرچه هردو کوئوردیناسیون $\eta^1-\pi$ و $\eta^1-\sigma$ قابل تشکیل است اما عمدتاً کمپلکس‌های σ خطی گزارش شده است. برای سنتز کمپلکس‌های آلی-معدنی با لیگاندهای آلکیل، روش‌های مختلفی وجود دارد. اما راهبرد ساده، استفاده از اسیدی‌شدن نسبتاً بالای آلکین‌های پایانی برای تشکیل مستقیم آلکیده‌های گروه ۱ و ۲، اتصال به نمک فلزی و سپس هالوژن‌زدایی می‌باشد. به دلیل حجم کمی که توسط لیگاند آلکینیل اشغال شده است، کمپلکس‌ها مستعد لیگومری شدن هستند. این برای کمپلکس‌های d8 و d10 مفید است، زیرا برهمکنش‌های ضعیف d-d را نشان می‌دهند. لیگاندهای فسفین دارای فرمول عمومی HR3 هستند که در آن R می‌تواند آلکیل، آریل، H، هالید و غیره باشد. آنها دارای دو گروه الکترون دهنده هستند که از طریق جفت‌های تنهای خود، پیوند برقرار می‌کنند، بنابراین بارکلی سیستم تغییری نمی‌کند. این کمپلکس‌ها از طریق افزودن یک پیش‌ساز فلزی با قابلیت محل‌های تشکیل کوئوردیناسیون به لیگاند نوع L تهیه می‌شوند. اهمیت فسفین‌ها در شیمی آلی-فلزی ناشی از توانایی تنظیم دقیق خواص الکترونیکی و فضایی با انتخاب استخلاف‌های مختلف است. کمپلکس‌های فسفین تمام فلزات واسطه شناخته شده است. فسفین‌ها را می‌توان به یکدیگر متصل کرد تا یک لیگاند کیلیت تشکیل دهند. اگر این کار برای دو فسفین درجه سوم انجام شود، طبقه مهم لیگاندهای دی‌فسفین ایجاد می‌شود. این اتصال می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که خواص فضایی و الکترونیکی مورد نظر را تنظیم کند که می‌تواند تأثیر فوق العاده‌ای بر رفتار ترکیب آلی-معدنی داشته باشد. لیگاندهای فسفین دوتایی در ترکیب با پل‌های آریل و آلکینیل و گروه‌های پنتافلوروفنیل منجر به تغییرات فام از بنفش به زرد می‌شود. پورفیرین، به عنوان یک لیگاند بسیار معروف، یک تتراپیرول 18π مزدوج با الکترون‌های 4π اضافی است (شکل ۴) که ساختارهای پیچیده مسطح و تتراگونال-هرمی دارد. کمپلکس‌های پورفیرین تمام فلزات غیررادیکال هستند که اغلب دارای پیکربندی مسطح هستند. توجه به این نکته ضروری است که کلروفیل یک کمپلکس پورفیرین -

باید پیوند فلز-لیگاند قوی ایجاد کند که بتواند حالت برانگیخته محور $d-d^*(MC)$ را بالا ببرد. (۲) اختلاط کافی حالت برانگیخته $\pi-\pi^*$ LC با حالت 3MLCT برای تسریع نرخ واپاشی تشعشعی و افزایش بازده کوانتومی با کاهش واپاشی غیر تابشی در دسترس باشد. (۳) تغییرات شیمیایی روی لیگاندها می‌توانند نه تنها سطوح انرژی کمپلکس‌ها، بلکه تزریق و/یا حمل‌ونقل حامل‌های بار آزاد را تنظیم کنند. بنابراین، رنگ انتشار و خواص الکترونیکی ترکیبات نورتاب را می‌توان تغییر داد. برای مثال، اضافه کردن استخلاف‌های الکترون‌دهنده یا گیرنده به سیستم مزدوج بر روی شکاف باند HOMO/LUMO تاثیر می‌گذارد. یا استفاده از استخلاف‌هایی حاوی عناصر B، N، O، P و S می‌تواند سبب بهینه‌سازی ویژگی‌های الکترونیکی نورتاب‌ها شود (۱۲). در ادامه مروری بر تحقیقات منتشر شده در خصوص کمپلکس‌های آلی-معدنی مورد استفاده در دیودهای نورتاب آلی ارائه می‌شود. ريو^۱ و همکارانش یک کمپلکس آلی-معدنی همولپتیک با استفاده از ۳-متیل-۵-فنیل-۱H-۲،۳-تری‌آزول به عنوان لیگاند و ایریدیم (II) به عنوان فلز مرکزی، برای کاربرد در دیودهای نورتاب آلی تهیه نمودند. کمپلکس تهیه شده یک باند نشری آبی قوی در محدوده ۴۵۰ نانومتر در هر دو محلول و حالت فیلم در دمای محیط نشان می‌دهد. این پیک دارای عرض بسیار باریک بوده و بازده کوانتومی آن در حدود ۳۳ درصد بود.



شکل ۵: انواع ساختارهای کمپلکس آلی-معدنی دارای ایریدیم (۱۲).
Figure 5: Types of organometallic complex structures with iridium (12).

اما کاربرد آنها به اندازه لیگاندهای قبلی گسترش نیافته است. بازده کوانتومی گزارش شده از ترکیبات آلی-معدنی دارای این نوع لیگاندها اغلب متوسط می‌باشد (۹).

۴-۲- فلزات واسطه

فلزات واسطه که برای تهیه کمپلکس‌های آلی-معدنی نشرکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از: ایریدیم، پلاتین، اسمیم و روی (II). بیشتر تحقیقات و بالاترین بازده‌های کوانتومی برای دو فلز ایریدیم و پلاتین گزارش شده که در ادامه به معرفی کمپلکس‌های مبتنی بر این دو فلز پرداخته می‌شود.

۵- مواد رنگزای آلی-معدنی حاوی ایریدیم

کمپلکس‌های آلی-معدنی دارای ایریدیم به عنوان فلز مرکزی، به دلیل ویژگی‌های فوتوفیزیکی قابل تنظیم، پایداری خوب و سهولت طراحی مولکولی، یکی از نویدبخش‌ترین ترکیبات برای کاربرد در ساختار دیودهای نورتاب آلی هستند (۱۱، ۱۰). تحقیقات زیادی با هدف توسعه کمپلکس‌های نورتاب جدید بر پایه ایریدیم با بازده کوانتومی بالا، قابلیت ساخت خوب و خواص الکترونیکی عالی انجام و یا در جریان است. کمپلکس‌های نورتاب بر پایه ایریدیم به دو طبقه کمپلکس‌های خنثی و کاتیونی تقسیم می‌شوند. از آنجائیکه بیشتر افزاره‌های نورتاب با استفاده از کمپلکس‌های خنثی تهیه می‌شوند، این مقاله بر روی این ترکیبات متمرکز شده است. به طور معمول، کمپلکس‌های نورتاب دارای ایریدیم یک هندسه هشت‌وجهی نامنظم با شش پیوند هماهنگی هستند. برای ایجاد تعادل الکتریکی مرکز کاتیونی سه ظرفیتی ایریدیم به عنوان یک ترکیب خنثی، انواع مختلفی از لیگاندها و ساختارهای آلی با پیکربندی A-E طراحی شده‌اند (شکل ۵). برای کمپلکس‌هایی با ساختارهای A-C، از سه لیگاند دوگانه تک‌ظرفیتی برای تشکیل کمپلکس همولپتیک (A)، یا لیگاندهای تک‌ظرفیتی یکسان برای کمپلکس‌های هتروپلتیک (B) و انواع مختلف لیگاندها برای کمپلکس (C) استفاده می‌شود. برای تهیه کمپلکس‌های با ساختارهای D و E از لیگاندهای سه‌گانه استفاده می‌شود. در مولکول D، دو لیگاند، یکی تک‌ظرفیتی و دیگری دو ظرفیتی، مورد نیاز است، در حالیکه لیگاندهای سه‌ظرفیتی و دو ظرفیتی و یک اتم تک‌ظرفیتی متعادل برای ساختن ساختار مولکول E مورد نیاز است. از آنجایی که خواص نورتابی کمپلکس‌های ایریدیم عمدتاً توسط حالت انتقال بار سه‌گانه فلز به لیگاند و یا حالت انتقال بار متمرکز لیگاند سه‌گانه تعیین می‌شود، سطوح انرژی و قدرت میدان لیگاند برای رنگ انتشار، عرض نوار، زمان فروپاشی و بازده کوانتومی و غیره ضروری هستند. برای یک طراحی موفق باید موارد مهمی در نظر گرفته شود که عبارتند از: (۱) لیگاند مورد نظر

¹ Ryu

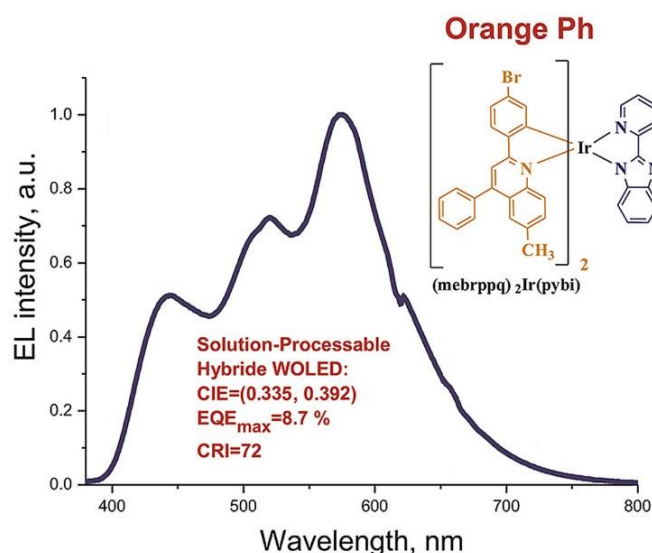
است. دیود تهیه شده با این کمپلکس، تابش الکترولومینسانس قرمز-نارنجی در ۶۲۴ نانومتر نشان دادند. اثر مواد میزبان در عملکرد دیود تهیه شده با این کمپلکس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب PVK در لایه تابشی، باعث افزایش ۲۰٪ در بازده جریان شده و روشنایی معادل 2 cdm^{-2} ۲۵۴۸ به دست می‌آید (۱۵). تییاگاراچان^۳ و همکارانش ائیر لیگاندهای بنزوئیمیدازوفنانتریدین را بر روی توسعه کمپلکس‌های آلی-معدنی روتنیوم مورد مطالعه قرار دادند. عملکرد این کمپلکس با نشر نارنجی در دیودهای نورتاب آلی مورد ارزیابی قرار گرفت. دیود نورتاب تهیه شده با دمای رنگ ۲۰۸۸ درجه کلون، بازده کوانتومی معادل ۱۷/۵ درصد را نشان داد. عملکرد خوب دیود تهیه شده ناشی از فسفرسانس نارنجی کارآمد کمپلکس با بازده کوانتومی ۶۰ درصد در دمای اتاق است (شکل ۶). در این پژوهش دیودهای نورتاب آلی قابل پردازش با محلول سفید ترکیبی با استفاده از غلظت فوق‌العاده کم کمپلکس ایریدیم جدید سنتز شده (III) به عنوان ناخالصی فسفرسانس در ترکیب با یک ترکیب تابنده فلورسنت آبی (میزبان) بررسی گردید. نتایج نشان داد که دیود نورتاب تهیه شده با دمای رنگ ۲۹۱۰ درجه کلون، بازده کوانتومی معادل ۸/۷ درصد را نشان داد (۱۶). چنانکه اشاره شد کمپلکس‌های مبتنی بر ایریدیم برای کاربرد در ساختار دیودهای نورتاب بسیار عالی هستند و موضوع بسیاری از تحقیقات می‌باشند. بخش از تحقیقات منتشر شده در این خصوص در جدول ۱ جمع‌آوری شده است. طیف نشری برخی از این ترکیبات در شکل ۷ نشان داده شده است (۱۷).

این کمپلکس پایداری حرارتی بالایی را با ۵ درصد کاهش وزن و دمای انتقال شیشه‌ای به ترتیب ۳۲۴ و ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد. این کمپلکس در ساختار دیود نورتاب آلی با استفاده از mCBP و 4DBTCz به عنوان ماده میزبان تهیه گردید. افزاره مبتنی بر 4DBTCz ولتاژ کمتر و در حدود ۵ ولت نشان دادند و بازده کوانتومی آن در حدود ۱۱ درصد برآورد گردید. طول عمر عملیاتی دستگاه مبتنی بر mCBP و 4DBTCz به ترتیب ۶۹۰ و ۳۹۰ ساعت به دست آمد. بنابراین کمپلکس نورتاب برپایه ۱،۰۲۴-تریازول (mCBP) یک ترکیب نورتاب آبی نویدبخش برای تهیه دیودهای نورتاب آلی پایدار و کارآمد می‌باشد (۱۳). می و همکارانش کمپلکس تریس‌سیکلو متالاته ایریدیم با استفاده از لیگاند آزا-تریپتیسین و روش تک‌گلدانه^۱ سنتز نمودند. این کمپلکس‌ها دارای پایداری حرارتی در حدود ۴۵۴-۵۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این کمپلکس‌ها نشر فسفرسانس سبز قوی با بازده کوانتومی بیش از ۷۰ درصد را به دلیل حضور استخلاف آزا-تریپتیسین و کاهش برهمکنش‌های بین مولکولی نشان می‌دهد. دیودهای نورتاب تهیه شده با این کمپلکس‌ها بدون حضور ماده دوپینگ، روشنایی معادل 2 cdm^{-2} ۲۰۵۷۱، ۱۵۴۰۷، ۱۰۷۰۷ نشان می‌دهد که در حضور ۳۰ درصد ماده دوپینگ مقدار روشنایی حدوداً دوبرابر می‌شود (۱۴). یک کمپلکس جدید هترولیپتیک ایریدیم (II) استیل استونات (acac) توسط آلتینولسک^۲ و همکارانش تهیه شد. مطالعات نشان داد که کمپلکس تهیه شده از نظر حرارتی و الکتروشیمیایی بسیار پایدار است. بررسی خواص فوتولومینسانس این ترکیب در حلال دی‌کلرومتان نشان داد که یک نشر قوی در ۶۶۲ نانومتر مشاهده می‌شود و حضور گروه فرمیل سبب جابجایی باند نشر به مقدار ۱۵۱ نانومتر به طول موج‌های بالاتر شده است. همچنین این کمپلکس دارای بازده کوانتومی ۶۷٪ و طول عمر نشر ۲۸۰ نانوثانیه

¹ One-pot method

² Altinolcek

³ Thiyagarajan

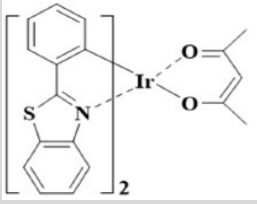
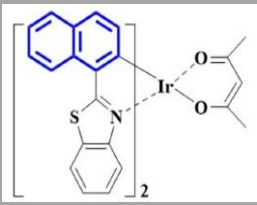
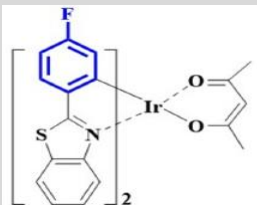
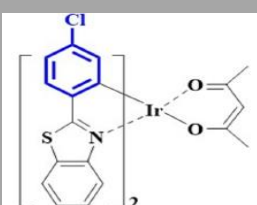
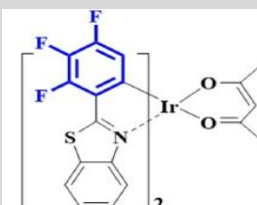
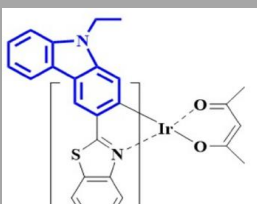
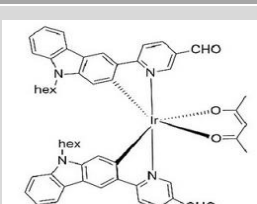


شکل ۶: طیف نشری کمپلکس‌های آلی-معدنی روتنیوم دارای لیگاندهای بنزوئیمیدازوفنانتریدین (۱۶).

Figure 6: Emission spectra of iridium (III) complex containing benzoimidazophenanthridine ligand (16).

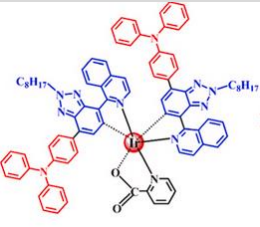
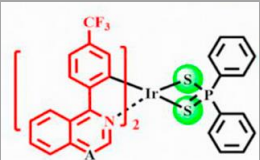
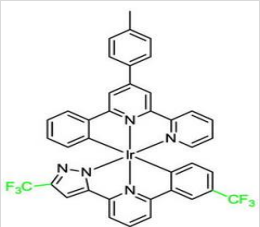
جدول ۱: خلاصه‌ای از ویژگی‌های الکترولومینسانس کمپلکس‌های ایریدیم (۱۷، ۱۸).

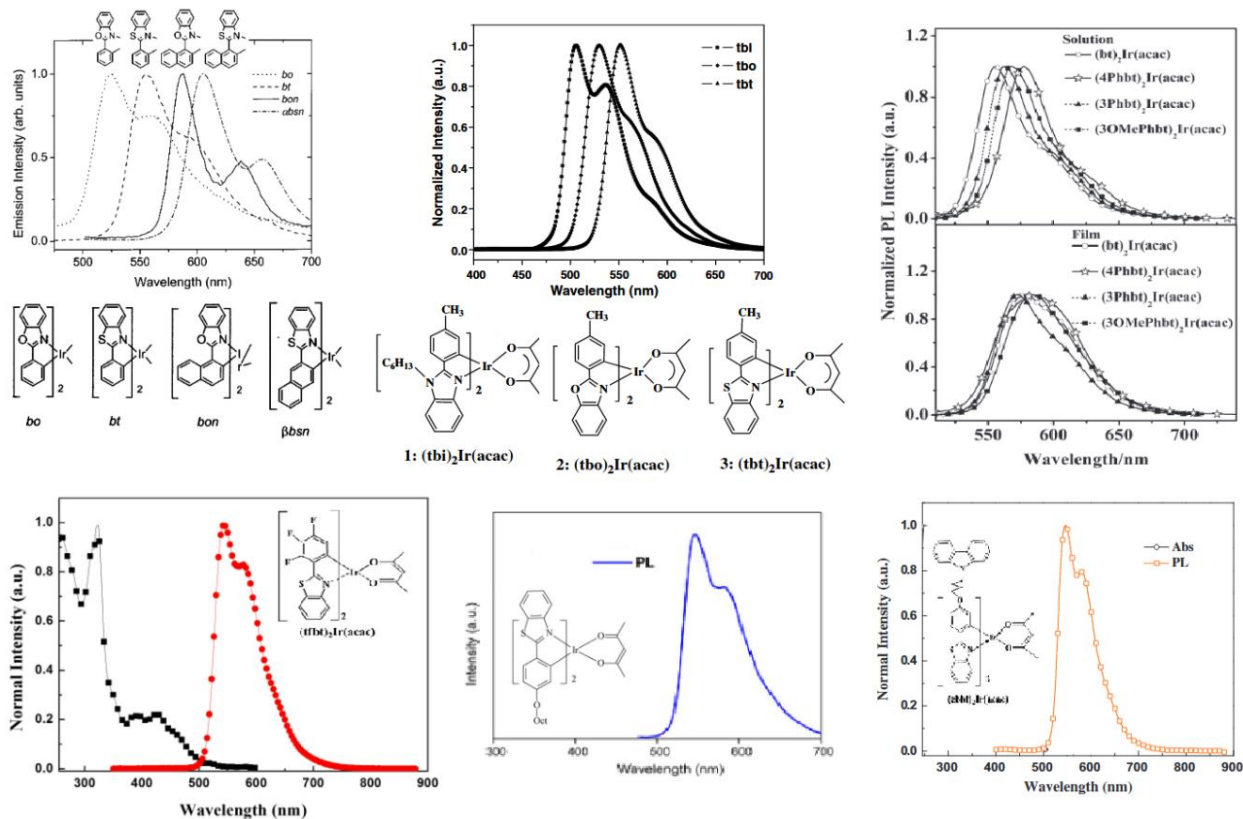
Table 1: Summary of EL properties of Ir(II) complexes (17, 18).

Ir(II) complexes	Device structure	λ_{EL} (nm)	EQE (%)
	ITO/NPB/CBP: 1% Ir(II)-1/BCP/Alq3/Mg/Ag	481	9.28
	ITO/NPB/CBP: 6% Ir(II)-2/BCP/Alq3/Mg/Ag	478	6.5
	ITO/MoO3/NPB/CBP/CBP: Ir(II)-11/TPBi/LiF/Al	489	17.2
	ITO/MoO3/TAPC/TCTA/CBP: Ir(II)-12/TmPyPB/LiF/Al	492	20.2
	ITO/NPB/TCTA/ CBP: 6%Ir(II)-14/ Bepp2/ LiF /Al	493	27.3
	ITO/PEDOT: PSS/a-NPD/TCTA/CBP: 8% Ir(II)-28/BCP/Alq3/LiF/Al	480	12.9
	ITO/PEDOT:PSS/CBP: 1.5% Ir(II)-31/mCP: 8% Firpic/TPBi/LiF /Al	485	21.90

جدول ۱: ادامه.

Table 1: Continued.

Ir(II) complexes	Device structure	λEL (nm)	EQE (%)
	ITO/PEDOT:PSS/CBP : 5% Ir(II)-43/TPBi/LiF/Al	456	27.2
	ITO/PEDOT:PSS/CBP : 5% Ir(II)-52/TPBi/LiF/Al	472	29.6
	ITO/NPB/FPYPCA: 15% Ir(II)-73/TPBi/LiF/Al	398	26.6



شکل ۷: طیف نشری کمپلکس‌های آلی-معدنی روتنیم (۱۷، ۱۸).

Figure 7: Emission spectra of iridium complex (17, 18)

۶- مواد رنگزای آلی-معدنی حاوی پلاتین

بعد از ایریدیم، پلاتین دومین فلز سنگین پرکاربرد در تهیه ترکیبات نورتاب قابل استفاده در دیودهای نورتاب آلی است. زیرا پلاتین، مانند ایریدیم دارای ثابت‌های جفت مدار چرخشی بالا بوده و قابلیت ایجاد پیوند موثر با انواع لیگاندهای آروماتیک را دارد. ساختار شبکه‌های ایجاد شده توسط این دو فلز مشابه یکدیگر می‌باشد اما مهندسی رنگ و حالت‌های تشعشعی برانگیخته تحت تاثیر لیگاندهای مورد استفاده، می‌باشد. برای تعیین بزرگی شکاف انرژی HOMO-LUMO و پیش‌بینی انرژی انتشار، می‌توان از روش‌های تئوری نظریه تابع چگالی (DFT) و مدل وابسته به زمان آن (TD-DFT) استفاده کرد. البته این محاسبات، ممکن است سطوح انرژی فرآیندهای تشعشعی سه‌گانه غیرمجاز را نیز ارائه کنند، برای مثال سطوح انرژی مشارکت آرومیتال‌های اتمی فلز در آرومیتال‌های مرزی درگیر در کم‌انرژی‌ترین سطح برانگیخته شده نیز محاسبه و اعلام می‌گردد. بنابراین، مفاهیم ساده‌ای مانند صلبیت پیچیده و ارزیابی نقاط قوت میدان لیگاند می‌تواند به ارائه یک نشانه کیفی از مقدار محدودکننده عملکرد فروپاشی غیرتشعشعی، کمک کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بازده کوانتومی انتشار برای یک کمپلکس نورتاب توسط مقادیر نسبی ثابت‌های سرعت واپاشی تابشی و غیرتشعشعی، تعیین می‌شود و بنابراین ارزیابی کیفی خواص مولکولی تأثیرگذار این عوامل در طراحی مولکول‌های نورتاب کارا بسیار مهم هستند. بسیاری از این مفاهیم در مقالات مروری که در خصوص پلاتین منتشر شده، گزارش شده است (۱۹). تحقیقات نشان می‌دهد که لیگاندهای حلقوی متالیزه برای تهیه کمپلکس‌های نورتاب مناسب هستند. البته لیگاندهای دارای الگوی ۲-فنیل‌پیریدین (ppy) که می‌تواند از طریق اتم نیتروژن پیریدین و اتم کربن در پیوند بین حلقه‌ای مجاور، به یون‌های فلزی پلاتین، متصل شوند، دارای عملکرد نورتابی بسیار خوبی هستند. ترکیبی از اتم کربن در حلقه فنیل به عنوان گروه الکترون‌دهنده و حلقه پیریدیل به عنوان گروه الکترون‌گیرنده، یک میدان لیگاند قوی ایجاد می‌کند و حلقه کیلیت پنج‌عضوی ایجاد شده به ویژگی صلب به کمپلکس نهایی اضافه خواهد کرد. با وجود تمام ویژگی‌های قابل توجه کمپلکس‌های پلاتین دارای لیگاند ppy، اثر لیگاندهای دیگر موجود در شبکه را نمی‌توان نادیده گرفت، برای مثال کمپلکس دو ظرفیتی $Pt(ppy)Cl_2$ در دمای اتاق نشر ندارد اما کمپلکس $Pt(ppy)(acac)$ در دمای اتاق دارای نشر زرد پرشدت می‌باشد (۶).

مطالعات تامپسون^۱ و همکارانش نشان داد که چگونه اصلاح حلقه‌های آریل یا پیریدیل می‌تواند منجر به تنظیم انرژی حالت برانگیخته در کمپلکس‌های $Pt(N^C)$ شود. گروه آریل عمدتاً بر انرژی

HOMO تأثیر می‌گذارد در حالی که پیریدیل (یا سایر ترکیبات آروماتیک حلقوی) در تعیین انرژی LUMO مهم تر است. گروه‌های الکترون‌دهنده، آرومیتال‌ها (هر دو آرومیتال HOMO و LUMO) را بی‌ثبات می‌کنند و گروه‌های الکترون‌گیرنده آن‌ها را تثبیت می‌کنند. با استفاده از این مفهوم ساده می‌توان رنگ انتشار را با دقت قابل توجهی، کنترل کرد. اگرچه بازده کوانتومی برای ترکیبات نورتاب پرنرژی (ناحیه آبی) کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل کاهش انرژی شکاف d-d است (۶). از آن زمان، کمپلکس‌های مبتنی بر پلاتین تهیه شدند که دارای لیگاندهایی بر پایه فنیل پیریدین بودند. سیستم‌های بلور مایع دارای زنجیره‌های آلکیل طولانی می‌تواند یک لیگاند مناسب برای تهیه کمپلکس‌های نورتاب مبتنی بر پلاتین باشد. نکته جالب آن است که اغلب این ترکیبات دارای بازده کوانتومی بالایی هستند. البته این عملکرد خوب تنها ناشی از حضور زنجیره‌های بلند مزدوج نیست، بلکه محل قرارگیری آن دارای اهمیت زیادی است. برای مثال موقعیت ۵ حلقه فنیل و آلکوکسی و موقعیت ۶ حلقه پیریدیل بهترین مکان برای جایگزینی چنین استخلاف‌هایی است. به نظر می‌رسد این جایگزینی نه تنها ثابت‌های واپاشی غیرتشعشعی را کاهش داده، بلکه نرخ فروپاشی تابشی را نیز کاهش می‌دهد، که منجر به طول عمر نورتاب غیرمعمول طولانی (~۲۷ ثانیه) می‌شود. اگرچه این نتیجه برای یک ماده نورتاب ایده‌آل، کمی زیاد است اما نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان ترکیبات نورتاب بسیار کارآمد دارای سیستم‌های لیگاند نسبتاً پیچیده تهیه کرد. یکی دیگر نوآوری‌ها، ایجاد پیوندهای کووالانسی در کمپلکس‌های آلی-معدنی بوده که سبب تسهیل حرکت با در این ترکیبات می‌گردد. این واحدها شامل عناصر گروه اصلی مانند بور، ژرمانیم و سیلیکون بوده که تزریق الکترون‌ها در آن بهبود یافته است. این رویکرد ممکن است راه حلی باشد برای مشکلات جداسازی فازی که گاهی اوقات در کامپوزیت‌ها و هیبریدهای پلیمری نورتاب مشاهده می‌شود (۲۰). یک رویکرد دیگر برای تهیه کمپلکس‌های مبتنی بر پلاتین نورتاب، استفاده از لیگاندهای چهار دندانه بوده که در آن دو واحد ppy با یک پیوند به یکدیگر متصل شده با یک گروه آلیفاتیک به موقعیت اروتو اتم نیتروژن پیریدیل متصل شده باشد. البته این ساختارهای چهاردندانه ممکن است دچار واپاشی غیرتشعشعی نامطلوب شده و بازده کوانتومی کمتر از ۰/۵ را نشان دهند البته برخی ترکیبات دارای بازده بالا نیز گزارش شده اند. استفاده از لیگاندهای سه‌دندانه سبب پایداری پیکربندی کمپلکس می‌شود. کمپلکس‌های مسطح مربعی متشکل از دو لیگاند دوتایی نسبت به پیچش صفحه یک لیگاند نسبت لیگاند دیگر ناپایدار است. چنین پیچشی با تسهیل امکان جفت‌شدن در تراز پایه، خاموش شدن نورتابی را به تاخیر می‌اندازد. لیگاندهای مبتنی بر سه حلقه آروماتیک

¹ Thompson

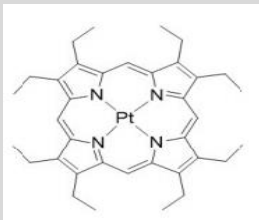
(۲۴). مجموعه‌ای از کمپلکس‌های ۱،۲-سیکلو متالاته پلاتین با استفاده از کروموفورهای کیلیت شده از موقعیت نیروژن حلقه برای کاربرد در تهیه حسگرهای اکسیژن و دیودهای نورتاب آلی تهیه گردید. نتایج نشان داد که لیگاندهای دودندانه، عملکرد بهتری در ایجاد ویژگی‌های نورتابی دارند. اتصال یک گروه بوردی‌مستیل^۳ به لیگاند می‌تواند، نورتابی را تا حدود ۱۵ درصد بهبود دهد. برای کمپلکس‌های بر پایه فنیل-۱،۲،۳-تری‌آزول، اتصال یک گروه آمینودی‌فنیل به لیگاندها، سبب بهبود فسفرسانسی تا حدود ۱۰٪ می‌گردد (۲۵). دو سری کمپلکس پلی‌این پلاتین (II) حاوی لیگاندهای نوع فلورن با واحدهای اتینیل در موقعیت‌های مختلف سنتز شدند. بررسی طیف‌های جذبی کمپلکس‌های سنتز شده نشان می‌دهد که اتصال واحدهای اتینیل در موقعیت‌های ۳ و ۶ سبب جابجایی باتوکرومیک نسب به موقعیت ۲ و ۷ شده و رنگ به دست آمده شفافیت بهتری دارد. به علاوه، اتصال در موقعیت‌های مذکور سبب ایجاد انتشار سه‌گانه قوی در طیف‌های نشری می‌گردد. در مجموع کمپلکس‌های استخلاف شده در موقعیت ۳ و ۶ دارای خواص نورتابی بهتری می‌باشند و بازده کوانتومی آن در حدود ۲۰٪ بیشتر از ترکیب مشابه استخلاف شده در موقعیت ۲ و ۷ است (۲۶). تحقیقات زیادی در مورد کمپلکس‌های مبتنی بر پلاتین برای کاربرد در ساختار دیودهای نورتاب منتشر شده که بخش از آن در جدول ۲ خلاصه شده است (۲۷). چنانکه در بالا اشاره شد، عملکرد و بازده کوانتومی ترکیبات آلی-معدنی بهتر از ترکیبات آلی بدون فلز می‌باشد. مقایسه اجمالی این موضوع در جدول ۳ نشان داده شده است. برای آنکه این مقایسه قابل استناد باشد، تشابه ساختار افزاره ضروری است. طیف نشری برخی ترکیبات آلی-معدنی نورتاب بر پایه پلاتین در شکل ۸ نشان داده شده است (۲۷، ۱۸، ۲۰).

که از طریق موقعیت‌های مرتبط با متا حلقه مرکزی به هم متصل شده‌اند (مانند تری‌پیریدین)، دارای استحکام بیشتری بوده و از چنین پیچش‌هایی جلوگیری می‌کنند (۲۱).

سه پیش‌ساز لیگاند ایمیدازولیلیدین^۱ مختلف با گروه‌های متیل در موقعیت ۴ و ۵ سنتز و برای ساخت مجموعه‌ای از نه کمپلکس پلاتین سیکلومتاله شده (II) انتخاب شدند. علاوه بر لیگاندهای کربن‌دار، گروه‌های β -دیکتونات و بیس (پیرازولیل) بورات به عنوان لیگاندهای کمکی استفاده شد. تمام کمپلکس‌های پلاتینه سنتز شده، در دمای اتاق و در بستر پلیمری PMMA، فسفرسانس قوی در ناحیه سبز-آبی تا آبی خالص و بازده کوانتومی تا حدود ۹۲ درصد نشان دادند. نتایج بررسی‌های محاسبات شیمیایی کوانتومی و آزمون‌های الکتروشیمیایی، اطلاعات مفیدی در خصوص سطوح انرژی و انتقالات الکترونی این کمپلکس‌ها ارائه نمودند (۲۲). سان^۲ و همکارانش یک کمپلکس آلی-معدنی بر پایه پلاتین جدید سنتز نمودند که دارای یک لیگاند دودندانه و دو لیگاند تک دندانه مستقل بود. در این پژوهش، نوزده کمپلکس مختلف براساس چینش‌های متفاوت از این نوع لیگاندها تهیه شد و تاثیر هر لیگاند بر خواص نورتابی و تزریق/حمل بار مورد بررسی قرار گرفت. برخی از این کمپلکس‌ها، ویژگی‌های نورتابی عالی نشان دادند که تعادل خوبی بین حفره ایجاد شده و تزریق الکترون رویت شد. نتایج نشان داد که کمپلکس‌های تهیه شده، بازده کوانتومی بالا در حدود ۲۴/۲ درصد و نورتابی پرشدت در ناحیه زرد دارند (۲۳). این گروه تحقیقاتی، در پژوهش دیگری دو کمپلکس سه هسته‌ای خنثی پلاتین را با استفاده از هسته تری‌فنیل آمین و سه بازوی لیگاند دوتایی تهیه نمودند. کمپلکس تهیه شده دارای دو محدوده نورتابی زرد و قرمز بوده که بازده کوانتومی آن، نسبت به کمپلکس‌های تک هسته‌ای پلاتین مشابه، بسیار بالاتر بود. دیود نورتاب آلی تهیه شده بر پایه ترکیب نورتاب زرد، بازده کوانتومی در حدود ۱۶/۹۲ درصد نشان داد که در مقایسه با کمپلکس‌های پلاتین چند هسته‌ای، بسیار بالا است. بازده دیود نورتاب آلی مبتنی بر ترکیب نورتاب قرمز در حدود ۹ درصد ثبت شد که در مقایسه با ترکیب‌های مشابه، عملکرد خوبی است

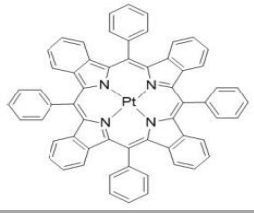
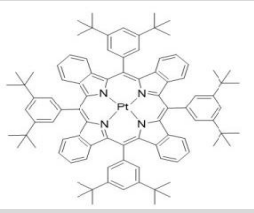
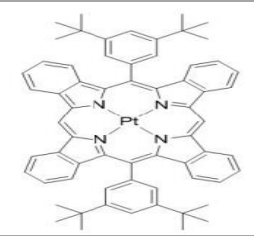
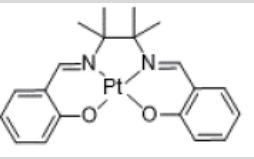
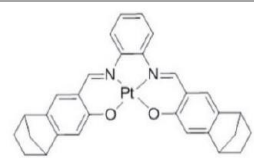
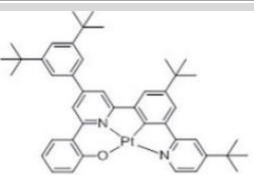
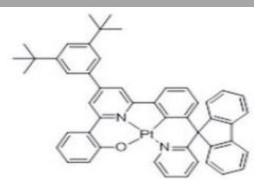
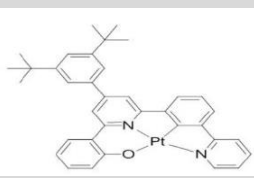
جدول ۲: خلاصه‌ای از ویژگی‌های الکترو لومینسانس کمپلکس‌های پلاتین (۲۷).

Table 2: Summary of EL properties of Pt(II) complexes (27).

Pt(II) complexes	Device structure	λ_{EL} (nm)	EQE (%)
	ITO/NPB/CBP: 2%Pt/BCP/Alq3/Mg/Ag	650	4.23

جدول ۲: ادامه.

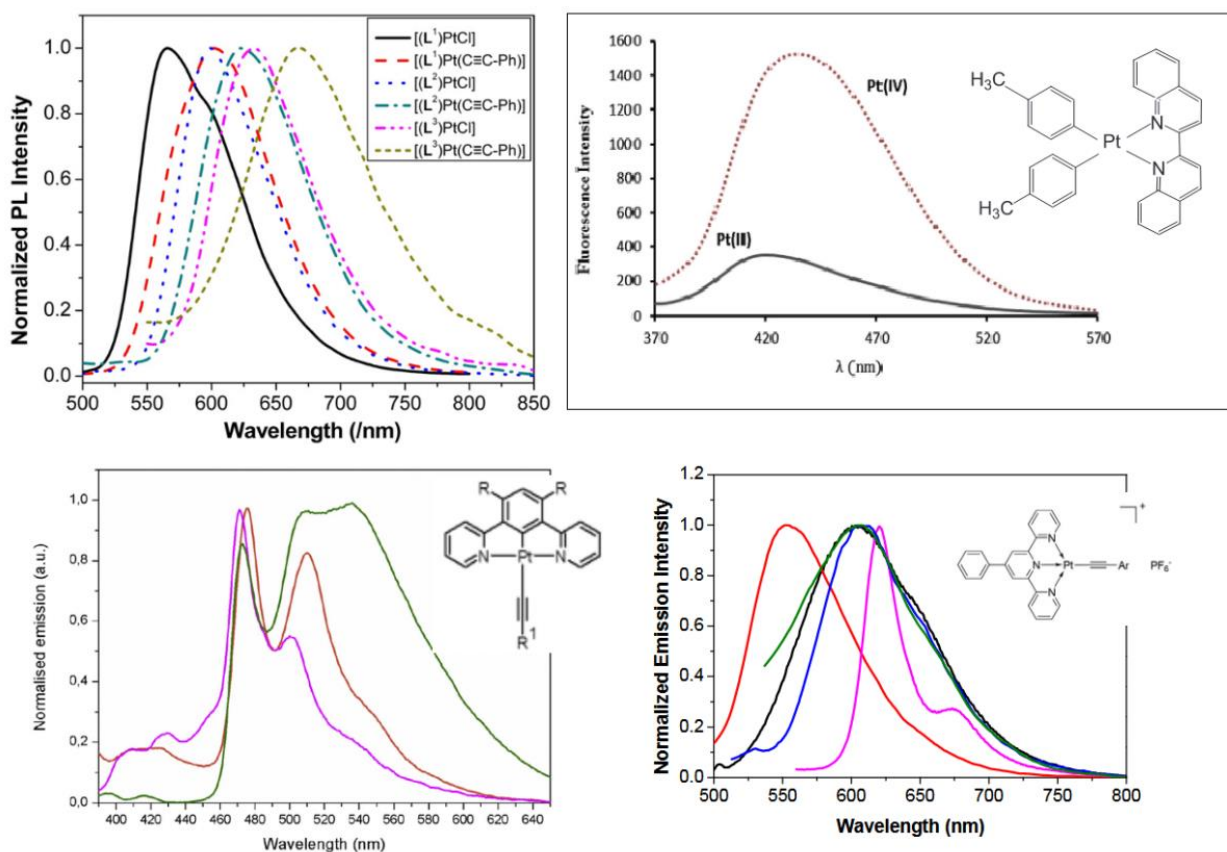
Table 2: Continued.

Pt(II) complexes	Device structure	λ_{EL} (nm)	EQE (%)
	ITO/NPB/CBP: 5% Pt/BCP/Alq3/Mg/Ag	655	8.0
	ITO/MoO3/NPB/CBP/6%Pt/TPBi/LiF/Al	773	9.8
	ITO/MoO3/TAPC/TCTA/CBP: Pt/TmPyPB/LiF/Al	777	19.6
	ITO/NPB/TCTA/ CBP:4%Pt/ Bepp2/ LiF /Al	698	14.36
	ITO/PEDOT: PSS/a-NPD/TCTA/CBP: 2%Pt/BCP/Alq3/LiF/Al	712	11.28
	ITO/PEDOT:PSS/CBP:3%Pt/mCP: 8%Firpic/TPBi/LiF /Al	729	16.39
	ITO/PEDOT:PSS/CBP : 4%Pt/TPBi/LiF/Al	649	18.25
	ITO/PEDOT:PSS/CBP: 4%Pt/TPBi/LiF/Al	683	12.16

جدول ۳: مقایسه عملکرد و بازده افزاره‌های نورتاب در حضور ترکیبات آلی و آلی-معدنی (۲۷، ۱۸، ۲۷).

Table 3: Comparing the performance and efficiency of OLED in the presence of organic and organometallic compounds (2, 18, 27).

Kind	Device structure	λ_{EL} (nm)	EQE (%)
Organometallic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/BiCzSiPh ₃ :Ir(ppy) ₃ /TSPO1/TPBi/LiF/Al	722	13.8
Organometallic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/mCP:Ir(ppy) ₃ /TSPO1/TPBi/LiF/Al	734	12.1
Organometallic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/mCP:Ir(piq) ₂ (cac)/TSPO1/TPBi/LiF/Al	614	12.3
Organic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/m-MTDATA:t-Bu-PBD/TSPO1/TPBi/LiF/Al	540	2.4
Organic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/mCP:PO-T2T/TSPO1/TPBi/LiF/Al	471	8.0
Organic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/BCzPh:B3PYMPM/TSPO1/TPBi/LiF/Al	500	4.89
Organic	ITO/MoO ₃ /NPB/TCTA/mCP/TCTA:DTrz/TSPO1/TPBi/LiF/Al	515	5.52



شکل ۸: طیف نشری کمپلکس‌های آلی-معدنی پلاتین (۲۷).

Figure 8: Emission spectra of Pt complex (27).

می‌شود. ویژگی‌های الکترولومینسانس ترکیبات آلی-معدنی نسبت به ترکیبات آلی، بهتر بوده و برای تهیه دیودهای نورتاب آلی بسیار مناسب می‌باشند. فلزات واسطه که برای تهیه کمپلکس‌های آلی-معدنی نورتاب مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: ایریدیم، پلاتین،

۷- نتیجه‌گیری

یکی از گزینه‌های مطلوب برای جایگزینی نمایشگرهای بلور مایع و صفحات نمایش پلاسما، دیودهای نورتاب آلی بوده زیرا این افزاره‌ها دارای بازده بالا، ولتاژ پایین و رنگ کامل بوده و به راحتی تهیه

قابل استفاده در دیودهای نورتاب آلی است. زیرا پلاتین، مانند ایریدیم دارای ثابت‌های جفت مدار چرخشی بالا بوده و قابلیت ایجاد پیوند موثر با انواع لیگاندهای آروماتیک را دارد. ساختار شبکه‌های ایجاد شده توسط این دو فلز مشابه یکدیگر می‌باشد. بالاترین بازده کوانتومی گزارش شده برای ایریدیم و پلاتین به ترتیب ۳۳ و ۲۱/۷ درصد می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت پژوهشگاه رنگ برای انجام این مطالعه، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

اسمیم و روی (II). بالاترین بازده‌های کوانتومی برای دو فلز ایریدیم (۳۳ درصد) و پلاتین (۲۱/۷ درصد) گزارش شده است. توسعه کمپلکس‌های آلی-معدنی وابسته به استخلاف‌ها و واحدهای ساختاری آلی بوده که به عنوان لیگاند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا ویژگی‌های نورتابی و خواص رنگی ترکیبات آلی-معدنی با تغییر لیگاندها قابل مدیریت است. لیگاندهای حلقوی دودندانه حاوی گروه C=N و لیگاندهای حلقوی متالیزه از مهم‌ترین لیگاندهای مورد استفاده در تهیه ترکیبات آلی-معدنی بوده که ویژگی‌های نورتابی عالی ایجاد می‌کند. بالاترین بازده برای کمپلکس‌های آلی معدنی بر پایه ایریدیم دارای این دو لیگاند به ترتیب ۲۹/۶ و ۲۳/۴ درصد گزارش شده است. کمپلکس‌های آلی-معدنی دارای ایریدیم به عنوان فلز مرکزی، به دلیل ویژگی‌های فوتوفیزیکی قابل تنظیم، پایداری خوب و سهولت طراحی مولکولی، یکی از نویدبخش‌ترین ترکیبات برای کاربرد در ساختار دیودهای نورتاب آلی هستند. بعد از ایریدیم، پلاتین دومین فلز سنگین پرکاربرد در تهیه ترکیبات نورتاب

۸- مراجع

1. Ho CL, Li H, Wong WY. Red to near-infrared organometallic phosphorescent dyes for OLED applications. *J. Organometal. Chem.* 2014; 751(4): 261-285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jorganchem.2013.09.035>.
2. Hosseinezhad M, Nasiri S, Gharanjig K., Review on light-emitting organic dyes based on naphthalimide. *J. Studies Color World* 2023; 13(1): 1-14. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.1.1> (In Persian)
3. Xiao L, Chen Z, Qu B, Luo J, Kong S, Gong Q, Kido J. Recent progresses on materials for electrophosphorescent organic light-emitting devices. *Adv. Mater.* 2011; 23(6): 926-952. <https://doi.org/10.1002/adma.201003128>.
4. Nasiri S, Palanisamy P, Rabiei M, Hosseinezhad M, Palevicius A, Vilkauskas A, Janusas G, Nutalapati V. Investigation of the influence of persulfurated benzene derivatives on optical and carrier mobility properties. *Mater. Lett.* 2023; 342(3): 134323. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134323>
5. Zhou GJ, Wong WY, Suo S. Recent progress and current challenges in phosphorescent white organic light-emitting diodes (WOLEDs). *J. Photochem. Photobio. C Photochem. Rev.* 2010; 11(4): 133-250. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2011.01.001>.
6. Kalinowski J, Fattori V, Cocchi M, Gareth Williams JA. Light-emitting devices based on organometallic platinum complexes as emitters. *Coordinat. Chem. Rev.* 2011; 255(6), 2401-2425. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2011.01.049>
7. Sarma M, Chen LM, Chen YS, Wong KT. Exciplexes in OLEDs: principles and promises. *Mater. Sci. Eng. R. Rep.* 2022; 150(9): 100689. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2022.100689>.
8. Kalinowski J, Giro G, Cocchi M, Fattori V, Di Marco P. Unusual disparity in electroluminescence and photoluminescence spectra of vacuum-evaporated films of 1,1-bis ((di-4-tolylamino) phenyl) cyclohexane. *Appl. Phys. Lett.* 2000; 76(6): 2352. <https://doi.org/10.1063/1.126343>.
9. Bizzarri C, Spuling E, Knoll DM, Volz D, Bräse S. Sustainable metal complexes for organic light-emitting diodes (OLEDs). *Coordin. Chem. Rev.* 2018; 373(9): 49-82. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.09.011>
10. Miyata K, Conrad-Burton FS, Geyer FL, Zhu XY. Triplet Pair States in Singlet Fission. *Chem. Rev.* 2019; 119(9), 4261-4292., <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00572>
11. Hosseinezhad M, Nasiri S. Review on metal-free light-emitting dyes for OLED. *J. Studies Color World* 2022; 12(4): 105-116 [In Persian].
12. Li TY, Wu J, Wu ZG, Zheng YX, Zuo JL, Pan Y. Rational design of phosphorescent iridium(III) complexes for emission color tunability and their applications in OLEDs. *Coord. Chem. Rev.*, 2018; 374(8): 55-92. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.06.014>
13. Ryu CH, Lim J, Kim M, Shin I, Lee JY, Lee KM. 1,2,4-Triazole-Ligand-based Iridium(III) complex and its use in blue phosphorescent organic light-emitting diodes. *Dye Pigm.* 2023; 218(9): 11508. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111508>
14. Mei Q, Liu L, Yang J, Jiang X, Ye S, Zhang L, Tong B. Aza-triptycene-based homoleptic tris-cyclometalated iridium(III) complexes as highly efficient phosphors in green OLEDs. *Dye Pigm.* 2022; 199(10): 110075. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.110075>
15. Altinolcek N, Battal A, Tavasli M, Cameron J, Peveler WJ, Yu HA, Skabara PJ, Fairbairn NJ, Hedley GJ. A red-orange carbazole-based iridium(III) complex: Synthesis, thermal, optical and electrochemical properties and OLED application. *J. Organometal. Chem.*, 2021; 951(11): 122004.

- <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2021.122004>.
16. Thiagarajan MD, Balijapalli U, Leitonas K, Volyniuk D, Simokaitiene J, Keruckas J, Jatautiene E, Pathak M, Kulathi Iyer S, Grazulevicius JV. Human-eyes-friendly white electroluminescence from solution-processable hybrid OLEDs exploiting new iridium (III) complex containing benzoimidazophenanthridine ligand. *Dye Pigm.* 2020; 174(9): 108068. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108068>
 17. Hu YX, Xia X, He W, Tang Z, Lv Y, Li X, Zhang DY. Recent developments in benzothiazole-based iridium (II) complexes for application in OLEDs as electrophosphorescent emitters. *Org. Electron.* 2019; 66(9): 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.12.029>
 18. Song Z, Xu X, Zhao N, Cao C, Zhang Y, Liu L, Mao Y. AIE-active heteroleptic iridium complexes showing piezochromic luminescence. *J. Mol. Struct.*, 2023; 1287(9): 135712. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135712>
 19. Thejo Kalyani N, Dhoble SJ. Novel materials for fabrication and encapsulation of OLEDs. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015; 44(9): 319-347. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.070>
 20. Schwab T, Lussem B, Furno M, Gather MC, Leo K. Handbook of organic materials for optical and Opto-electronic devices. Elsevier Pub., New York, 2013, 508-534.
 21. Williams JAG, Develay S, Rochester DL, Murphy L. Optimising the luminescence of platinum(II) complexes and their application in organic light emitting devices (OLEDs). *Coord. Chem. Rev.*, 2008; 252(12): 2596-2611. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2008.03.014>.
 22. Stipurin S, Strassner T. Blue emitting phosphorescent platinum(II) complexes with cyclometalated 4,5-dimethylimidazolydene ligands. *J. Organometal. Chem.*, 2023; 16(7): 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2023.122785>
 23. Sun Y, Zhu C, Liu S, Wang W, Chen X, Zhou G, Yang X, Wong W. AIE-active Pt(II) complexes based on a three-ligand molecular framework for high performance solution-processed OLEDs. *Chem. Eng. J.* 2022; 449(14): 137457. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137457>
 24. Sun Y, Liu B, Guo Y, Feng Z, Zhou G, Chen Z, Yang X. Triphenylamine-based trinuclear Pt(II) complexes for solution-processed OLEDs displaying efficient pure yellow and red emissions. *Org. Electron.* 2021; 91(12): 106101. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106101>
 25. Hussain F, Wang X, Wang S. Impact of bidentate N,C-Chelate ligands on the performance of phosphorescent Pt(II) complexes. *J. Organometal. Chem.* 2020; 880(10): 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.11.017>
 26. Tian Z, Yang X, Liu B, Zhong D, Zhou G. Photophysical properties and optical power limiting ability of Pt(II) polyynes bearing fluorene-type ligands with ethynyl units at different positions. *J. Organometal. Chem.* 2019; 895(14): 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2019.05.022>
 27. Li H, Lam T, Yan L, Dai L, Choi B, Cho Y, Kwak Y, Che C. Tetradentate platinum(II) emitters: design strategies, photophysics, and OLED applications. *Liquid Crystals Display Technol.* 2020; 17(9): 1-24. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93221>.

How to cite this article:

Hosseinnezhad M, Nasiri S. Review on Organometallic Dyes for Light-Emitting Diodes. *J Stud color world.* 2023;13(4):359-375. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1402.13.4.5.3> [In Persian].

Printed Solar Cells, an Inevitable Remedy for the Global Energy Crisis

Mohsen Mohammad Raei Nayini^{1*}, Mojtaba Jalili¹, Saeed Bastani^{1,2}, Sara Khamseh³

1- Department of Printing Science and Technology, Faculty of color physics, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

2- Department of Surface Coating and Corrosion, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

3- Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Colour Science and Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 16765-654.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17- 09- 2023

Accepted: 08- 10-2023

Available online: 31-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1

Keywords:

Global energy crisis

Environmental foot print

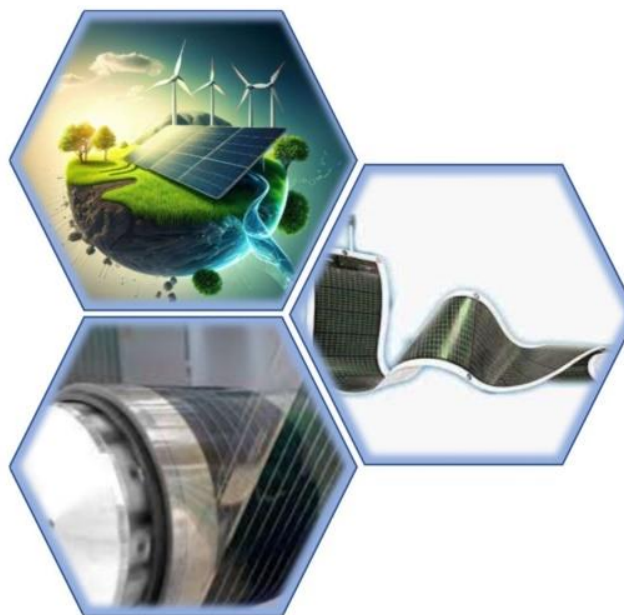
Global warming

Printed solar cells

Printed electronics

ABSTRACT

The ever-increasing human need for energy and the increase in the world's population have caused significant demand increases. This has created a global movement toward new energy sources, especially green energies with minimal negative environmental effects, with solar energy on top. On the other hand, an important requirement in the growth and consolidation of the position of solar cells is the reduction of the production cost of these cells and the increase in the speed of their production on a large scale, which can be achieved by using printing methods. The global energy crisis and its significance are first discussed in this study, after which the solutions are briefly discussed. Additionally, the different types of solar cells and their most recent advancements have been reviewed, and different printing techniques that may be exploited in each form of solar cell have been explained. Finally, the market forecasts for solar cells have been studied.



Corresponding author: mnnayini@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



سلول‌های خورشیدی چایی، چاره غیرقابل انکار بحران جهانی انرژی

محسن محمد رائی نائینی^{۱*}، مجتبی جلیلی^۱، سعید باستانی^۲، سارا خمسه^۴

۱- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۲- استاد، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۳- استادیار، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۴- دانشیار، گروه پژوهشی نانو فناوری رنگ، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

چکیده

نیاز روزافزون بشر به انرژی، در کنار افزایش جمعیت جهان موجب افزایش جهانی تقاضا برای انرژی در سطح جهانی شده است. همین امر یک حرکت جهانی به سوی منابع جدید انرژی و به ویژه انرژی‌های سبز با حداقل عوارض منفی برای محیط زیست رقم زده است که در راس آنها انرژی خورشیدی است. از سوی دیگر، یک پیش‌نیاز مهم در رشد جایگاه سلول‌های خورشیدی، کاهش هزینه تولید این سلول‌ها و همچنین افزایش سرعت تولید آنها در مقیاس وسیع است، موضوعی که با بهره‌گیری از روش‌های چایی به خوبی قابل حصول است. در این مقاله، موضوع بحران جهانی انرژی و اهمیت آن معرفی شده و در ادامه، روش‌های مواجهه با این بحران به اختصار بیان شده‌اند. همچنین انواع سلول‌های خورشیدی و آخرین دستاوردها در مورد آنها مرور شده‌اند و ظرفیت انواع روش‌های چایی برای بهره‌گیری در تولید هر دسته از انواع سلول‌های خورشیدی بررسی شده‌اند. در پایان به پیش‌بینی‌ها از آینده‌ی بازار سلول‌های خورشیدی پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

شاپا چایی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1

واژه‌های کلیدی:

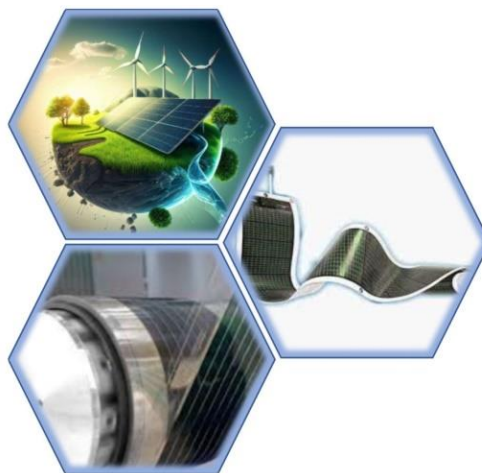
بحران جهانی انرژی

ردپای زیست محیطی

گرمايش جهانی

سلول‌های خورشیدی چایی

الکترونیک چایی



۱- مقدمه

بحران جهانی انرژی، طی سالیان اخیر، به عبارتی پر تکرار در رسانه‌ها، محافل سیاسی و تصمیم‌گیری تبدیل شده است. افزایش جمعیت، افزایش سرانه مصرف انرژی و انباشت آلودگی‌های زیست‌محیطی و گازه‌های گل‌خانه‌ای، عواملی هستند که جهان را درگیر بحران انرژی کرده‌اند. عوامل متعددی وجود دارند که ضرورت انجام تغییر اساسی در رویکرد جهانی به موضوع انرژی را نشان می‌دهند. در این بخش به اختصار به این عوامل اشاره می‌شود تا وضعیت کنونی جهان به لحاظ انرژی تصویر شود و ضرورت افزایش سهم انرژی‌های سبز در سبد انرژی جهانی روشن گردد.

۱-۱- افزایش تقاضا برای بهره‌مندی از انرژی

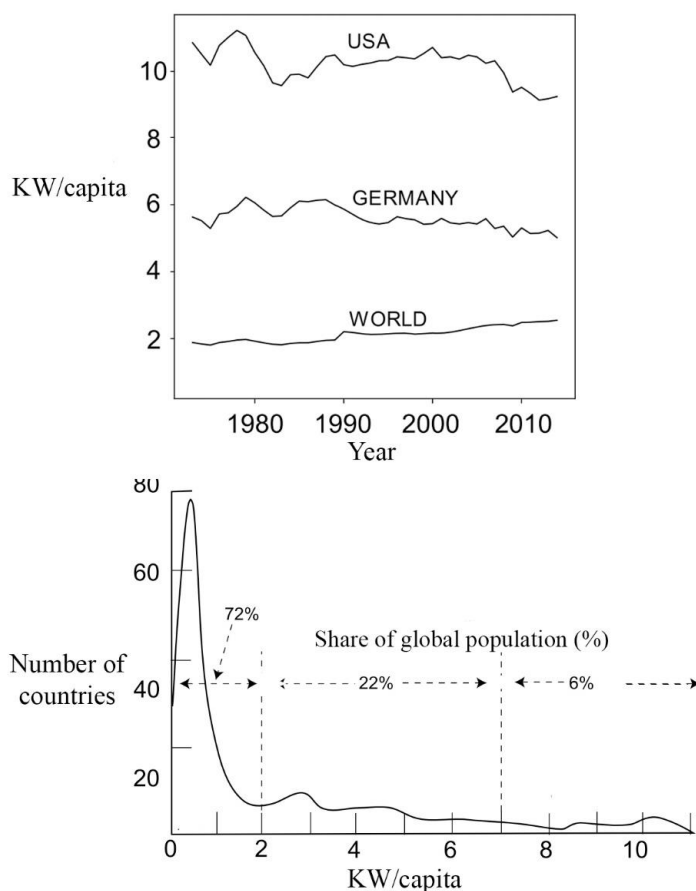
سرانه بهره‌گیری از انرژی در جهان در طی زمان به طور پیوسته روند رو به رشد داشته است. کهن‌ترین نشانه‌های یافته شده از انسان مربوط به حدود ۱۴۰ هزار سال پیش است. در آن زمان، تمام انرژی استفاده شده توسط هر فرد، محدود به مواد غذایی بوده که وی مصرف می‌نموده. با توجه به اینکه در جوامع گردآورنده-شکارچی آن زمان، میزان دسترسی به مواد غذایی بسیار محدود بوده، می‌توان با اطمینان عنوان کرد که میزان سرانه مصرف انرژی در آن دوران، کمتر از میزان انرژی دریافتی است که انسان امروزی تنها از طریق خوراک دریافت می‌کند. این در حالیست که در حال حاضر، سهم انرژی موجود در خوراک از کل سرانه مصرف انرژی هر فرد، میزان بسیار محدود و ناچیزی است. در حال حاضر متوسط جهانی دریافت انرژی از طریق مواد غذایی، حدود ۲۰۰۰ کیلوکالری در روز (معادل توان مصرفی ۱۰۰ وات) است که بیش از کل استفاده بشر اولیه از انرژی بوده است. روند رو به رشد بهره‌گیری انسان از منبع انرژی به صورت پیوسته ادامه داشته و در مقطعی با جهش روبرو بوده است. با کشف آتش و بهبود تغذیه و بهره‌مندی انسان از مواد غذایی پخته شده و همچنین توسعه فناوری‌های مبتنی بر حرارت دادن مواد نظیر پخت آجر و خالص‌سازی و شکل‌دهی به فلزات، این میزان تا بیش از ۵ برابر هم افزایش می‌یابد. با توسعه کشاورزی و افزایش سطح زمین‌های زیر کشت، بهره‌گیری انسان‌ها از نیروی حیوانات و استفاده محدود از انواع آسیاب‌ها و توسعه دریانوردی با کشتی بادبانی، به نظر می‌رسد که میزان بهره‌گیری انسان‌ها از انرژی تا اواخر قرن سیزدهم میلادی، به معادل بیش از ۲۰۰۰ وات به ازاء هر نفر افزایش یافته باشد. اما با آغاز انقلاب صنعتی و رواج استفاده از سوخت‌های فسیلی، نرخ رشد سرانه‌ی مصرف انرژی به شدت افزایش یافته است و در حال حاضر این میزان در ایالات متحده به حدود ۱۰۰۰۰ وات به ازاء هر نفر افزایش یافته است. این میزان مصرف از یک سو، رقابت بر سر دستیابی به منابع انرژی

را افزایش داده که منجر به بی‌ثباتی سیاسی و حتی درگیری‌های نظامی در کشورهای دارنده‌ی این ذخایر گردیده، و از سوی دیگر موجب نوسانات شدید قیمتی در این ذخایر شده است. این نوسانات به حدی است که قیمت هر بشکه نفت خام را از حدود ۳/۶ دلار در هر بشکه در دهه ۱۹۷۰ میلادی (پیش از شکل‌گیری آپک) به بیش از ۱۶۰ دلار در سال ۲۰۰۸ افزایش داد که با وجود افت قابل توجه ارزش دلار طی این سال‌ها، باز هم مبین یک رشد چند صد درصدی در قیمت نفت است. همین امر بسیاری از معادلات اقتصادی و محاسبات هزینه تولید را دچار اختلال می‌کند و اتکا به منابع سوخت فسیلی به عنوان منابع پایدار تامین انرژی را با تردید جدی مواجه می‌سازد (۱).

علاوه بر این، میزان مصرف انرژی با میزان رشد یافتگی کشورها ارتباط تنگاتنگ دارد، به نحوی که سرانه مصرف انرژی در ایالات متحده، بیش از ۵ برابر متوسط جهانی این میزان است. به همین دلیل در حالی که کشورهای توسعه یافته در حال مهار سرانه‌ی مصرف انرژی در جوامع خود هستند، کشورهای در حال توسعه به سرعت در حال افزایش میزان سرانه مصرف انرژی خود به منظور پر کردن عقب‌ماندگی موجود می‌باشند. همین امر یک عامل موثر بر افزایش تقاضای جهانی برای انرژی است. این موضوع در شکل ۱ به خوبی نمایش داده شده است. بر اساس برآورد اداره‌ی اطلاعات انرژی ایالات متحده، تا سال ۲۰۳۵، تقاضا برای بهره‌مندی از انرژی، به طور متوسط سالانه ۱/۶٪ رشد خواهد داشت که این میزان برای کشورهای توسعه یافته نظیر ایالات متحده کمتر از این مقدار و برای اقتصادهای نوظهور و کشورهای در حال توسعه بسیار بیشتر است به طوری که این میزان برای چین حدود ۲/۱٪ برآورد می‌شود (۲). همچنین همان‌طور که به خوبی در این شکل دیده می‌شود، توزیع بهره‌مندی سرانه از منابع انرژی بسیار نامتوازن است به نحوی که سرانه‌ی استفاده از انرژی برای ۷۲٪ جمعیت جهان، معادل کمتر از ۲ کیلووات است و همزمان این رقم برای حدود ۶٪ جمعیت جهان بیش از ۷ کیلووات است (۳، ۴).

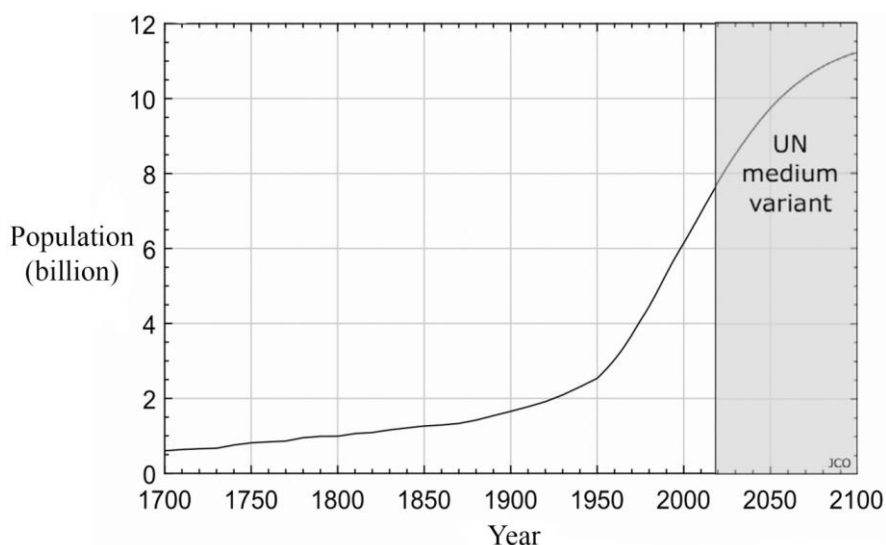
علاوه بر این موارد که مؤید رشد سرانه استفاده جهانی از منابع انرژی است، جمعیت جهان نیز به طور فزاینده در حال رشد است. متوسط جهانی نرخ رشد جمعیت از میانه‌ی قرن بیستم میلادی به سرعت رو به افزایش نهاد و در سال ۱۹۶۲ به بیشینه‌ی تاریخی خود یعنی ۲/۱٪ رسید. پس از آن این نرخ کاهش یافت و در حال حاضر کمی بیش از ۱٪ است. این بدان معناست که حتی با فرض متوقف کردن رشد استفاده سرانه از منابع انرژی، باز هم فقط به واسطه رشد جمعیت، سالانه ۱٪ رشد نیازمندی به منابع انرژی را شاهد خواهیم بود. این در حالی است که متوسط، سرانه‌ی جهانی استفاده از منابع انرژی، نرخ رشد بیش از ۱٪ را نشان می‌دهد. تخمین‌های صورت گرفته، افزایش جمعیت کره‌ی زمین به بیش از ۱۱ میلیارد نفر را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند (شکل ۲) (۵، ۱).

^۱ در این نوشتار، به منظور نزدیکی مقادیر به ذهن، در اغلب موارد به جای مقدار انرژی که واحد آن بر حسب ژول (J) است، نرخ مصرف آن با واحد وات (W) نمایش داده شده است.



شکل ۱: (بالا) محدود شدن سرانه استفاده از انرژی در کشورهای توسعه یافته در عین رشد متوسط جهانی آن (پایین) توزیع نامتوازن سرانه استفاده از انرژی در بین کشورهای مختلف و بخش‌های مختلف جمعیت جهان (۳، ۴).

Figure 1: (Top) Limitation of per capita energy use in developed countries while its global average growth (Bottom) Uneven distribution of per capita energy use among different countries and different parts of the world's population (3, 4).



شکل ۲: روند تغییرات جمعیت جهان طی سه قرن گذشته و پیش‌بینی روند آن تا پایان قرن حاضر (۵).

Figure 2: The trend of world population changes during the last three centuries and its forecast until the end of this century (5).

هزینه‌های متغیر مرتبط با سوخت بخش کمی از هزینه تمام شده را شامل می‌شود. بنابراین تمامی عوامل موثر بر نرخ بهره سرمایه و قیمت سوخت، قیمت نیروی الکتریکی نهایی را تحت تاثیر قرار داده و در جدول رده‌بندی روش‌های تولید الکتریسیته جایجایی‌هایی را ایجاد کند. به همین دلیل و به جهت اینکه مقایسه‌ی قیمتی بین انواع فناوری‌های تولید الکتریسیته امکان‌پذیر شود، اداره‌ی اطلاعات انرژی ایالات متحده، معیاری را تحت عنوان LCOE ارائه کرده. این معیار، در واقع بر اساس قیمت نهاده‌ها و نرخ بهره در سال ۲۰۱۷ در ایالات متحده محاسبه شده و قیمت الکتریسیته را بر مبنای سنت دلار بر کیلووات ساعت (cent/kWh) معرفی می‌کند. این مقادیر در جدول ۱ نمایش داده شده است. از این معیار در ادامه این نوشتار هم برای مقایسه‌های فناوری‌های مختلف سلول‌های خورشیدی چاپی استفاده خواهد شد.

همانطور که مشخص است، هزینه تولید نیروی الکتریسیته با استفاده از انرژی‌های سبز نظیر سلول‌های فتوولتائیک و یا بادی، کاملاً قابل رقابت با هزینه تولید نیروی الکتریسیته با استفاده از سوخت‌های فسیلی یا هسته‌ای است. در این بین باید این موضوع را نیز مورد توجه قرار داد که بخش ذخایر انرژی فسیلی که استخراج ساده و کم‌هزینه‌ای داشتند تاکنون برداشت شده‌اند و بیشتر چیزی که باقی مانده، با هزینه استخراج بسیار بیشتری قابل استحصال است. به این ترتیب این رقابت قیمتی باز هم به سود انرژی‌های سبز جابجا خواهد شد. البته از دیگر سو، انرژی‌های سبز در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ضریب ظرفیت^۱ پایینتری دارند و همین امر تا حدی هزینه‌ی انرژی الکتریسیته تولیدی توسط آنها را افزایش داده است.

¹ Capital

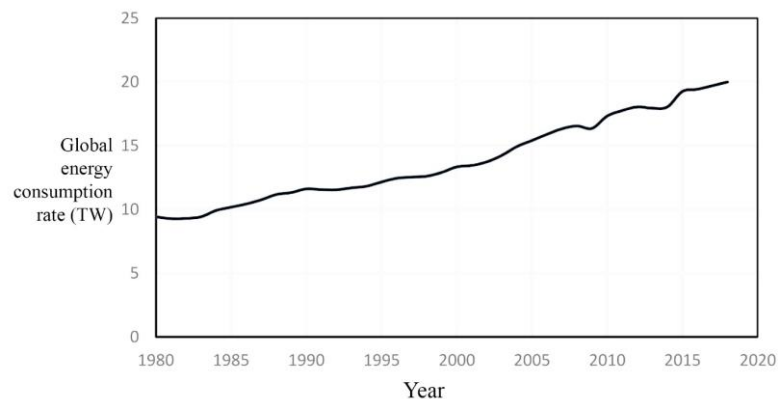
² Capacity factor

بنابراین، هم‌زمان با رشد متوسط جهانی سرانه بهره‌برداری از انرژی، جمعیت نیز با نرخ قابل توجهی در حال افزایش است. طی سالیان گذشته، این دو عامل در کنار یکدیگر موجب افزایش شدید نیاز به انرژی، در جهان طی سالیان شده‌اند. علاوه بر این، برآوردها نشان می‌دهند که بر اساس قیمت‌های ثابت سال ۱۹۸۰ میلادی، به ازاء هر یک دلار تولید ناخالص ملی، به معادل حدود ۲/۲۷ انرژی نیاز است. البته بخشی از این نیاز از محل صرفه‌جویی ناشی از افزایش بازدهی صنایع تامین می‌شود. ولی برای دستیابی به نرخ رشد اقتصادی مطلوب، باز هم نیاز به مقدار قابل توجهی از انرژی خواهد بود. روند جهانی مصرف انرژی طی چهار دهه‌ی گذشته در شکل ۳، نمایش داده شده است. سازمان اطلاعات انرژی ایالات متحده، تا سال ۲۰۴۰، رشد متوسط سالانه‌ی ۱٪ را برای مصرف جهانی انرژی پیش‌بینی کرده است. به این ترتیب، کل نیاز جهانی انرژی که در حال حاضر معادل کمی بیش از ۲۰TW است، تا سال ۲۰۴۰ به ۲۴/۶TW افزایش خواهد یافت که تامین چنین توان بالایی بسیار دشوار خواهد بود (۴).

۱-۲- نفوذ فناوری جدید و قیمت انرژی

بیشتر انرژی که توسط بشر استفاده می‌شود، به شکل الکتریسیته است. بنابراین برای پیش‌بینی روند بهره‌گیری از انواع منابع انرژی در آینده شاید ساده‌تر آن باشد که از روند تغییرات فناوری و قیمت در حوزه تولید نیروی برق پرسش به عمل آید.

محاسبات قیمتی نیروی الکتریسیته، تابع عوامل متعدد و محاسبات پیچیده‌ی اقتصادی است. در برخی از روش‌های تولید الکتریسیته نظیر نیروگاه‌های گازی، هزینه‌های متغیر تولید که مرتبط با مصرف گاز است، بخش بزرگی از هزینه تمام شده را تشکیل می‌دهند و در نقطه مقابل، در نیروگاه‌های هسته‌ای، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه^۱ بخش عمده هزینه تمام شده را شکل می‌دهد و



شکل ۳: نرخ جهانی مصرف انرژی طی چهار دهه‌ی گذشته (۴).

Figure 3: The trend of global energy consumption rate in the last four decades (4).

جدول ۱: میزان «هزینه‌ی انرژی هم‌تراز شده»^۱ (LCOE) برای انواع انرژی، پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۲۲ در ایالات متحده آمریکا (۴)

Table 1: The levelized cost of energy (LCOE) for various energy sources, forecasted in united states in 2022 (4).

Plant type	Capacity factor (%)	US levelized cost 2017 (cents/kWh)				
		Capital	Fixed O&M*	Variable O&M	Transmission investment	LCOE without tax credit
Coal	85	8.4	0.95	3.56	0.11	13.01
Conventional CT**	30	3.72	0.67	5.16	0.32	9.87
Advanced CT	30	2.36	0.26	5.57	0.32	8.51
Nuclear	90	6.94	1.29	0.93	0.10	9.26
Conventional CC***	87	1.26	2.5	3.49	0.11	5.01
Advanced CC	87	1.44	1.3	3.22	0.11	4.90
Wind onshore	41	4.31	1.34	0.0	0.25	5.91
Wind offshore	45	11.58	1.99	0.0	0.23	13.80
Solar photovoltaics	29	5.12	0.87	0.0	0.33	6.32

* Operation and maintenance

** Combustion turbine

*** Combined cycle

حوزه‌های گوناگون فناوری توسط این مدل صورت گرفته از جمله در حوزه‌ی فناوری تولید فولاد و همچنین کاهش مصرف زغال سنگ و افزایش مصرف گاز طی اوایل قرن بیست و یکم. در حال حاضر، الگوهای ارائه شده توسط این مدل در حوزه‌ی انرژی، حکایت از افزایش سریع سهم بازار انرژی‌های سبز از کل بازار انرژی دارد. در بین انرژی‌های سبز نیز پیش‌بینی این مدل آن است که سهم بازار نیروگاه‌های برقی‌آبی کاهش یافته و سهم سایر انواع انرژی سبز نظیر نیروگاه‌های بادی و فتوولتاییک افزایش خواهد یافت (۱، ۶).

۱-۳- رد پای زیست‌محیطی^۳

از اواخر قرن هجدهم میلادی و با آغاز عصر صنعتی شدن، به ناگاه نرخ بهره‌کشی انسان از منابع طبیعی فزونی یافت و به گونه‌های ناپایدار، به دگرگونی طبیعت منجر شد. میزان استفاده انسان از زمین، منابع طبیعی و به خصوص آب و در عین حال میزان تولید ضایعات و پسماند به شدت و با نرخی غیرقابل جبران توسط طبیعت افزایش یافت. با این حال تنها از اواسط قرن بیستم بود که به تدریج، آسیب‌های وارد شده به محیط‌زیست به دغدغه‌ی انسان‌ها تبدیل شد. عبارت ردپای زیست‌محیطی، معیاری از میزان فشار انسان‌ها بر طبیعت تعریف می‌شود تا بتواند جنبه‌های گوناگون این فشار در حوزه‌های برداشت منابع، تولید و پراکنده‌سازی مواد ضایعات و مواد مضر و برداشت از سهم سایر گونه‌های طبیعی را پوشش دهد (۷). از مهم‌ترین مزیت‌های

ضریب ظرفیت یک نیروگاه، بیانگر مقدار انرژی تولیدی آن نیروگاه در حالت واقعی است، نسبت به مقدار انرژی تولیدی در همان نیروگاه، با این فرض که آن نیروگاه با تمام توان و به صورت تمام وقت فعالیت می‌کند. طبیعی است که به خاطر نوسان شدت تابش نور خورشید و چرخه‌های شب و روز، تابستان و زمستان، ابر و آفتاب و یا تغییر شدت وزش باد و غیره، این ضریب برای نیروگاه‌های فتوولتاییک و بادی در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای بسیار پایینتر باشد. اما با این وجود، باز هم الکتروسیته تولیدی توسط این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های وابسته به سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر قابل رقابت است. همچنین باید توجه داشت که انرژی‌های سبز، هم از آن جهت که وابستگی کمتری به منابع هیدروکربنی دارند و از منظر امنیت انرژی ارجح هستند و هم از جهت عوارض زیست‌محیطی بسیار اندکی که دارند، مورد حمایت‌های تعرفه‌ای دولت‌ها از جمله حمایت‌های مالیاتی هم هستند که همین امر حتی مطلوبیت قیمتی آنها را افزایش نیز می‌دهد (۴).

موضوع دیگر، میزان نفوذ انرژی‌های سبز، به عنوان نسل جدید فناوری‌های حوزه انرژی در بازار است. یکی از مدل‌های شناخته شده برای تخمین نرخ نفوذ یک فناوری جدید به جای یک فناوری قدیمی و جایگزین شدن آن، تابع لاجستیک ورهالست^۲ است. این مدل، روند افزایش سهم بازار فناوری جدید و کاهش سهم بازار فناوری قدیمی در طی زمان را پیش‌بینی می‌کند. تاکنون پیش‌بینی‌های موققی در

¹ Levelized cost of energy

² Verhulst

³ Environmental footprint

مناسب‌ترین منابع انرژی برای تولید نیروی الکتریسیته، با توجه به معیار ردپای آبی است.

۱-۳-۲- قانون بقای انرژی و گرم شدن زمین

اگر به موضوع انرژی و مصرف آن به صورت کلان نگریسته شود، می‌توان اصل بقای انرژی را برای کل سیاره اعمال کرد. کل انرژی وارد شده به زمین، شامل انرژی تابشی از سوی خورشید (انرژی دریافتی از سوی سایر اجرام آسمانی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است) حدوداً معادل 173000 TW است. حدود ۳۰٪ از این میزان با توجه به ضریب سپیدایی^۴ متوسط زمین، مستقیماً به فضا انعکاس داده می‌شود. باقی این انرژی توسط زمین جذب شده و نهایتاً به صورت انواع انرژی نظیر انرژی حرارتی، انرژی شیمیایی (با فتوسنتز و غیره) و انرژی امواج (باد و آب) در می‌آید. تمامی این انواع انرژی در کنار انرژی حاصل از سوختن و همچنین انرژی زمین‌گرمایی، نهایتاً به صورت حرارت در آمده و به شکل امواج فروسرخ ساطع می‌شوند. با افزایش نرخ مصرف انواع سوخت و همچنین گیاهان، میزان این انرژی که به صورت حرارت و امواج فروسرخ باید تخلیه شوند افزایش یافته است. این موضوع خطر گرم شدن زمین را در پی دارد. اول اینکه چرخه‌های تاریخی آب و هوایی سیاره‌ی زمین نشان می‌دهند که چرخه‌ی متناوب و تکرار شونده‌ای بین افزایش تابش انرژی از سطح زمین و انرژی تابیده شده از فضا به سطح زمین وجود دارد. از سوی دیگر، خود مصرف بیشتر انرژی، موازنه انرژی زمین را بر هم زده و می‌تواند موجب افزایش دمای زمین شود (۱).

جدول ۲: میزان ردپای آبی مصرفی کل (مشمول بر فرآیند تولید تجهیزات، بهره‌برداری از آنها و تامین سوخت واحد نیروگاهی) به ازای واحد تولید انرژی الکتریسیته از منابع انرژی مختلف (۹).

Table 2: The total amount of water footprint consumed (including the process of producing equipment, using them and supplying fuel to the power plant unit) per unit of electricity production from different energy sources (9).

Energy source	Total water footprint, including fuel supply, construction and operation (m^3/GWh)
Conventional oil	777 – 4464
Oil shale	1280 – 7990
Natural gas	273 – 4464
Coal	284 – 7560
Nuclear	72 – 5420
Hydro power	1090 – 3096000
Photovoltaics	27 – 1278
Wind	0.72- 42

⁴ Albedo

انرژی‌های سبز، کاهش ردپای زیست‌محیطی است. این موضوع در ادامه به شکل مفصل‌تری توضیح داده خواهد شد.

۱-۳-۱- ردپای آبی^۱

آب به عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای توسعه در جوامع انسانی از گذشته مطرح بوده است. با افزایش جمعیت و افزایش مطالبه انسان‌ها برای دستیابی به رفاه و سطح بالاتر بهداشت، تغذیه و انرژی، میزان مصرف آب در جوامع به سرعت رو به رشد نهاده است. در حال حاضر بیشترین مصرف آب در جهان مربوط به بخش کشاورزی است و پس از آن بخش صنعت-انرژی با ۲۰٪ مصرف آب جهانی، در رده‌ی دوم قرار دارد و البته بیشترین نرخ رشد مصرف آب در جهان مربوط به همین بخش است (۸). در گزارشی که آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۲) در سال ۲۰۱۲ منتشر کرد، پیشبینی کرد که میزان مصرف آب در بخش انرژی، در بازه‌ی بیست ساله منتهی به سال ۲۰۳۲، رشد بیش از ۸۵٪ را تجربه خواهد نمود (۹). این درحالیست که در حال حاضر نیز بخش بزرگی از جمعیت جهان تحت تنش آبی قرار دارند. در واقع بر اساس مطالعات صورت گرفته، بیش از دو سوم مردم جهان، حداقل یک بار در ماه با کمبود آب مواجه می‌شوند و بیش از نیم میلیارد نفر از جمعیت جهان، تمام سال را با کمبود آب روبرو هستند (۱). بنابر این در توسعه‌ی واحدهای تولید الکتریسیته، به عنوان مهم‌ترین گونه انرژی مصرفی در حال حاضر، باید به میزان ردپای آبی آنها توجه نمود. در سایه‌ی همین نوع نگاه است که مشخص می‌شود برخی گونه‌های انرژی تجدیدپذیر نظیر زیست‌سوخت‌ها^۳ که در سالیان گذشته به شدت مورد حمایت دولت‌ها نیز قرار گرفتند، میزان ردپای آبی مصرفی بسیار زیادی دارند که مطلوبیت زیست‌محیطی آنها را به شدت با تردید روبرو می‌سازد. در جدول ۲، ردپای آبی مصرفی واحد انرژی تولیدی در انواع واحدهای تولید الکتریسیته با هم مقایسه شده است. باید توجه داشت که میزان ردپای آبی، صرفاً مربوط به مرحله‌ی بهره‌برداری از واحد نیروگاهی نیست و بخشی از آب مصرفی، مربوط به فرآیند تولید تجهیزات نیروگاهی و همچنین فرآیند تولید و تامین سوخت احتمالی مورد نیاز آنها است. آنچه در این جدول مورد اشاره قرار گرفته، مجموع کل ردپای آبی مصرفی مربوط به هر یک از این نوع واحدها است. همانطور که مشخص است، نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در مقایسه با انواع نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ردپای آبی بسیار اندکی دارند. همچنین باید به نیروگاه‌های برق‌آبی به عنوان قدیمیترین منبع انرژی سبز نیز توجه کرد که میزان ردپای آبی بسیار بالایی دارد. و از سوی دیگر، انرژی خورشیدی یکی از

¹ Water footprint

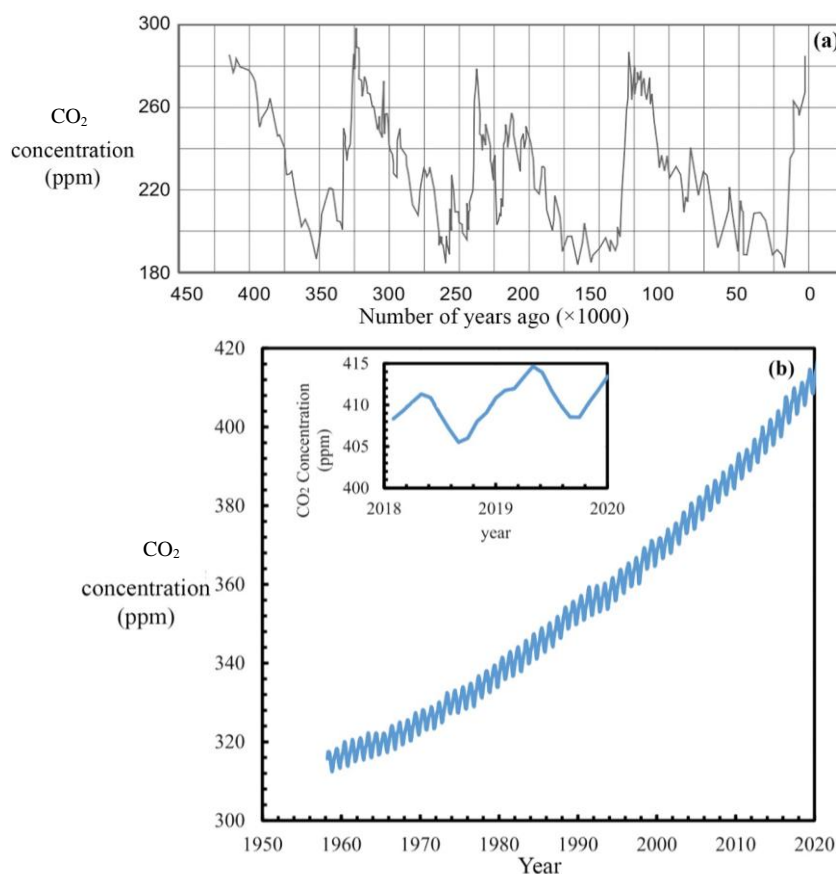
² International energy agency

³ Biofuels

۳-۳-۱- گازهای گلخانه‌ای

به هر صورت، تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، چه موجب افزایش و چه موجب کاهش دمای سیاره شود، نهایتاً بقای حیات در زمین و گونه‌ی انسان را با مخاطره مواجه خواهد ساخت. اما نکته اینجاست که با فعالیت‌های صنعتی گسترده بشر طی دو قرن گذشته، غلظت این گازها و مشخصاً دی‌اکسید کربن به بیشترین مقدار تاریخی خود در سطح سیاره زمین رسیده است. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، غلظت دی‌اکسید کربن در جو، طی نیم میلیون سال گذشته در بازه‌ی ۱۸۰-۳۰۰ ppm در نوسان بوده است. اما در حال حاضر نرخ افزایش این گاز در جو به شدت افزایش یافته به نحوی که مقدار آن از حدود ۳۱۵ ppm در سال ۱۹۵۰ میلادی، به حدود ۴۱۵ ppm در سال ۲۰۲۰ رسیده است که نسبت به سقف تاریخی پیشین نیز رشد چشمگیری نشان می‌دهد. این روند برای سایر گازهای گلخانه‌ای نیز قابل مشاهده است. در شکل ۵ روند تغییرات غلظت دو گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید نیتروژن و متان، که بعد از CO_2 ، بیشترین سهم را در بین گازهای گلخانه‌ای جو دارند نمایش داده شده است.

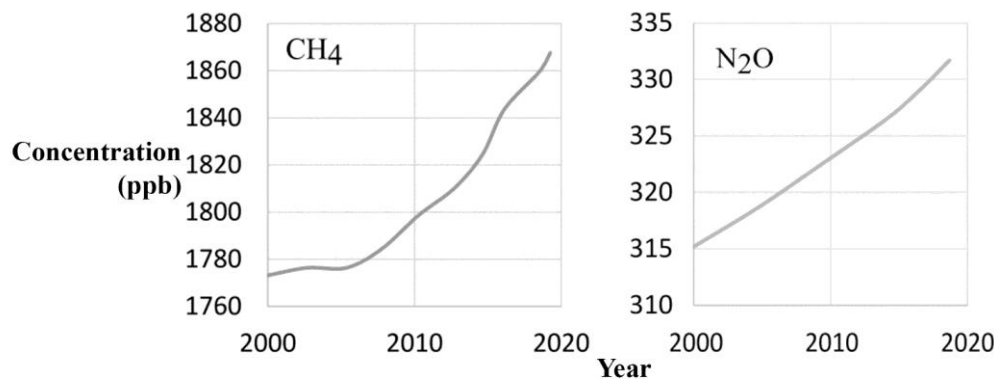
گازهای گلخانه‌ای به مجموعه‌ای از گازها در جو زمین گفته می‌شود که با جذب انرژی خورشید، ذخیره‌سازی آن و بازنشر آن در قالب امواج بلند فروسرخ (هم‌زمان به سمت فضا و به سطح زمین)، موجب حفظ دمای زمین و کاهش نوسانات دمایی آن می‌شوند. مهم‌ترین این گازها با اختلاف دی‌اکسید کربن است و بعد از آن گازهای متان، دی‌اکسید نیتروژن و ترکیبات فلئوئور قرار دارند. غلظت این ترکیبات در اتمسفر، برای حفظ الگوی دمایی و بوم‌شناسی زمین بسیار مهم است. افزایش غلظت این ترکیبات در جو، می‌تواند موجب گرم شدن و افزایش دمای زمین شود. هرچند که برخی پیشبینی‌ها حکایت از آن دارد که با عبور دمای زمین از یک مقدار مشخص، با افزایش تبخیر آب اقیانوس‌ها در مدارهای نزدیک به خط استوا و بارش آب تیخیر شده در قطب‌های زمین به صورت برف، ضریب سپیدایی زمین افزایش یافته و بخش بیشتری از انرژی خورشید را به خارج از جو منعکس می‌کند. همین امر، به وقوع عصر یخبندان جدیدی در عمر زمین منتج خواهد شد.



شکل ۴: روند تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن در جو (الف) طی دوره تاریخی بلند مدت ۴۲۰ هزار سال گذشته (۱۰) و

(ب) از ۱۹۵۸ تاکنون (داخل: از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰) (۱۱)

Figure 4: Changes in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere (a) during the long-term historical period of the last 420 thousand years (10) and (b) from 1958 until now (inset: from 2018 to 2020) (11).



شکل ۵: روند تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید نیتروژن و متان در جو، طی بازه‌ی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی (۱).

Figure 5: Changes in the concentration of greenhouse gases, nitrogen dioxide and methane in the atmosphere, during the period from 2000 to 2020 (1).

زمین گرمایی، مبداء انرژی‌شان خورشید است. بخشی از انرژی خورشید که به سطح زمین می‌رسد، به شکل باد، موج دریا و چرخه‌ی باران تبدیل می‌شود که می‌تواند توسط نیروگاه‌های بادی، برق‌آبی و غیره برداشت شود. بخشی نیز با فتوسنتز به شکل ساختارهای زیستی در می‌آید که می‌تواند به زیست‌سوخت و چوب برای سوزاندن تبدیل شود. بهره‌گیری مستقیم از انرژی خورشیدی اما ظرفیت بسیار زیادی برای تامین انرژی مورد نیاز جهان خواهد داشت. میزان انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد، در یک روز آفتابی و در آسمان صاف، به طور متوسط در حدود 1000 W/m^2 است که عدد بسیار بزرگی است. این انرژی به صورت امواج الکترومغناطیس به زمین می‌رسد. این امواج، محدوده‌ی بزرگی از طول‌موج‌ها از امواج گاما تا امواج رادیویی را شامل می‌شوند اما ۴۵٪ از کل این انرژی، در قالب امواج مرئی، به زمین می‌رسد.

چنانچه بتوان این منبع عظیم انرژی را به کار بست، می‌توان بخش زیادی از سبد انرژی مصرفی را به این نوع از انرژی سبز اختصاص داد. این موضوع به ویژه از آن جهت اهمیت دارد که کشور ایران، در منطقه‌ی جغرافیایی، با بیشترین میزان تابش سالیانه انرژی خورشید قرار گرفته است (شکل ۶). راه‌کارهای متفاوتی برای بهره‌برداری از این انرژی توسعه یافته که به طور کلی، یا از انرژی خورشید برای گرم کردن سیال و مشخصاً آب استفاده می‌کنند و یا اینکه انرژی دریافتی از خورشید را به شکل الکتریسیته درآورده و در طیف وسیعی از کاربردها از آن بهره می‌برند. استفاده حرارتی از انرژی خورشید، اگرچه سهولت بیشتری دارد ولی تنها در مصارف محدود و محلی قابل بهره‌برداری است و امکان انتقال انرژی به دست آمده نیز تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل توسعه‌ی واحدهای تولید نیروی فتوولتاییک جذابیت کاربردی، اقتصادی و صنعتی بسیار بیشتری دارند.

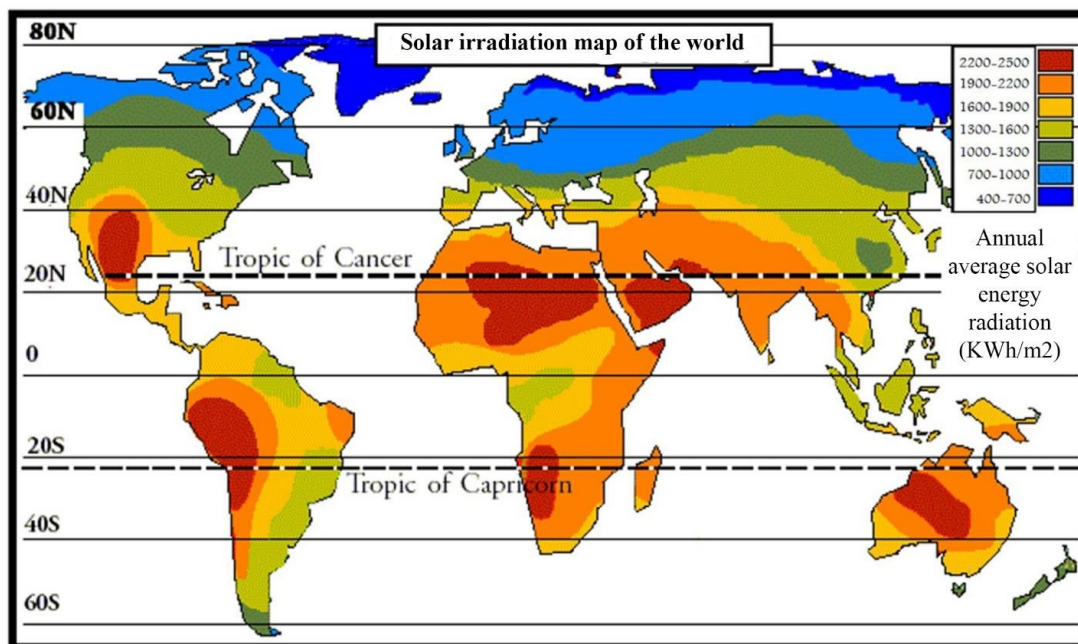
با توجه به ابعاد جهانی بحران تغییرات اقلیمی، و اینکه این تغییرات به حد غیرقابل چشم‌پوشی رسیده است، قوانین و پیمان‌های بین‌المللی متعددی - نظیر توافق پاریس - در حال شکل‌گیری است تا کشورهایی که به این تغییرات بی‌توجهی کنند را با تنبیه‌های جدی مواجه سازد. با توجه به اینکه بخش عمده‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و به خصوص دی‌اکسید کربن در جو ناشی از صنعت انرژی است، برای خلاصی از شر این تنبیه‌ها و همچنین عوارض ناشی از گرم شدن زمین، چاره‌ای جز اصلاح رویکرد در توسعه‌ی انرژی وجود ندارد.

۲- انرژی خورشید، منبع انرژی عظیم، پایدار، ارزان و در دسترس

همانطور که عنوان گردید، از زوایای گوناگون اقتصادی و هزینه‌ای، سیاسی و امنیتی و همچنین بوم‌شناسی و زیست محیطی، وضعیت انرژی در جهان بحرانی است و در نقطه‌ای است که باید به طور جدی و با فوریت به آن توجه نمود. رویکردهای گوناگونی برای مواجهه با این چالش مطرح شده که از راه‌های رادیکالی نظیر کاهش جهانی مصرف انرژی تا افزایش بهره‌وری صنایع و بهره‌گیری از منابع انرژی سبز را شامل می‌شود. تمامی راه‌کارهای علم‌یاتی اما بر افزایش سهم انرژی‌های سبز از سبد انرژی مصرفی جهان به عنوان یک شرط لازم تاکید دارند. در حال حاضر تنها در حدود ۱۳/۷ درصد انرژی مصرفی جهان از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود. از این میزان نیز، بیش از نیمی را زیست‌سوخت، چوب و نیروگاه‌های برق‌آبی تشکیل می‌دهند که به واسطه‌ی ردپای آبی زیاد و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطلوبیت کمتری در مقایسه با انواع انرژی‌های سبز نظیر خورشیدی، بادی و زمین‌حرارتی^۱ دارند.

بخش عمده انرژی که به سطح سیاره زمین می‌رسد، از خورشید است. تمامی انواع انرژی سبز و تجدیدپذیر، به استثناء انرژی

¹ Geothermal



شکل ۶: نقشه‌ی توزیع جغرافیایی میزان تابش انرژی خورشید (۱۲).

Figure 6: Map of the geographical distribution of solar radiation (12).

سایه‌ی کاهش قیمت تمام شده برق تولیدی به وسیله سامانه‌های فتوولتاییک بود که روند توسعه این ساختارها رشد فزاینده‌ای را تجربه کند.

شکل ۷ روند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی واحدهای تولید برق فتوولتاییک در جهان را طی سه دهه‌ی گذشته نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، این روند از سال ۲۰۰۲ به ناگه با یک جهش بسیار بزرگ روبرو شده است. این شیب تند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی واحدهای فتوولتاییک، به شکل فزاینده تا امروز ادامه یافته به نحوی که از ۱ گیگا وات در سال ۲۰۰۷ ظرف تنها ۱۳ سال، به بیش از ۶۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ رسیده است که نشان از یک افزایش خیره کننده دارد.

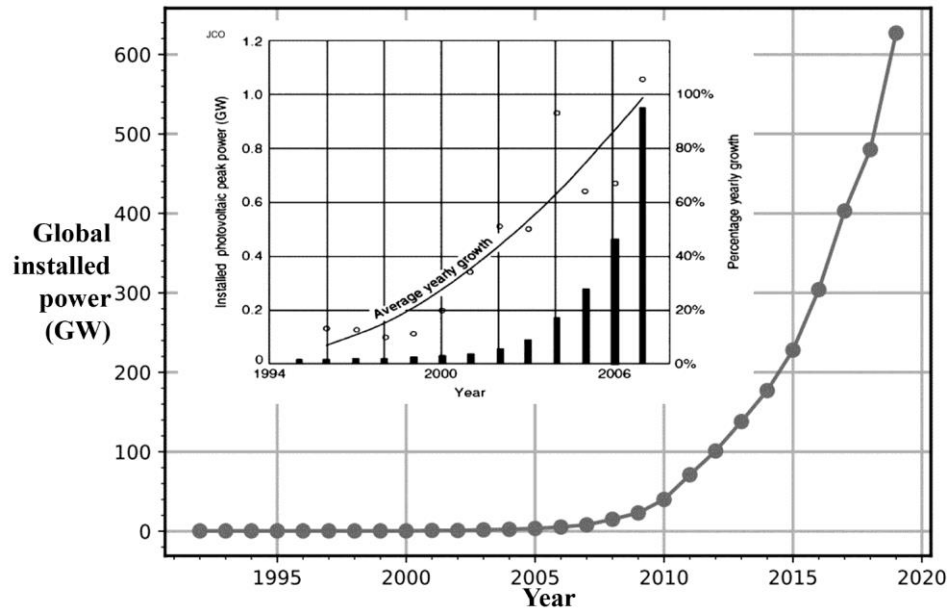
مهم‌ترین عامل این افزایش اقبال جهانی به فتوولتاییک‌ها، کاهش قیمت تمام‌شده‌ی برق تولیدی به وسیله‌ی آنها و افزایش بازده عملکرد آنها است. این روند به ویژه بعد از گسترش شدید نیروگاه‌های فتوولتاییک در چین شدت گرفته است. روند این تغییرات در کشور آمریکا از سال ۲۰۱۰ به بعد در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، به غیر از هزینه‌های نرم که مستقل از مسائل فنی است، قیمت ماژول^۱ صفحه فتوولتاییک، بیشترین سهم را از قیمت تمام شده برق فتوولتاییک تولیدی دارند.

¹ Module

۳- فتوولتاییک، تبدیل انرژی خورشید به انرژی کاربردی تر الکتریکی

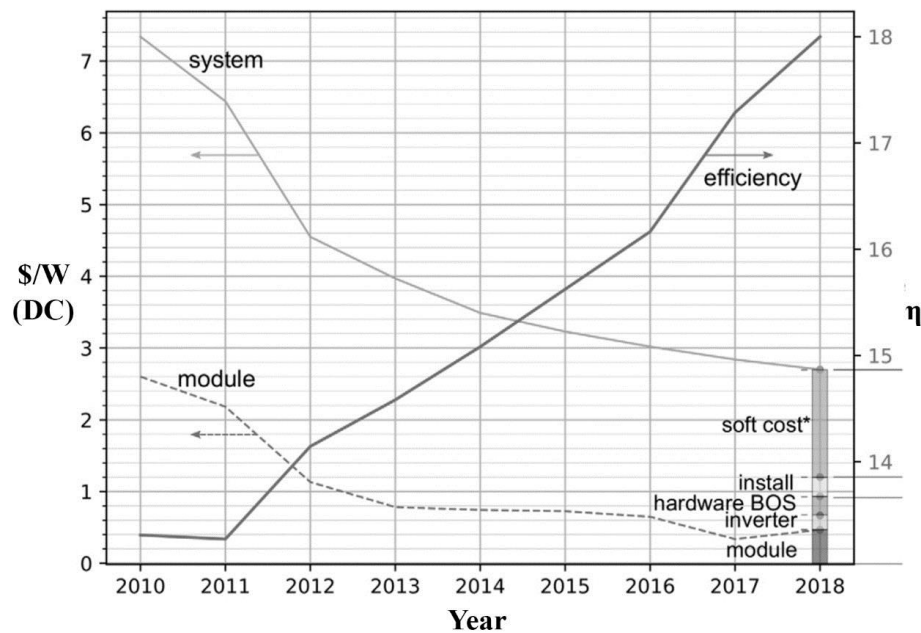
همانطور که پیشتر عنوان شد، عمده‌ی انرژی مصرفی امروز جهان در قالب الکتریسیته است. تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته نیز مهم‌ترین راهکار صنعتی-خانگی برای بهره‌برداری از انرژی خورشید است. این فرایند با سلول‌های فتوولتاییک صورت می‌پذیرد. سلول‌های فتوولتاییک یا سلول‌های خورشیدی سیستم‌هایی هستند که به طور مستقیم نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. مدت زیادی است که از این سلول‌ها در صنعت هوا فضا استفاده می‌شود و استفاده آن‌ها در ساعت و ماشین حساب برای همگان آشنا است. اما فناوری سلول‌های فتوولتاییک هزینه بر است و در گذشته استفاده از این فناوری محدود بود. اما با پیشرفت این سلول‌ها و به وجود آمدن نسل‌های جدید آن‌ها امید بیشتری در ترویج این فناوری ایجاد شده است (۱۴، ۱۳).

توسعه تولید الکتریسیته از انرژی خورشید تنها در صورتی می‌تواند رشد معنی‌دار داشته باشد که به لحاظ اقتصادی با انواع روش‌های دیگر تولید الکتریسیته قابل رقابت و نسبت به آنها برتری داشته باشد. به این ترتیب مهم‌ترین معیار مقایسه، قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی با فتوولتاییک‌ها یا همان LOCE است. در واقع مهم‌ترین مولفه‌ای که برای سنجش کارایی یک سامانه‌های فتوولتاییک باید مورد توجه قرار گیرد، نه مولفه‌هایی نظیر بازده تبدیل، بلکه قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی است. به همین دلیل، در



شکل ۷: روند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی فتولتائیک‌ها در جهان (۱).

Figure 7: The trend of increasing the installed capacity of photovoltaics in the world (1).



شکل ۸: روند تغییرات متوسط قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی توسط فتولتائیک و بازده این سامانه‌ها طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۸ در ایالات متحده‌ی آمریکا (منظور از هزینه نرم در قیمت تمام شده عبارت است از مالیات، نرخ بهره‌ی سالانه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه اخذ مجوز و ... است) (۱۵).

Figure 8: The trend of changes in the average cost price of electricity produced by photovoltaics and the efficiency of these systems during the years 2010-2018 in the United States (soft cost in the cost price means taxes, the annual interest rate of the initial investment, the cost of obtaining a permit, etc.) (15).

مطلوبیت اقتصادی، این رشد صنعت برق خورشیدی را میسر ساخته‌اند. چاپ سلول‌های خورشیدی، یکی از ابزارهای کارآمد و موثر برای کاهش هزینه تمام شده‌ی آنهاست. در ادامه، انواع روش‌های

توسعه‌ی نسل‌های جدید سلول‌های خورشیدی که بازده بالاتری دارند و در عین حال، ابداع روش‌های جدید و سریع‌تر تولید که قیمت تمام شده‌ی این سلول‌ها را کاهش می‌دهند، دو عامل اصلی هستند که موجب کاهش قیمت برق تولیدی شده‌اند و با افزایش

می‌گرفت، اما روش‌های مورد استفاده معمولاً پرهزینه است. علاوه بر این چون زوج الکترون و حفره در یک ماده تولید می‌شود و در همان ماده حمل می‌شود امکان باز ترکیب آن‌ها زیاد می‌باشد. برای رفع این نقص باید تک‌بلوری با خلوص بالا تهیه شود. لذا تهیه سلول‌های خورشیدی پیوند گاه p-n همیشه سخت و پرهزینه است. بنابراین محدودیت‌ها، نسل‌های جدیدی از سلول‌های خورشیدی شکل گرفت که منجر به ساخت سلول‌های خورشیدی نسل سوم که شامل سلول‌های لایه نازک، مانند سلول‌های حساس شده به مواد رنگزا و سلول‌های پلیمری شدند. در این دسته از سلول‌ها بیشتر از از مواد آلی و پلیمری استفاده می‌گردد (۱۷، ۱۸).

در انواع دیگر سلول‌های خورشیدی نظیر سلول‌های خورشیدی حساس شده با مواد رنگزا (DSSC)، سازوکاری متفاوت ولی کماکان مبتنی بر جدایش الکترون‌ها و حفره‌ها بر اثر دریافت فوتون‌های انرژی بیش از کاف نوار و جریان یافتن آنها در مدار الکتریکی برقرار است.

۳-۲- نسل‌های مختلف سلول‌های فتوولتاییک

سلول‌های خورشیدی را به طور کلی بر اساس ساختارشان به سه دسته می‌توان تقسیم نمود. سلول‌های خورشیدی پیوندگاه n-p و یفر سیلیکون به سلول‌های خورشیدی نسل اول معرف هستند و رایج‌ترین نوع سلول‌های خورشیدی می‌باشند.

¹ Acceptor level

² Donor level

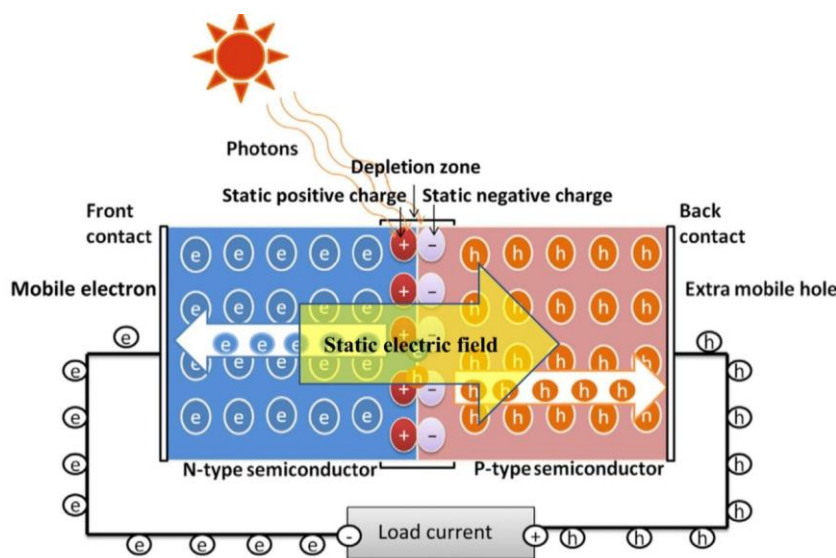
³ Band gap

چاپی که برای ساخت سلول‌های فتوولتاییک مورد استفاده قرار گرفته‌اند به اختصار اشاره شده است.

۳-۱- سازوکار کلی سلول‌های فتوولتاییک

هنگامی که دو نیمه‌رسانای نوع n و p در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، در محل تماس این دو نیمه‌رسانا، الکترون‌های نیمه‌رسانای n وارد تراز پذیرنده^۱ در نیمه‌رسانای p شده و بار مثبت ایستا بر جای می‌گذارد. از سوی دیگر، در نیمه‌رسانای p نیز حفرات وارد تراز دهنده نیمه‌رسانای n^۲ می‌شوند و بار منفی ایستا بر جای می‌گذارند. این لایه‌ی دوگانه الکتریکی یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که با انتقال مقدار مشخصی بار، این میدان به اندازه‌ای بزرگ می‌شود که جلوی انتقال بیشتر الکترون‌ها و حفرات بین دو نیمه‌رسانا را می‌گیرد. این میدان الکتریکی اما نقش حیاتی در انتقال بارها در مدار خارجی این اتصال p-n را ایفا می‌کند. هنگامی که نور خورشید به این اتصال p-n تابیده می‌شود، چنانچه انرژی فوتون‌هایی که با این اتصال p-n برخورد می‌کنند به اندازه کافی - یعنی بیش از کاف نوار^۳ این اتصال - بزرگ باشد، می‌تواند الکترون‌ها را وارد نوار رسانش نماید که در نتیجه یک حفره نیز در نوار ظرفیت تشکیل می‌دهد. این دو حامل بار، تحت اثر میدان الکتریکی پیش گفته، در دو جهت مخالف حرکت کرده و در مدار خارجی جریان می‌یابند. به همین ترتیب انرژی خورشید به جریان الکتریسیته بدل می‌شود. این ساز و کار در شکل ۹ نمایش داده شده است.

این سازوکار، در انواع سلول‌های خورشیدی، نسل اول و دوم برقرار است. به طور کلی در نسل اول و دوم سلول‌های خورشیدی اصول کار بر اساس تشکیل پیوندگاه p-n استوار بود، بنابر این تلاش‌های انجام شده مبنی بر تولید یک پیوندگاه مناسب صورت



شکل ۹: توصیف تصویری سازوکار کلی سلول‌های فتوولتاییک نسل اول (۱۶).

Figure 9: Schematic description of general mechanism of the first generation photovoltaic cells (16).

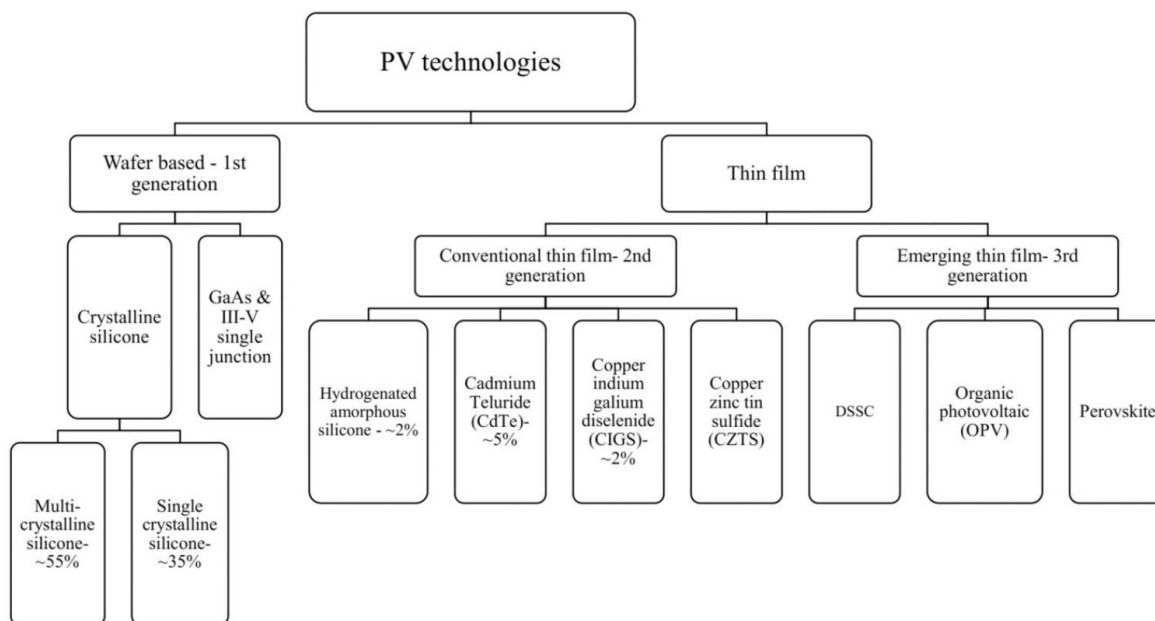
مدل‌های تجاری بازده ۱۴ درصد را از خود نشان داده‌اند. علی‌رغم قیمت بالا و روش‌های ساخت مشکل، سلول‌های سلیکونی در بازار پیشتانزد (۱۷، ۱۸).

نسل دوم سلول‌های خورشیدی را سلول‌های خورشیدی لایه نازک شکل می‌دهند. ساختارهای به کار رفته در این دسته از سلول‌ها به واسطه‌ی جذب بالایی که در محدوده‌ی تابش نور خورشید دارند، می‌توانند در ضخامت‌های بسیار کمتری در مقایسه با سلول‌های نسل اول ساخته شوند. این دسته از سلول‌های خورشیدی ضخامت‌ی بین چندصد نانومتر تا چند ده میکرون دارند و گونه‌های متفاوتی نظیر کادمیم تلورید (CdTe)، سلیکون بی‌شکل، سولفید مس روی قلع (CZTS) و غیره در این دسته قرار می‌گیرند. این دسته از سلول‌های خورشیدی بازدهی تبدیل انرژی کمتری در مقایسه با سلول‌های خورشیدی سلیکونی تک‌بلوری دارند ولی قیمت آنها بسیار پایین‌تر است. نسل سوم سلول‌های خورشیدی که آنها هم از نوع لایه نازک هستند، شامل انواع DSSC، سلول‌های آلی، سلول‌های هیبرید آلی- معدنی نظیر سلول‌های پروسکایتی^۲ و سلول‌های نقطه کوانتومی هستند (۱۲). در شکل ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تقسیم‌بندی انواع نسل‌های سلول‌های خورشیدی و منحنی رادار مقایسه‌ی جنبه‌های مختلف عملکردی و اقتصادی آنها قابل مشاهده است.

¹ Doped

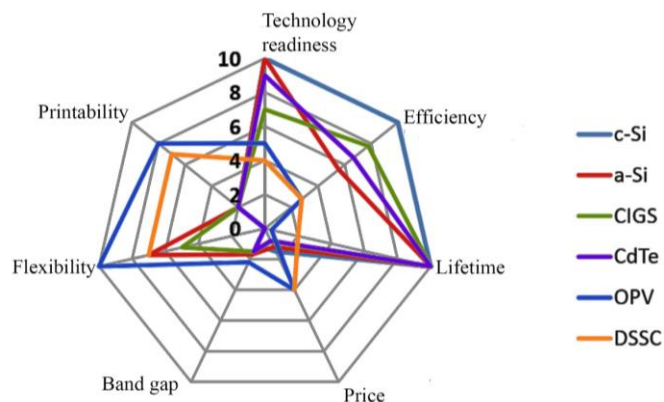
² Provkite

برای ساخت این نوع از سلول‌های خورشیدی از سلیکون آلییده^۱ استفاده می‌شود. ظاهر این دسته از سلول‌ها به رنگ پوشش ضدانعکاسی آنها بستگی دارد. این پوشش‌ها محدوده نوری را که می‌تواند به سلول راه پیدا کند، مشخص می‌کنند و طراح سلول با انتخاب رنگ مورد نظر مقدار نور ورودی را تنظیم می‌کند. رنگ آبی به دلیل بازده بالا رایج‌ترین رنگ است و سلول‌های خورشیدی با رنگ‌های دیگر نسبت به آن بازده پایین‌تری دارند. این خانواده از سلول‌های خورشیدی به دو دسته تک‌بلوری و چند بلوری تقسیم می‌شوند (۱۹، ۱۷). سلیکون تک‌بلوری به لحاظ تاریخی مرسوم‌ترین ماده برای تهیه سلول‌های خورشیدی است و بیشترین آزمایش‌ها برای استفاده در صنایع الکترونیک روی آنها انجام شده است. این نوع از سلول‌ها کارآمدترین و در عین حال گران‌ترین نوع از سلول‌های خورشیدی می‌باشند و استفاده از آنها در فضاهایی که از نظر مساحت دچار مشکل هستند توصیه می‌شوند. سلول‌های خورشیدی تهیه شده از تک بلورهای سلیکون، در آزمایشگاه‌ها بازده ۲۴ درصدی و در صنعت به بازده ۱۵ درصدی رسیده‌اند. سلول‌های تک بلوری سلیکون بین ۲۰ تا ۲۵ سال پایدار هستند و مهم‌ترین - و نه تنها- مشکل آنها در گران بودن قیمت آنها است (۱۷، ۱۹). سلول‌های خورشیدی چند بلوری سری دیگری از سلول‌های خورشیدی ویفر سلیکونی نسل اول هستند که نسبت به سلول‌های تک بلوری از قیمت ارزان‌تر برخوردار هستند. علت این اختلاف قیمت در نحوه تهیه آنها می‌باشد، اما این سری از سلول‌های خورشیدی با وجود قیمت پایین‌تر، از بازده کمتری نیز دارند. در این نوع سلول‌ها نمونه‌های آزمایشگاهی بازده ۱۸ درصدی و



شکل ۱۰: نسل‌های مختلف سلول‌های فتوولتائیک به همراه سهم تقریبی هر یک از آنها از کل بازار (۱۲، ۲۰).

Figure 10: different generations of photovoltaic cells along with the approximate share of each of them in the total market (12, 20).



شکل ۱۱: منحنی مقایسه‌ی کیفی ابعاد مختلف فنی و اقتصادی نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی (۲۱).

Figure 11: Qualitative comparison curve of different technical and economic dimensions of different generations of solar cells (21).

ارزان قیمت انعطاف‌پذیر به روش R2R^۳ را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، با بهره‌گیری از زیرآیندهای انعطاف‌پذیر، همچنین می‌توان دوام قطعه‌ی الکترونیکی را افزایش داد. همین عوامل سبب شده تا آینده‌ی روشنی پیش روی این حوزه باشد، به نحوی که تخمین زده می‌شود حجم بازار جهانی الکترونیک چاپی تا سال ۲۰۲۷ به بیش از ۷۳ میلیارد دلار (۲۲) و تا سال ۲۰۳۵ به بیش از ۳۰۰ میلیارد دلار (۲۳) برسد که رقم قابل توجهی است (۲۴).

دستیابی به عملکرد چاپی مناسب و تولید قطعات الکترونیک چاپی با مشخصات مطلوب (هدایت الکتریکی، شفافیت نوری، پایداری حرارتی، انعطاف‌پذیری، امکان تا شدن و پایداری در برابر خم شدن‌های مکرر)، مستلزم انتخاب دقیق روش چاپ، ماده‌ی رسانا، فرمول‌بندی جوهر و زیرآیند خواهد بود.

برای استفاده از هریک از روش‌های چاپ برای اعمال مواد موظف^۴، باید فرمول‌بندی جوهر، متناسب با آن روش چاپ، تنظیم و بهینه‌سازی شود. به عنوان مثال، جوهرهای چاپ جوهرافشان، باید زمان انبارداری طولانی مدت و پایداری مناسب در داخل چاپگر داشته باشند، از چسبندگی مناسب به زیرآیند برخوردار باشند، کمترین آسیب را به چاپگر وارد کنند و در عین حال از وضوح چاپ مناسبی برخوردار باشند. بنابراین، باید ویژگی‌هایی نظیر، خاص رئولوژیکی، کشش سطحی، تر کنندگی و میزان چسبندگی به زیرآیند در آنها به دقت کنترل شود (۲۵). به عنوان مثال در روش چاپ جوهرافشان، جوهر رسانا باید کاملاً الزامات یک جوهر رسانای مناسب چاپ گرافیکی را دارا باشد. جوهر باید رفتار نیوتونی، با گرانروی در حدود ۱-۱۵ cP و کشش سطحی ۷-۲۰ dyne/cm داشته باشد (۲۶). این مولفه‌ها، کاملاً بر فرمول‌بندی جوهر تاثیرگذارند و تعیین کننده‌ی نوع و میزان اجزاء در فرمول‌بندی و به ویژه جزء عملگر رسانا هستند. چیزی که بر این پیچیدگی می‌افزاید،

همانگونه که در شکل ۱۱ به اختصار نمایش داده شده است، در سلول‌های خورشیدی نسل سومی DSSC و OPV، علیرغم آنکه طول عمر سلول به شدت کاهش پیدا کرده که همین امر موجب افزایش هزینه تولید انرژی در این دسته از سلول‌های خورشیدی شده است، اما مزیت بزرگی که در این دسته از سلول‌ها وجود دارد، امکان تولید به روش‌های ساده‌ی چاپی و همچنین امکان دستیابی به سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر است که می‌تواند بر روی بستری که در نسل‌های قبلی امکان‌پذیر نبود نیز آنها را نصب کرد.

۳-۳- الکترونیک چاپی، ابزاری مناسب و روزآمد برای تولید سلول‌های فتوولتائیک

«الکترونیک چاپی^۱»، فناوری ساخت تجهیزات الکترونیکی با روش‌های مرسوم چاپی نظیر چاپ اسکرین، اُفت و جوهرافشان است. چاپ تجهیزات در حوزه‌ی الکترونیک چاپی با استفاده از جوهرهای موظف^۲ با عملکرد الکتریکی ویژه و بر روی زیرآیندهایی نظیر کاغذ، پلاستیک و منسوجات صورت می‌پذیرد. الکترونیک چاپی، در حال حاضر یکی از حوزه‌های به شدت در حال رشد در زمینه علم و فناوری مواد به شمار است. آینده‌ی الکترونیک چاپی، به طور مشخص به قطعات الکترونیکی انعطاف‌پذیر دوبعدی و سه‌بعدی، با قابلیت حمل آسان، قابلیت تا شدن و طول عمر زیاد گره خورده است. این موضوع با توجه به روند رو به رشد تعداد مقالات چاپ شده در زمینه‌ی الکترونیک انعطاف‌پذیر، طی ۱۰-۱۵ سال گذشته، قابل تایید به نظر می‌رسد. انعطاف‌پذیری قطعات الکترونیکی، به مفهوم قابلیت این قطعات برای خم و تا شدن مکرر و در عین حال، حفظ عملکرد قطعه است. این ویژگی، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های الکترونیک جدید است که قابلیت ساخت قطعات الکترونیکی پوشیدنی و همچنین تولید ساختارهای الکترونیکی با ابعاد بزرگ، بر روی زیرآیندهای

³ Roll-to-roll

⁴ Functional Materials

¹ Printed electronics

² Functional inks

تولیدی توسط آنها، این موقعیت ممتاز را به این دسته از سلول‌های بخشیده‌اند. فرایند تولید سلول‌های خورشیدی بلوری سیلیکونی، یک فرایند پیچیده و چند مرحله‌ای است که از تولید سیلیکون فلزی خالص یا شمش^۴ سیلیکون آغاز شده و با شکل‌دهی آن، پردازش سطح، دوپ کردن و تشکیل اتصال n-p، و همچنین فلزی‌سازی^۵، سوزاندن و نهایتاً ساخت ماژول ادامه پیدا می‌کند (۳۲). در مرحله‌ی فلزی‌کردن، اتصالات فلزی در پشت و جلوی سلول خورشیدی تشکیل می‌شوند که وظیفه جمع‌آوری و انتقال حامل‌های بار یا همان الکترون‌ها و حفره‌ها را در مدار خارجی و به عبارت دیگر، تکمیل مدار الکتریکی را بر عهده دارند. این اتصالات به طور معمول با استفاده از روش چاپ اسکرین و با استفاده از جوهرهای حاوی ذرات فلزی انجام می‌شود (۳۳). در این فرایند برای تشکیل اتصالات فلزی بر روی سلول، معمولاً از خمیر نقره و در پشت سلول معمولاً از خمیر آلومینیم استفاده می‌شود. تلاش‌های زیادی در این مسیر برای کاهش میزان استفاده از ذرات فلزی و به ویژه نقره و همچنین افزایش سرعت تولید صورت گرفته است. همچنین مطالعات زیادی برای کاهش بهینه‌سازی عرض این اتصالات و کاهش مقاومت اتصال صورت گرفته است (۳۴، ۳۳) زیرا با افزایش عرض، مقاومت انتقال بار کاهش می‌یابد ولی از سوی دیگر، سایه ناشی از این الگوهای فلزی، موجب کاهش جذب نور می‌شود.

مرور جامع استفاده از روش‌های چاپی در تولید سلول‌های خورشیدی، بسیار مفصل خواهد بود و در یک مقاله‌ی مجزا صورت خواهد پذیرفت، اما در اینجا به اختصار به انواع سلول‌های خورشیدی، مزیت‌ها و محدودیت‌های هر کدام، کاربردهای مناسب برای هر یک، امکان استفاده از روش‌های چاپی در تولید آنها و همچنین پیش‌بینی روند آینده هر دسته مورد اشاره قرار خواهد گرفت.

لزوم استفاده از مقادیر بالای ذرات رسانا یا نیمه‌رسانای موظف در فرمول‌بندی این جوهرها است که هم عملکرد الکتریکی آنها حفظ شود و هم خواص یک جوهر مناسب را تامین کنند (۲۷). در ادامه مشخصاً به استفاده از روش‌های چاپی در ساخت فتوولتائیک‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۴- انواع روش‌های چاپی برای تولید سلول‌های فتوولتائیک

تاکنون روش‌های چاپی متنوعی برای تولید سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است. از میان آنها، چاپ اسکرین و inkjet پیشرو هستند ولی در کنار آنها، روش‌های چاپی فلکسوگرافی (۲۸)، گراور و حتی افست نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌های چاپی، از جهت نوع فرآیند، مشخصات جوهری که امکان اعمال آن را دارند و همچنین محدودیت‌های ابعادی که امکان چاپ آن را دارند، ویژگی‌هایی دارند که آنها را برای استفاده در بخشی از الکترونیک چاپی و سلول‌های خورشیدی مناسب می‌سازند. در جدول ۳، به ویژگی‌های هر یک از این روش‌های چاپی اشاره شده است. برای انتخاب روش چاپ مناسب در هر کاربرد، موارد طرح شده در این جدول اثرگذاری جدی دارند. به عنوان مثال، چنانچه تولید مدارهای چاپی مورد نظر باشد که در آنها وضوح چاپ و عرض خطوط چاپی بسیار مهم هستند، باید از روش‌های چاپی با وضوح بالاتر نظیر چاپ جوهرافشان استفاده کرد. البته باید توجه داشت در مدارهای میکروالکترونیکی، وضوح بسیار بالاتری مورد نیاز خواهد بود که در این موارد باید از روش‌های دیگر چاپی که مشخصاً برای همین منظور توسعه یافته‌اند استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به لیتوگرافی نوری^۱، E-Jet^۲ و AJP^۳ اشاره کرد (۲۷).

۳-۴-۱- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری

علیرغم توسعه‌ی سریعی که در نسل‌های جدید سلول‌های خورشیدی رخ داده است، اما هنوز هم بازیگر اصلی این صنعت، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری هستند. بلوغ فنی حاصل شده در این سلول‌ها، در کنار طول عمر بالا و همچنین قیمت ارزان‌تر انرژی

جدول ۳: مقایسه مشخصات جوهر و مشخصات ابعاد قابل چاپ الکترونیکی با روش‌های مختلف چاپی (۲۹-۳۱).

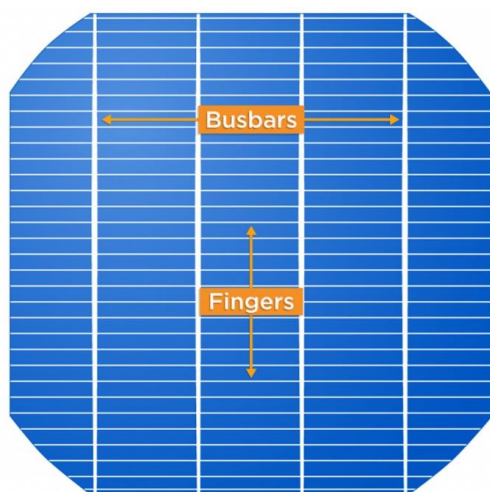
Table 3: Comparison of ink characteristics and limitations of electronic printable dimensions with different printing methods (29-31).

Printing method	Ink viscosity (Pa.S) (29)	Printing thickness (μm) (29)	Printing width (μm) (28)	Resolution (μm) (28)	Printing rate (m ² /S) (30)
Offset	1 – 10	0.5 – 2.5	10	80	0.4 – 40
Screen	0.5 – 5	< 12	30 – 50	100	0.008 – 10
Flexography	0.05 – 0.2	0.8 – 1	45 – 100	50	0.2 – 20
Gravure	0.05 – 0.2	0.8 – 1	10 – 50	30	0.1 – 70
inkjet	0.005 – 0.02	< 0.5	30 – 50	20	0.001 – 3

به صفر می‌رسد (۳۸، ۳۹). با توجه به اینکه هنوز هم سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بازیگر اصلی حوزه فتولتائیک‌ها هستند، به نظر می‌رسد کماکان این دسته از جوهرهای رسانای اسکرین، بیشترین سهم را از بازار جوهرهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی برخوردار باشند.

۳-۴-۲- سلول‌های خورشیدی لایه نازک نسل دومی

سلول‌های خورشیدی نسل اول یا همان سیلیکون بلورها، ضخامت بالایی دارند و اصطلاحاً پایه ویفری^۱ هستند. ضخامت معمول این سلول‌ها در حال حاضر حدود ۱۸۰ میکرون است که البته تلاش‌ها برای کاهش این میزان ادامه دارد.

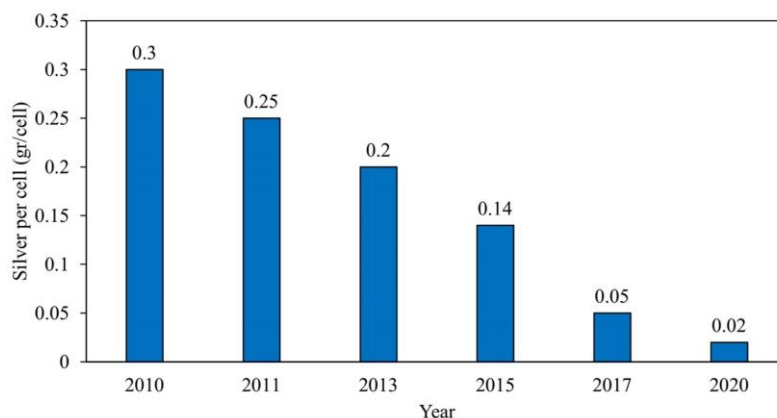


شکل ۱۲: موقعیت باسبارها و انگشتان در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی.
Figure 12: the position of busbars and fingers in silicon solar cells.

¹ Wafer-based

بعد از این مرحله، سلول در داخل کوره‌ای با دمای بسیار بالا قرار داده می‌شود تا اجزاء آلی جوهر رسانای اعمال شده بسوزد و تفجوشی آنها هم با موفقیت انجام پذیرد. به این ترتیب مسیرهای رسانایی بر روی سطح جلویی و پشتی سلول تشکیل می‌شوند که در واقع همان busbarها و انگشت‌ها هستند (شکل ۱۲). جوهرهایی رسانایی که در مرحله فلزی‌سازی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حال حاضر حجم بازاری در حدود ۱/۸ میلیارد دلار دارند. با توجه به سهم بسیار بالای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی از بازار سلول‌های خورشیدی، این جوهرها بیشترین سهم را از بازار جوهرهای مورد استفاده در ساخت انواع سلول‌های خورشیدی دارند. علاوه بر این، با پیشرفت‌هایی که در توسعه و بهبود این جوهرها پدید آمده، حجم بازار جوهرهای رسانای مورد استفاده در فلزی‌سازی این سلول‌ها، یک جهش را پیش روی خود دارند. پیشرفت‌هایی که در این زمینه پدید آمده عمدتاً در سه حوزه زیر است.

۱. افزایش دقت چاپ و کاهش کمینه عرض الگوهای قابل چاپ توسط این جوهرها. با توجه داشت که فلزی‌سازی، بخشی از سطح سلو خورشیدی را می‌پوشاند و جلوی دریافت نور در آن نقاط را می‌گیرد. لذا چنانچه بتوان با کاهش عرض باسبارها و انگشتان، انتقال بار و هدایت الکتریکی مناسبی را تامین کرد، بازده سلول افزایش پیدا می‌کند (۳۵، ۳۶).
۲. کاهش میزان نقره موجود در این جوهرها و همچنین استفاده از نانوذرات نقره به جای پرک نقره (۲۸، ۳۷). به این ترتیب هم جرم سلو کاهش می‌یابد و هم قیمت ساخت آن که هر دو مطلوب است. در شکل ۱۳ روند تغییرات میزان نقره موجود در این جوهرها طی سالیان گذشته قابل مشاهده است (۲۱).
۳. ایجاد مسیرهای انتقال بار شفاف. به این ترتیب، ضمن حفظ عملکرد سلول، عملاً میزان پوشانده شدن سطح سلول به واسطه فلزی شدن



شکل ۱۳: روند تغییرات میزان مصرف نقره در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به تفکیک سال (۲۱).
Figure 13: Changes in the amount of silver used in silicon solar cells by year (21).

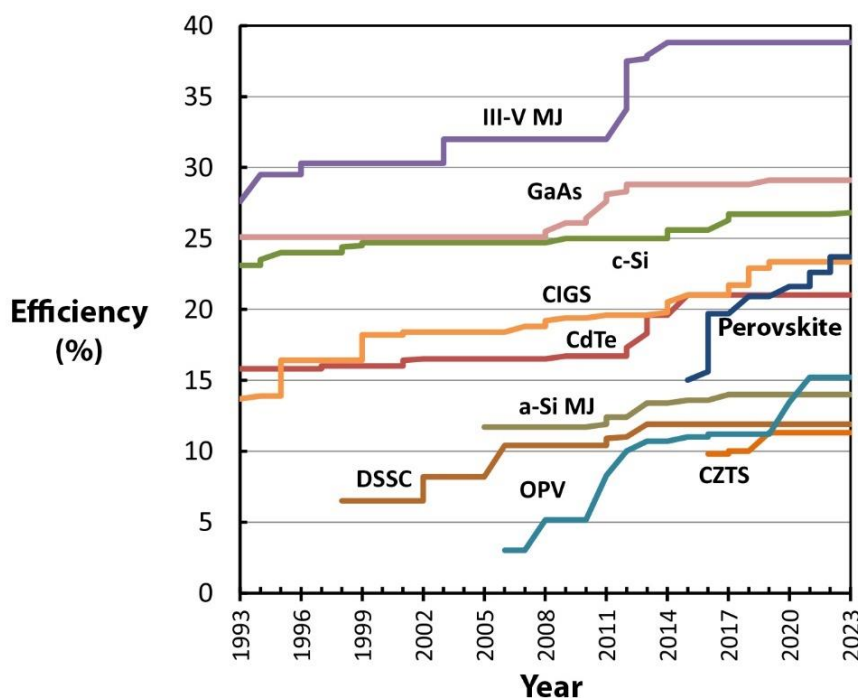
می‌دهند، بازده بسیار بالا و بیش از ۴۷٪ را نیز تامین می‌کنند، اما هزینه ساخت این دسته از سلول‌ها به اندازه‌ای زیاد است که تنها آنها را برای استفاده در کاربردهای خاص فضایی توجیه‌پذیر می‌کند (۴۳). مقایسه بازده نسل‌های مختلف سلول خورشیدی و روند پیشرفت آنها طی سال‌های گذشته در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

از روش‌های چاپی در ساخت بخش‌های مختلف این دسته از سلول‌ها استفاده شده است. لایه جاذب نور در سلول‌های خورشیدی نسل دوم، از مواد نیمه‌رسانای ترکیبی نظیر مس-گالیم-ایندیم-سلنید یا کادمیم-تلورید تشکیل شده که عمدتاً به روش‌هایی تحت خلاء نظیر CVD^1 و PVD^2 بر روی زیرآیند مورد نظر اعمال می‌شوند. این روش‌ها پر هزینه هستند و مصرف بالای انرژی در این فرآیندها، با یکی از اهداف اصلی استفاده از سلول‌های خورشیدی که همان کاهش ردپای زیست‌محیطی است در تضاد است. به همین دلیل روش‌های چاپی گوناگونی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از چاپ اسکرین جوهرهای حاوی پیشسازهای نیمه‌رساناهای ترکیبی (۴۴) و یا نانوذرات این نیمه‌رساناها (۴۵) اشاره کرد.

¹ Chemical vapor deposition

² Physical vapor deposition

سلول‌های نسل دومی ضخامت بسیار کمتر و از مرتبه چند میکرون دارند و به همین دلیل به آنها سلول‌های لایه نازک گفته می‌شود. با توجه به اینکه در ساخت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، به سیلیکون خالص نیاز خواهد بود که قیمت بالایی دارد، ۲۵٪-۲۰٪ هزینه ساخت سلول‌ها خورشیدی سیلیکونی مربوط به تامین همین جزء است. با توجه به ضخامت بالای این سلول‌ها، هزینه تمام شده این نسل از سلول‌های خورشیدی زیاد خواهد بود. لذا، در تلاش برای کاهش قیمت این دسته از سلول‌های خورشیدی، تلاش برای توسعه‌ی مواد نیمه‌رسانا با قابلیت جذب نور بالاتر تشدید شد که همین امر به توسعه‌ی نسل دوم سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی نیمه‌رساناهایی نظیر سیلیکون بی‌شکل و غیره انجامید (۴۱، ۴۰). در نسل دوم سلول‌های خورشیدی، تنها کمتر از ۲٪ هزینه ساخت سلول مربوط به نیمه‌هادی به کار رفته در آن است (۲۰). این سلول‌ها مزایایی از جمله انعطاف‌پذیری بیشتر در مقایسه با سلول‌های نسل اول و همچنین وزن کمتر دارند (۴۲) اما بازده آنها کمتر و مقاومت آنها در برابر رطوبت و شرایط محیطی پایین‌تر است. همین امر سبب شده است که کماکان هزینه تمام شده‌ی انرژی تولیدی به وسیله‌ی سلول‌های نسل اول کمتر باشد و بیش از ۹۰٪ بازار را در اختیار داشته باشند (۲۰). البته در سلول‌های خورشیدی لایه نازک تشکیل شده از نیمه‌رساناهای ترکیبی و به ویژه ترکیبات گروه‌های ۳ و ۵ جدول تناوبی که اصطلاحاً سلول‌های خورشیدی III-V را تشکیل



شکل ۱۴: روند رشد بیشترین بازده تایید شده‌ی انواع سلول‌های خورشیدی طی سی سال گذشته (۴۳).

Figure 14: Highest confirmed efficiencies for cells, fabricated using the different technologies shown (43).

این لایه عبارت است از ایجاد شرایط مناسب برای جمع‌آوری و انتقال بهتر حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) که از جذب نور در لایه جذب نور ایجاد می‌شوند (۵۴، ۵۳). ترکیب این لایه معمولاً سولفید کادمیوم، سولفید روی، اکسید روی یا سولفید ایندیوم (In_2S_3) است و به روش لایه نشانی شیمیایی حمامی (CBD^2) اعمال می‌شود (۵۵). در یک نمونه از تلاش‌هایی که برای اعمال این لایه به روش چاپی صورت گرفته، یک مرکب جوهرافشان پایه الکلی حاوی تیاور و نیترات ایندیوم تهیه و به روش جوهرافشان بر روی لایه‌ی جذب CIGS اعمال شد و مشخص شد که بازده سلول نهایی، مشابه سلول CIGS استاندارد، با لایه بفری سولفید کادمیم اعمال شده به روش CBD مشابه است (۵۶). در پژوهشی دیگر نیز که مرکب جوهرافشان بر پایه‌ی آب/الکل و حاوی پیش‌سازهای مشابه تهیه شده بود نیز نتایج مشابهی به دست آمد. علاوه بر اینکه مشخص شد که آماده‌سازی سطح لایه‌ی CIGS به با استفاده از آن، با بهبود ترشوندگی سطح زیرآیند، بازده را حتی بهبود نیز می‌بخشد (۵۷).

در سلول‌های لایه نازک نیز مانند سلول‌های سیلیکونی، نهایتاً نیاز به مسیرهای رسانایی در پشت و جلوی سلول خواهد بود که انتقال حامل‌های بار در مدار خارجی را صورت دهند. به همین منظور در سلول‌های CIGS به طور معمول بر روی الکتروود شفاف رویی، یک ساختار دولایه از بخار فلزات آلومینیم و نیکل پوشش داده می‌شود تا جمع‌آوری بار را صورت دهد. تلاش‌هایی برای جایگزینی این لایه با ساختار مشابه انگشتان و باسبارها در سلول‌های سیلیکونی انجام شده است. این ساختارها می‌توانند با چاپ اسکرین و یا ریزش مستقیم^۳ جوهر انجام شود (۵۸). همچنین از چاپ جوهرافشان مرکب حاوی پیش‌سازهای نقره - نظیر نیترات نقره - بر روی سطح و در ادامه تفجوشی آنها انجام شده که نتایج مناسبی را به دنبال داشته. همچنین مشخص شده که فرمول‌بندی مرکب مورد استفاده و به ویژه کشش سطحی، ریخت ذرات نقره‌ی مورد استفاده، نوع حلال مورد استفاده، بر میزان هدایت در نقطه‌ی اتصال و همچنین مقاومت سطحی و نهایتاً بازده سلول کاملاً اثرگذار است (۵۹). البته تلاش‌های بعدی برای چاپ مستقیم نانوذرات پایدار شده‌ی نقره، توانست حتی هدایت الکتریکی و مقاومت در نقطه اتصال مطلوب‌تری را نیز تامین کند (۶۰).

۳-۴-۳- سلول‌های خورشیدی نسل سومی

۳-۴-۳-۱- DSSC

در سلول‌های نسل سومی DSSC، اساس کار بر جذب نور توسط ماده رنگزای جذب شده بر روی سطح نانوذرات TiO_2 و انتقال الکترون

الته در این پژوهش‌ها، یا فرآیند تولید همراه با مراحل خطرناک و پیچیده بوده و یا اینکه بازده سلول‌های به دست آمده پایین و در حد کمتر از ۵٪ بوده است که همین امر سبب شده استفاده از این روش‌ها در تولید سلول‌های خورشیدی نسل دومی هنوز محدود به فعالیت‌های پژوهشی و آزمایشگاهی باشد.

استفاده از چاپ جوهرافشان نیز برای چاپ لایه‌ی جذب از نیمه‌رساناهای ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. ساخت لایه جذب در سلول‌های خورشیدی CIGS، با استفاده از مرکب‌های جوهرافشان حاوی نمک‌های فلزات مس، گالیم و ایندیوم، با نسبت استوکیومتری توسعه یافتند. از سیستم‌های حلالی مختلفی نظیر حلال‌های الکلی-تری (۴۶، ۴۷) و یا آبی (۴۸) استفاده شد که البته و پس از چاپ، لایه چاپی در اتمسفر بخار سلنیم و در دمای بالا تاب‌کاری^۱ می‌شود تا ساختار بلوری مد نظر حاصل شود (۴۹). دمای نوع پایه حلال و همچنین سایر اجزا فرمول‌بندی چاپ، تاثیر زیادی بر عملکرد سلول چاپی نهایی داشتند. کیفیت تر شدن سطح زیرآیند، میزان خارج شدن حلال‌ها، میزان باقیماندن خاکستر اجزاء آلی و لیگندهای نمک‌های فلزی، بر نحوه‌ی شکل‌گیری و رشد ساختار بلوری و به تبع آن، عملکرد و بازده سلول تولید شده‌ی نهایی تاثیرگذارند. به نحویکه اصلاح این موارد می‌تواند منجر به افزایش بازده سلول CIGS نهایی که لایه‌ی جذب در آن به روش جوهرافشان اعمال شده، بازده سلول را از حدود ۵٪ (۴۶) به بیش از ۱۱٪ (۴۷) افزایش می‌دهد. در سلول‌های CZTS نیز لایه‌ی جذب به روش جوهرافشان اعمال شده است. در پژوهش‌های متعددی، از نمک‌های فلزی مس، روی و قلع به همراه ترکیبات گوگرد، مرکب جوهرافشان بر پایه‌ی DMSO توسعه یافته است و با اعمال بر روی زیرآیند مورد نظر و فرارگیری در دمای بالای ۲۵۰ درجه، ساختار بلوری مورد نظر حاصل شده است (۵۱، ۵۰). البته مشخص شده است که ذر این نوع از لایه‌ی جذب نیمه‌رسانای ترکیبی، وجود ترکیباتی نظیر NaF می‌تواند به بهبود ساختار بلوری، یکنواختی آن، انتقال بار و نهایتاً افزایش بازده نهایی سلول کمک کند (۵۲). در حال حاضر بازده سلول‌های CZTS با لایه‌ی جذب چاپ شده به روش جوهرافشان در حدود ۶٪ است و تلاش برای بهبود عملکرد، از طریق اصلاح فرمول‌بندی جوهر، رتولوزی جوهر، نسبت اجزاء پیش‌ساز فلزی در داخل فرمول‌بندی، دمای خشک کردن سلول و همچنین وارد کردن جزئی ترکیبات فلزی دیگر ادامه دارد (۵۱).

تلاش‌هایی نیز برای اعمال لایه‌ی بافر در سلول‌های لایه نازک نسل دوم، به روش جوهرافشان صورت گرفته است. لایه بافر در سلول‌های خورشیدی لایه‌ای نازک عبارت است از یک لایه نیمه‌هادی میانی که در میان لایه جذب نور و الکتروود شفاف قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی

² Chemical bath deposition

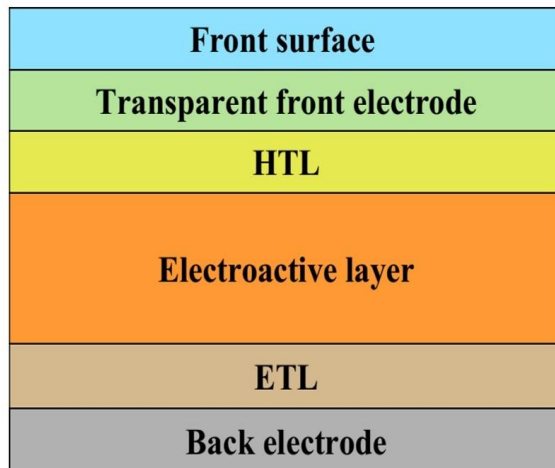
³ Direct dispensing

¹ Annealing

واسطه‌ی سهولت فرایند و همچنین هزینه کمتر، می‌تواند بسیار سودمند باشد.

۳-۴-۳-۲-OPVها

سلول‌های خورشیدی آلی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده‌اند. عامل جلب توجه پژوهشگران به این دسته از سلول‌های خورشیدی، انعطاف‌پذیری، سبک بودن، ارزان قیمت بودن و فرآیند تولید بسیار ساده و ارزان قیمت آنها است. این سلول‌ها از یک ساختار چند لایه تشکیل شده‌اند که به ترتیب عبارتند از زیرآیند شفاف که می‌تواند انعطاف‌پذیر و یا سخت باشد، الکتروود جلویی (معمولاً از جنس FTO یا ITO^۴، لایه‌ی انتقال حفره (HTL^۵)، لایه‌ی جاذب نور که از ترکیبات آلی تشکیل شده، لایه‌ی انتقال دهنده الکترون (ETL^۶) و الکتروود پشتی که فلزی و معمولاً از جنس طلا، پلاتین و یا نقره است (شکل ۱۵) لایه فعال نوری که از دو بخش اصلی دهنده الکترون - که معمولاً ترکیبات پلیمری ذاتا رسانا هستند - و پذیرنده الکترون - که معمولاً ترکیبات کربنی فولرنی هستند - تشکیل شده‌اند. با تابش نور به این لایه، زوج الکترون-حفره‌هایی در این لایه تشکیل و از هم تفکیک می‌شوند. الکترون از طرق ETL به الکتروود پشتی و حفره از طریق HTL به الکترون جلویی می‌روند (۷۱، ۷۰). این لایه‌ها در ضخامت بسیار پایین اعمال می‌شوند و استفاده از روش‌هایی نظیر پوشش‌دهی دورانی^۷ برای اعمال آنها، هدر رفت بسیار زیاد مواد، سرعت تولید پایین و آلاینده‌ی محیطی قابل توجهی را به دنبال دارد (۷۲).



شکل ۱۵: توصیف تصویری چینش کلی لایه‌ها در OPVها (۷۱، ۷۰).

Figure 15: Schematic description of layers alignment in OPVs (70, 71).

⁴ Indium tin oxide

⁵ Hole transporting layer

⁶ Electron transporting layer

⁷ Spin coating

تهییج یافته به نوار رسانش این ذرات نیمه رسانا و نهایتاً انتقال آن به الکتروود است. همچنین به یک الکتروولیت برای تکمیل چرخه و احیاء مجدداً ماده‌ی رنگزا جهت ادامه چرخه‌ی جذب نور و انتقال الکترون است (۶۲، ۶۱). البته در گونه‌های دیگری از سلول‌های خورشیدی که ساختار کلی مشابه DSSCها دارند، از مواد فعال نوری زیستی و باکتری‌ها برای جذب فوتون و انتقال الکترون به نوار رسانش TiO₂ استفاده می‌شود (۶۳).

اعمال لایه نازک فتو الکتروود از نانوذرات TiO₂، با روش‌های مختلف چاپی نظیر اسکرین و چاپ جوهر افشان و همچنین روش‌های شبه چاپی نظیر doctor blade انجام گرفته است. اخیراً در یک کار مقایسه‌ای، دو روش چاپ اسکرین و doctor blade برای اعمال لایه‌ی نازک ذرات TiO₂ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، سلول‌های DSSC که لایه فتوالکتروود آنها با روش اسکرین چاپ شده بود، بازده ۶/۷۲٪ داشتند که در مقایسه با بازده ۴/۸۶٪ سلول ساخته شده با روش doctor blade، بازدهی بهتری بود (۶۴). البته از روش چاپ جوهرافشان نیز برای ساخت این لایه استفاده شده است که مشخص شده محدودیت چاپ جوهرافشان در اعمال جوهرهای با گرانروی بسیار پایین، مستلزم استفاده از مقادیر زیادی از محمل برای دستیابی به گرانروی به اندازه کافی پایین است و همین امر، موجب می‌شود که پس از مرحله‌ی تاب‌کاری، چسبندگی مناسبی بین این لایه و الکتروود رسانای شفاف ایجاد نکند که همین امر میزان بازترکیبی بارها در داخل فتوالکتروود را افزایش می‌دهد (۶۵). به همین دلیل، روش‌های چاپی جدیدتری ابداع شده‌اند که بتوانند این مشکل را مرتفع سازند. به عنوان مثال، روش DMD^۱ که به نوعی تلفیق چاپ جوهرافشان و چاپ سه‌بعدی است و می‌تواند جوهرهایی با گرانروی‌های بسیار زیاد را نیز اعمال کند. در پژوهشی، لایه‌ی فتوالکتروود را به دو روش چاپ اسکرین و چاپ DMD اعمال کردند و مشخص شد که لایه‌ی چاپ شده به روش DMD، در عین داشتن ضخامت کمتر، بازدهی بالاتری را به واسطه ریخت و شکل بهینه تامین کرده می‌کند (۶۶). استفاده از روش چاپ جوهرافشان برای ساخت الکتروود مخالف^۲ نیز گزارش شده است که توانسته بازدهی سلول مشابه با سلولی که الکتروود مخالف در آن به روش معمول لایه‌نشانی انجام شده تامین کند (۶۷، ۶۸). در ادامه، با اعمال جوهر رسانای حاوی نانولوله‌هایی کربنی بر روی شیشه‌ی FTO^۳ در ساخت الکتروود مخالف، حتی توانستند بازده بالاتری در مقایسه با سلول دارای الکتروود مخالف معمولی به دست آورند (۶۹). استفاده از روش چاپ جوهرافشان برای ساخت الکتروود مخالف در ساخت DSSCها، به

¹ Direct material deposition

² Counter electrode

³ Fluorine doped tin oxide

همچنین عرض و ارتفاع آنها بهینه‌سازی شود، نهایتاً بازده بالای ۱/۶٪ حاصل شد (۷۹).

استفاده از روش‌های چاپی برای ایجاد لایه‌ی HTL نیز گزارش شده است. در یک نمونه از این پژوهش‌ها، لایه‌ی PEDOT:PSS، در قالب یک جوهر فلکسوگرافی آب‌پایه با فرمول‌بندی متشکل از PEDOT، PSS، اتیلن گلاکول، ایزوپروپیل الکل، آب، سطح فعال‌ها و غیره، به روش چاپ فلکسوگرافی بر روی لایه‌ی فعال نوری قرار گرفت. در این پژوهش، لایه‌ی فعال نوری هم به روش چاپ گراور اعمال شده بود و الکتروپشتی نیز از جنس اکسید روی و زیر آیند نیز کاغذ بود. به این ترتیب، یک سلول خورشیدی انعطاف‌پذیر، عاری از اجزاء گران‌بها نظیر ITO، و به صورت تماماً چاپی به دست آمد که نهایتاً بازده حدود ۱/۳٪ را ارائه می‌کرد (۸۰). روش چاپ جوهرافشان هم برای ایجاد این لایه گزارش شده است. در یک نمونه از این پژوهش‌ها، مرکب جوهرافشان آب‌پایه، حاوی پیش‌سازهای PEDOT:PSS، گلیسرین، بوتیل گلیکول و مواد سطح فعال، بر روی زیرآیند ITO چاپ شدند تا لایه‌ی HTL را شکل دهند. آنها توانستند با بهینه‌سازی فرمول‌بندی بازدهی حدود ۳/۱۶٪ را به دست آورند (۸۱). در ادامه مشخص شد که شرایط چاپی نیز نقش مهمی در یکنواختی لایه‌ی اعمالی PEDOT:PSS بر روی ITO دارد. با تنظیم بهینه‌ی دمای سطح زیرآیند و همچنین فاصله‌ی پاشش قطرات جوهر، بافتار سطحی یکنواخت‌تر و به تبع آن انتقال موثرتر حفره و بازدهی بالاتر سلول حاصل می‌شود (۸۲). با این وجود، پایداری کم ساختار PEDOT:PSS سبب شده است که تلاش‌هایی برای یافتن جایگزین مناسب برای این لایه صورت بگیرد. در همین راستا، یکی از جایگزین‌های مطرح برای PEDOT:PSS، اکسید نیکل است. مرکب جوهرافشان حاوی نانوذرات NiO، بر روی بستر الکتروود ITO اعمال شده است. به منظور بهبود تر شونده‌گی سطح الکتروود و یکنواختی لایه‌ی نازک چاپی NiO (ضخامت فیلم خشک حدود ۱۸ nm)، سطح زیرآیند با استفاده از ازون اصلاح شد. نهایتاً سلول خورشیدی به دست آمده، شفافیت بسیار بالای ۸۹٪ از خود نشان می‌داد و با بازدهی ۳/۶٪، عملکردی مشابه سلول متناظر استاندارد داشت که HTL آن به روش پوشش‌دهی چرخشی اعمال شده بود (۸۳).

اعمال لایه جاذب نور در OPV‌ها، با استفاده از روش‌های چاپی نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است (۸۴، ۸۵). در یک پژوهش، توانستند با استفاده از چاپ اسکرین پایه حلال، لایه فعال متشکل از دو پلیمر رسانای دهنده و پذیرنده‌ی الکترون، بازده کل سلول حدود ۴/۵٪ را به دست آورند. آنها همچنین توانستند با استفاده از مزیت ذاتی روش‌های چاپی و از جمله چاپ اسکرین که همان کنترل بالا بر روی الگوی چاپی است، سلول‌ها را به صورت سری چاپ کنند و به این ترتیب ولتاژ مطلوب را که در حالت عادی و با استفاده از تک‌سلول قابل استحصال نبود را به دست بیاورند (۸۶). چاپ گراور

به همین دلیل از روش‌های مختلف چاپی و یا روش‌های مشابه آن نظیر slot die ساخت این دسته از سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود (۷۳). استفاده از روش‌های چاپی و با سرعت بالا برای ساخت این نوع سلول‌ها ممکن است. مهم‌ترین نکته در رابطه اعمال لایه‌های مختلف OPV‌ها، تکرار پذیری، ثبات فرآیند، امکان اعمال لایه‌ای یکنواخت و بدون نقص و ترک، با سرعت بالا، در مقیاس وسیع و هزینه کم است. تمامی این موارد در کنار یکدیگر، استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت این دسته از سلول‌های خورشیدی را توجیه‌پذیر می‌سازد (۷۴).

استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت الکتروودهای سلول خورشیدی آلی، در پژوهش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از روش slot die برای ساخت OPV‌ها نخستین بار توسط Krebs در دانشگاه فنی دانمارک انجام شد. وی موفق شد تمامی لایه‌های یک سلول آلی را با روش slot die و بدون نیاز به لایه‌نشانی تحت خلاء اعمال کند. وی همچنین موفق شد الکتروود رسانای پشتی از جنس نقره را با استفاده از جوهر slot die حاوی نانوذرات نقره، به عنوان جایگزین الکتروودهای ITO استفاده کند. اگرچه این پژوهش به ساخت سلول‌هایی با بازدهی بسار پایین حدود ۰/۳٪ منجر شد، ولی امیدواری بسیاری را برای استفاده موفق از روش‌های چاپی در ساخت OPV برانگیخت (۷۵). از چاپ اسکرین هم برای ساخت الکتروودها استفاده شده است. انواع جوهر اسکرین حاوی نانوذرات نقره برای ساخت الکتروود پشتی توسعه یافتند. در یکی از این پژوهش‌ها مشخص شد که جوهر اسکرین پایه حلال در مقایسه با جوهرهای اسکرین پایه آب و پخت شونده با UV، عملکرد ضعیفتری دارد (۷۶). از چاپ اسکرین مرکب پایه نقره هم برای اعمال مسیره‌های رسانا برای جایگزینی الکتروود جلویی ITO استفاده شده که البته در استفاده از این جوهرها، باید الگوی چاپ هم به شکلی بهینه‌سازی شود که بتواند هم جمع‌وری بار را به نحو موثری انجام دهد و هم اینکه بیش از اندازه بر روی سطح سلول ایجاد سایه نکند (۷۷). به عنوان مثال در یکی از پژوهش‌ها تلاش شد تا الکتروود جلویی ITO، با استفاده از یک لایه‌ی رسانای PEDOT:PSS^۱ و شبکه‌ی رسانا از جنس نقره، که با چاپ اسکرین قابل اعمال است جایگزین شود و مشخص شد که با یک الگوی مشخص که کمتر از ۸٪ سطح سلول را پوشش می‌دهد، می‌توان عملکردی معادل سلول مشابه حاوی الکتروود ITO را به دست آورد (۷۸). از روش چاپ فلکسوگرافی نیز برای اعمال جوهرهای حاوی نانوذرات نقره به منظور ایجاد این مسیره‌های رسانا استفاده شده است. با بهینه‌سازی الگوی چاپی این مسیره‌های رسانا به نحوی که فاصله خطوط از هم و

^۱ Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)

البته علیرغم تمامی این موارد، هنوز هم با توجه به عمر کمتر سلول‌های خورشیدی آلی (۹۴) که در شکل ۱۱، نیز نمایش داده شده است، قیمت انرژی تولید شده با این سلول‌ها قابل رقابت با سلول‌های فعلی موجود در بازار نیست و برای اینکه بتوان از این سلول‌ها به صورت گسترده در صنعت انرژی استفاده کرد، باید باز هم توسعه آنها و به ویژه افزایش طول عمر آنها کار شود (۹۶، ۹۵).

۳-۴-۳- سلول‌های پروسکایتی

پیدایش سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، حکم یک نفس تازه را برای حوزه‌ی فناوری سلول‌های خورشیدی داشت و از زمانی که نخستین بار، استفاده از پروسکایت به عنوان لایه فعال نوری در سلول‌های خورشیدی مطرح شد، به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. این سلول‌ها، به روش‌های ساده‌تری در مقایسه با سلول‌های معمول سیلیکونی قابل تولید هستند، هزینه تولید کمتری دارند، با روش‌های قابل ساخت در مقیاس وسیع و با سرعت بالا سازگارند و برای تولید آنها به روش‌های انرژی‌بر نیازی نیست و به همین دلیل ردپای محیط زیستی کمی بر جای می‌گذارند. بازدهی این دسته از سلول‌های خورشیدی نیز به واسطه‌ی ضریب جذب بالای پروسکایت در محدوده طول موج نور مرئی و همچنین نرخ بالای انتقال بار در این ساختار زیاد است. این مزیت‌های ذاتی پروسکایت با تلاش‌های محققان برای توسعه‌ی سلول‌های خورشیدی همراه شد و به همین سبب، بازده آنها از زمانی که برای نخستین بار مطرح شدند (۹۷) از حدود ۳/۳٪، به نزدیک ۲۴٪ در حال حاضر افزایش یابد (۴۳) که کاملاً قابل رقابت با سلول‌های خورشیدی سیلیکون ویفری است. علاوه بر این، این دسته از سلول‌های خورشیدی می‌توانند به صورت شفاف تولید شوند و بر روی زیرآیندهای انعطاف‌پذیر هم اعمال شوند و به این ترتیب امکان استفاده از آنها در کاربردهایی نظیر الکترونیک پوشیدنی^۳ و یا پنجره‌های خورشیدی فراهم است که استفاده از سلول‌های سیلیکونی در آنها امکان‌پذیر نیست (۹۸). تمامی این موارد، موجب شده است که بسیاری از محققین، شانس بالایی را برای این دسته از سلول‌های خورشیدی به عنوان مهم‌ترین بازیگر آینده‌ی سلول‌های خورشیدی قائل باشند. البته در این مسیر چالش‌هایی نیز وجود دارند که از آن جمله می‌توان به حساسیت پروسکایت به رطوبت و نور که عمر این سلول‌های را کاهش می‌دهد، وجود مقدار قابل توجه سرب در ساختار پروسکایت که مخاطرات سلامت و زیست‌محیطی را به دنبال دارد و دستیابی به روش‌های ارزان قیمت، پایدار و تکرارپذیر برای تولید مهم‌ترین آنهاست (۹۹).

نیز برای اعمال لایه‌ی فعال نوری در OPVها مورد استفاده قرار گرفته. کاپولا^۱ و همکارانش از شاخص‌ترین افراد در استفاده از چاپ گراور برای تولید OPV هستند. آنها توانستند مرکب حلال پایه گراور، حاوی اجزا دهنده و پذیرنده الکترون در لایه فعال نوری را توسعه داده و با استفاده از آن و همچنین چاپ لایه HTL متشکل از PEDOT:PSS، ماژول‌های چندگانه از سلول‌های خورشیدی با بازده کل ۱/۶-۱/۹٪ بسازند (۸۷). آنها همچنین توانستند ارتباط موثری بین ریخت‌سطحی لایه فعال نوری و بازده کل سلول بیابند و با بهینه‌سازی فرمول‌بندی جوهر سلول واحدی با بازده کل ۲/۸٪ نیز با روش چاپ گراور تهیه کنند (۸۸). همچنین چاپ هر سه لایه ETL، HTL و لایه فعال نوری به روش گراور نیز صورت گرفته است. در این پژوهش، با بهینه‌سازی انرژی سطحی هر لایه و به تبع آن، برهم‌کنش بین سطحی این سه لایه با یکدیگر و همچنین با الکترودهای جلویی و پشتی، با سرعت بالای ۴۰ متر بر دقیقه، سلول‌های خورشیدی تولید شد که بازدهی حدود ۰/۶٪ داشتند (۸۹). از چاپ جوهرافشان هم برای ایجاد لایه‌ی فعال نوری استفاده شده است. بهینه‌سازی ترکیب حلالی در مرکب جوهرافشان این لایه بسیار مورد توجه بوده است. به خاطر حلالیت بسیار اندک پلیمرهای دهنده و ترکیبات فولرنی گیرنده الکترون در این لایه، عموماً از حلال‌های هالوژنه و به ویژه کلروبنزن در این جوهرها استفاده شده است (۹۰). همچنین تلاش شده است تا از ترکیبات و نسبت‌های مختلف دهنده و گیرنده الکترون در این لایه استفاده شود و با همین رویکرد، بازدهی سلول تا ۳/۸٪ نیز گزارش شده است (۹۱). باید توجه داشت که به ویژه در سلول‌های آلی BHJ، الگوی جدایش فازی و ریخت که به تبع آن حاصل می‌شود، کاملاً بر عملکرد نهایی سلول اثرگذار است. به همین دلیل نیز بهینه‌سازی ترکیب حلالی به منظرو دستیابی به ریخت مناسب کاملاً مورد توجه است. به عنوان مثال در یکی از این پژوهش‌ها، بخشی از کلروبنزن به عنوان حلال اصلی جوهر، با یک حلال دیر تبخیر نظیر اکتان‌دی‌تیول، دی‌کلروبنزن یا کلروفتالین جایگزین گردید. همین امر منجر به بهبود ریخت نهایی و افزایش بازدهی سلول شد، به نحویکه حتی بازده سلول با فرمول‌بندی حلالی بهینه، بازده حدود ۳/۷۱٪ را نشان داد که در مقایسه با سلول ساخته شده به روش پوشش دهی دروانی با بازدهی ۲/۷۹٪ هم عملکرد بسیار بهتری داشت (۹۲). همچنین به منظور اصلاح گرانروی و بهبود چاپ پذیری، پلیمرهای با جرم مولکولی بالا نظیر پلی‌استایرن وارد فرمول‌بندی شدند این کار اگرچه چاپ‌پذیری را بهبود داد، ولی به واسطه‌ی ایجاد یک فاز سوم در لایه‌ی فعال نوری و در سطح تماس این لایه به لایه‌ی بعد، انتقال بار را با اختلال مواجه کرده و نهایتاً به کاهش ۲۰٪ بازدهی سلول انجامید (۹۳).

¹ Kopola

² Bulk heterojunction

³ Wearable electronics

با توجه به تخریب حرارتی پروسکایت در دماهای بالا، این امکان در مورد پروسکایت وجود ندارد (۱۰۶). با این وجود، در یک پژوهش، از روش چاپی فلکسوگرافی برای چاپ لایه HTL در سلول پروسکایتی استفاده شد. در این پژوهش، سعی شد تا به جای استفاده از ترکیبات پلیمری برای تنظیم خواص رئولوژیکی، با کنترل ترکیب حلالی و همچنین نسبت حل شونده و حلال، رئولوژی کنترل شود و نهایتاً با یک فرآیند حرارت‌دهی خیلی کوتاه و سریع آن اجزاء پلیمری نیز از ساختار خارج شوند. به این ترتیب سلول پروسکایتی با بازده بیش از ۱۵٪ حاصل شد (۱۰۷).

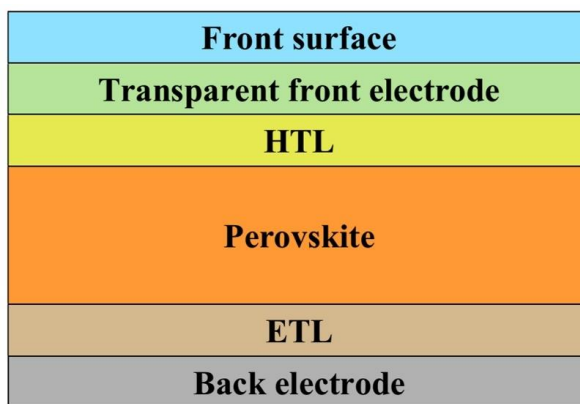
در میان روش‌های چاپ تماسی، چاپ گراور با توجه به گرانروی جوهر پایین که دارد، ظرفیت مناسبی برای استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی پایه پروسکایتی دارد. در یکی از نمایان‌ترین پژوهش‌ها که در این زمینه صورت گرفته است، یک فرآیند چاپ گراور برای ساخت سلول پایه پروسکایتی در مقیاس پیلوت گزارش شد که طی آن، پیش‌سازهای پروسکایت سه‌کاتیونی به روش گراور بر روی الکتروود ITO چاپ شد و فیلم چاپی، با عبور از داخل یک حمام حاوی ضدحلال بوتیل آمین و نهایتاً تاب‌کاری^۱ حرارتی، به ریخت و ساختار بلوری مورد نظر رسید. به این ترتیب سلول خورشیدی پروسکایتی با بازده بسیار مناسب ۱۹/۱٪ با سرعت بالا و در مقیاس نیمه‌صنعتی تولید شد (۱۰۸).

روش‌های چاپ جوهرافشان به طور گسترده برای چاپ لایه فعال نوری در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در یکی از نخستین گزارشات ثبت شده در این حوزه، مرکب جوهرافشان حاوی پیش‌ساز ساختار پروسکایتی متیل‌آمونیم، تری‌یدید سرب (MAPbI_3)، یعنی متیل‌آمونیم مونیو یدید (MAI)، به همراه ترکیبات کربنی به عنوان استخراج‌کننده حفرات پایه کربنی تهیه شد. جوهر مورد اشاره پس از اعمال در حضور یدید سرب (PbI_2) ساختار بلوری MAPbI_3 را ایجاد کرد که توانست بازده کل سلول معادل ۱۱/۶٪ را به دست دهد (۱۰۹). همچنین مشخص شد که ساختار بلوری پروسکایت تشکیل شده، کاملاً بر عملکرد نهایی آن اثرگذار خواهد بود. به همین جهت، در پژوهشی دیگر، فرمول‌بندی مرکب جوهر افشان و وارد کردن افزودنی‌های اصلاح‌کننده ساختار بلوری پروسکایت و همچنین دمای سطح الکتروود تیتانی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، در مرکب جوهرافشان بر پایه بوتیرولاکتون، علاوه بر پیش‌سازهای MAI و PbI_2 ، افزودنی متیل مونیو کلرید آمونیم (MACl) نیز وارد شد. همچنین دمای سطح الکتروود نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که با بهینه‌سازی مقدار حضور افزودنی MACl و همچنین دمای زیرآیند (حدود 50°C)، می‌توان به ساختار بلوری مناسبی از پروسکایت دست یافت

ساختار کلی سلول‌های پروسکایتی، بسیار شبیه به سلول‌های خورشیدی آلی است. این سلول‌ها از یک ساختار چند لایه تشکیل شده‌اند که به ترتیب عبارتند از زیرآیند شفاف که می‌تواند انعطاف‌پذیر و یا سخت باشد، الکتروود جلویی (معمولاً از جنس FTO یا ITO)، لایه‌ی HTL، لایه‌ی جاذب نور که یک ساختار پروسکایتی هیبریدی آلی-معدنی است، لایه‌ی ETL از جنس اکسید روی یا اکسید تیتانیم و الکتروود پشتی که فلزی و معمولاً از جنس طلا، نقره یا آلومینیم است (شکل ۱۶). با تابش نور به لایه فعال نوری پروسکایتی، زوج الکترون-حفره‌هایی در این لایه تشکیل و از هم تفکیک می‌شوند. الکترون از طریق ETL به الکتروود پشتی و حفره از طریق HTL به الکتروود جلویی می‌روند (۱۰۱، ۱۰۰). البته باید توجه داشت که این ساختار کلی این سلول‌ها است و برخی از لایه‌های می‌توانند حذف یا دچار تغییر شوند (۱۰۲).

از مهم‌ترین نقاط ضعف سلول‌های پروسکایتی، حساسیت آنها به رطوبت است. علاوه بر آسیب‌هایی که تمامی سلول‌های خورشیدی از رطوبت می‌بینند، خود لایه‌ی پروسکایت در معرض رطوبت دچار افت عملکرد شدید می‌شود. از یک سو، ساختار پروسکایت به آب‌کافت حساس است و در معرض رطوبت دچار آب‌کافت می‌شود. از سوی دیگر، ورود رطوبت به داخل ساختار پروسکایت، موجب جابجایی یون‌ها در داخل ساختار لایه‌ای پروسکایت، آسیب به ساختار بلوری آن (۱۰۳) و نهایتاً افت چشمگیر عملکرد جذب نور و انتقال زوج الکترون-حفره در داخل این لایه می‌شود (۱۰۵، ۱۰۴).

استفاده از جوهرهای حاوی مقدار قابل توجه پیوندهای پلیمری در سلول‌های پروسکایتی ممکن نیست زیرا باقی ماندن اجزاء پلیمری موجود در جوهر بر عملکرد نهایی آن اثر منفی دارد و نهایتاً باید به روش‌های حرارتی جزء پلیمری را از ساختار خارج کرد.



شکل ۱۶: توصیف تصویری نحوه قرارگیری لایه‌های مختلف در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (۱۰۱، ۱۰۰).

Figure 16: Schematic description of various layers alignment in perovskite solar cells (100, 101).

¹ Annealing

بر اساس گزارش یک مرکز تخصصی مطالعات بازار، ظرفیت نیروگاهی نصب شده سلول‌های خورشیدی که در سال ۲۰۱۲ معادل ۱۰۰ گیگاوات بود، طی یک روند نزدیک به ۱۰ ساله و تا سال ۲۰۲۲ به حدود یک تراوات افزایش یافت. اما تنها سه سال زمان نیاز است تا این رقم بیش از دو برابر شود و به حدود ۲/۳ تراوات افزایش پیدا کند. پیش‌بینی می‌شود که این روند شتابان افزایش ظرفیت نصب شده سلول‌های خورشیدی، تا سال ۲۰۲۹ نیز با نرخ رشد مرکب سالانه‌ی بیش از ۶٪ ادامه پیدا کند. این موضوع نشان از رشد صنعت سلول‌های خورشیدی در زمان حاضر و سال‌های پیش رو دارد (۱۱۴).

آژانس ملی انرژی ایالات متحده در سال ۲۰۱۶، هدف‌گذاری خود را در زمینه توسعه فناوری‌های فتوولتاییک منتشر کرد. بر اساس این سند، LOCE انرژی خورشیدی تولیدی در مقیاس صنعتی در این کشور، باید تا سال ۲۰۳۰ به $0.3 \text{ \$/kWh}$ برسد (۱۱۵). تا سال ۲۰۲۰، LOCE تولید انرژی با استفاده از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری، به عنوان بازیگر اصلی بازار سلول‌های خورشیدی تجاری، با در نظر گرفتن حاشیه سود ۱۵٪ - کمینه حاشیه سود ممکن برای بقای یک کسب و کار - حدود $0.25 \text{ \$/kWh}$ بوده است که در بین نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی کمترین مقدار و بیشترین مطلوبیت را داشته. پس از آن، سلول‌های خورشیدی نسل دومی CdTe با حدود $0.28 \text{ \$/kWh}$ کمترین LOCE را داشتند (۱۱۶). به همین دلیل هم با اینکه در حال حاضر بیش از ۹۵٪ بازار سلول‌های خورشیدی در انحصار سیلیکون‌های بلوری است، تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۲۷ حداقل ۱۲٪ از سهم بازار به سلول‌های CdTe اختصاص پیدا کند (۲۱). نکته اینجاست که بر اساس مطالعات صورت گرفته، تخمین زده می‌شود که حتی طی سالیان آینده و با پیشرفت فناوری هم، میزان LOCE برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری و CdTe به ترتیب به حدود $0.17 \text{ \$/kWh}$ و $0.19 \text{ \$/kWh}$ خواهند رسید که با هدف‌گذاری صورت گرفته فاصله دارند. به نظر می‌رسد که این فناوری‌ها برای رسیدن به هدف‌گذاری‌های مطلوب با موانع ذاتی در حوزه‌ی فناوری مواجهند. اما سلول‌های نسل سومی نظیر سلول‌های پروسکایت که در حال حاضر با LOCE بسیار بالا و در حد $0.38 \text{ \$/kWh}$ رقابت‌پذیری مناسبی برای گرفتن بازار سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری را ندارند، تخمین زده می‌شود که بتوانند به LOCE معادل $0.18 \text{ \$/kWh}$ و حتی کمتر از آن برسند که از رقابت‌پذیری مناسبی برخوردار است (۱۱۵). به ویژه که سلول‌های پروسکایتی، می‌توانند به صورت انعطاف‌پذیر و شفاف تولید شوند که مزیت بسیار بزرگی برای آنها به ارمغان می‌آورد. به همین دلیل هم برآوردها حکایت از آن دارد که علیرغم LOCE بالای سلول‌های خورشیدی نسل سومی، این سلول‌های در آینده سهمی از بازار را به خود اختصاص دهند و به همین دلیل، نرخ رشد مرکب

که بازده سلول حدود ۱۲/۳٪ را تامین می‌نماید (۱۱۰). گروهی از پژوهشگران آمریکایی هم در اقدامی خلاقانه، کارتریج‌های یک چاپگر جوهرافشان چهار رنگ را با جوهرهای حاوی پیش‌سازهای کاتیون‌های مختلف پر کردند و با کنترل نحوه پاشش هر یک از مرکب‌ها توانستند سلول‌های پروسکایتی با ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری متفاوت بسازند و از این طریق، به روشی ساده و سریع برای بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی سلول پروسکایت دست یافتند (۱۱۱). البته بعداً مشخص شد که تاثیر نمک‌های پیش‌ساز پروسکایتی بر ریخت و ساختار بلوری لایه پروسکایت، تنها از جهت ساختار شیمیایی و الگوی الکترونی نیست، بلکه این نمک‌ها و همچنین دوپ‌کننده‌هایی که در داخل فرمول‌بندی جوهر مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر رفتار ترشوندگی زیرآیند توسط مرکب نیز اثر می‌گذارند و همین امر می‌تواند ساختار بلوری و ریخت لایه پروسکایتی را متاثر نماید. با بهینه‌سازی فرمول‌بندی جوهر به منظور بهبود تر کنندگی آن، نهایتاً سلول‌هایی با بازده نزدیک به ۱۸٪ به دست آمد (۵۱). علاوه بر فرمول‌بندی جوهر و دمای زیرآیند، فاصله‌ی پرتاب قطرات^۱ و ضخامت لایه‌ی پروسکایت نیز بر ریخت لایه پروسکایت و عملکرد نهایی سلول اثرگذار است. ضخامت سلول با افزایش تعداد لایه‌های چاپ شده از جوهر قابل کنترل است و با کنترل همین دو مولفه، بازده کل نزدیک به ۱۳٪ به دست آمد (۱۱۳، ۱۱۲).

۴- جمع‌بندی و پیش‌بینی آینده و روند بازار

در این مقاله، در ابتدا به موضوع بحران جهانی انرژی پرداخته شد و اهمیت این موضوع، از زوایای مختلف مواجهه با این بحران از جهات مختلف زیست‌محیطی، افزایش تقاضای جهانی انرژی و همچنین نفوذ فناوری‌های جدید و به تبع آن نیاز به اشکال جدید انرژی مورد اشاره قرار گرفت. در ادامه روش‌های مختلف تولید انرژی و مزیت فتولتاییک‌ها به سایر روش‌های تولید انرژی مورد اشاره قرار گرفتند. این مزیت چه از جهت اقتصادی و چه از جهت ردپای زیست‌محیطی مورد تاکید قرار گرفت. ساز و کار فتوولتاییک‌ها و مزیت استفاده از روش‌های چاپی برای تولید آنها، به عنوان راه حلی برای رفع موانع گسترش بهره‌گیری از سلول‌های خورشیدی در صنعت انرژی دنیا مورد بعدی بود که در این نوشتار به آن پرداخته شد و نهایتاً، نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و تحقیقاتی که در زمینه‌ی استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت سلول‌های هر نسل صورت گرفته مورد مرور گردیدند. پایان‌بخش این نوشتار، بررسی دورنمای بازار برای سلول‌های خورشیدی و به خصوص آن دسته از سلول‌های خورشیدی است که به روش‌های چاپی تولید می‌شوند.

¹ Drop spacing

به عنوان الکتروود جلویی (۱۱۸). در یک نمونه از این پژوهش‌ها که در سال ۲۰۱۸ منتشر شد، روندهای توسعه‌ی فناوری در زمینه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بررسی شد و با فرض به نتیجه رسیدن این روندها و تجاری‌سازی آنها، بازده این سلول‌ها در مقیاس تجاری و همچنین هزینه انرژی تولیدی توسط آنها مشخص گردید (۱۱۹). بر اساس نتایج این پژوهش، هنوز هزینه ساخت و همچنین LCOE سلول‌های پروسکایتی برای ورود به بازار مناسب نبود. همین گروه از پژوهشگران اما یک سال بعد مجدداً روندها را بررسی کردند و اعلام نمودند که اگر از روش‌های تولید R2R برای ساخت لایه‌های HTL، ETL و لایه‌ی فعال نوری استفاده شود، می‌توان انتظار داشت که سلول با عمر ۳ سال، بازدهی ۱۰٪ و نسبت پر کردن هندسی ماژول (MGFF¹) ۶۸٪ با هزینه تولید ۳۷\$/m² قابل استحصال خواهد بود که هزینه تولید انرژی را به حدود ۱/۱\$/W خواهد رساند. این مقدار در آن زمان برای رقابت با سلول‌های خورشیدی قابل حمل مطلوب تشخیص داده شد ولی نتایج نشان داد که برای رقابت با سلول‌های بلوری سیلیکونی ثابت، با فرض ثابت ماندن هزینه ساخت سلول، به بازده بیش از ۱۵٪ و عمر بالای ۱۵ سال نیاز خواهد بود (۱۱۸). با پیشرفت‌های سریعتر از حد انتظار در توسعه‌ی سلول‌های پروسکایتی، این پیشبینی‌ها مکرراً اصلاح شد و در پژوهشی که نتایج آن در اواخر سال ۲۰۲۱ منتشر شد، مشخص شد که با برخی اصلاحات و از جمله استفاده از چاپ اسکرین برای اعمال الکتروودها، می‌توان به LCOE حدود ۰/۳۵-۰/۰۳ \$/kWh دست یافت که بسیار بهتر از پیشبینی‌های قبلی بود (۱۲۰). البته این پیشبینی با فرض عمر ۱۰ ساله‌ی سلول بود که امکان‌پذیر بودن آن در شرایط واقعی محل تردید است. در یکی از جدیدترین بررسی‌ها از این دست، گروهی از پژوهشگران ایتالیایی به LCOE در حدود ۰/۰۶ \$/kWh- رسیدند که البته در همین پژوهش هم عنوان شده بود با توجه به اینکه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی در ابتدای مسیر تجاری‌سازی هستند، عدم قطعیت زیادی در این ارقام وجود دارد و ممکن است در فرایند افزایش مقیاس تولید، هزینه تولید انرژی در عمل افزایش یابد (۱۲۱). مهم‌ترین اقداماتی که در مسیر توسعه و تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی باید صورت پذیرد، عبارتست از اصلاح فرمول‌بندی جوهر و طراحی سلول به نحوی که چاپ‌پذیری آن بهبود یابد و ترتیب فاصله‌ی نواری لایه‌های مختلف به نحو بهینه تنظیم شود و همچنین توسعه روش‌هایی برای روئین کردن سلول نهایی در برابر عوامل تخریب‌کننده و کاهش دهنده عمر سلول و نهایتاً ترکیب روش‌های چاپی برای اعمال لایه‌های مختلف به منظور دستیابی به روش بهینه تولید که نهایتاً بتواند هزینه تولید ماژول‌های سلول خورشیدی پروسکایتی با هزینه تمام شده \$/W

سالانه‌ی این دسته از سلول‌های خورشیدی، بیشتر از متوسط بازار سلول‌های خورشیدی تخمین زده می‌شود.

بر اساس گزارش یک مرکز تخصصی مطالعات بازار، ظرفیت نیروگاهی نصب شده سلول‌های خورشیدی که در سال ۲۰۱۲ معادل ۱۰۰ گیگاوات بود، طی یک روند نزدیک به ۱۰ ساله و تا سال ۲۰۲۲ به حدود یک تراوات افزایش یافت. اما تنها سه سال زمان نیاز است تا این رقم بیش از دو برابر شود و به حدود ۲/۳ تراوات افزایش پیدا کند. پیشبینی می‌شود که این روند شتابان افزایش ظرفیت نصب شده‌ی سلول‌های خورشیدی، تا سال ۲۰۲۹ نیز با نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) ۶/۹٪ ادامه پیدا کند. این موضوع نشان از رشد صنعت سلول‌های خورشیدی در زمان حاضر و سال‌های پیش رو دارد (۱۱۴). برای سلول‌های خورشیدی نسل دومی یا همان سلول‌های خورشیدی لایه نازک، CAGR بالاتری تخمین زده می‌شود. بر اساس برآوردهای صورت گرفته، نرخ رشد سالانه بازار سلول‌های خورشیدی نسل دومی در بازه‌ی ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی، معادل ۸/۴٪ تخمین زده می‌شود که اندکی بیشتر از نرخ رشد مجموع بازار سلول‌های خورشیدی است (۱۱۷). این نرخ رشد برای سلول‌های نسل سومی آلی و DSSC بیشتر است. CAGR برای سلول‌های آلی و DSSC در بازه‌ی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۷ به ترتیب ۱۲/۳٪ و ۱۲/۴٪ تخمین زده می‌شود (۱۱۴). البته همان‌طور که پیشتر گفته شد سهم سلول‌های خورشیدی آلی و DSSC از بازار سلول‌های خورشیدی بسیار ناچیز است. در حالیکه کل حجم بازار جهانی سلول‌های خورشیدی معادل ۲۳۴ میلیارد دلار است، سهم سلول‌های خورشیدی آلی و DSSC از این بازار، مجموعاً کمتر از ۱۶۰ میلیون دلار است (۱۱۴). تخمین‌های آینده‌نگرانه از وضعیت آتی بازار سلول‌های خورشیدی، بیشترین نرخ رشد را متعلق به سلول‌های نسل سومی پایه پروسکایتی می‌دانند. بر اساس تخمین‌ها، CAGR سلول‌های پایه پروسکایتی بین ۳۲/۵٪ (۱۱۷) و ۵۶/۵٪ (۱۱۴) تخمین زده می‌شود و بر همین اساس پیشبینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰، حجم بازار ۶/۶ میلیارد دلاری را برای این دسته از سلول‌ها شاهد باشیم (۱۱۷).

در پیش‌بینی روند بازار سلول‌های خورشیدی، سه مولفه اصلی مد نظر هستند که عبارتند از ۱- بازده -۲- قیمت -۳- عمر کاری. این سه مولفه، مثلث طلایی موفقیت سلول‌های خورشیدی هستند. در میان انواع سلول‌های خورشیدی نسل جدید، سلول‌های نسل سومین بیشترین ظرفیت را در بهره‌گیری از روش‌های چاپی در فرآیند تولید دارا هستند. از سوی دیگر، در بین سلول‌های نسل سومی، بهترین وضعیت را در مثلث طلایی عملکردی، سلول‌های پروسکایتی دارند. در مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که در مسیر تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی سه مانع مهم وجود دارد: وجود عناصر گران‌قیمت در لایه انتقال دهنده الکترون، پوشش فلزات نیب بر الکتروود پشتی و نهایتاً الکتروود گران قیمت ITO

¹ Modulus geometric fell factor

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های آقایان دکتر علی مسعود پیمان‌نیا و علی آشتیانی عبدی، نهایت تشکر را دارند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان عنوان نشده است.

۰/۳۰ - ۰/۲۵ را میسر سازد (۱۱۵). باید توجه داشت که بسیاری از بازده‌هایی که در حال حاضر برای سلول‌های پروسکایتی چاپی گزارش می‌شود، برای سلول‌های واحد و با سطح بسیار کوچک است و تهیه ماژول‌های سلول خورشیدی با همین روش‌ها در سطوح بزرگ‌تر، بازده بسیار کمتری را تامین می‌کند. همین امر لزوم ادامه توسعه در این حوزه را بیشتر پررنگ می‌کند (۱۰۶).

۵- مراجع

1. Da Rosa AV, Ordóñez JC. Fundamentals of renewable energy processes. 2022.
2. Ahmad T, Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*. 2020;6:1973-91 <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>.
3. BP. Statistical Review of World Energy. 2018 June. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>EIA. Annual Energy Outlook. Energy Information Administration; 2018.
4. EIA. Annual Energy Outlook. Energy Information Administration; 2018.
5. Klein Goldewijk K, Beusen A, Janssen P. Long-term dynamic modeling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1. *The Holocene*. 2010;20(4):565-73 <https://doi.org/10.1177/095968360935658>.
6. Skoczkowski T, Bielecki S, Wojtyńska J. Long-Term Projection of Renewable Energy Technology Diffusion. *Energies*. 2019;12(22):4261 <https://doi.org/10.3390/en12224261>.
7. Hoekstra AY. The water footprint of modern consumer society. 2nd ed. London, UK.: Routledge; 2020. <https://doi.org/10.4324/9780429424557>.
8. Hadian S, Madani K. The water demand of energy: implications for sustainable energy policy development. *Sustainability*. 2013;5(11):4674-87. <https://doi.org/10.3390/su5114674>.
9. Mekonnen MM, Gerbens-Leenes P, Hoekstra AY. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2015;1(3):285-97. <https://doi.org/10.1039/C5EW00026B>.
10. Keeling CD, Piper SC, Bacastow RB, Wahlen M, Whorf TP, Heimann M, et al. Atmospheric CO₂ and 13CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. A history of atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems: Springer; 2005. p. 83-113 https://doi.org/10.1007/0-387-27048-5_5.
11. Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, et al. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020;12(4):3269-340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
12. Ansari MIH, Qurashi A, Nazeeruddin MK. Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2018;35:1-24 <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2017.11.002>.
13. Hosseinezhad M, Moradian S. Organic dyes for Using in Dye-sensitized solar cells. *Journal of Studies in Color World*. 2011;1(3):29-32 <https://dor.net/20.1001.1.22517278.1390.1.3.5.7>.
14. Grätzel M. Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol A: Chem*. 2004;164(1-3):3-14 <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.02.023>.
15. Fu R, Feldman DJ, Margolis RM. US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2018. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); 2018.
16. Simya O, Radhakrishnan P, Ashok A, Kavitha K, Althaf R. Engineered Nanomaterials for Energy Applications. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. In: Mustansar Hussain C, editor. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier BV; 2018. p. 751-67 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00043-2>.
17. Nazeeruddin MK, Zakeeruddin S, Lagref J-J, Liska P, Comte P, Barolo C, et al. Stepwise assembly of amphiphilic ruthenium sensitizers and their applications in dye-sensitized solar cell. *Coord Chem Rev*. 2004;248(13-14):1317-28 <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2004.03.012>.
18. O'regan B, Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*. 1991;353(6346):737-40 <https://doi.org/10.1038/353737a0>.
19. Bach U, Lupo D, Comte P, Moser J-E, Weissörtel F, Salbeck J, et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies. *Nature*. 1998;395(6702):583-5 <https://doi.org/10.1038/26936>.
20. Płaczek-Popko E. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*. 2017;25(2):55-64

- <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2017.03.002>.
21. Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2017-2027 [Internet]. IDTechEx. 2017. Available from: <https://www.idtechex.com/en/research-report/printed-organic-and-flexible-electronics-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027/510>.
 22. Kamyshny A, Magdassi S. Conductive nanomaterials for 2D and 3D printed flexible electronics. *Chem Soc Rev*. 2019;48(6):1712-40 <https://doi.org/10.1039/C8CS00738A>.
 23. Singh M, Haverinen HM, Dhagat P, Jabbour GE. Inkjet printing—process and its applications. *Adv Mater*. 2010;22(6):673-85 <https://doi.org/10.1002/adma.200901141>.
 24. Kamyshny A, Magdassi S. Conductive Nanomaterials for Printed Electronics. *Small*. 2014;10(17):3515-35. <https://doi.org/10.1002/sml.201303000>.
 25. Tam SK, Fung KY, Poon GSH, Ng KM. Product design: Metal nanoparticle-based conductive inkjet inks. *AIChE J*. 2016;62(8):53-2740. <https://doi.org/10.1002/aic.15271>.
 26. Liu Y-F, Tsai M-H, Pai Y-F, Hwang W-S. Control of droplet formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing. *Appl Phys A*. 2013;111(2):509-16. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-7569-7>.
 27. Mohsen MRN, Mojtaba J, Zahra R. Printed Electronics, Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets. *Journal of studies in color world*. 2020;10(3):29-42 <https://dor.net/20.1001.1.22517278.1399.10.3.3.8>.
 28. Bhatnagar M, Jha S, Pattnaik A. Analysis of different printing technologies for metallization of crystalline silicon solar cells. *International Journal of Materials Research*. 2023 <https://doi.org/10.1515/ijmr-2021-8686>.
 29. Ganesan S, Mehta S, Gupta D. Fully printed organic solar cells – a review of techniques, challenges and their solutions. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(3):298-320 <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.09.002>.
 30. Kipphan H. Fundamentals. In: Kipphan H, editor. *Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001. p. 1-202 https://doi.org/10.1007/978-3-540-29900-4_1.
 31. Southee D, York N, editors. Printed electronics, product design and the education of future industrial designers. DS 82: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE15), Great Expectations: Design Teaching, Research & Enterprise, Loughborough, UK, 03-0409 2015; 2015.
 32. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010;2(3):96-102. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.82>.
 33. Tepner S, Wengenmeyr N, Linse M, Lorenz A, Pospischil M, Clement F. The Link between Ag-Paste Rheology and Screen-Printed Solar Cell Metallization. *Adv Mater Technol*. 2020;5(10):2000654. <https://doi.org/10.1002/admt.202000654>.
 34. Erath D, Filipović A, Retzlaff M, Goetz AK, Clement F, Biro D, et al. Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2010;94(1):57-61 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.05.018>.
 35. Messmer C, Tutsch L, Pingel S, Erath D, Schön J, Fell A, et al. Optimized front TCO and metal grid electrode for module-integrated perovskite-silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2022;30(4):374-83 <https://doi.org/10.1002/pip.3491>.
 36. Jost N, Askins S, Dixon R, Ackermann M, Dominguez C, Anton I. Array of micro multijunction solar cells interconnected by conductive inks. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2022;240:111693. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111693>.
 37. Wu X, Zhou Z, Wang Y, Li J. Syntheses of Silver Nanowires Ink and Printable Flexible Transparent Conductive Film: A Review. *Coatings*. 2020;10(9):865. <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/9/865>
 38. Li D, Lai W-Y, Zhang Y-Z, Huang W. Printable Transparent Conductive Films for Flexible Electronics. *Adv Mater*. 2018;30(10):1704738. <https://doi.org/10.1002/adma.201704738>.
 39. Ostfeld AE, Arias AC. Flexible photovoltaic power systems: integration opportunities, challenges and advances. *Flexible Printed Electron*. 2017;2(1):013001 <https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa5750>.
 40. Han G, Zhang S, Boix PP, Wong LH, Sun L, Lien S-Y. Towards high efficiency thin film solar cells. *Prog Mater Sci*. 2017;87:246-91 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.02.003>.
 41. Stuckelberger M, Biron R, Wyrsh N, Haug F-J, Ballif C. Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;76:1497-523 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.190>.
 42. Ramanujam J, Bishop DM, Todorov TK, Gunawan O, Rath J, Nekovei R, et al. Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review. *Prog Mater Sci*. 2020;110:100619 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100619>.
 43. Green MA, Dunlop ED, Siefert G, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, et al. Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2023;31(1):3-16 <https://doi.org/10.1002/pip.3646>.
 44. Faraj M, Ibrahim K, Salhin A. Fabrication and characterization of thin-film Cu (In, Ga) Se₂ solar cells on a PET plastic substrate using screen printing. *Mater Sci Semicond Process*. 2012;15(2):165-73 <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.10.006>.
 45. Dai P, Zhang Y, Xue Y, Jiang X, Wang X, zhan J, et al. Nanoparticle-based screen printing of copper zinc tin sulfide thin film as photocathode for quantum dot sensitized solar cell. *Mater Lett*. 2015;158:198-201 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.016>.

46. Wang W, Su Y-W, Chang C-h. Inkjet printed chalcopyrite $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ thin film solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(9):2616-20
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.05.011>.
47. Lin X, Klenk R, Wang L, Köhler T, Albert J, Fiechter S, et al. 11.3% efficiency Cu (In, Ga)(S, Se) 2 thin film solar cells via drop-on-demand inkjet printing. *Energy & Environmental Science*. 2016;9(6):2037-43
<https://doi.org/10.1039/C6EE00587J>.
48. Yadav BS, Dey SR, Dhage SR. Effective ink-jet printing of aqueous ink for Cu (In, Ga) Se_2 thin film absorber for solar cell application. *Solar Energy*. 2019;179:363-70
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.003>.
49. Karunakaran SK, Arumugam GM, Yang W, Ge S, Khan SN, Lin X, et al. Recent progress in inkjet-printed solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(23):13873-902. <https://doi.org/10.1039/C9TA03155C>.
50. Lin X, Kavalakkatt J, Lux-Steiner MC, Ennaoui A. Inkjet-Printed Cu_2ZnSn (S, Se) 4 Solar Cells. *Advanced science*. 2015;2. <https://doi.org/10.1002/advs.201500028>.
51. Colina M, Bailo E, Medina-Rodríguez B, Kondrotas R, Sánchez-González Y, Sylla D, et al. Optimization of ink-jet printed precursors for Cu_2ZnSn (S, Se) 4 solar cells. *J Alloys Compd*. 2018;735:2462-70
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.035>.
52. Lin X, Madhavan VE, Kavalakkatt J, Hinrichs V, Lauer mann I, Lux-Steiner MC, et al. Inkjet-printed CZTSSe absorbers and influence of sodium on device performance. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;180:373-80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.09.003>.
53. Nakada T, Mizutani M, Hagiwara Y, Kunioka A. High-efficiency Cu (In, Ga) Se_2 thin-film solar cells with a CBD-ZnS buffer layer. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2001;67(1-4):255-60 <https://doi.org/10.1016/S0927-0248>.
54. Mughal MA, Engelken R, Sharma R. Progress in indium (III) sulfide (In_2S_3) buffer layer deposition techniques for CIS, CIGS, and CdTe-based thin film solar cells. *Solar Energy*. 2015;120:131-46
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.028>.
55. Mohammed IM, Gubari GM, Huse NP, Dive AS, Han S-H, Sharma R. Effect of Cd/S ratio on growth and physical properties of CdS thin films for photosensor application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020;31:9989-96.
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03543-z>.
56. Wang L, Lin X, Ennaoui A, Wolf C, Lux-Steiner MC, Klenk R. Solution-processed In_2S_3 buffer layer for chalcopyrite thin film solar cells. *EPJ Photovoltaics*. 2016;7:70303 <https://doi.org/10.1051/epjpv/2016001>.
57. Debot A, Chu VB, Adeleye D, Guillot J, Arl D, Melchiorre M, et al. Inkjet-printed indium sulfide buffer layer for $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ thin film solar cells. *Thin Solid Films*. 2022;745:139096
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139096>.
58. Gensowski K, Jimenez A, Freund T, Wengenmeyr N, Tepner S, Pospischil M, et al. CIGS Mini-Modules with Dispensed Metallization on Transparent Conductive Oxide Layer. *Solar RRL*. 2020;4(12):2000475
<https://doi.org/10.1002/solr.202000475>.
59. Hersh PA, Curtis CJ, van Hest MF, Kreuder JJ, Pasquarelli R, Miedaner A, et al. Inkjet printed metallizations for $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ photovoltaic cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2011;19(8):973-6. <https://doi.org/10.1002/pip.1105>.
60. Hao Y, Gao J, Xu Z, Zhang N, Luo J, Liu X. Preparation of silver nanoparticles with hyperbranched polymers as a stabilizer for inkjet printing of flexible circuits. *New J Chem*. 2019;43(6):2797-803.
<https://doi.org/10.1039/C8NJ05639K>.
61. Hosseinezhad M. Review on Metal-based Complex Dyes for Dye-sensitized Solar Cells. *Journal of Studies in Color World*. 2021;11(3):45-54
<https://doi.org/10.1001.1.22517278.1400.11.3.4.6>.
62. Rouhani S, Hosseinezhad M, Sohrab N, Gharanjig K, Salem A, Ranjbar Z. Investigation of the Effect of rGO/TiO_2 on Photovoltaic Performance of DSSCs Devices. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2022;15(2):123-31
<https://doi.org/10.30509/pccc.2021.166738.1094>.
63. Hosseinezhad M, Masoud Etehad S. A Review of Bacterial-sensitizers for Photovoltaic Devices. *Journal of Studies in Color World*. 2021;11(1):1-10
<https://doi.org/10.1001.1.22517278.1400.11.1.1.9>.
64. Agrawal A, Siddiqui SA, Soni A, Khandelwal K, Sharma GD. Performance analysis of TiO_2 based dye sensitized solar cell prepared by screen printing and doctor blade deposition techniques. *Solar Energy*. 2021;226:9-19
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.001>.
65. Cherrington R, Hughes DJ, Senthilarasu S, Goodship V. Inkjet-Printed TiO_2 Nanoparticles from Aqueous Solutions for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Energy Technology*. 2015;3(8):866-70
<https://doi.org/10.1002/ente.201500096>.
66. Raïssi M, Pellegrin Y, Lefevre F-X, Boujtita M, Rousseau D, Berthelot T, et al. Digital printing of efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy*. 2020;199:92-9
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.004>.
67. Hashmi SG, Ozkan M, Halme J, Paltakari J, Lund PD. Highly conductive, non-permeable, fiber based substrate for counter electrode application in dye-sensitized solar cells. *Nano Energy*. 2014;9:212-20
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.07.013>.
68. Özkan M, Hashmi SG, Halme J, Karakoc A, Sarikka T, Paltakari J, et al. Inkjet-printed platinum counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Org Electron*. 2017;44:159-67 <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.02.015>.
69. Hashmi SG, Sonai GG, Iftikhar H, Lund PD, Nogueira AF. Printed single-walled carbon-nanotubes-based counter electrodes for dye-sensitized solar cells with copper-based redox mediators. *Semicond Sci Technol*. 2019;34(10):105001.
<https://doi.org/10.1063/1.5136101>.
70. Abdulrazzaq OA, Saini V, Bourdo S, Dervishi E, Biris AS. Organic solar cells: a review of materials, limitations, and

- possibilities for improvement. Particulate science and technology. 2013;31(5):427-42
<https://doi.org/10.1080/02726351.2013.769470>.
71. Xu H, Yuan F, Zhou D, Liao X, Chen L, Chen Y. Hole transport layers for organic solar cells: recent progress and prospects. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020;8(23):11478-92
<https://doi.org/10.1039/D0TA03511D>.
 72. Ashtiani Abdi A, Nourmohammadian F, Mohammadi Y, Saeb MR. Control over Power Conversion Efficiency of BHJ Solar Cells: Learn more from Less, with Artificial Intelligence. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2019;12(1):1-14
<https://doi.org/10.30509/pccc.2019۸۰۳۰.8303>.
 73. Benganem M, Almomhammedi A. Organic Solar Cells: A Review. In: Mellit A, Benganem M, editors. *A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems*. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 81-106. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97887-7_1-4
 74. Krebs FC, Gevorgyan SA, Alstrup J. A roll-to-roll process to flexible polymer solar cells: model studies, manufacture and operational stability studies. *J Mater Chem*. 2009;19(30):5442-51. <https://doi.org/10.1039/B823001C>.
 75. Krebs FC. All solution roll-to-roll processed polymer solar cells free from indium-tin-oxide and vacuum coating steps. *Org Electron*. 2009;10(5):761-8.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.03.009>.
 76. Krebs FC, Søndergaard R, Jørgensen M. Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1348-53.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.007>.
 77. Manceau M, Angmo D, Jørgensen M, Krebs FC. ITO-free flexible polymer solar cells: From small model devices to roll-to-roll processed large modules. *Org Electron*. 2011;12(4):566-74
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.01.009>.
 78. Galagan Y, J.M. Rubingh J-E, Andriessen R, Fan C-C, W.M. Blom P, C. Veenstra S, et al. ITO-free flexible organic solar cells with printed current collecting grids. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1339-43
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.011>.
 79. Deganello D, Cherry JA, Gethin DT, Claypole TC. Patterning of micro-scale conductive networks using reel-to-reel flexographic printing. *Thin Solid Films*. 2010;518(21):6113-6
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.125>.
 80. Hübler A, Trnovec B, Zillger T, Ali M, Wetzold N, Mingeback M, et al. Printed Paper Photovoltaic Cells. *Advanced Energy Materials*. 2011;1(6):1018-22.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201100394>.
 81. Eom SH, Senthilarasu S, Uthirakumar P, Yoon SC, Lim J, Lee C, et al. Polymer solar cells based on inkjet-printed PEDOT:PSS layer. *Org Electron*. 2009;10(3):536-42
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.01.015>.
 82. Steirer KX, Berry JJ, Reese MO, van Hest MFAM, Miedaner A, Liberatore MW, et al. Ultrasonically sprayed and inkjet printed thin film electrodes for organic solar cells. *Thin Solid Films*. 2009;517(8):2781-6
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.10.124>.
 83. Singh A, Gupta SK, Garg A. Inkjet printing of NiO films and integration as hole transporting layers in polymer solar cells. *Scientific Reports*. 2017;7(1):1775
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01897-9>.
 84. Krebs FC, Spanggaard H, Kjær T, Biancardo M, Alstrup J. Large area plastic solar cell modules. *Materials Science and Engineering: B*. 2007;138(2):106-11
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.008>.
 85. Krebs FC, Jørgensen M, Norrman K, Hagemann O, Alstrup J, Nielsen TD, et al. A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—first public demonstration. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2009;93(4):422-41
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.12.001>.
 86. Zhang B, Chae H, Cho SM. Screen-printed polymer: fullerene bulk-heterojunction solar cells. *Jpn J Appl Phys*. 2009;48(2R):020208
<https://doi.org/10.1143/JJAP.48.020208>.
 87. Kopola P, Aernouts T, Sliz R, Guillerez S, Ylikunnari M, Cheyns D, et al. Gravure printed flexible organic photovoltaic modules. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1344-7
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.020>.
 88. Kopola P, Aernouts T, Guillerez S, Jin H, Tuomikoski M, Maaninen A, et al. High efficient plastic solar cells fabricated with a high-throughput gravure printing method. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2010;94(10):1673-80
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.027>.
 89. Voigt MM, Mackenzie RCI, Yau CP, Atienzar P, Dane J, Keivanidis PE, et al. Gravure printing for three subsequent solar cell layers of inverted structures on flexible substrates. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(2):731-4
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.013>.
 90. Jung J, Kim D, Lim J, Lee C, Yoon SC. Highly Efficient Inkjet-Printed Organic Photovoltaic Cells. *Jpn J Appl Phys*. 2010;49(5S1):05EB3
<https://doi.org/10.1143/JJAP.49.05EB03>.
 91. Hermerschmidt F, Papagiorgis P, Savva A, Christodoulou C, Itskos G, Choulis SA. Inkjet printing processing conditions for bulk-heterojunction solar cells using two high-performing conjugated polymer donors. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2014;130:474-80
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.07.050>.
 92. Eom SH, Park H, Mujawar S, Yoon SC, Kim S-S, Na S-I, et al. High efficiency polymer solar cells via sequential inkjet-printing of PEDOT: PSS and P3HT: PCBM inks with additives. *Org Electron*. 2010;11(9):1516-22
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2010.06.007>.
 93. Lamont CA, Eggenhuisen TM, Coenen MJJ, Slaats TWL, Andriessen R, Groen P. Tuning the viscosity of halogen free bulk heterojunction inks for inkjet printed organic

- solar cells. *Org Electron.* 2015;17:107-14
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.10.052>.
94. Arredondo B, Romero B, Beliatís MJ, del Pozo G, Martín-Martín D, Blakesley JC, et al. Analysing impact of oxygen and water exposure on roll-coated organic solar cell performance using impedance spectroscopy. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2018;176:397-404
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.028>.
 95. Krebs FC, Tromholt T, Jørgensen M. Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. *Nanoscale.* 2010;2(6):873-86
<https://doi.org/10.1039/B9NR00430K>
 96. Machui F, Hösel M, Li N, Spyropoulos GD, Ameri T, Søndergaard RR, et al. Cost analysis of roll-to-roll fabricated ITO free single and tandem organic solar modules based on data from manufacture. *Energy & Environmental Science.* 2014;7(9):2792-802
<https://doi.org/10.1039/C4EE01222D>.
 97. Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society.* 2009;131(17):6050-1
<https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
 98. Shi B, Duan L, Zhao Y, Luo J, Zhang X. Semitransparent perovskite solar cells: from materials and devices to applications. *Adv Mater.* 2020;32(3):1806474
<https://doi.org/10.1002/adma.201806474>.
 99. Djurišić AB, Liu FZ, Tam HW, Wong MK, Ng A, Surya C, et al. Perovskite solar cells - An overview of critical issues. *Progress in Quantum Electronics.* 2017;53:1-37
<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.05.002>.
 100. Fu F, Feurer T, Weiss Thomas P, Pisoni S, Avancini E, Andres C, et al. High-efficiency inverted semi-transparent planar perovskite solar cells in substrate configuration. *Nature Energy.* 2016;2(1):16190
<https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.190>.
 101. Fallahdoust Moghadam S, Gilani N, Yousefi Aa. A Review of Recent Progress in Fabrication of Perovskite Solar Cells. *J Stud Color World.* 2023;13(2):159-84
<https://dor.net/20.1001.1.22517278.1402.13.2.3.7>.
 102. Maleki E, Ranjbar M, Kahani SA. The Effect of Antisolvent Dropping Delay Time on The Morphology and Structure of the Perovskite Layer in the Hole Transport Material Free Perovskite Solar Cells. *Progress in Color, Colorants and Coatings.* 2021;14(1):47-54
<https://doi.org/10.30509/pccc.2021.81671>.
 103. You J, Yang Y, Hong Z, Song T-B, Meng L, Liu Y, et al. Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells. *Appl Phys Lett.* 2014;105(18)
<https://doi.org/10.1063/1.4901510>.
 104. Xiong J, Qi Y, Zhang Q, Box D, Williams K, Tatum J, et al. Enhanced moisture and water resistance in inverted perovskite solar cells by poly (3-hexylthiophene). *ACS Applied Energy Materials.* 2021;4(2):1815-23
<https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02941>.
 105. Salado M, Contreras-Bernal L, Calìo L, Todinova A, López-Santos C, Ahmad S, et al. Impact of moisture on efficiency-determining electronic processes in perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2017;5(22):10917-27
<https://doi.org/10.1039/C7TA02264F>.
 106. Parida B, Singh A, Kalathil Soopy AK, Sangaraju S, Sundaray M, Mishra S, et al. Recent developments in upscalable printing techniques for perovskite solar cells. *Advanced Science.* 2022;9(14):2200308
<https://doi.org/10.1002/advs.202200308>.
 107. Huddy JE, Ye Y, Scheideler WJ. Eliminating the Perovskite Solar Cell Manufacturing Bottleneck via High-Speed Flexography. *Adv Mater Technol.* 2022;7(7):2101282
<https://doi.org/10.1002/admt.202101282>.
 108. Kim YY, Yang T-Y, Suhonen R, Kempainen A, Hwang K, Jeon NJ, et al. Roll-to-roll gravure-printed flexible perovskite solar cells using eco-friendly antisolvent bathing with wide processing window. *Nature Communications.* 2020;11(1):5146
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18940-5>.
 109. Wei Z, Chen H, Yan K, Yang S. Inkjet printing and instant chemical transformation of a CH₃NH₃PbI₃/nanocarbon electrode and interface for planar perovskite solar cells. *Angew Chem Int Ed.* 2014;53(48):13239-43
<https://doi.org/10.1002/anie.201408638>.
 110. Li S-G, Jiang K-J, Su M-J, Cui X-P, Huang J-H, Zhang Q-Q, et al. Inkjet printing of CH₃NH₃PbI₃ on a mesoscopic TiO₂ film for highly efficient perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2015;3(17):9092-7
<https://doi.org/10.1039/C4TA05675B>.
 111. Bag M, Jiang Z, Renna LA, Jeong SP, Rotello VM, Venkataraman D. Rapid combinatorial screening of inkjet-printed alkyl-ammonium cations in perovskite solar cells. *Mater Lett.* 2016;164:472-5
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.058>.
 112. Mathies F, Abzieher T, Hochstuhl A, Glaser K, Colsmann A, Paetzold UW, et al. Multipass inkjet printed planar methylammonium lead iodide perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2016;4(48):19207-13
<https://doi.org/10.1039/C6TA07972E>.
 113. Mathies F, Eggers H, Richards BS, Hernandez-Sosa G, Lemmer U, Paetzold UW. Inkjet-printed triple cation perovskite solar cells. *ACS Applied Energy Materials.* 2018;1(5):1834-9
<https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00222>.
 114. Solar Power Market Size, Share & Industry Analysis, By Technology, By Application and Regional Forecast, 2021-2028. -Fortune Business Insights; 2021. Contract No.: 103761. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/solar-power-market-100764>
 115. Smith BL, Woodhouse M, Horowitz KA, Silverman TJ, Zuboy J, Margolis RM. Photovoltaic (PV) module technologies: 2020 benchmark costs and technology evolution framework results. *National Renewable Energy*

- Lab.(NREL), Golden, CO (United States); 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/78173.pdf>
116. Feldman D, Ramasamy V, Margolis R. US Solar photovoltaic BESS system cost Benchmark Q1 2020 report. National Renewable Energy Laboratory-Data (NREL-DATA), Golden; 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80694.pdf>
117. Thin-film solar cell market by type, installation, end-user, and region: Global opportunity analysis and industry forecast, 2020–2030. . Allied Market Research; 2022. <https://www.alliedmarketresearch.com/thin-film-solar-cell-market>
118. Chang NL, Ho-Baillie AWY, Vak D, Gao M, Green MA, Egan RJ. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;174:314-24 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.038>.
119. Chang NL, Yi Ho-Baillie AW, Basore PA, Young TL, Evans R, Egan RJ. A manufacturing cost estimation method with uncertainty analysis and its application to perovskite on glass photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2017;25(5):390-405 <https://doi.org/10.1002/pip.2871>.
120. Kajal P, Verma B, Vadaga SGR, Powar S. Costing Analysis of Scalable Carbon-Based Perovskite Modules Using Bottom Up Technique. *Global Challenges*. 2022;6(2):2100070 <https://doi.org/10.1002/gch2.202100070>.
121. De Bastiani M, Larini V, Montecucco R, Grancini G. The levelized cost of electricity from perovskite photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. 2023;16(2):421-9 <https://doi.org/10.1039/D2EE03136A>.

How to cite this article:

Mohammad Raei Nayini M, Jalili M, Bastani S, Khamseh S. Printed Solar Cells, an Inevitable Remedy for the Global Energy Crisis. *J Stud color world*. 2023;13(4):343-358. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1> [In Persian].

A Review of the Performance and Applications of Electric Pulse in the Extraction of Natural Dye

Mahdiah Ghamary*^{1,2}, Zahra Salehi¹

1- Department of Food Industry, Basir Institute of Higher Education, P. O. Code: 3441356611, Abyek, Qazvin, Iran.

2- Agricultural mechanisation and industrial development center, Ministry of Agriculture-Jahad, P. O. Code: 1593416111, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14- 08- 2023

Accepted: 21- 10-2023

Available online: 30-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2

Keywords:

Electric pulse

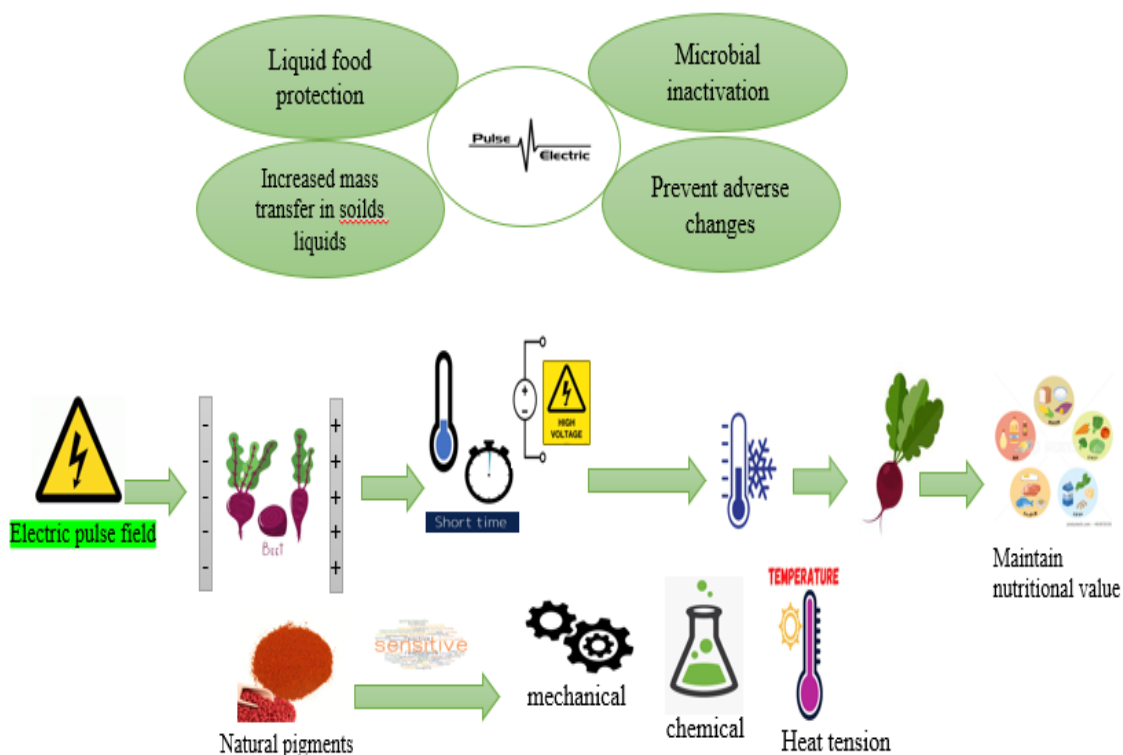
Extraction

Natural dye

Food industry

ABSTRACT

In recent years, the demand for good quality natural products and minimally processed products with high nutritional value has increased. One of the most important natural materials in demand is natural edible dye. Pulsed electric fields in food processing focus on two main areas: microbial inactivation and preservation of liquid foods and enhancing mass and tissue transfer in solids and liquids. The pulse process uses pulsed electric fields with high voltage, which are used quickly for the food between two electrodes. Due to the short duration of the pulses, a little heat is generated in the foodstuff. Thus, the nutrients, vitamins, texture and flavour, as well as the microstructure of the foodstuff, are better preserved than the samples that are subjected to the thermal process. Natural dyes are very sensitive to the processes applied in conventional extraction techniques, such as thermal, mechanical and chemical stresses. Pulsed electric field (PEF) technology is promising as a non-thermal alternative.



Corresponding author: m.ghamari@basir-abyek.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



مروری بر عملکرد و کاربردهای پالس الکتریکی در استخراج مواد رنگزای طبیعی

مهديه قمری^{۱*}، زهرا صالحی^۲

۱- استادیار، گروه صنایع غذایی، موسسه آموزش عالی بصیر، آبیک، قزوین، ایران، کدپستی: ۳۴۴۱۳۵۶۶۱۱.

۲- مرکز مکانیزاسیون و صنایع، وزارت جهادکشاورزی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۵۹۳۴۱۶۱۱۱.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی بصیر، آبیک، قزوین، ایران، کدپستی: ۳۱۴۶۷۱۳۵۵۵.

چکیده

در سال‌های اخیر تقاضا برای محصولات غذایی طبیعی با کیفیت مناسب و محصولات غذایی با حداقل فرآوری و با ارزش تغذیه‌ای بالا افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین مواد طبیعی مورد تقاضا، مواد رنگزای خوراکی طبیعی می‌باشند. میدان‌های الکتریکی پالسی یک فناوری نگهداری غیرحرارتی می‌باشد که در پردازش مواد غذایی در دو حوزه‌ی اصلی یعنی غیرفعال سازی میکروبی و حفاظت از مواد غذایی مایع، و همچنین افزایش انتقال جرم و بافت در جامدات و مایعات متمرکز است و به دلیل جلوگیری از تغییرات نامطلوب مورد توجه قرار گرفته است. فرآیند پالس الکتریکی روشی است که در آن از میدان‌های الکتریکی پالس‌دار با ولتاژ بالا در زمان کوتاه برای مواد غذایی که بین دو الکترود قرار گرفته است، استفاده می‌شود. به دلیل کوتاه بودن زمان پالس‌ها، گرمای کمی در ماده غذایی ایجاد می‌شود و بدین ترتیب در مواد غذایی که تحت فرآیند پالس الکتریک قرار گرفته‌اند، مواد مغذی، ویتامین‌ها، بافت و عطر و طعم و نیز میکروساختار ماده غذایی نسبت به نمونه‌هایی که فرآیند حرارتی به آنها اعمال می‌شود بهتر حفظ می‌گردد. مواد رنگزای طبیعی به فرآیندهای اعمال شده در روش‌های استخراج مرسوم مانند تنش‌های حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بسیار حساس هستند. در این راستا، فناوری میدان الکتریکی پالسی (PEF) به عنوان یک جایگزین غیرحرارتی می‌توان امیدوار بود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2

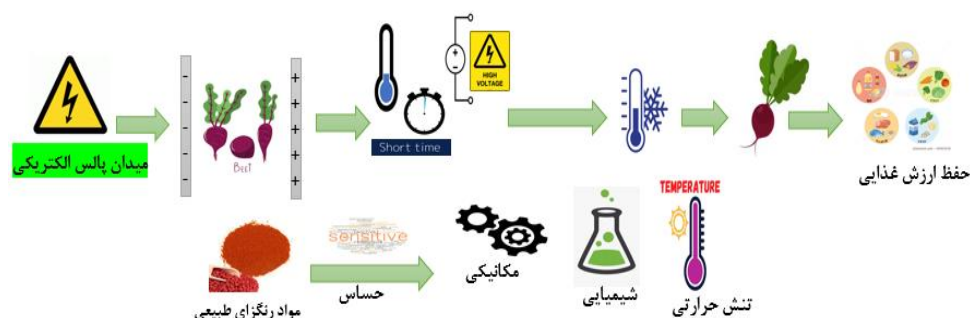
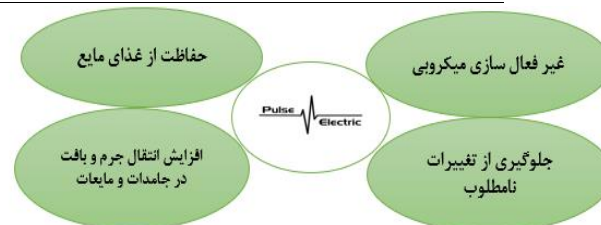
واژه‌های کلیدی:

پالس الکتریکی

استخراج

مواد رنگزای طبیعی

صنایع غذایی



۱- مقدمه

نیازهای مصرف‌کننده برای غذا به طور مداوم در حال تغییر است و امروزه مصرف‌کنندگان خواستار غذاهایی تازه و طبیعی هستند. مراحل استفاده شده در فرآوری مواد غذایی باید برای حفظ کیفیت طبیعی آن‌ها طراحی شود. پردازش حرارتی نه تنها باعث از بین رفتن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و عوامل فساد می‌شود بلکه سبب کاهش طعم، مواد رنگزا و کیفیت غذا می‌شود. روش‌های پاستوریزه‌کردن سرد برای از بین بردن میکروارگانیسم‌ها و حفظ کیفیت بدون اعمال گرما ایجاد شده‌اند (۱). یکی از روش‌های غیرحرارتی نگهداری مواد غذایی، استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی (PEF)^۱ می‌باشد که از آن در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها به گونه‌ای که کمترین آسیب بر خواص کیفی مواد غذایی ایجاد گردد استفاده می‌نمایند. افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای دستیابی به محصولات با کیفیت بالاتر و با حداقل اتلاف مواد مغذی نسبت به روش‌های مرسوم حرارتی استفاده از روش‌های غیرحرارتی از جمله استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی را افزایش داده است (۲). پالس الکتریکی یکی از روش‌های غیرحرارتی نگهداری مواد غذایی مایع به خصوص در شیر و نوشیدنی‌های میوه‌ای می‌باشد و مانند حرارت‌دهی اهمیت بر مبنای قرار گرفتن ماده غذایی در میدان الکتریکی عمل می‌کند. برخلاف حرارت‌دهی اهمیت، فرآیند پالس الکتریکی بر مبنای حرارت‌دهی مواد توسط جریان الکتریکی نیست، در این روش از میدان الکتریکی با ولتاژ بالا ۵۰-۱۵۰ kv/cm و پالس‌های کوتاه و مقیاس زمانی بین میکروثانیه و میلی‌ثانیه جهت سالم‌سازی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش ماده غذایی در زمانی کوتاه با صرف انرژی کم، فرآوری می‌شود. این ولتاژ بالا سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود و از این طریق بر میکروارگانیسم‌ها اثر می‌گذارد. به دلیل کوتاه بودن زمان پالس‌ها، گرمای کمی در ماده غذایی ایجاد می‌شود و بدین ترتیب در مواد غذایی که تحت فرآیند پالس الکتریکی قرار گرفته‌اند، مواد مغذی، ویتامین‌ها، بافت و عطر، نسبت به نمونه‌هایی که فرآیند حرارتی به آنها اعمال می‌شود، بهتر حفظ شده و نیز میکروساختار ماده غذایی بهتر حفظ می‌شود. بنابراین برای حفظ خصوصیات کیفی ماده غذایی نسبت به روش‌های حرارتی ارجح است (۳). غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها با استفاده از این فرآیند به اوایل ۱۹۲۰ در فرآیند تولید شیر پاستوریزه بر می‌گردد. ظهور فرآیند را می‌توان به مخترع آلمانی نسبت داد که پیشگام در طراحی میدان‌های پالس الکتریکی بوده است. به دلیل اهمیت و کاربرد صنعتی میدان پالس الکتریکی، در این مقاله به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی استخراج مواد غذایی با استفاده از میدان‌های پالس الکتریکی و حفظ مواد رنگزای طبیعی و ارزش غذایی

به جای دیگر فرآیندهای حرارتی مختلف پرداخته شده است.

۲- پالس الکتریکی (PEF)

با استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی به علت افزایش در نفوذپذیری سلول‌ها، میزان بازده استخراج مواد رنگزای افزایش می‌یابد. قابل قبول‌ترین نظریه پذیرفته شده درباره نحوه عملکرد روش PEF با مدل الکترومکانیکی معرفی شده توسط زیمرمن^۲ و همکارانش در سال ۱۹۷۴ تطابق دارد. این مدل توضیح می‌دهد که غشاء سلول‌ها در حالت عادی همانند خازنی با ثابت دی الکتریک پایین حاوی یون‌های مثبت و منفی است که مجتمع شدن این یون‌ها در دو سمت غشاء به ایجاد اختلاف پتانسیل در حدود ۱۰ mV در سلول منجر می‌شود. در صورت قرار گرفتن این سلول در یک میدان الکتریکی خارجی، یون‌ها در طول میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. حرکت یون‌ها باعث افزایش اختلاف پتانسیل شده تا اینکه مقدار آن به یک حد بحرانی برسد که در سلول‌های مختلف متفاوت است. زمانی که اختلاف پتانسیل به حد بحرانی رسید، نیروی جاذبه بین بارهای با قطب‌های مخالف خود سبب غالب شدن نیروهای الکترومکانیکی و آسیب دیدن غشاء الاستیک می‌شود و به این ترتیب منافذی در غشاء به وجود می‌آید که این پدیده را نفوذپذیری الکتریکی یا الکتروپوریزه کردن^۳ می‌گویند (۴). بسته به شدت میدان الکتریکی اعمال شده می‌تواند به طور دائم یا برگشت پذیر رخ دهد. سلول‌ها پس از برخورد با یک مقدار میدان خاص نمی‌توانند به نیمه نفوذپذیری اولیه خود برگردند. الکتروپوریزه کردن می‌تواند اثرات مضر را بر یکپارچگی سلول، مانند همجوشی سلولی، تجمع پروتئین در غشای پلاسمایی، وارد کردن میکرو و ماکرومولکول‌ها و تخریب ساختار سلولی افزایش دهد. شکل ۱ اثرات PEF را بر ساختار سلول ارائه می‌دهد (۵).

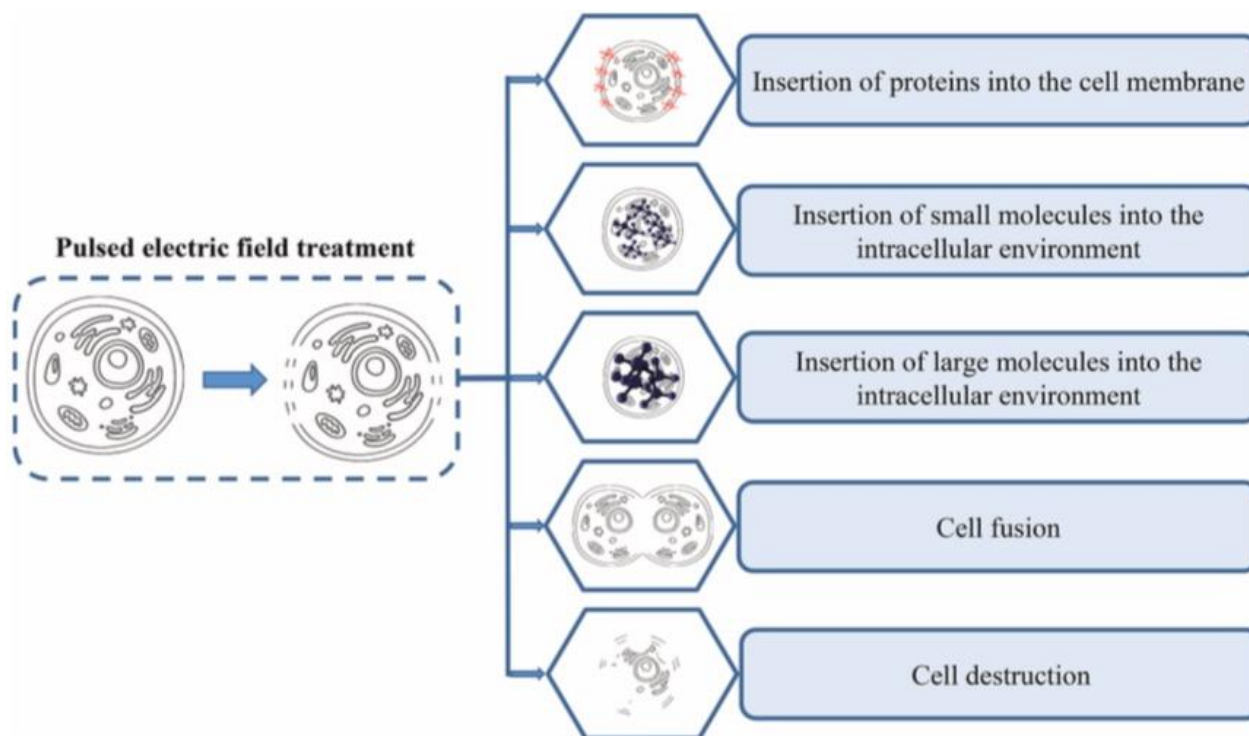
۳- کاربرد پالس الکتریکی جهت استخراج مواد در صنایع غذایی

از این فرآیند می‌توان در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها در شیر، فراورده‌های شیری، تخم مرغ آب و مواد غذایی دیگر استفاده نمود. استفاده از فناوری میدان‌های الکتریکی پالسی با موفقیت برای پاستوریزاسیون مواد غذایی مانند آب میوه، شیر، ماست، سوپ و تخم مرغ مایع به کار گرفته شده است. کاربرد این فرآیند به محصولات غذایی عاری از حباب هوا و با هدایت الکتریکی کم محدود شده است. حداکثر اندازه ذرات نیز در مایع باید کوچکتر از فاصله منطقه تیمار در محفظه تیمار به منظور حصول اطمینان از تیمار مناسب باشد.

² Zimmerman

³ Electroporation

¹ Pulsed Electric Field



شکل ۱: اثرات میدان الکتریکی پالسی بر ساختار سلول (۵).
Figure 1: Effects of pulsed electric field on cell structure (5).

بطور مثال با استفاده از این روش دما و زمان استخراج بطور قابل توجهی در مقایسه با روش حرارتی کاهش می‌یابد، بدین صورت که برای استخراج ۲۳ درصد ساکاروز برای نمونه‌های تیمار شده حرارتی دمای حداقل ۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه نیاز است اما بعد از اینکه از تیمار با PEF با ۱۵۰ پالس در قدرت ۷ kV/cm استفاده شد، بازده مشابه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در طول ۷۵ ثانیه حاصل شد. میزان انرژی مصرفی نیز هنگام تیمار با PEF به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از روش حرارتی است به طوری که برای حصول مقادیر بازده استخراج مشابه میزان انرژی مصرفی در PEF تحت قدرت ۷ kV/cm با ۱۵۰ پالس ۱۳ برابر کمتر از انرژی مصرفی در تیمار حرارتی است. از طرفی ملاحظه شد که میزان انتقال جرم (آزادسازی مولکول‌های قند و یونها) حاصل از هر دو روش تیمار (حرارتی و PEF) به طور معنی‌داری $P \leq 0.05$ بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در روش حرارتی نیز به دلیل تخریب نسبتاً کامل بافت سلولی چغندر طی فرآیند استخراج، میزان انتقال جرم مقادیر بالاتری را نشان داد. این نتایج نشان دهنده قابلیت بالای فرآیند PEF نسبت به فرآیندهای معمول و سنتی برای استخراج است و بطور امید بخشی می‌تواند در صنایع با صرفه جویی در مصرف آب، انرژی و زمان تولید، به کار گرفته شود (۶).

هرچند این روش برای مواد غذایی جامد که قابلیت پمپ‌کردن نیستند مناسب نمی‌باشد. از این فرآیند می‌توان در فرآوری آب میوه‌جات از قبیل عصاره پرتقال و عصاره سیب استفاده کرد (۲). همچنین از این فناوری در استخراج مواد از بافت گیاهی نیز استفاده شده است مانند استخراج ساکاروز، استخراج ترکیبات زیست‌فعال، استخراج روغن و استخراج مواد رنگزا.

۳-۱- استخراج ساکاروز از چغندر قند

تولید شکر از چغندر از حدود ۲۵۰ سال قبل شروع شد و به عنوان یک منبع قندی می‌تواند حائز اهمیت باشد. از آنجایی که چغندر قند در بدن ایجاد حرارت و انرژی می‌نماید و جزء معدود موادی است که در طبیعت می‌توان آن را تقریباً بطور خالص تهیه نمود، لذا هرگونه روش جهت بالا بردن میزان استخراج قند از آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. فرآیند حرارتی مرسوم‌ترین روش جهت فرآوری و نگهداری مواد غذایی و نیز استخراج ترکیبات درون سلولی مانند ساکارز از چغندر قند می‌باشند که در طی آن از دماهای بالا جهت تخریب ماکرو مولکول و نیز اختلال در عملکرد غشاء استفاده می‌شود (۶).
 اثر میدان الکتریکی پالسی قوی به عنوان روشی غیرحرارتی برای استخراج قند از چغندر قند تحت شرایط مختلف قدرت میدان و تعداد پالس، توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که بکارگیری روش PEF منجر به بهبود عملیات استخراج قند می‌گردد،

۳-۲- استخراج ترکیبات زیست فعال

میوه زرشک دارای ترکیبات با ارزشی از جمله فنل‌های کل، آنتوسیانین‌ها، اسیدسیتریک، ویتامین ث و ترکیبات دیگر می‌باشد. کاربرد روش‌هایی برای استخراج این ترکیبات با ارزش که بتوان بیشترین ماده عملگر را با کمترین ناخالصی و حداقل تخریب به دست آورد از اهمیت بسزایی برخوردار است. معمولاً عصاره‌گیری از زرشک با روش‌های معمول به زمان زیاد، درجه حرارت بالا و حجم زیادی از حلال نیاز دارد. عصاره‌گیری حرارتی باعث افت آنتوسیانین‌ها شده و فعالیت‌های ضداکسیدکنندگی عصاره زرشک را کاهش می‌دهد (۷). میدان پالس الکتریکی ضمن اینکه اثر کمی روی ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات دارد، به عنوان یک پیش‌فرآیند باعث افزایش بازدهی استخراج مواد داخل سلولی و افزایش سرعت خشک شدن می‌گردد. از تحقیقات دیگر در زمینه استخراج به کمک میدان الکتریکی پالسی می‌توان به استخراج ترکیبات زیست‌فعال از بافت‌های گیاهی، استخراج ترکیبات فلاونوئیدی و ضداکسیدکنندگی از کنجاله‌های دانه کتان، در استخراج کاروتنوئیدهای گوجه‌فرنگی اشاره نمود (۸).

۴- استخراج مواد رنگزای طبیعی

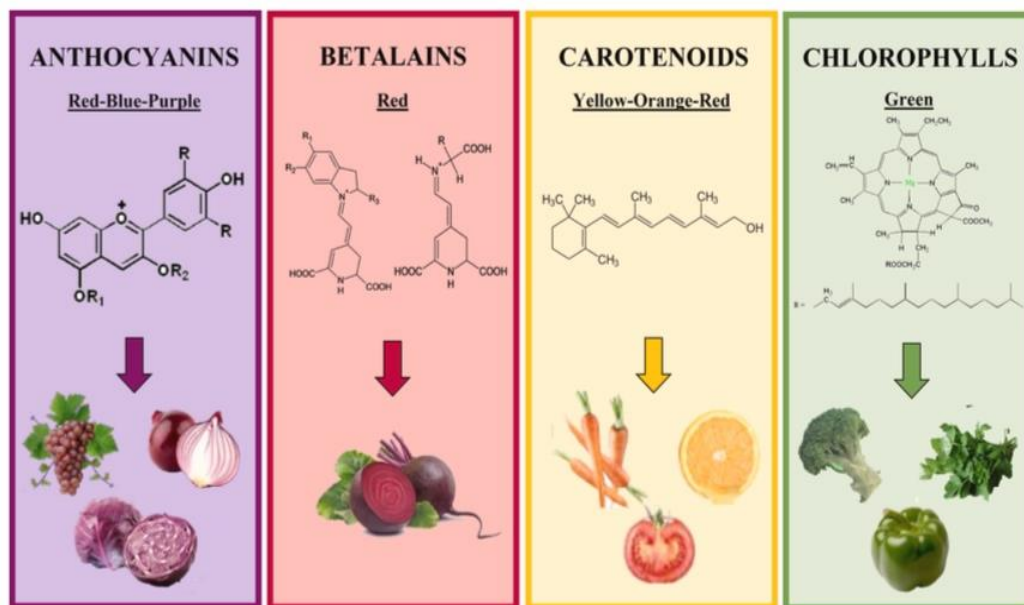
۴-۱- مواد رنگزای خوراکی طبیعی

مواد رنگزای خوراکی طبیعی دسته‌ای از افزودنی‌ها را تشکیل می‌دهند که به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌شوند. عملکرد آنها با تجمع، ترمیم یا افزایش مواد رنگزای غذاها و نوشیدنی‌ها مرتبط است. بنابراین، آنها به طور گسترده‌ای برای استاندارد کردن مواد رنگزای محصولات غذایی، بهبود ظاهر و پذیرش حسی آنها استفاده می‌شوند. همچنین، افزایش تقاضا برای محصولات طبیعی، مواد رنگزای گیاهی و حیوانی را به عنوان یکی از بازارهای با رشد سریع در سطح جهانی برجسته می‌کند. در نتیجه، رشد بازار مورد انتظار برای این بخش از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، ۱۱ درصد است (۹). در این راستا، مصرف‌کنندگان جدید از کشورهای مختلف جستجو برای محصولات طبیعی و پایدار را تشدید کرده‌اند که تأثیر مثبتی بر سلامت انسان دارد و از طول عمر و کیفیت زندگی بیشتر حمایت می‌کند. علی‌رغم اثرات مفید مواد رنگزای غذایی طبیعی، استفاده از مواد رنگزای طبیعی در غذاها و نوشیدنی‌ها در مقایسه با مواد رنگزای مصنوعی، معایب فناوری بیشتری دارد. به عنوان مثال، مواد رنگزای طبیعی هزینه تولید بالا، قدرت رنگ دهی کمتر، یکنواختی و پایداری شیمیایی و فیزیکی پایین‌تری دارند (۱۰). علاوه بر این، ساختار شیمیایی مواد رنگزای طبیعی حساسیت قابل توجهی به نور، فلزات، اکسیژن و عوامل کاهنده یا اکسیدکننده دارد. علاوه بر این، مواد رنگزای طبیعی در برخی از فعالیت‌های

آبی، pH و محدوده دما، ناپایداری بالایی دارند (۱۱). مواد رنگزای یکی از جنبه‌های اصلی توسعه محصولات غذایی است. ویژگی‌های رنگی محصول بر ظاهر دیداری آن تأثیر می‌گذارد و بر درک مصرف‌کنندگان از طعم و کیفیت آن تأثیر گذار است. مواد رنگزای افزودنی‌هایی هستند که براساس منبعشان به دو دسته تقسیم می‌شوند: طبیعی (گیاهی، حیوانی، معدنی و میکروارگانیسم) و مصنوعی. همه انواع مواد رنگزای در ساختار خود کروموفورها را دارند. این کروموفورها گروه‌های عاملی هستند که قادر به جذب انرژی از تابش هستند و الکترون‌های خود را در سطح انرژی بالاتر تحریک می‌کنند. بنابراین، هنگامی که الکترون‌های کروموفورها به حالت پایه خود باز می‌گردند، انرژی را در طول موج خاصی آزاد می‌کنند و رنگ محصول را تنظیم می‌کنند (۱۱). مواد رنگزای طبیعی در بین سه دسته مواد رنگزای به دلیل تغییرات فعلی در الگوی مصرف جهانی برجسته می‌شوند. این الگوها نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان نسبت به محصولاتی که مصرف می‌کنند، انتقادپذیرتر و آگاه‌تر هستند. در نتیجه، آنها به طور فزاینده‌ای به دنبال غذاهایی هستند که اثرات مفیدی بر سلامت آنها داشته باشد. مواد رنگزای طبیعی از این روند پیروی می‌کنند زیرا جذابیت تجاری مرتبط با عملکرد زیستی (فعالیت ضد میکروبی و ضد اکسیدکنندگی) و عمل در پیشگیری از بیماری‌های غیرواگیر دارند (۱۱). با این حال، مواد رنگزای خوراکی طبیعی هنوز محدودیت‌های فناوری دارند که ادغام آن‌ها در توسعه مواد غذایی را پیچیده و گران می‌کند. این مواد رنگزای به دما، pH، فعالیت آب، نور، عوامل کاهنده یا اکسیدکننده، فلزات و اکسیژن بسیار حساس هستند. علاوه بر این، مواد رنگزای طبیعی طیف و تنوع رنگ کمتری نسبت به مواد رنگزای مصنوعی دارند. آنها همچنین به دلیل بهره‌وری انرژی پایین فرآیند‌های استخراج گران‌تر هستند. شکل ۲ مواد رنگزای اصلی مورد استفاده برای تولید مواد رنگزای طبیعی غذایی را ارائه می‌دهد. آنها از منابع گیاهی مشتق شده و به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند: آنتوسیانین‌ها (قرمز-آبی-بنفش)، بتالین‌ها (قرمز)، کاروتنوئیدها (زرد-نارنجی-قرمز) و کلروفیل‌ها (سبز). این ترکیبات هنگامی که در معرض شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند، ثبات رنگ متفاوتی دارند. شکل ۳ ثبات رنگ آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها را در برابر حرارت، اکسیژن، نور و تغییر pH نشان می‌دهد. در این راستا، انتخاب از شرایط استخراج باید ویژگی‌های هر مواد رنگزای در نظر گرفت تا تخریب اجزا به حداقل برسد (۵).

۴-۲- روش‌های استخراج مواد رنگزای از مواد اولیه طبیعی

به طور کلی روش‌های استخراج مواد رنگزای شامل دو مرحله است که در مرحله اول عصاره خام غنی شده یا همان اولئورزین یا مواد رنگزای هیدروالکلی از مواد خام از طریق فرآیند جداسازی جامد-مایع جدا شده و سپس در مرحله تخلیص مواد ناخواسته اخلاص‌گر حذف می‌شوند.



شکل ۲: مواد رنگزای اصلی مورد استفاده برای تولید مواد رنگزای طبیعی غذایی: آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها (۵).
Figure 2: The main pigments used to produce natural food pigments: anthocyanins, betalains, carotenoids and chlorophylls (5).

Food pigment	Heat	Oxygen	Light	pH change
Anthocyanins	High to moderate	High	High	Low
Betalains	Moderate to low	High	High	Moderate
Carotenoids	Moderate	Low	Low	High
Chlorophylls	Moderate	High	High	Low

شکل ۳: ثبات مواد رنگزا آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها در برابر حرارت، اکسیژن، نور و تغییر pH (۵).
Figure 3: Pigments stability of anthocyanins, betalains, carotenoids and chlorophylls against heat, oxygen, light and pH change (5).

مرحله شامل تخلیص و جزءبه‌جزء کردن عصاره خام از طریق روش‌های جداسازی جامد-مایع یا جداسازی مایع-مایع است که به دنبال آن تغلیظ تحت خلاء یا استفاده از روش‌های صاف‌کردن غشایی صورت می‌گیرد (۵).

به طور معمول در مرحله اول مواد خام خرد و آسیاب شده و با یک حلال مناسب برای استخراج مواد رنگزا مخلوط می‌شوند. امروزه این روش‌ها، پیشرفته‌تر و خلاصه‌تر شده‌اند و به منظور دستیابی به بازده استخراج بالاتر، عوامل مختلفی نظیر دما، فشار، استفاده از مایکروویو، پالس الکتریکی یا فراصوت بهینه‌سازی شده‌اند. دومین

فناوری PEF حداقل تغییرات را در خواص حسی و تغذیه‌ای محصولات ایجاد می‌کند. این واقعیت به طور مستقیم با دمای پایین مورد استفاده در طول فرآیند، در حدود ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد مرتبط است. از سوی دیگر، برخی از جنبه‌های منفی نیز در کاربرد این فناوری نوظهور گزارش شده است، مانند تشکیل رادیکال‌های آزاد، شستشوی احتمالی ترکیبات فعال زیستی، و تجزیه آنزیمی مواد رنگزای بازبافتی (۱۱). علاوه بر این، بیشتر غذاهایی که با فناوری PEF تیمار می‌شوند، مایعات همگن هستند. کاربرد این فناوری در مواد جامد یا مایع ناهمگن، هوا را به محصول وارد می‌کند. ادغام هوا پدیده پارگی دی الکتریک را ترویج می‌کند. این پارگی به دلیل تخلیه الکتریکی بین دو الکترود در محفظه تصفیه رخ می‌دهد. این پدیده واکنش‌های نامطلوب را در غذا کاتالیز می‌کند و می‌تواند به دلیل تشکیل جرقه باعث انفجار در تجهیزات شود (۱۴).

فناوری PEF به دلیل اثرات مضر آن بر یکپارچگی سلول، به عنوان یک روش امیدوارکننده برای افزایش انتقال جرم در طول فرآیند استخراج ارزیابی شده است (۱۴). افزایش در انتقال جرم اثر الکتروپوزیو کردن است زیرا اعمال میدان‌های الکتریکی (۵ تا ۵ کیلوولت بر سانتی متر) منافذی را در ساختار سلولی بافت گیاه تشکیل می‌دهد. بنابراین، الکتروپوزیو کردن نفوذپذیری پلاسما را تغییر می‌دهد. در جدول ۱، خلاصه‌ای تحقیقات انجام شده در مورد استخراج مواد رنگزا به کمک پالس الکتریکی مشاهده می‌شود.

۴-۳-۱- آنتوسیانین‌ها

آنتوسیانین‌ها گروهی از مواد رنگزا را تشکیل می‌دهند که به طور گسترده در صنایع غذایی به عنوان مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند که طیف رنگی آنها قرمز، بنفش و آبی است. این ترکیبات متعلق به کلاس فلاونوئیدها هستند و از گلیکوزیدهای پلی‌متوکسی و مشتقات پلی‌هیدروکسی یون فلاویلیوم یا نمک‌های ۲-فنیل بنزوپیریلیوم تشکیل شده‌اند (۲۹). علاوه بر این، آنتوسیانین‌ها در ساختار خود دارای یک پایه غیرگلیکوزید به نام آنتوسیانیدین هستند. این پایه غیرگلیکوزید، به نوبه خود، معمولاً با یک یا چند مولکول قند و سایر ترکیبات حاصل از واکنش بین فندها و اسیدهای موجود در محیط مرتبط است (۳۰). علاوه بر این، آنتوسیانیدین از پیوندهای دوگانه مزدوج بین سه حلقه کربنی تشکیل می‌شود.

این پایه مسئول فعالیت رنگ‌آمیزی آنتوسیانین‌ها است زیرا کروموفور ساختار آنها است. بنابراین، آنتوسیانین‌ها را می‌توان به عنوان مواد رنگزای طبیعی در غذاهایی که در حال حاضر در بازار تولید می‌شود، مانند شیر تخمیر شده، پنیر خامه‌ای، نوشیدنی‌های با pH پایین، پنکیک و املت استفاده کرد.

به طور معمول، مواد رنگزای طبیعی از طریق استخراج جامد-مایع (SLE) استخراج می‌شوند. در این فرآیندها، ذرات جامد بافت‌های گیاهی به دلیل اختلاف گرادیان غلظت، با انتشار به فاز مایع مهاجرت می‌کنند. استخراج SLE معمولاً با حلال‌های آلی که مواد رنگزا را حل می‌کنند، مانند اتانل، متانل و هگزان انجام می‌شود. بنابراین، مراحل جداسازی و خالص‌سازی برای حذف حلال عصاره و خالص‌سازی ترکیبات استخراج شده پس از استخراج انجام می‌شود. استخراج سوکسله نمونه‌ای از SLE است. در این روش استخراج جامع، حلال‌های آلی به طور پیوسته در بستر گیاه چرخانده می‌شوند تا اجزای غیرقطبی را با جوشاندن و متراکم کردن حلال بازیابی کنند. با این حال، چندین اشکال را می‌توان به روش استخراج سوکسله مربوط کرد. به عنوان مثال، شرایط استخراج در نقطه جوش حلال برای مدت طولانی به تجزیه حرارتی ترکیبات هدف کمک می‌کند (۱۱).

امروزه تمایلات جهانی به سمت استخراج با حلال کمتر، روش‌های بر پایه جذب سطحی و استفاده از حلال‌های کم ضررتر برای محیط‌زیست سوق یافته است. در دهه‌های اخیر فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند استخراج با سیال فوق بحرانی، استخراج تحت فشار با مایع، استخراج به کمک مایکروویو، استخراج به کمک فراصوت، پالس الکتریکی، استخراج مداوم غیرهمسو، استخراج فاز جامد و ریزاستخراج فاز جامد جایگزین روش‌های قدیمی نظیر استخراج سوکسله و تقطیر آبی شده‌اند. نسل جدید روش‌های بهبود یافته استخراج بر استفاده از دماهای بالاتر از نقطه تقطیر آبی پایه‌گذاری شده‌اند (۵).

۴-۳-۲- استخراج مواد رنگزا با کمک پالس الکتریکی (PEF)

با استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی به علت افزایش در نفوذپذیری سلول‌ها، میزان بازده استخراج مواد رنگزا افزایش می‌یابد. فناوری‌های پردازش غیرحرارتی به طور گسترده‌ای برای استخراج مواد رنگزای غذایی طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته است. این فناوری‌ها از دماهای پایین‌تر و مقادیر کمی حلال استفاده می‌کنند که باعث افزایش پایداری شیمیایی و فیزیکی مواد رنگزا، کارایی انرژی و بازده استخراج می‌شود. علاوه بر این، با استفاده نکردن از گرما به عنوان عامل اولیه برای فرآیندهای استخراج، فناوری‌های غیرحرارتی حفاظت بهتری از اجزای حساس به حرارت مانند مواد رنگزا را ممکن می‌سازد. از جمله کاربردهای اصلی آن در سیستم‌های غذایی، بازیابی ترکیبات فیتوشیمیایی از بسترهای گیاهی، غیرفعال‌سازی میکروبی و آنزیمی، کم آبی و انجماد، غلظت ترکیبات فعال زیستی و بهبود خواص فیزیوشیمیایی، رئولوژیکی و ساختاری محصولات غذایی است. علاوه بر افزایش بازده فرآیند استخراج،

¹ Solid Phase Extraction

جدول ۱: استخراج مواد رنگزای طبیعی غذایی از بستری گیاهی به کمک PEF (۵).

Table 1: Extraction of natural food coloring substances from plant matrices with the help of PEF (5).

Food pigments	Plant matrix	PEF process parameters	Major findings	Ref.
Anthocyanins	Purple potatoes (<i>Solanum tuberosum</i>)	- Electric field strength: 1 - 5 kV/cm - Specific energy input: 0.54 - 13.50 kJ/kg - Pulse width: 45 - 105 μ s - Pulse number: 5 - 35 - Frequency: 1 Hz	Regardless of extraction temperature (10 - 40°C) or solvent (water and ethanol) used for extraction of anthocyanins, PEF-treated samples had greater extraction yield compared to those untreated. PEF treatment increased the anthocyanins recovery yield and reduced the extraction temperature besides eliminating the use of organic solvents.	(16)
Anthocyanins	Blueberry (<i>Vaccinium sect. Cyanococcus</i>)	- Electric field strength: 10 - 35 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: 2 μ s - Pulse number: 2 - 14 - Frequency: -	PEF treatment increased anthocyanin extraction yield and reduced the temperature and extraction time. High electric field strength (>20 kV/cm) and pulse number (>10 pulses) reduced anthocyanin extraction yield. PEF treatments were more efficient compared to high-intensity ultrasound treatments.	(17)
Anthocyanins	Grape (<i>Vitis vinifera</i> L.)	- Electric field strength: 13.3 kV/cm - Specific energy input: 0 - 564 kJ/kg - Pulse width: - - Pulse number: - - Frequency: 0.5 Hz	The PEF process intensification increased anthocyanin extraction. PEF treatment was more efficient for anthocyanin extraction than high-intensity ultrasound (up to 22%) and high voltage electrical discharges (up to 55%) treatments.	(18)
Anthocyanins	Plum peel (<i>Prunus domestica</i> var. Casselman) and grape peel (<i>Vitis vinifera</i> L.)	- Electric field strength: 25 kV/cm - Specific energy input: 3.91 and 11.5 kJ/kg (grape peel); 1.84 and 9.05 kJ/kg (plum peel) - Pulse width: 6 μ s - Pulse number: 9.7 and 25.2 - Frequency: 10 Hz	The 25-mm diameter PEF chamber showed best results than the 7-mm diameter. The use of a PEF chamber of a larger diameter allowed the application of a higher residence time and a higher number of pulses, which increased the anthocyanin extraction yield. However, this treatment promoted a high degradation of ascorbic acid.	(19)
Betanins	Beetroot (<i>Beta vulgaris</i> L.)	- Electric field strength: 4.38 and 6.25 kV/cm - Specific energy input: 0 - 12.5 kJ/kg - Pulse width: 10 μ s - Pulse number: 10 - 30 - Frequency: -	The electric field strength of 4.38 kV/cm and specific energy input of 4.10 kJ/kg allowed the extraction of 329% more betanin than the control treatment.	(20)
Betanins	Beetroot (<i>Beta vulgaris</i> L.)	- Electric field strength: 0, 1, 3, 5, 7, and 9 kV/cm - Specific energy input: 0, 0.02, 0.09, 0.24, 0.50, and 0.70 kJ/kg - Pulse width: - - Pulse number: 5 - Frequency: 1 Hz	The betanin extraction yield was affected by the applied electric field strength, temperature, and pH of the liquid medium. However, the pressure and number of pulses used in the process did not significantly influence the betanin recovery. The pH 3.5 and temperatures in the range of 30 - 40 °C contributed to the highest yields.	(21)
Betanins	Beetroot (<i>Beta vulgaris</i> L.)	- Electric field strength: 0.2 - 0.6 kV/cm (range of milliseconds) and 2 - 6 kV/cm (range of microseconds) - Specific energy input: 1.6 to 57.6 kJ/kg (range of milliseconds) and 0.04 to 74.16 kJ/kg (range of microseconds). - Pulse width: 1 ms and 3 μ s - Pulse number: 10 - 80 (range of milliseconds) and 5 - 100 (range of microseconds) - Frequency: 1 Hz	PEF treatments in the range of ms and μ s were effective for the disintegration of red beet cells enhancing betanin aqueous extraction. However, PEF treatments in the range of μ s were more efficient for improving betanin extraction in terms of total specific energy consumption.	(22)
Betanins	Red prickly pear (<i>Opuntia stricta</i> Haw.)	- Electric field strength: 8 - 20 kV/cm - Specific energy input: 24 - 145 kJ/kg - Pulse width: 10 μ s - Pulse number: 0 - 300 - Frequency: 0.5 Hz	PEF treatment was more profitable compared to ultrasound treatment due to lower energy consumption. Furthermore, scanning electron microscopy images revealed the ability of PEF treatment to induce cell wall permeabilization without disintegrating the cell tissue facilitating the selective recovery of the valuable intracellular compounds	(23)
Carotenoids	Date fruit (<i>Phoenix dactylifera</i> L., Sukkari)	- Electric field strength: 1, 2, and 3 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: - - Pulse number: 30 - Frequency: 10 Hz	The increase in the electric field strength promoted a positive effect on the total carotenoid content of the extracts from 2.9 ± 0.1 to 6.1 ± 0.1 μ g/mL.	(24)

جدول ۱: ادامه.

Table 1: Continued.

Food pigments	Plant matrix	PEF process parameters	Major findings	Ref.
Carotenoids	Tomato (<i>Solanum Lycopersicon</i>)	- Electric field strength: 1, 3, and 5 kV/cm - Specific energy input: 5 and 10 kJ/kg - Pulse width: 20 μs - Pulse number: 10 - 833 - - Frequency: 10 Hz	PEF treatment increased the extraction yield of carotenoids, especially lycopene, using acetone or ethyl lactate in the proportion 1:40 g/mL as solvents.	(25)
Carotenoids	Canary tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>) peel	- Electric field strength: 3 - 7 kV/cm - Specific energy input: 0.54 - 13.50 kJ/kg - Pulse width: 3 μs - Pulse number: 5 - 100 - Frequency: 1 Hz	The cell membrane electroporation of tomato peels increased the extraction of carotenoids. PEF treatment reduced the extraction time and the proportion of hexane applied as a solvent without affecting the lycopene, lutein, and β-carotene extraction yield.	(26)
Carotenoids	Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> L.)	- Electric field strength: 0.25 - 0.75 kV/cm - Specific energy input: 1 kJ/kg - - Pulse width: 20 μs - Pulse number:- - Frequency: 10 Hz	Previous application of a pulsed electric field treatment at 0.50 kV/cm and 1 kJ/kg before the process of steam bleaching at 60°C significantly increased the carotenoid extraction yield.	(27)
Chlorophylls	Custard apple (<i>Annona squamosa</i>) leaves	- Electric field strength: 2, 4, and 6 kV/cm - Specific energy input: 45, 94, and 142 kJ/kg - Pulse width: - - Pulse number: 100, 200, and 300 - Frequency:-	Higher energy PEF treatments were promising non-thermal treatments for improving the extraction yield of flavanols, such as rutin. However, they reduced the chlorophyll content in the extracts.	(28)
Chlorophylls	Spinach (<i>Spinacia oleracea</i> L.)	-Electric field strength: 0, 3.3, 6.7, 13.3, 20.0 and 26.7 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: 20 μs - Pulse number: - - Frequency: -	PEF treatments inhibited the degradation of pigments, especially for the recovery of chlorophylls under different process temperatures (20, 35 and 45 °C).	(29)

دارای اسید بتلامیک به عنوان پیش‌ساز هستند (۱۰).

بتالین‌ها به دلیل اینکه از دسته‌ی مواد رنگزا با حساسیت بالا است برای حفظ ترکیبات حساس به حرارت آن می‌توان از میدان پالس الکتریکی برای استخراج آن استفاده کرد. در تحقیقی اثرات قدرت میدان الکتریکی در فرآیند استخراج بتاولگاریس (kV/cm) ۴/۳۸ و ۶/۲۵، انرژی ورودی (۰-۱۲/۵ kJ/kg) و تعداد پالس‌ها (۱۰-۳۰) بر سرعت انتقال جرم بتالین‌ها از چغندر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد PEF (۴/۳۸ kV/cm) در ۴/۳۸ kJ/k (۴/۱۰) بازده بتالین را ۳۲۹٪ و ولگاگزانتین را ۲۴۴٪ نسبت به نمونه تیمار نشده افزایش داد (۵).

۴-۳-۳- کاروتنوئیدها

کاروتنوئیدها مواد رنگزایی هستند که به طور گسترده در طبیعت توزیع شده‌اند، بیش از ۶۵۰ نوع آن شناسایی شده است و تقریباً ۱۰۰ نوع آن در مواد اصلی غذایی یافت شده است. این مواد رنگزا تتراترپن‌هایی هستند که از اتحاد ۸ مولکول ایزوپرن به وجود می‌آیند که منجر به یک زنجیره طولانی از پیوندهای دوگانه می‌شود. این ساختار کروموفور کاروتنوئیدها است. طیف رنگی کاروتنوئیدها به

آنتوسیانین‌ها منحصرأ در منابع گیاهی مانند میوه‌ها و سبزیجات مانند شاه‌توت، انجیر، بادمجان، توت‌فرنگی، آلو، جامبولانو، جابوتیکا، گیلان، آسرولا، تمشک، انگور، سیب، سیب زمینی بنفش و کلم قرمز یافت می‌شوند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید استفاده از میدان الکتریکی برای محصولات مختلف دارای عوامل مختلفی است. به طور مثال در فرآیند استخراج آنتوسیانین از کلم قرمز از قدرت میدان الکتریکی ۲/۵، ۵۰ پالس و ۱۵ میکروثانیه استفاده شده که تاثیرات مثبتی داشته و باعث افزایش بازدهی شده است (۳۱).

۴-۳-۲- بتالین

چغندر منبع اصلی بتالین است. با این حال، آنها معمولاً در چغندر سوئیس و میوه‌های کاکتوس نیز یافت می‌شوند. بتالین‌ها شامل طیف رنگی قرمز/بنفش و/یا زرد- نارنجی هستند. بنابراین، مواد رنگزای اصلی مرتبط با تولید مواد رنگزای بتالین هستند. ساختار این ترکیبات محصول کونژوگه بین اسید بتلامیک و یک آمین اولیه یا ثانویه است. این مواد رنگزا به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: بتاسیانین‌ها (قرمز/بنفش) و بتازانتین‌ها (زرد نارنجی). هر دو گروه

استخراج کلروفیل‌ها مشاهده کردند. محتوای کلروفیل در عصاره برگ سیب کاستارد تیمار شده با PEF نسبت به نمونه‌های تیمار نشده کمتر بود. این بازده PEF ممکن است با قطبیت حلال مورد استفاده مرتبط باشد (۱۴). حلال‌های غیرقطبی رسانایی تقریباً ناچیز دارند، بنابراین میدان الکتریکی اعمال شده در سیستم به طور یکنواخت در سراسر بستر منتقل نمی‌شود، که بر بازده فرآیند تأثیر می‌گذارد. بنابراین، این فناوری برای استخراج بتالین‌ها و آنتوسیانین‌ها مناسب‌تر است. این‌ها با حلال‌های قطبی استخراج می‌شوند، در حالی که کارتنوئیدها و کلروفیل‌ها معمولاً با حلال‌های غیرقطبی استخراج می‌شوند (۵).

۴-۳-۵- استخراج مواد رنگزای لیکوپین

این مواد رنگزا جزء دسته کارتنوئیدها و از خانواده کاروتن‌هاست. طیف رنگی لیکوپین قرمز است و منابع آن گوجه فرنگی، هندوانه، گریپ فروت صورتی، پاپایا، خربزه درختی و گواوا می‌باشد. اما مهمترین منبع لیکوپین، گوجه فرنگی و فرآورده‌های غذایی حاصل از آن است که مقدار لیکوپین در آنها بیش از ۶۰٪ کارتنوئیدهای موجود را تشکیل می‌دهد (۳۲).

دولت آبادی و همکارانش (۱۴۰۱) بهینه‌سازی فرآیند استخراج لیکوپین و ترکیبات فنولی از تفاله گوجه‌فرنگی با استفاده از پیش تیمار میدان الکتریکی پالسی را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق شدت‌های الکتریکی ۲، ۴ و ۶ کیلوولت بر سانتی‌متر و تعداد پالس‌های ۱۰، ۳۵ و ۶۰ مورد بررسی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان الکتریکی میزان لیکوپین استحصال، ترکیبات فنولی کل، فعالیت رادیکال گیرندگی به روش DPPH^۱ و میزان قدرت احیاکنندگی آهن ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش تعداد پالس‌ها نیز ابتدا میزان لیکوپین کاهش و سپس افزایش یافت ولی میزان ترکیبات فنولی کل و فعالیت رادیکال گیرندگی به روش DPPH به صورت جزئی افزایش یافت. بهینه‌سازی فرآیند نیز نشان داد که به منظور رسیدن به عصاره‌ای با میزان لیکوپین و ترکیبات فنولی بیشتر، بایستی شدت میدان الکتریکی ۳/۷ کیلوولت بر سانتی‌متر و تعداد پالس ۶۰ باشد تا مطلوبیت ۰/۹۱۵ ایجاد گردد. در نهایت مقایسه نمونه شاهد (فاقد تیمار) با نمونه حاصل از تیمار بهینه مشخص کرد که نمونه حاصل از پیش تیمار میدان الکتریکی پالسی درصد لیکوپین، ترکیبات فنولی کل، فعالیت رادیکال گیرندگی و قدرت احیاکنندگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارد (۳۳).

۴-۴- بهینه‌سازی شرایط فرآیند استخراج به کمک PEF

بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج با کمک PEF نیازمند اجرای روش‌ها و

کمیت و توزیع پیوندهای دوگانه بستگی دارد و شامل قرمز، زرد و نارنجی است. منابع اصلی کارتنوئیدها کدو حلواپی، هویج، اسفناج، کلم بروکلی، سیب زمینی شیرین، پاپایا و زردآلو هستند. برخلاف گیاهان، حیوانات قادر به سنتز کارتنوئیدها نیستند. با این حال، آنها می‌توانند جذب آنها را، تغییر دهند و در بافت‌های خود رسوب کنند، مانند زردی در زرده تخم مرغ. این مواد رنگزا به دو گروه اصلی کاروتن‌ها و گزانتوفیل‌ها تقسیم می‌شوند. تفاوت کاروتن‌ها و گزانتوفیل‌ها در اتم‌هایی است که ساختار مولکولی آنها را تشکیل می‌دهند. کاروتن‌ها فقط کربن و هیدروژن را در ساختار خود دارند، در حالی که گزانتوفیل‌ها کربن، هیدروژن و اکسیژن را دارند. کارتنوئیدها نیز بر اساس عملکردشان به کارتنوئیدهای اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. کارتنوئیدهای اولیه مولکول‌های حیاتی برای فتوسنتز گیاهان هستند. آنها بتا کاروتن، لوتئین و زآگزانتین هستند. ثانویه‌ها مستقیماً با سازوکارهای باقی‌مانده گیاه مرتبط نیستند. آنها شامل α -کاروتن، لیکوپین و آستاگزانتین هستند (۱۴).

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید اثرات فناوری غیرحرارتی (PEF) در فرآیند استخراج از گوجه فرنگی قناری مورد ارزیابی قرار گرفته است. الکتروپوریزه کردن غشای سلولی پوست گوجه فرنگی با قدرت میدان الکتریکی در فرآیند استخراج گوجه قناری (۷-۳ kV/cm) و انرژی (۱۳/۵-۵۴/۰ kJ/kg) و عرض پالس (۳ μ s). باعث افزایش استخراج کارتنوئیدها شده است. بنابراین این فناوری باعث افزایش انتقال جرم مواد رنگزا در طول فرآیند استخراج و کاهش شدت فرآیند (دما و مقدار حلال) شده است. علاوه بر این فناوری PEF از اصول شیمی سبز پیروی می‌کند، زیرا کاربرد آن باعث کاهش مصرف انرژی و اتلاف حلال‌های مرتبط با فرآیند می‌شود و به کاهش اثرات زیست محیطی کمک می‌کند (۵).

۴-۳-۴- کلروفیل‌ها

کلروفیل‌ها مواد رنگزایی هستند که مسئول رنگ سبز گیاهان، جلبک‌ها و باکتری‌ها هستند. آنها به طور گسترده در طبیعت پراکنده هستند و در کلروپلاست‌های گیاهی یافت می‌شوند که عموماً با کارتنوئیدها، لیپیدها و لیپوپروتئین‌ها مرتبط می‌باشند. علاوه بر این، کلروفیل‌ها مسئول جذب انرژی برای فرآیند فتوسنتز هستند و نقش حیاتی در گیاهان ایفا می‌کنند (۱۰). کلروفیل حساسیت بالایی به تغییرات pH دارد، در محدوده ۳/۵ تا ۵ پایدار می‌ماند و نسبت به گرما حساس است (۱۴).

همان‌طور که در جدول ۱، مشاهده می‌کنید استخراج کلروفیل از سیب کاستارد با قدرت میدان الکتریکی (۴، ۲ و ۶ kV/cm) و انرژی ورودی ویژه (۱۴۲، ۹۴ و ۴۵ kJ/kg) مورد بررسی قرار گرفته است. که اثرات نامطلوب قدرت میدان الکتریکی و انرژی ویژه را بر بازده

^۱ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl

گیاهی برجسته است. فناوری PEF انتقال جرم مواد رنگزای را از طریق پدیده الکتروپوریزه کردن افزایش می‌دهد و از تخریب حرارتی آنها جلوگیری می‌کند. بنابراین، یک فرآیند به کمک PEF بازده استخراج بالاتر، بازده انرژی بیشتر با استفاده از زمان‌های استخراج کوتاه‌تر، مقدار کمتر حلال و شرایط دمایی پایین‌تر را فراهم می‌کند. باین حال، مطالعات کمی اثرات PEF را بر استخراج کلروفیل گزارش می‌کنند، بنابراین تحقیقات بیشتری برای تأیید اثرات آن بر استخراج این مواد رنگزا مورد نیاز است. همچنین مطالعات بیشتری برای بهینه‌سازی عوامل فرآیندی که PEF را اعمال می‌کنند، مورد نیاز است. این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند بهره‌وری انرژی را برای کاربردهای بعدی در مقیاس صنعتی به بیشترین مقدار برسانند (۳۵).

۵- کاربرد اجزای طبیعی در صنایع غذایی

مواد رنگزای خوراکی اغلب در صنایع غذایی استفاده می‌شوند تا مواد رنگزای طبیعی محصولات را زمانی که در طول تولید و نگهداری محو می‌شوند، حفظ کنند. قوام میوه‌هایی که در اثر تغییرات آب و هوایی تخریب می‌شوند را می‌توان با افزودن مواد رنگزای طبیعی حفظ کرد که باعث افزایش کیفیت و طعم محصول نیز می‌شود. علاوه بر صنایع دیگر از جمله داروسازی، مواد مغذی و بسیاری دیگر، مواد رنگزای طبیعی در صنایع غذایی به عنوان نگهدارنده مواد غذایی، شاخص‌های کیفیت و عوامل رنگ دهنده استفاده می‌شوند. بحث در مورد هر یک از این کاربردها در زیر ارائه شده است (۳۶).

۵-۱- نگهدارنده های غذایی

مواد رنگزای طبیعی به دست آمده از گیاهان حاوی مواد شیمیایی گیاهی هستند. فعالیت‌های ضدباکتریایی و ضداکسیدکنندگی فیتوکمیکال‌ها رشد میکروبی را متوقف می‌کند. مواد رنگزای طبیعی دیگر زردچوبه که به رنگ زرد روشن است به دلیل خواص ضدباکتری و ضداکسیدکنندگی به عنوان نگهدارنده در ترشی‌ها و سایر محصولات غذایی استفاده می‌شود. زردچوبه دارای مقادیر بیشتری فنل و فلاونوئید است. جزء اصلی فنولی زردچوبه، کورکومین در از بین بردن رادیکال‌های پراکسید بسیار کارآمد است (۳۶).

۵-۲- شاخص کیفیت

کیفیت یک محصول مستقیماً تحت تأثیر رنگ غذا است، که بر نحوه درک مشتریان از جنبه‌های دیگر مانند طعم، شیرینی و تازگی نیز تأثیر می‌گذارد. مشخصات آنتوسیانین تشخیص این‌که آیا مریبا با توت‌های واقعی تهیه شده است یا نه، بسیار ساده است. رنگ قرمز مایل به آبی عصاره کلم قرمز، تولید شده توسط بتانین، که به ویژه در سطوح pH بالا پایدار است، می‌تواند به عنوان یک شاخص کیفیت استفاده شود (۳۶).

استراتژی‌های ساختاریافته برای افزایش بازیابی مواد رنگزای طبیعی از بسترهای گیاهی است. در این راستا، عوامل اصلی فرآیند مربوط به عملکرد PEF در فرآیند استخراج عبارتند از: قدرت میدان الکتریکی، انرژی ورودی ویژه، تعداد پالس، زمان تصفیه و دما است (۳۴). این عوامل فرآیند پدیده الکتروپوریزه کردن را در سلول‌های گیاهی تعدیل می‌کنند که بر انتشار محتوای ترکیبات فیتوشیمیایی آن‌ها در محیط یا حلال مایع تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، با تشدید عوامل فرآیند PEF ذکر شده، الکتروپوریزه کردن تشدید می‌شود و استخراج ترکیبات هدف را افزایش می‌دهد. با این حال، بسته به ویژگی‌های بستر گیاه، مانند توزیع اندازه سلول بین پوست و خمیر، ساختار و پایداری شیمیایی و فیزیکی مواد رنگزا طبیعی و همچنین موقعیت نسبی آن در سلول گیاهی و توانایی اتصال به بستر، تشدید عوامل فرآیند استخراج PEF ممکن است عملکرد استخراج را کاهش دهد. در واقع، قدرت میدان الکتریکی مورد نیاز برای ترویج الکتروپوریزه کردن در غشای سلولی ممکن است برای هر بستر گیاهی متفاوت باشد. تقاضای کم انرژی تیمارهای PEF یکی از مزایای اصلی کاربرد این فناوری در صنایع غذایی است. این عامل منجر به هزینه کمتری برای پردازش به کمک PEF می‌شود و سرمایه گذاری اولیه بالایی که مورد نیاز این فناوری نوآورانه است را جبران می‌کند. با این حال، عوامل فرآیند باید برای هر ماده خام گیاهی ارزیابی شود تا روش‌ها و پروتکل‌های مناسب برای تعیین قدرت میدان الکتریکی و مدت زمان پالس بهینه برای دستیابی به بازده انرژی بالاتر فرآیند استخراج مواد رنگزای طبیعی ایجاد شود (۵).

ژو و همکارانش^۱ (۲۰۱۵) اثرات تغییر قدرت میدان (۵ تا ۳۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) بر استخراج آنتوسیانین از زغال اخته را ارزیابی کرد. بهترین شرایط استخراج ۲۰ کیلوولت بر سانتی‌متر ۱۰، پالس و اتانل ۶۰ درصد بود، همچنین با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی فرآیند علاوه بر این، شرایط دمای استخراج و زمان پردازش را کاهش داد (۳۴).

میدان الکتریکی پالسی می‌تواند شدت شرایط استخراج (دما و مقدار حلال) را کاهش داده و با تغییر نفوذپذیری سلول‌ها، انتقال جرم مواد رنگزا را افزایش دهد. بنابراین، فناوری PEF به سیستم تولید مواد رنگزا پایدارتر کمک می‌کند.

ادغام روش‌های استخراج می‌تواند انرژی مورد نیاز برای استخراج مواد رنگزای طبیعی را کاهش دهد. شرایط استخراج انرژی کم به نوبه خود می‌تواند مواد رنگزای حساس به گرما، pH و نور را بهتر حفظ کند. بنابراین، روش‌های یکپارچه ممکن است افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب ترکیبات قابل‌انعطاف را افزایش دهند. ادغام فناوری PEF در فرآیند استخراج آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها به دلیل سازوکار عمل آن بر روی بسترهای

¹ Zhou, Zhao & Huang

۵-۳- خواص دارویی

مواد رنگزا ممکن است برای سلامت انسان مفید باشند زیرا حاوی مواد فعال فیزیولوژیکی با ویژگی های دارویی مانند ضد اکسیدکنندگی قوی ضد جهش‌زا، قابلیت‌های ضد التهابی و اثرات ضد آرتريت هستند. یکی دیگر از زانتوفیل‌های طبیعی با اثرات ضد اکسیدکنندگی قوی آستاگزانتین کاروتنوئیدها همچنین به عنوان ضد اکسیدکنندگی زیستی قوی عمل می‌کنند، از سلول‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از اکسیدان‌ها و رادیکال‌های آزاد محافظت می‌کنند. آنها منبع فوق‌العاده‌ای از داروهای ضد تومور هستند. بتاسیانین، یک ضد اکسیدکننده، همچنین یک ضد رادیکال موثر است. طبق مطالعات جمعیت شناختی، مصرف کلروفیل با کاهش بروز سرطان روده بزرگ مرتبط است. رنگدانه‌های میکروبی متعددی مانند ویولاسین، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها کشف شده‌اند که دارای خواص ضد اکسیدکنندگی هستند (۳۶).

۵-۴- مکمل‌های غذایی

اجزای زیست فعال گیاهی، که مواد ساخته شده توسط سلول‌های گیاهی هستند، در رنگ‌ها یافت می‌شوند. کاروتنوئیدها گروه مهمی از مواد رنگزای طبیعی هستند. مواد رنگزایی که به صورت زرد، نارنجی و قرمز محلول در چربی به نام کاروتنوئیدها در همه گیاهان عالی و برخی از حیوانات وجود دارند. مواد رنگزای زیستی در صنایع غذایی مهم هستند زیرا جایگزین طبیعی تری برای مواد رنگزای مصنوعی خوراکی هستند. مواد رنگزای زیستی از منابع طبیعی مانند میوه‌ها، سبزیجات، جلبک‌ها و دیگر منابع طبیعی ساخته می‌شوند، بنابراین می‌توانند به ارائه ظاهر و طعم طبیعی تر به غذا کمک کنند. آنها همچنین خطرات بالقوه کمتری برای سلامتی دارند، زیرا از منابع طبیعی تولید می‌شوند. علاوه بر این، مواد رنگزای زیستی حاوی مواد نگهدارنده مصنوعی نیستند که می‌تواند منجر به بهبود ایمنی و کیفیت مواد غذایی شود. در نهایت، مواد رنگزای زیستی اغلب مقرون به صرفه‌تر از مواد رنگزای خوراکی مصنوعی هستند و آنها را به گزینه‌ای جذاب برای تولیدکنندگان مواد غذایی تبدیل می‌کند (۳۶).

۶- نتیجه‌گیری

ادغام روش‌های استخراج می‌تواند انرژی مورد نیاز برای استخراج مواد رنگزای طبیعی را کاهش دهد. شرایط استخراج انرژی کم به نوبه خود می‌تواند مواد رنگزای حساس به گرما، pH و نور را بهتر حفظ کند. بنابراین، روش‌های یکپارچه ممکن است افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب ترکیبات قابل انعطاف را افزایش دهند. فناوری PEF در فرآیند استخراج آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها به دلیل سازوکار عمل آن بر روی بسترهای گیاهی برجسته است. همان‌طور که اشاره شد، فناوری PEF انتقال جرم مواد رنگزا را از طریق پدیده الکتروپوریزه کردن افزایش می‌دهد و از تخریب حرارتی آنها جلوگیری می‌کند. بنابراین، یک فرآیند به کمک PEF بازده استخراج بالاتر، بازده انرژی بیشتر با استفاده از زمان‌های استخراج کوتاه‌تر، مقدار کمتر حلال و شرایط دمایی پایین‌تر را فراهم می‌کند. میدان‌های الکتریکی پالسی تمایل دارند پروتئین‌های غذایی را به اسیدهای آمینه آزاد تبدیل کنند، اما حداقل تأثیر آن بر روی چربی‌ها است و حتی باعث افزایش مقادیر پلی‌فنول و کاروتنوئیدها در غذاهای مایع می‌شود. در نتیجه، اجرای فرآیند PEF در مقیاس صنعتی ممکن است گزینه‌ای برای بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی و تغذیه‌ای باشد. علاوه بر این، بالا بودن هزینه راه‌اندازی اولیه سیستم PEF اصلی‌ترین مانع استفاده از این سیستم در مقیاس صنعتی است. بنابراین استفاده از این تیمار همچنان در سطح آزمایشگاهی است. با این وجود این سیستم‌های PEF به دلیل پایین بودن هزینه‌های جاری و تولید محصولات با کیفیت بالا و فرآیند کم بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل تحقیق در گروه صنایع غذایی موسسه آموزش عالی بصیر توسط استاد و دانشجو است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۷- مراجع

- Joyandeh H, Nosrati Gh, The effect of pulsed electric fields on microorganisms, enzymes and food compounds, The 11th national conference on sustainable agriculture and natural resources, 1400 [In Persian].
- Barbosa-Canovas GV, Howard Zhang Q. In Pulsed Electric Fields in Food Processing. Washington, DC: Technomic. 2001, 289.
- Sadeghi R, Emamjomeh Z, Karimi M, The effect of electric pulse processes on the synthesis of bioactive compounds in food, Regional conference of Food and Biotechnology, Kermanshah, 1388 [In Persian].
- Asavasanti S, Ristenpart W, Stroeve P, Barrett DM. Permeabilization of Plant Tissue by Monopolar Pulsed Electric Field: Effect of Frequency. J. Food Sci.

- 2011;28(2):445-53.
<http://dio.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01940.x>.
5. Bocker R, Keven Silva E, Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices, School of Food Engineering, University of Campinas, Rua Monteiro Lobato, 80, Campinas, SP CEP, Brazil:13083-862. 2022.
 6. Vorobiev E., Lebovka N., Processing of sugar beets assisted by pulsed electric fields. *Res Agr. Eng.* 2022, 68: 63–79. <https://doi.org/10.17221/91/2021-RAE>.
 7. de L. Castro, M. D. and Garcia-Ayuso, L. E. Soxhlet extraction of solid materials: An outdated technique with a promising innovative future. *Analytica Chimica Acta.* 1998;369:1–10. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00233-5).
 8. Shorstkii I, Stuehmeier-Niehe C, Sosnin M, Hossein Ali E, Comiotto-Alles M, Siemer C, et al, Pulsed Electric Field Treatment Application to Improve Product Yield and Efficiency of Bioactive Compounds through Extraction from Peels in Kiwifruit Processing. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8172255>.
 9. Wood L. \$5 Billion Natural Dyes Market - Global Outlook and Forecasts 2019- 2024. Retrieved from. 2019. <https://www.prnewswire.com/news-releases/5-billion-natural-dyes-market-global-outlook-and-forecasts-2019-2024-300797306.html>. Accessed 20/10/2021 2021.
 10. Delgado-Vargas F, Jimenez AR, Paredes-Lopez O. Natural pigments: Carotenoids, anthocyanins, and betalains - Characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *CRC Crit Rev Food Sci Nutr.* 2000;40(3),173–289. <https://doi.org/10.1080/10408690091189257>.
 11. Aadil R. M., Zeng X.-A, Han Z. Sahar A, Khalil A. A. Rahman U. U, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *J Food Process Preserv.* 2018;42(2), 13507. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13507>.
 12. Barba F. J. Zhu Z. Koubaa M. Sant'Ana A. S. Orlie V. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by products. *Trends Food Sci Technol.* 2016;49,96–109. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.006>.
 13. Liang Gong Y, Lang H, Jun X, High intensity pulsed electric field as an innovative technique for extraction of bioactive compounds-A review, *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2017, 2877-2888, <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077193>.
 14. Ngamwonglumlert L, Devahastin S, Chiewchan N. Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2017; 57(15), 3243–3259. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109498>.
 15. Puertolas E. Cregenzan O. Luengo, E. Alvarez I. Raso J. Pulsed-electricfield-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato, *Food Chem Adv.* 2013;136(3), 1330–1336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.080>.
 16. Zhou Y. Zhao X. Huang H. Effects of pulsed electric fields on anthocyanin extraction yield of blueberry processing by-products. *J Food Process Preserv.* 2015;39(6), 1898–1904. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12427>.
 17. Barba F. J. Parniakov O. Pereira S. A. Wiktor A. Grimi N. Boussetta N, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Sci Technol Res.* 2015;77, 773–798. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1482-3>.
 18. Medina-Meza I. G. Boioli P. Barbosa-Canovas G. V, Assessment of the effects of ultrasonics and pulsed electric fields on nutritional and rheological properties of raspberry and blueberry purees, *Food Bioproc Tech* 2016;9(3), 520–531. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1642-5>.
 19. Nowacka M. Tappi S. Wiktor A. Rybak K. Miszczykowska A. Czyzewski J. et al. The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 2019;8(7). <https://doi.org/10.3390/foods8070244>.
 20. Lopez, N. Puertolas, E. Condon, S. Raso, J. Alvarez, I. Enhancement of the extraction of betanine from red beetroot by pulsed electric fields. *J Food Sci Eng.* 2009; 90(1), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.002>.
 21. Luengo E. Martínez, J. M. Alvarez, I. Raso J. Effects of millisecond and microsecond pulsed electric fields on red beet cell disintegration and extraction of betanines. *Ind Crops Prod.* 2016;. 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.016>.
 22. Koubaa M, Barba F. J. Grimi N. Mhemi, H. Koubaa W. Boussetta N, et al. Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. *Innov Food Sci Emerg Technol* , 2016, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.015>.
 23. Siddeeg A. Faisal Manzoor M. Haseeb Ahmad M. Ahmad N. Ahmed Z. Khan K. I. M. Ammar A. F, Pulsed electric field-assisted ethanolic extraction of date palm fruits: Bioactive compounds, antioxidant activity and physicochemical properties. *Processes*, 7(9). 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7090585>.
 24. Pataro G. Carullo D. Falcone M. Ferrari G. Recovery of lycopene from industrially derived tomato processing by-products by pulsed electric fields-assisted extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 63, Article 102369. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102369>.
 25. Luengo E. Alvarez I. Raso J. Improving carotenoid extraction from tomato waste by pulsed electric fields. *Frontiers in Nutrition*, 1, 12. 2014. <https://doi.org/10.3389/fnut.2014.00012>.
 26. Pataro G. Carullo D. Siddique A. Falcone M. Donisi F. Ferrari G. Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling, *J Food Sci Eng.* 2018. 233. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.029>.
 27. Shiekh K. A. Olatunde O. O. Zhang B. Huda N. Benjakul S. Pulsed electric field assisted process for extraction of bioactive compounds from custard apple (*Annona squamosa*)leaves. *Environ Res Health.* 2021;359, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129976>.
 28. Zhang Z.-H. Wang L.-H. Zeng X.-A. Han, Z. Wang M.-S. Effect of pulsed electric fields (PEFs) on the pigments extracted from spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies.* 2017; 43, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.014>.
 29. Pascual-Teresa S. Molecular mechanisms involved in the cardiovascular and neuroprotective effects of anthocyanins. *Arch Biochem Biophys.* 2014; 559, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2014.04.012>.
 30. Ribeiro JS, Veloso CM, "Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review".

- Food Hydrocoll Health, 2021; 112.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374>.
31. Cortez R, Luna-Vital D, Margulis DE A, Gonzalez de M. "Natural Pigments: Stabilization Methods of Anthocyanins for Food Applications". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017;16(1), 180–198.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12244>.
32. Ghamari M, Zareei H, Yazdankhah S, A review of new methods in lycopene extraction, The 4th national congress of development and promotion of agricultural engineering and soil sciences of Iran, 1401 [In Persian].
33. Dolatabadi Z, Elhamirad A M, Akhlaghi Feyzabadi S H, Farzaneh V, Bakhshabadi H, Optimizing the extraction process of lycopene and phenolic compounds from tomato pomace using pulsed electric field pretreatment, *Iranian journal of food science and industry*, 19(125):109-119.1401.
<https://doi.org/20.1001.1.20088787.1401.19.125.11.0>. [In Persian].
34. Zhou Y, Zhao X, Huang H. Effects of pulsed electric fields on anthocyanin extraction yield of blueberry processing by-products. *J Food Process Preserv*, 2015, 39(6), 1898–1904.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.12427>.
35. Arshad R. N. Abdul-Malek Z. Munir A. Buntat Z. Ahmad M. H. Jusoh Y. et al. Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 104, 1–13.. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>.
36. Singh T, Kumar Pandey V, Kumar Dash K, Zanwar S , Singh R, Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing, *CABI Agric Biosci*, 2023, 100628, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100628>.

How to cite this article:

Ghamary M, Salehi Z. A Review of the Performance and Applications of Electric Pulse in the Extraction of Natural Dye. *J Stud color world*. 2023;13(4):407-420. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2> [In Persian].

A Review on Providing Nanocoating Based on Nanoparticles of Zinc Oxide on magnesium alloy AZ31B by Plasma Electrolytic Oxidation Method and its Corrosion and Antibacterial Properties

Taha Ghaïem Hasankhani¹, Mehrnaz Gharagozlou², Saeed Reza Allahkaram^{*1}

1- School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, P. O. Box: 4563-11155, Tehran, Iran.

2- Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23- 07- 2023

Accepted: 28- 10-2023

Available online: 31-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.6.4

Keywords:

Magnesium alloys

Nanoparticles of Zinc oxide pigment

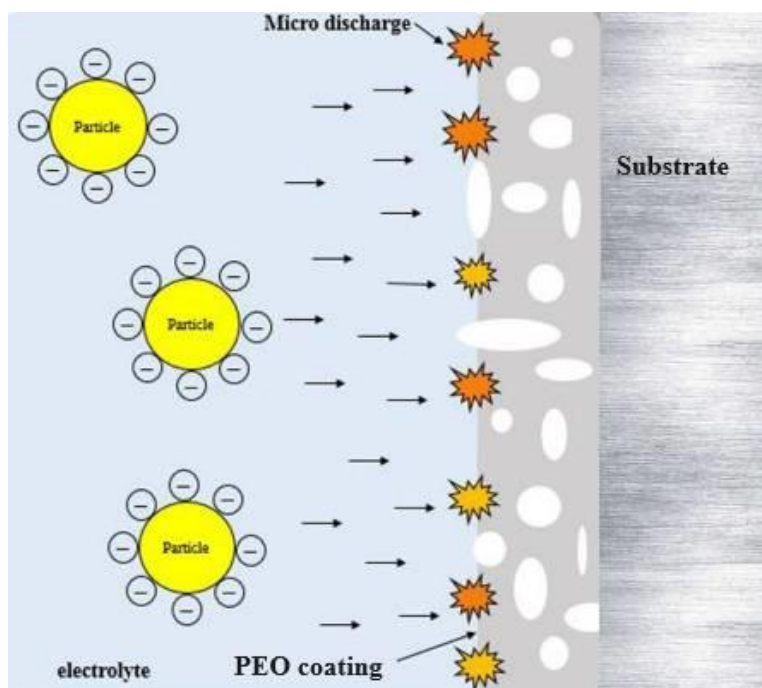
Plasma electrolytic oxidation

Corrosion

Antibacterial properties

ABSTRACT

Although the high chemical activity of magnesium alloys has given these metals biodegradable properties and an important place as a sacrificial anode in protection issues, it has caused them to have important weaknesses in corrosion and wear resistance. Their use in industry should be limited. However, these weaknesses mostly interact with the material's surface and can be overcome using appropriate surface modification. Electrochemical plasma oxidation (PEO) is a popular method to modify the surface of magnesium alloys, which creates a ceramic coating layer on the surface of the alloy, which is not perfect. The presence of a porous structure in this layer is its important weakness because it is a suitable path for the penetration of corrosive agents to the bare surface of the substrate. One of the attractive issues for researchers is to deal with this porosity by using appropriate ceramic additives in the electrolyte during the process. Zinc oxide nanoparticles are a good option for this. These nanoparticles are multifunctional, and in this article, their effects on corrosion properties and antibacterial properties are investigated.



Corresponding author: gharagozlou@icrc.ac.ir
akaram@ut.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



مروری بر توسعه نانوپوشش‌های مبتنی بر نانوذرات اکسیدروی با روش اکسیدشدن پلاسمای الکتروشیمیایی بر روی زیرلایه منیزیمی AZ31B و خواص ضدخوردگی و باکتریایی آن

طاها قیوم حسن‌خانی^۱، مهرناز قراگوزلو^{۲*}، سعید رضا اله‌کرم^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳.

۲- دانشیار، گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

۳- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳.

چکیده

فعالیت شیمیایی بالای آلیاژهای منیزیم با وجود اینکه به این دسته از فلزات خواص زیست‌تخریب‌پذیر بخشیده و همچنین جایگاه مهمی به‌عنوان آند فدا شونده در مباحث حفاظتی به آنها عطا کرده است اما سبب شده که از لحاظ مقاومت خوردگی و سایشی نقاط ضعف مهمی داشته باشند و استفاده از آنها در صنعت محدود شود. اما این نقاط ضعف مذکور بیشتر با سطح ماده برهمکنش دارد و با استفاده از اصلاح سطح مناسب می‌توان بر آن فایز آمد. اکسیدشدن پلاسمای الکتروشیمیایی (PEO) یک روش محبوب برای اصلاح سطح آلیاژهای منیزیم است که یک لایه رویین سرامیکی بر سطح آلیاژ ایجاد می‌کند که همین لایه سرامیکی هم بی‌نقص نیست. وجود یک ساختار متخلخل در این لایه نقطه ضعف مهم آن است، چرا که مسیر مناسبی برای نفوذ عوامل خوردنده به سطح عریان زیرلایه می‌باشد. یکی از مسائل جذاب برای محققان مقابله با این تخلخل به کمک استفاده از افزودنی‌های سرامیکی مناسب در الکترولیت، حین انجام فرآیند می‌باشد. نانوذرات اکسید روی گزینه مناسبی برای این امر می‌باشد. این نانوذرات چند عملکردی هستند که در این مقاله تأثیرات آن‌ها بر خواص خوردگی و همچنین خواص ضدباکتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.6.4

واژه‌های کلیدی:

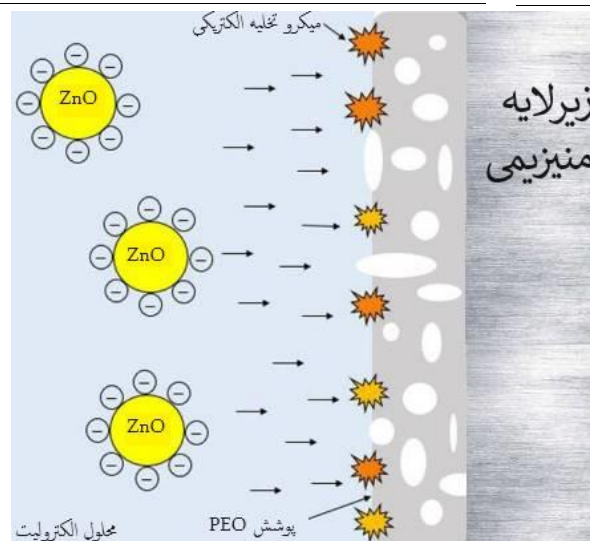
آلیاژهای منیزیم

نانوذرات رنگدانه اکسیدروی

اکسیدشدن پلاسمای الکتروشیمیایی

خوردگی

خواص ضد باکتری



Corresponding author: gharagozlou@icrc.ac.ir

akaram@ut.ac.ir



۱- مقدمه

آلیاژهای منیزیم دارای خواص قابل توجه مانند نسبت بالای استحکام به وزن، چگالی پایین، قابلیت ریخته‌گری، استحکام ویژه، هدایت الکتریکی عالی، محافظ‌الکترومغناطیس مناسب، زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و غیر سمی بودن هستند. از این رو این دسته از مواد برای استفاده در صنایع اتومبیل، هوافضا، الکترونیک و مواد زیستی گزینه مناسبی به شمار می‌روند.

آسیب‌پذیری در برابر خوردگی ناشی از سایش و همچنین فعالیت شیمیایی ذاتی این مواد در مصارف زیست‌تخریب‌پذیر یک مزیت به شمار می‌رود؛ اما در اغلب کاربردها به ویژه موارد حفاظتی این مسئله را باید یک نقطه ضعف دانست (۱).

برای جبران این نقطه ضعف استفاده از روش‌های اصلاح سطح و بهبود رفتار خوردگی و سایشی این دسته از مواد ضروری است. روش پلاسمای اکسیدشدن الکترولیت (PEO)^۱ یکی از بهترین روش‌هایی است که می‌تواند رفتار سایشی و خوردگی فلزات را بهبود ببخشد. به ویژه در فلزاتی چون آلومینیم، منیزیم و تیتانیوم و به کمک ایجاد پوششی (لایه اکسیدی) چسبنده، سخت و ضخیم این امر را مقدور می‌سازد.

امکان استفاده از اشکال پیچیده و بزرگ به عنوان آند، سادگی تجهیزات، مصرف کم انرژی و کم خطر بودن به علت استفاده از محلول‌های قلیایی از مزایای روش (PEO) محسوب می‌شوند (۲). هنگام استفاده از ولتاژی بالاتر از ولتاژ شکست دی‌الکتریک پس از ظاهر شدن تخلیه‌های گذرا و ریز کوتاه مدت بر روی سطح آند و به دلیل فشار

موضعی بالا (۱۰^۲-۱۰^۳ مگاپاسکال) و دما در کانال‌های تخلیه (۱۰^۴-۱۰^۳ کلوین) پوشش (PEO) ایجاد می‌شود.

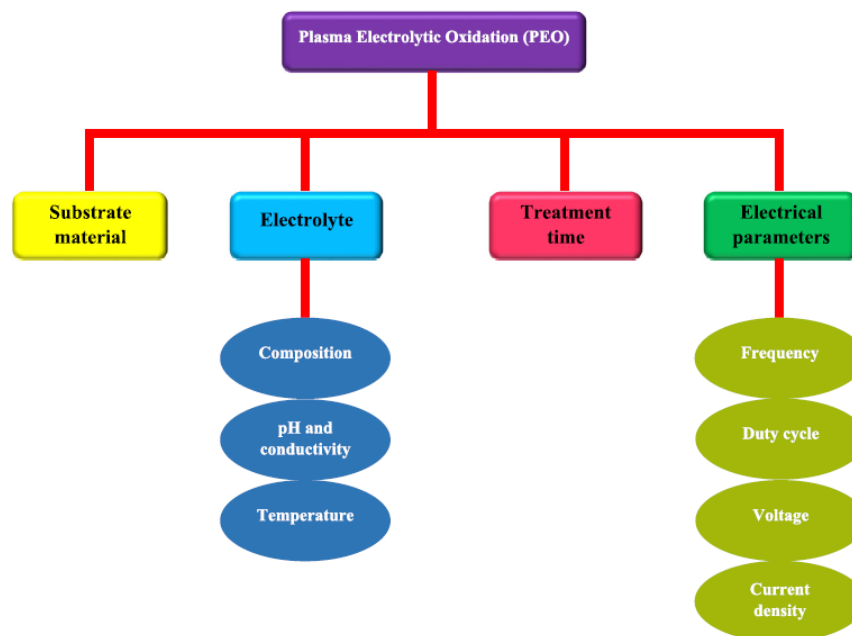
پوشش‌های (PEO) حاوی فلزات بستر یا عناصر محلول هستند (۳). پارامترهای مجزایی که می‌توانند به طور چشمگیری بر خواص و عملکرد پوشش‌های (PEO) اثر بگذارند. این پارامترها را در شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد. با توجه به شرکت عناصر الکترولیت در واکنش‌های پروسه (PEO) و تغییر ساختار و ترکیب و به دنبال آن خواص پوشش، ترکیب شیمیایی محلول قابل‌توجه‌ترین عامل بین متغیرهای یاد شده می‌باشد (۴). امری که (PEO) را یک فرآیند جذاب جلوه می‌دهد امکان استفاده از افزودنی‌های متفاوت به منظور تغییر کارایی پوشش است (۵).

اخیراً نتیجه گرفته شده است که با استفاده از مواد افزودنی با اندازه نانو یا میکرو در محلول‌های پایه، می‌توان پوشش‌های کامپوزیتی را بر روی بسترهای منیزیم با کارایی بهتر نسبت به پوشش‌های ساده به دست آورد.

بیشترین مطالعات منتشر شده بر روی آلیاژهای AZ31 Mg، با استفاده از ذرات ZrO₂، SiO₂ و Al₂O₃ و در مورد رفتار خوردگی بوده است (۵).

سطح پوشش نقش مهمی در تعیین عملکردهای ماده دارد. امروزه پوشش‌هایی سطحی ارائه شده‌اند که هم‌زمان می‌توانند خواص زینتی و عملکردی ارائه دهند.

¹ Plasma Electrochemical Oxidation



شکل ۱: عوامل موثر بر ترکیب، ساختار و خواص پوشش‌های (PEO) (۴).

Figure 1: Effective factors on composition, structure and properties of PEO coatings (4).

در آلیاژ مورد مطالعه (AZ)، عنصر آلومینیم به طور معمول تا ۱۰ درصد وزنی استفاده می‌شود اما استحکام و شکل پذیری بهینه در ۶ درصد وزنی حاصل می‌شود. علاوه بر بهبود استحکام و سختی با گستراندن محدوده مذاب ریخته‌گری آلیاژ را راحت‌تر می‌کند. در بالای ۶ درصد امکان عملیات حرارتی برای آلیاژ میسر می‌شود. عنصر آلیاژی روی بعد از آلومینیم دومین عنصر آلیاژی موثر مرسوم برای آلیاژهای منیزیم می‌باشد. هنگامی که درصد وزنی آلومینیم در آلیاژ ۷ تا ۱۰ درصد یا بیشتر شود خطر ترک‌خوردگی داغ افزایش می‌یابد. استفاده از عنصر روی آلیاژ را از این خطر مصون می‌دارد.

عنصر منگنز مقاومت خوردگی در آب‌نمک را افزایش می‌دهد. علت این امر نیز گرفتن آهن یا سایر فلزات سنگین در یک ترکیب بین فلزی که می‌تواند هنگام ذوب حذف شود، می‌باشد. آلیاژهای تجاری به ندرت بیشتر از ۱/۵ درصد منگنز را شامل می‌شود. در صورت حضور آلومینیم انحلال‌پذیری منگنز به تقریباً ۰/۳ درصد تقلیل می‌یابد (۷).

در جدول ۱ برخی از خواص منیزیم قابل مشاهده هستند. این فلز به صورت آلیاژی در شکل‌های ریختگی، فورجینگ، اکستروژن، ورق‌های نورد شده و تسمه استفاده می‌شود (۸).

۳- کاربردهای آلیاژهای منیزیم

ساختاری: کاربردهای ساختاری شامل خودرو، صنعت، جابجایی مواد، تجاری و تجهیزات هوافضا می‌باشد. مصارف کاربردی خودرو شامل قلاب‌های پشتیبانی از پدال کلاچ و ترمز، محفظه‌های قفل ستون فرمان و محفظه‌های گیربکس دستی و در ماشین آلات صنعتی مانند ماشین آلات نساجی و چاپ. آلیاژهای منیزیم برای قطعاتی که با سرعت بالا کار می‌کنند و باید سبک وزن باشد استفاده می‌شود تا نیروهای لختی^{۱۲} را به حداقل برساند.

جدول ۱: برخی از خواص منیزیم (۸).

Table 1: Some properties of magnesium (8).

هگزگونال	ساختار بلوری
۱۲	عدد اتمی (g/mol)
۲۴/۳۰۵۰	وزن اتمی
+۲	ظرفیت
۶۵۰	نقطه ذوب (°C)
$4/45 \times 10^{-8}$	مقاومت الکتریکی (m.Ω.cm ²)

¹² Inertia force

در حالی که خواص زینتی منجر به بهبود زیبایی ظاهری می‌شوند، خواص عملکردی منجر به ایجاد یک سد فیزیکی محافظ در برابر خطرات محیطی مانند گاز خورنده و مواد شیمیایی، آسیب‌های مکانیکی و حرارتی و همچنین در معرض قرار گرفتن نور پراثری، می‌شود. به طور کلی به پوشش‌هایی که قادر اند به طور هم‌زمان چندین عملکرد از خود ارائه دهند در اصطلاح پوشش‌های چندعملکردی^۱ گفته می‌شود. یکی از عملکردهایی که از یک پوشش می‌توان انتظار داشت و اخیراً به لطف رواج ویروس کرونا مورد توجه قرار گرفت عملکرد ضد باکتریایی می‌باشد (۶).

با توجه به خاصیت ضدباکتری اکسیدروی که به لطف رفتار کاتالیزور نوری آن نمود پیدا می‌کند و کاربرد آلیاژهای منیزیم در مصارف بالینی توجه به این عملکرد امری دور از ذهن نمی‌باشد. از این رو در این مطالعه برآنیم تا عملکرد ضدخوردگی و ضدباکتری پوشش را به صورت توأمان مورد بررسی قرار دهیم.

۲- منیزیم و آلیاژهای آن

منیزیم خالص (۹۸/۸ Mg) درصد یا بالاتر) دارای چندین رده تجاری برای مصارف متالورژیکی و می‌باشد اما به ندرت برای کاربردهای ساختار مهندسی استفاده می‌شود. طبق سیستم ASTM الفبای انواع آلیاژهای منیزیم که بر اساس ترکیب شیمیایی تقسیم‌بندی شده‌اند به شرح زیر است:

- منیزیم- منگنز^۱
- منیزیم- آلومینیم- منگنز^۲
- منیزیم- آلومینیم- روی- منگنز^۳
- منیزیم- زیرکونیم^۴
- منیزیم- روی- زیرکونیم و عناصر قلیایی خاکی^۵
- منیزیم - زیرکونیم و عناصر قلیایی خاکی^۶
- منیزیم- نقره- زیرکونیم و عناصر قلیایی خاکی^۷
- منیزیم- یترویم- زیرکونیم و عناصر قلیایی خاکی^۸
- منیزیم- روی- مس و منگنز^۹
- منیزیم- آلومینیم- سیلیکون و منگنز^{۱۰}
- منیزیم - آلومینیم- استرونیوم^{۱۱}

¹ Magnesium-manganese (M)

² Magnesium-aluminum-manganese (AM)

³ Magnesium-aluminum-zinc-manganese (AZ)

⁴ Magnesium-zirconium (K)

⁵ Magnesium-zinc-zirconium (ZK), with rare earth (ZE)

⁶ Magnesium-rare earth metal-zirconium (EZ)

⁷ Magnesium-silver-rare earth metal-zirconium (QE)

⁸ Magnesium-yttrium rare earth metal-zirconium (WE)

⁹ Magnesium-zinc-copper-manganese (ZC)

¹⁰ Magnesium-aluminum-silicon-manganese (AS)

¹¹ Magnesium-aluminum-strontium (AJ)

مقاومت خوردگی ضعیف منیزیم از ۲ عامل مهم سرچشمه می‌گیرد:

- ۱- فیلم‌های اکسیدی تشکیل شده روی آن بی‌نقص و محافظ نیستند.
- ۲- خوردگی گالوانیک که می‌تواند در اثر حضور ناخالصی یا عنصر آلیاژی و یا فازهای ثانویه بسیار مخرب باشد.

انواع شایع خوردگی در این دسته از آلیاژها عبارتند: از خوردگی گالوانیک، خوردگی شیری، خوردگی بین دانه‌ای، خوردگی رشته‌ای، خوردگی حفره‌ای، خوردگی تنش و خوردگی خستگی. شایع‌ترین و اصلی‌ترین خوردگی، خوردگی گالوانیک و همچنین خوردگی حفره‌ای می‌باشد که هر دو این خوردگی‌ها به طور مستقیم به حضور ناخالصی‌ها و فازهای ثانویه مربوط می‌شوند (۱۰).

۵- اکسیدشدن پلاسما الکتروشیمیایی

برخی از راهکارهای بهبود سطح برای محافظت از منیزیم و آلیاژهای آن وجود دارد. این راهکارها شامل آبکاری تبدیل شیمیایی، رسوب الکتریکی، آنودایز، رسوب در فاز گاز، پوشش‌های آلی و روش سل-ژل است (۱۱). یک روش محبوب برای بهبود سطحی منیزیم و آلیاژهای آن، اکسیدشدن الکترولیت پلاسما است که به‌عنوان اکسیدشدن میکرو قوس، اکسیدشدن میکرو پلاسما و رسوب جرقه آندی شناخته می‌شود. PEO که از فرآیند سنتی آندایزینگ سرچشمه می‌گیرد، یک راهکار نسبتاً ارزان و سازگار با محیط‌زیست است. این یک فرآیند با ولتاژ بالا است که به طور گسترده برای بهبود سطح منیزیم و آلیاژهای آن استفاده می‌شود. در این فرآیند، تخلیه پلاسما رخ می‌دهد که منجر به هم‌جوشی جزئی یک فیلم اکسید و در نتیجه تشکیل یک پوشش اکسیدی بسیار چسبنده بر روی بستر می‌شود. پوشش‌های تولید شده دارای مقاومت بسیار خوب در برابر سایش و خوردگی و همچنین خواص الکتریکی مناسب و پایداری حرارتی بالا هستند. مطالعات زیادی در مورد پوشش‌های PEO روی منیزیم انجام شده است (۱۲).

ویژگی‌های ریزساختاری پوشش‌های PEO به شرایط عملیاتی بستگی دارد و ضخامت پوشش ممکن است بین ۵ تا ۲۰۰ میکرومتر متغیر باشد. به طور کلی، فصل مشترک پوشش به شکل زیگزاگی است که باعث می‌شود پوشش در زیرلایه یکپارچه به نظر برسد. فرآیند PEO شامل یک روش تخلیه پلاسما در اطراف یک فلز غوطه‌ور در یک الکترولیت دوست‌دار محیط‌زیست است. روش‌های تخلیه به طور قابل توجهی بر ساختار پوشش‌ها و در نتیجه خواص فیزیکی و مکانیکی آنها اثر می‌گذارد (۱۳).

۶- سازوکار پوشش‌دهی

سه فرآیند به طور هم‌زمان در فرآیند PEO رخ می‌دهد. اینها شامل

به عنوان مثال در تجهیزات انتقال مواد شامل تخته‌های اسکله، بیل‌های غلات و نوار نقاله‌های جاذبه استفاده می‌شود. مصارف کاربردی تجاری شامل ابزارهای دستی، چمدان، محفظه کامپیوتر، و نردبان نیز در این دسته اند. آلیاژهای منیزیم برای کاربردهای هوافضا ارزشمند هستند زیرا آنها سبک هستند و استحکام خوب و سفتی هم در دمای اتاق و هم در دمای بالا از خود نشان می‌دهند (۹)

آذرافشانی: از اولین کاربردهای منیزیم در اجزای پودر آتش‌بازی، شرابه‌ها و سایر وسایل آتش‌زا می‌باشد که نور سفید چشمگیری ایجاد می‌کند. سیم منیزیم ریز هم برای لامپ‌های روشنایی عکاسی استفاده می‌شد. هنوز هم از منیزیم در آتش‌زنه‌های کیف‌های نجات استفاده می‌شود (۹).

متالورژی: منیزیم به عنوان یک عنصر آلیاژی در آلیاژهای غیرآهنی چون آلومینیم، روی و سرب استفاده می‌شود. این عنصر به عنوان رابنده اکسیژن از آلیاژهای نیکل و مس و گوگردزدا در آهن و فولاد استفاده می‌شود. چقرمگی و انعطاف‌پذیری را در چدن با ساخت ذرات گرافیت گره‌دار را بهبود می‌بخشد. در کنار وزنی که دارد این امر بزرگ‌ترین استفاده از منیزیم است (۹)

کاربردهای الکتروشیمیایی: منیزیم در سری فلزات الکتروموتیو در آب نمک بالاترین می‌باشد. این امر آنرا به یک گزینه مناسب به عنوان آند فدا شونده برای حفاظت کاتدی تبدیل می‌کند. از کاربردهای مفید و سازنده این سازوکار در باتری‌ها استفاده می‌شود (۹)

کاربردهای بالینی: از آلیاژهای منیزیم در ابزار دستی بالینی که در آن‌ها وزن سبک امر سودمندی محسوب می‌شود استفاده می‌شود. در صندلی‌های چرخ‌داری که در فعالیت‌های ورزشی استفاده می‌شوند (که هر انس حیاتی است) نیز کاربرد دارند (۹)

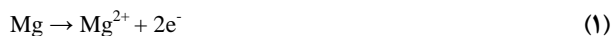
به علت زیست‌سازگاری و زیست‌جذب منیزیم، آلیاژهای این عنصر که با سایر فلزات زیست‌سازگار (مانند کلسیم) ترکیب شده در ابزارهای ارتوپدی و استن‌های کاردیوواسکولار برای تثبیت استخوان‌های درونی استفاده می‌شود (۹).

طبعا در موارد بالینی وجود خواص ضدباکتری می‌تواند امر مهمی محسوب شود. در کنار این کاربردها یکی از مصارف مهمی که می‌تواند برای خواص ضدباکتری ذکر کرد در تصفیه آب می‌باشد که جلوتر بیان می‌شود این کاربرد بیشتر از سایرین می‌تواند از ویژگی‌های کاتالیزور نوری بهره‌بردار.

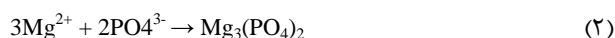
۴- مروری بر رفتار خوردگی آلیاژهای منیزیم

با توجه به جایگاه منیزیم در سری الکتروموتیو فلزات، این فلز را می‌توان یک فلز فعال دانست بنابراین از لحاظ مقاومت خوردگی قابل اتکا نمی‌باشد. همین امر از مهم‌ترین محدودیت‌های این فلز برای استفاده گسترده در کاربردهای مهندسی می‌باشد. بنابراین بهبود این نقطه ضعف همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه می‌باشد (۱۰).

می‌گیرد. بنابراین، واکنش انحلال منیزیم تحت یک میدان الکتریکی قوی که یون منیزیم تولید می‌کند (واکنش ۱)، رخ می‌دهد.



واکنش ۲ در الکترولیت محتوی فسفات رخ می‌دهد:



همچنین اکسید منیزیم طی واکنش (۴) تولید می‌شود (۱۵):

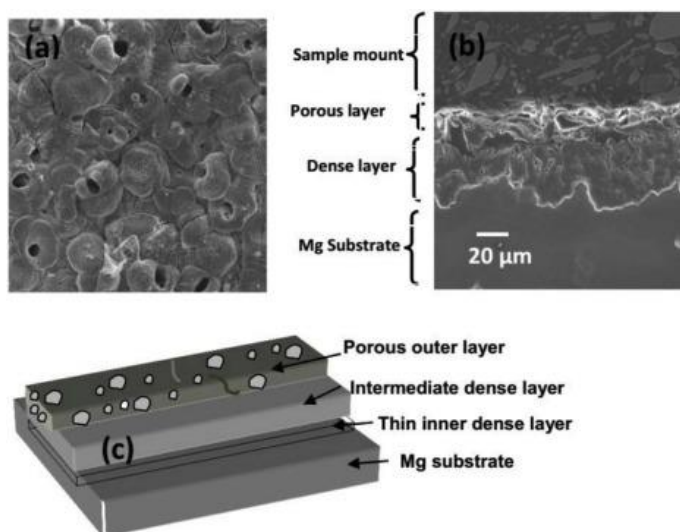


انحلال فلز و رشد لایه مانع در ابتدای عملیات PEO روی بسترهای منیزیم یا آلیاژهای آن اتفاق می‌افتد. ممکن است در شکل درک شود که ولتاژ به صورت خطی با افزایش زمان در مرحله اول افزایش می‌یابد. در این مرحله جرقه‌های محسوسی روی سطح فلز دیده نمی‌شود و لایه ای نازک، شفاف و رویین تشکیل می‌شود. علاوه بر این، مولکول‌های اکسیژن حاصل از اکسیدشدن آب همراه با آنیون‌های هیدروکسید به طور یکنواخت روی سطح فلز جذب می‌شوند. سطح آند با یک فیلم دی الکتریک نازک محصور می‌شود. میدان الکتریکی قوی نیروی محرکه مورد نیاز برای حرکت کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در الکترولیت را در سراسر لایه مانع ارائه می‌کند.

واکنش‌های الکتروشیمیایی و پلازما شیمیایی و همچنین انتشار حرارتی اکسیژن است. اعتقاد بر این است که پوشش‌های PEO روی بسترهای منیزیمی دارای ساختار سه لایه هستند (شکل ۲). سطح پوشش‌های PEO به طور کلی شامل ساختارهای پنکیک‌گونه با یک مسیل تخلیه در مرکز هر پنکیک است. مواد مذاب از طریق کانال‌های تخلیه نفوذ می‌کنند و در حالی که در معرض الکترولیت سرد قرار می‌گیرند خاموش می‌شوند. در نتیجه، مرزهای مشخصی ایجاد می‌شود که پنکیک را از هم جدا می‌کند. حفره‌های نسبتاً بزرگ در مرکز هر پنکیک نشان دهنده تخلیه شدید است که ممکن است به اعماق پوشش‌ها نیز نفوذ کند. اندازه منافذ تابعی از چگالی تخلیه و همچنین زمان فرآیند است. گزارش شده است که قطر منافذ در آلیاژهای منیزیم معمولاً بین ۰/۵ و ۵۰ میکرومتر است (۱۴).

مسیل‌های تخلیه توسط مواد مذاب و ریز ترک‌های موضعی احاطه شده اند. ایجاد ترک‌های ریز ممکن است به دلیل خاموش شدن مواد مذاب در هنگام قرار گرفتن در معرض الکترولیت سرد باشد. تخلیه‌های شدید دارای انرژی ورودی بالایی هستند که باعث همجوشی^۲ بخش‌های قابل توجهی از فیلم اکسید و بستر می‌شود. در نهایت، مواد مذاب به سمت سطح جریان می‌یابند و در حین رسیدن به الکترولیت سرد، ذرات سرامیکی بزرگی را تشکیل می‌دهند. اکسیدهای مذاب در اطراف منافذ این واقعیت را نشان می‌دهد که دمای لحظه‌ای در داخل حفره‌های کوچک ممکن است به چندین هزار درجه برسد (۲۳۰۰ تا ۳۰۰۰ کلوین) (۱۵).

ماهیت هر فازی که در فرآیند PEO تشکیل می‌شود به بستر و نوع الکترولیت و گونه‌های موجود در الکترولیت بستگی دارد. در فرآیندهای PEO، بستر منیزیم به عنوان آند در الکترولیت قرار



شکل ۲: لایه‌های مختلف پوشش (a) سطح پوشش PEO، (b) سطح مقطع و (c) لایه‌های مختلف پوشش PEO (۱۴).

Figure 2: a) Coating surface PEO b) Cross section c) Different layers of PEO coating (14).

¹ Multifunction

² Fusion

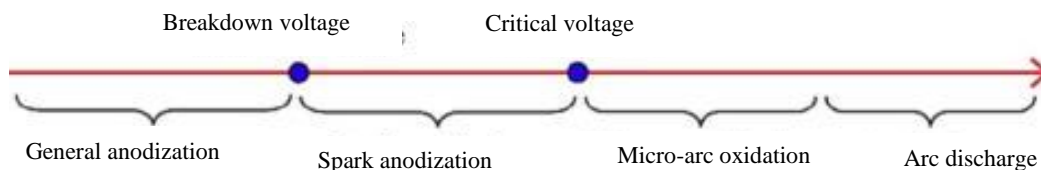
ممکن است به سه مرحله تقسیم شود. اما، زمانی که پدیده‌هایی را در نظر می‌گیریم که در فصل مشترک الکتروود/ الکترولیت رخ می‌دهند، ممکن است چهار مرحله بیان شود. این مراحل شامل آنودایز معمولی، آنودایز با جرقه، اکسیدشدن میکرو جرقه و اکسیدشدن قوس است. ارتباط این مراحل با نمودار ولتاژ-زمان در فرآیند PEO در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است (۱۷).

۷- ترکیب محلول پوشش‌دهی

۷-۱- سدیم هگزامتافسفات

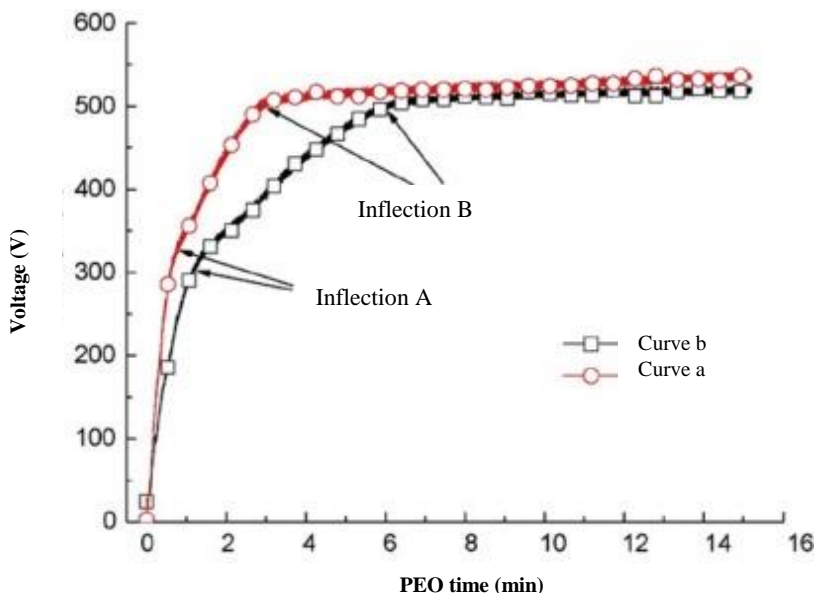
سدیم هگزامتافسفات یک فسفات تمیز و غیرسمی است که به طور گسترده در صنایع غذایی و صنایع شیمیایی استفاده می‌شود. این ماده به صورت گسترده در صنایع معدن به ویژه در فرآیندهای فلوتاسیون استفاده می‌شود. از آن بیشتر برای پراکنده سازی و کاهش مواد معدنی استفاده می‌شود.

این حرکت ضخامت پوشش را تا ۰.۶ نانومتر افزایش می‌دهد. این مرحله در واقع نمایانگر یک فرآیند آنودایزینگ معمولی است. در مرحله دوم، ولتاژ سلول‌های الکتروشیمیایی همچنان به صورت خطی افزایش می‌یابد. با این حال، شیب کمتر می‌شود. در اینجا ممکن است جرقه‌های کوچکی در سراسر سطح فلز مشاهده شود. در مرحله سوم، یک حالت جرقه یکنواخت ایجاد می‌شود و پتانسیل سلول به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. جرقه‌های سفید با جرقه‌های نارنجی جایگزین می‌شوند که ممکن است در مکان‌های خاصی دیده شوند. این جرقه‌ها به آرامی در سراسر سطح فلز حرکت می‌کنند. اندازه و چگالی جرقه‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. اولین نقطه عطف در منحنی ولتاژ با ولتاژ شکستی مرتبط است که پس از پدیده جرقه اولیه رخ می‌دهد. ولتاژ شکست به شدت به غلظت و هدایت الکترولیت بستگی دارد. دومین نقطه عطف که پس از آن پدیده‌های سطح فلز به طور چشمگیری تغییر می‌کند، ولتاژ بحرانی نامیده می‌شود. در این مرحله ولتاژ سلول به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد و جرقه حالت پایدار نیز روی سطح فلز صورت می‌گیرد. با توجه به نمودار ولتاژ-زمان، فرآیند PEO



شکل ۳: رابطه بین پاسخ ولتاژ- زمان PEO و چهار مرحله اکسیدشدن (۱۷).

Figure 3: Relationship between voltage-time response of PEO and four oxidation stages (17)



شکل ۴: پاسخ‌های ولتاژ-زمان برای فرآیند PEO آلیاژهای منیزیم در محلول حاوی $Na_2SiO_3 \cdot 6H_2O$ ۶ g/L، $KF \cdot 2H_2O$ ۴ g/L، KOH ۲ g/L (a و b) در به ترتیب 100 و 50 mA/cm² به مدت ۱۵ دقیقه (۱۷).

Figure 4: Voltage-time responses for the PEO process of magnesium alloys in a solution containing $Na_2SiO_3 \cdot 6H_2O$ 6 g/L, $KF \cdot 2H_2O$ 4 g/L, KOH 2 g/L at 100 and 50 mA/cm² (a and b), respectively, for 15 minutes (17).

مواد مبتنی بر ZnO می‌توانند کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله ضدباکتری، ضدقارچ، ضدسوپ، ضدپیری، ضدخوردگی، پوشش‌های سطحی (رنگ‌ها)، عوامل مسدودکننده پرتو فرابنفش، فیلترهای خورشیدی، ترانزیستور، دستگاه‌های صوتی، الکترونیک نوری، هواپیما داشته باشند. نانو پوشش‌ها، رنگ‌های غنی از روی و غیره داشته باشند. اکسید روی نقش ضدخوردگی قابل‌قبولی دارد، به دلیل تمایل به واکنش با اسیدها، بالاترین میزان همگام سازی pH در نقص فیلم پوشش، قابلیت طراحی صابون‌های بازدارنده روی با چسب‌های واکنشی و رفتار ضد خوردگی پلاریزه کردن نواحی کاتدی و غیره می‌تواند داشته باشد. این موارد باعث می‌شود که اکسید روی ماده امیدوارکننده‌ای برای عملکرد بهتر پوشش باشد (۲۳). نانو اکسیدهای فلزی نقشی کلیدی در شیمی، فیزیک و فناوری زیست مهندسی دارند. اکسیدروی یک نیمه‌هادی شناخته شده است که به علت خواص مطلوبی که دارد جایگاه کارآمد و پرمصرفی در بین نانو اکسیدهای فلزی کسب کرده است. از جمله:

کاربرد در کشاورزی: روی عنصری ضروری برای گیاهان است. به عنوان یک یون دو ظرفیتی از طریق ریشه آنها جذب می‌شود. در تمام آنزیم‌ها به عنوان جزء فلزی آنها یا به عنوان عامل کمکی وجود دارد. نانوذرات اکسیدروی خطر سمیت کمی برای محصولات زراعی دارند و می‌توان از آنها به عنوان منبع ریز مغذی روی استفاده کرد. علاقه روزافزونی به استفاده از نانوذرات اکسید روی در کشاورزی وجود دارد. آنها همچنین باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان، تولید زیست توده، مقاومت در برابر تنش خشکی، افزایش زنده‌مانی گرده و افزایش سرعت انتقال در ریشه و اندام هوایی می‌شوند. از آنها می‌توان به عنوان کود، حشره‌کش، آفت کش و قارچ کش استفاده کرد (۲۴).

ضدعفونی آب: روش‌های مختلفی مانند کلرزی، ازن‌زنی و تصفیه UV^۶ برای از بین بردن بیماری‌زاهای^۷ آب استفاده می‌شود، اما این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند. برخی از بیماری‌زاهای بسیار مقاوم در آب با کلرزی از بین نمی‌روند. این روش همچنین تمایل به تشکیل محصولات جانبی سرطان‌زا دارد. روش دیگر، یعنی ازن‌زنی چندان مقرون به صرفه نیست، در حالی که تصفیه با UV حفاظت کوتاه مدت را فراهم می‌کند. نانوذرات اکسید روی می‌توانند برای تصفیه آب استفاده شوند زیرا گونه‌های اکسیژن را از سطح خود آزاد می‌کنند که با آسیب رساندن به DNA، غشای سلولی و پروتئین‌های سلولی منجر به مرگ ریزاندام‌های بیماری‌زها می‌شود (۲۴).

کاربردهای زیست پزشکی: از آنجایی که نانوذرات اکسید روی، گونه‌های اکسیژن فعال تولید می‌کنند و آپوپتوز^۸ با واسطه میتوکندری^۱ یا توقف چرخه سلولی را القا می‌کنند، این نانوذرات در

به علاوه از آن می‌توان برای کاهش کلسیت‌ها استفاده کرد (۱۸). به منظور خاصیت پراکنده‌سازی که دارد گزینه مناسبی برای استفاده در الکترولیت به هنگام استفاده از نانوذره می‌باشد، چرا که تجمع این ذرات در کنار هم و خارج شدن آنها از ابعاد نانو همواره یک چالش محسوب می‌شود.

۷-۲- نانو ذرات اکسید روی

اکسید روی اخیراً به علت قیمت مناسب، غیرسمی بودن و فعالیت ضدباکتری توجه‌ها را به خود جلب کرده است. این اکسید یک ماده ایمن شناخته شده است (۱۹).

اکسید روی در اشکال مختلفی وجود دارد که شامل: نانومیل^۱، نانوصفحه^۲ و نانولوله^۳ می‌شود و از روش‌های متفاوتی مانند روش ریزموج^۴ حرارتی، روش الکتروشیمیایی و فرآیندهای سل-ژل آماده می‌شود. همه این روش‌ها برای ساخت نانوذرات اکسیدروی استفاده می‌شود. تجزیه شیمی- حرارتی کامپلکس‌های روی در سال‌های اخیر توجه‌های زیادی به خود جلب کرده است. این فرآیند تولید اکسید روی یک روش سراسر است، عاری از حلال آلاینده و موثر است. آرزان (اقتصادی) است و از حلال سمی (آلودگی) استفاده نمی‌کند و عاری از سرفکتانت^۵ بوده و بسیار سریعتر است، در حالی که شرایط فرآیند، اندازه ذرات و خلوص را می‌توان به راحتی کنترل کرد (۲۰).

مواد در مقیاس نانو توجه چشمگیری در زمینه تحقیقات کاربردی را جذب کرده‌اند، زیرا وقتی اندازه ذرات به محدوده نانومتری می‌رسد، خواص مواد به طور چشمگیری تغییر می‌کند. مواد در اندازه نانو دارای شکاف باند وسیع‌تری نسبت به سایر مواد هستند. بنابراین، تنظیم خواص نوری و الکتریکی آنها برای ایجاد ماده‌ای جهت استفاده در کاربردها و دستگاه‌های فوق جدید مقدور است (۲۱).

ZnO (اکسید روی) یک ماده نیمه‌هادی برجسته از نوع n که دارای انرژی گاف نواری نسبتاً بزرگ ۳/۳۷ eV و انرژی تهیج بزرگ (۶۰ meV) در دمای اتاق است.

پودرهای اکسید روی در تولید رنگ، سرامیک، وریستور، کاتالیزور، حسگر گاز، رنگدانه و غیره کاربردهای مهمی دارند. اندازه ذرات اکسید روی در این پودرها یک عامل برجسته برای کاربردهای خاص است (۲۲).

نانوذرات اکسید روی به دلیل داشتن ساختار فیزیکی و شیمیایی یکتا، می‌توانند به عنوان یک ماده چند منظوره در نظر گرفته شوند.

¹ Nanorad

² Nanoplate

³ Nanotube

⁴ Microwave

⁵ Surfactant

⁶ Ultra Violent

⁷ Pathogen

⁸ Apoptosis

می‌دهند و رادیکال‌های واکنشی تولید می‌کنند (۲۵).

۹- سازوکارهای رفتار ضدباکتریایی نانوذرات

اکسیدروی

۹-۱- تشکیل یون Zn^{2+}

یون‌های Zn^{2+} نقش مهمی در تشکیل سیگنال‌های یونی بین کاتالیزور و پروتئین، در داخل سلول‌های مختلف و اندام‌های میان‌یاخته^۱ دارد. همچنین اعتقاد بر این است که این یون‌ها در ممانعت از حمل نقل فعال، سوخت و ساز^۲ اسیدهای آمینه و اختلال آنزیمی نقش دارند.

۹-۲- تولید گونه‌های فعال اکسیژن

نه تنها در نانوذرات اکسید روی بلکه در اکثر نانو ذرات اکسیدهای فلزی مهندسی شده، ROS^{\dagger} ایجاد شده با نور می‌تواند تولید شود. این سازوکار هم برای باکتری‌های دارای بار منفی و هم بار مثبت کارکرد دارد (۲۶).

¹ Mitochondrie

^۲ Cytoplasm: میان‌یاخته یا سیتوپلاسم عبارت است از تمام محتویات داخل سلول به جز هسته آن

³ Metabolism

⁴ Reactive Oxygen Species

درمان انواع سرطان‌ها مانند سرطان روده بزرگ، سرطان ریه، سرطان تخمدان، سرطان دهانه رحم استفاده می‌شوند (۲۴).

تحویل دارو: نانوذرات اکسید روی می‌توانند بسیاری از خواص مهم داروهای آزاد مانند پایداری در شرایط آزمایشگاهی، حلالیت و توزیع زیستی آنها را افزایش دهند (۲۴).

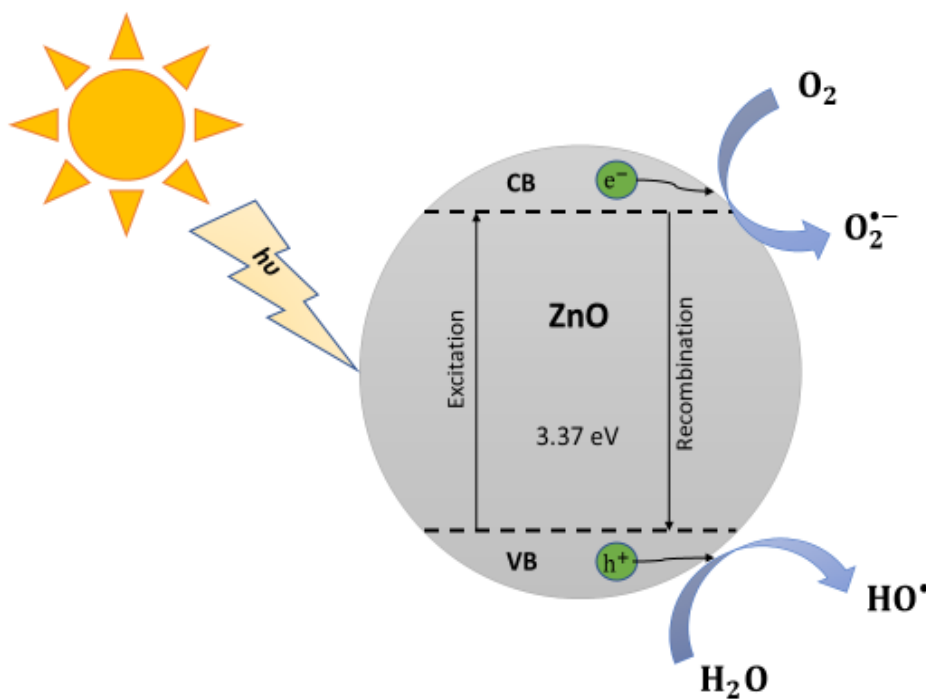
صنعت لاستیک: نانوذرات اکسید روی چقرمگی، شدت و خواص ضد پیری لاستیک را بهبود می‌بخشد. افزودن نانوذرات روی در ترکیبات لاستیکی آن را ضدسایش می‌کند (۲۴).

ساخت حسگرهای زیستی: نانوذرات اکسید روی به دلیل داشتن خاصیت نیمه‌هادی خوب و داشتن نقطه ایزوالکتریک بالا، می‌توانند در ساخت حسگرهای زیستی استفاده شوند (۲۴).

دستگاه‌های فوتونیک: به دلیل پایداری بالای نور، طیف وسیعی از جذب تابش و ضرایب جفت الکتروشیمیایی بزرگ، نانوذرات اکسید روی در دستگاه‌های نوری استفاده می‌شود (۲۴).

۸- رفتار کاتالیزوری نوری نانوذرات اکسیدروی

یکی از سازوکارهای ضدباکتری اکسیدروی به دلیل طبیعت نیمه‌هادی آن است که امکان رفتار کاتالیزوری نوری را فراهم می‌کند. مطابق شکل ۵ نور فرودی الکترون‌های لایه ظرفیت را تحریک کرده و برانگیختگی آنها را به نوار رسانایی ارتقا می‌دهد. جفت الکترون-حفره در سطح از هم جدا می‌شوند، جایی که با محیط اطراف واکنش



شکل ۵: طرح واژه رفتار فوتوکاتالیستی اکسیدروی (۲۵)

Figure 5: Scheme of photocatalytic behavior of zinc oxide (25).

سیتوپلاسمی و پری‌پلاسم^۱ نفوذ کرده و از سوخت‌وساز ممانعت کرده و سبب اختلالات غشایی شوند (۲۶).

۱۰- تاثیر ریخت‌شناسی نانوذرات بر فعالیت ضدباکتری

به خوبی می‌دانیم که مواد در ابعاد نانو و یا ساختارهای منحصر به فرد دارای سطح ویژه بالایی هستند. مساحت سطح ویژه به شدت به اندازه ذرات وابسته است و با کاهش اندازه ذره افزایش می‌یابد. (۲۶). شکل ۷ ساختارهای شناخته شده از نانوذرات اکسید روی را نشان می‌دهد که عملکرد هر یک از این‌ها را بررسی خواهیم کرد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، انکوباسیون^۲ هم‌زمان سلول‌های باکتری^۳ E. coli با نانو ذرات و میکرو ذرات اکسید روی به مدت ۲ ساعت برای تأثیرگذاری بر زنده ماندن باکتری کافی بود. در همه موارد، تعداد سلول‌های باکتری کاهش یافت. علاوه بر این، سیگنال‌های قرمز، نشان دهنده سلول‌های مرده ظاهر شد. شمارش هر دو سیگنال، جمع آوری شده از تصاویر که به طور تصادفی انتخاب شده برای همه نمونه‌ها، به ما اجازه می‌دهد تا درصد سلول‌های زنده و مرده را تعیین کنیم.

¹ Periplasm

² Incubation

³ Escherichia Coli

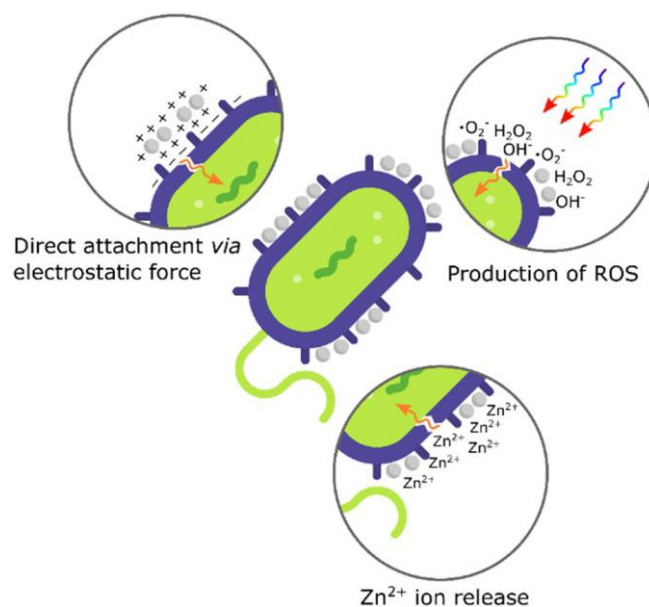
این گونه‌ها به واسطه سلسله واکنش‌های ۵-۱،



منجر به ایجاد H_2O_2 در واکنش ۵ می‌شود که می‌تواند با نفوذ به درون سلول باعث اختلال در عملکرد DNA و پروتئین‌های سلولی و مرگ مولکولی شود (۲۶).

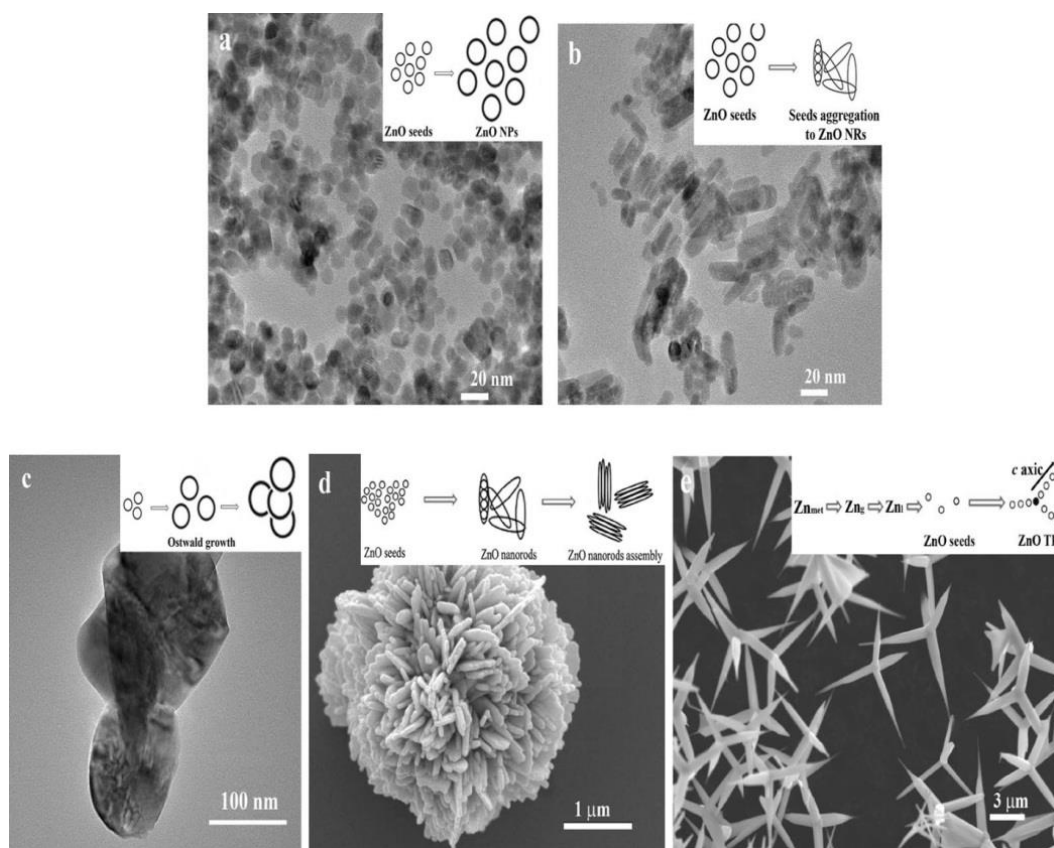
۹-۳- اتصال مستقیم نانوذرات اکسید روی و سلول باکتری از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیکی

فرآیند بالقوه دیگری برای توضیح فعالیت ضدباکتری اکسید روی همان برهم‌کنش مستقیم بین نانوذرات اکسید روی و غشاء باکتری‌ها از طریق نیروی الکترواستاتیک است. بارهای مخالف مطابق شکل ۶ می‌توانند سبب القای یک نیروی الکترواستاتیک قوی شود، که یک پیوند فیزیکی برای اکسید روی برای محاصره سلول باکتری ایجاد می‌کند. در نتیجه، سلول آسیب دیده و کل باکتری از طریق آپوپتوز می‌میرد. این ذرات به آرامی می‌توانند از طریق حفرات به مکان‌های

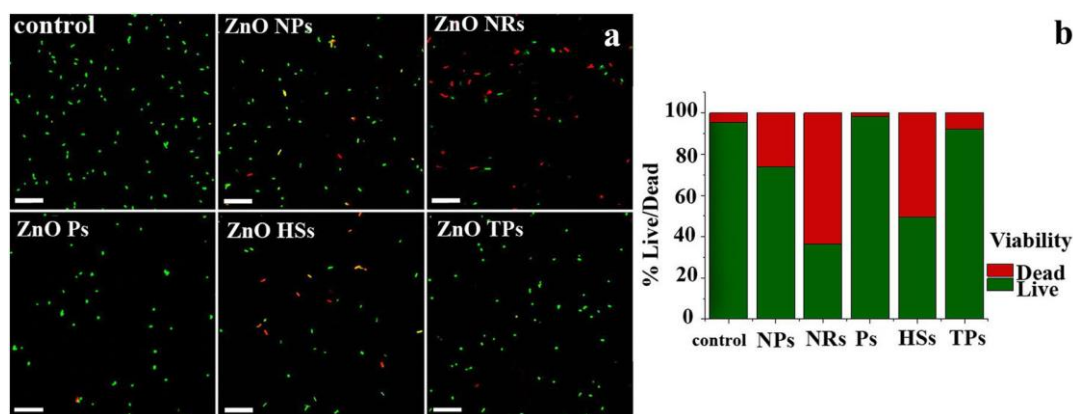


شکل ۶: طرح واره‌ای از فرآیندهای تعریف شده حول فعالیت ضدباکتریایی اکسید روی (۲۶).

Figure 6: Schematic of the processes defined around the antibacterial activity of zinc oxide (26).



شکل ۷: تصاویر SEM و TEM نانو و میکروذرات اکسیدروی: (a) نانوذرات، (b) نانومیله، (c) ذرات، (d) ساختار هایپراکیکال^۱، (e) چهارپا^۲ (۲۸).
Figure 7: SEM and TEM images of zinc oxide nano and microparticles: (a) nanoparticles, (b) nanorods, (c) particles, (d) hierarchical structure (e) quadrupeds (28).



شکل ۸: سنجش زنده‌مانی باکتری: (a) تصاویر CLMS^۳ از باکتری E. coli پس از ۲ ساعت انکوباسیون با نانوذرات و میکروذرات اکسید روی و در ریخت‌های مجزا در غلظت ۵۰۰ میکروگرم بر میلی لیتر. نوار مقیاس: ۲۰ میکرومتر (b) درصد نسبی سلول‌های زنده و مرده در نمونه‌ای که در معرض محلول‌های اکسید روی و نمونه شاهد به صورت کمی که از پنج تصویر میکروسکوپی به‌طور تصادفی انتخاب شده است (۲۸).

Figure 8: Bacterial viability measurement: a) CLMS³ images of E. coli bacteria after 2 hours of incubation with zinc oxide nanoparticles and microparticles in separate forms at a concentration of 500 μg/ml. Scale bar: 20 μm
b) The relative percentage of live and dead cells in the sample exposed to zinc oxide solutions and the control sample in a quantitative form that is randomly selected from five microscopic images (29).

¹ Hierarchical

² Tetrapode

³ Confocal Laser Scanning microscopy

ضدباکتری و همچنین افزایش سطح موثر در این ابعاد کاملاً قابل توجیه و معقول است.

۱۱- سازوکار عملکرد ضدخوردگی نانوذرات اکسیدروی

سیکدر^۳ و همکارانش (۳۶) دریافتند که ادغام نانوذرات ZnO در الکترولیت باعث کاهش ضخامت پوشش، زبری سطح و تخلخل پوشش‌ها به دلیل ضعیف شدن قوس‌های تخلیه میکرو و انسداد منافذ توسط نانوذرات ZnO شد. علاوه بر این، وجود نانوذرات اکسید روی در ساختار پوشش، چگالی را افزایش داد که در نتیجه مقاومت پوشش افزایش یافت. همچنین مشاهده شد نمونه‌ای که یک لایه کامل از $Ca_3(PO_4)_2$ روی کل پوشش ارائه می‌کند حاوی منافذ کمتری است. تولید این لایه کمترین اتلاف جرم نمونه و همچنین تولید گاز هیدروژن را ایجاد کرد. این ویژگی نشان‌دهنده افزایش فعالیت زیستی پوشش نسبت به سایر پوشش‌ها است (۳۶).

همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود حضور نانوذرات اکسیدروی (بطور کلی هرگونه ماده سرامیکی که در الکترولیت وجود داشته باشد) سبب ایجاد یک ساختار چگال‌تر که دارای تخلخل کمتری است می‌شود.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که نانومیله و ساختار هایپراکیکال با تعداد سلول‌های مرده بالای ۵۰ درصد بیشترین تأثیر را در مورد باکتری E. coli داشتند. همانطور که پس از اندازه‌گیری‌های چگالی نوری مشخص شد، که کمترین اثربخشی را ذرات و چهارپایه‌های اکسیدروی دارند.

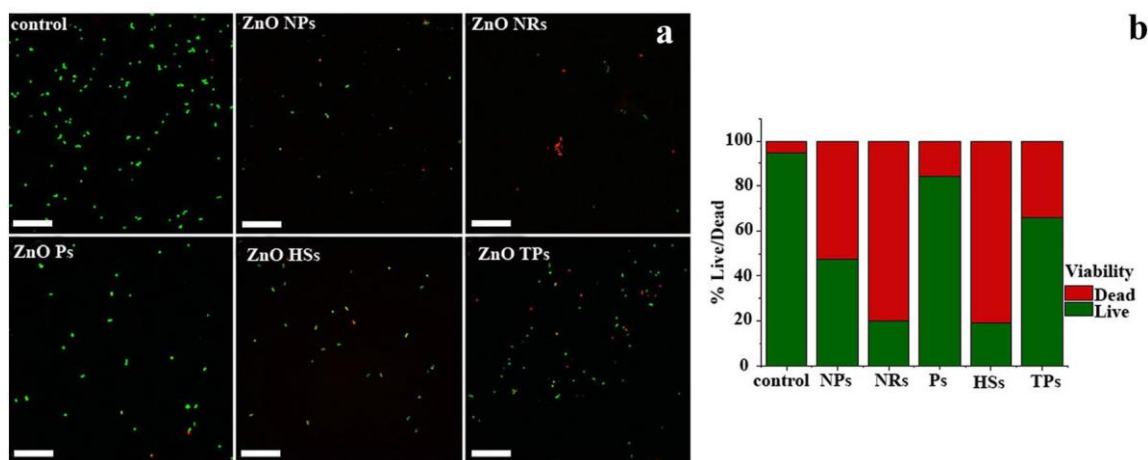
برای سویه^۱ S. Aureus (شکل ۹) مواد اکسید روی اثر ضدباکتری قوی‌تری نسبت به E. coli از خود نشان دادند. تعداد سلول‌های باکتری به طور قابل توجهی در مقایسه با شاهد آغشته نشده به اکسیدروی کاهش یافت. علاوه بر این، پس از آغشته شدن نانوذرات اکسید روی، در باکتری‌های قبلی تعداد سلول‌های مرده به سلول‌های زنده حدود ۵۰:۵۰ بود، در حالی که برای نانومیله، درصد سلول‌های زنده به حدود ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین، چهارپایه‌های اکسیدروی زنده ماندن سلول‌ها را کاهش داد، اما در این مورد به نظر می‌رسد تعداد کلی سلول‌های زنده بیشتر باشد. همان‌طور که در مورد E. coli، ذرات اکسیدروی ضعیف‌ترین فعالیت ضدباکتری را نشان می‌دهند، نتایج به دست آمده برای تجزیه و تحلیل زیست‌پذیری با اندازه‌گیری‌های چگالی نوری سازگار و قابل مقایسه بود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد اثر ضدباکتری می‌تواند مربوط به نسبت سطح به حجم ویژه مواد اکسید روی باشد که با اعظم^۲ و همکارانش (۳۰) مطابقت دارد. این امر نشان داد که اندازه کوچک‌تر نانوذرات اکسید روی فعالیت ضدباکتری بیشتری نسبت به ذرات در مقیاس میکرو از خود بروز می‌دهد (۲۹).

این نتیجه که عملکرد ضدباکتری ذرات اکسیدروی در ابعاد نانو نسبت به میکرو به مراتب بهتر است با توجه به سازوکارهای عملکرد

¹ Staphylococcus Aureus

² Azam

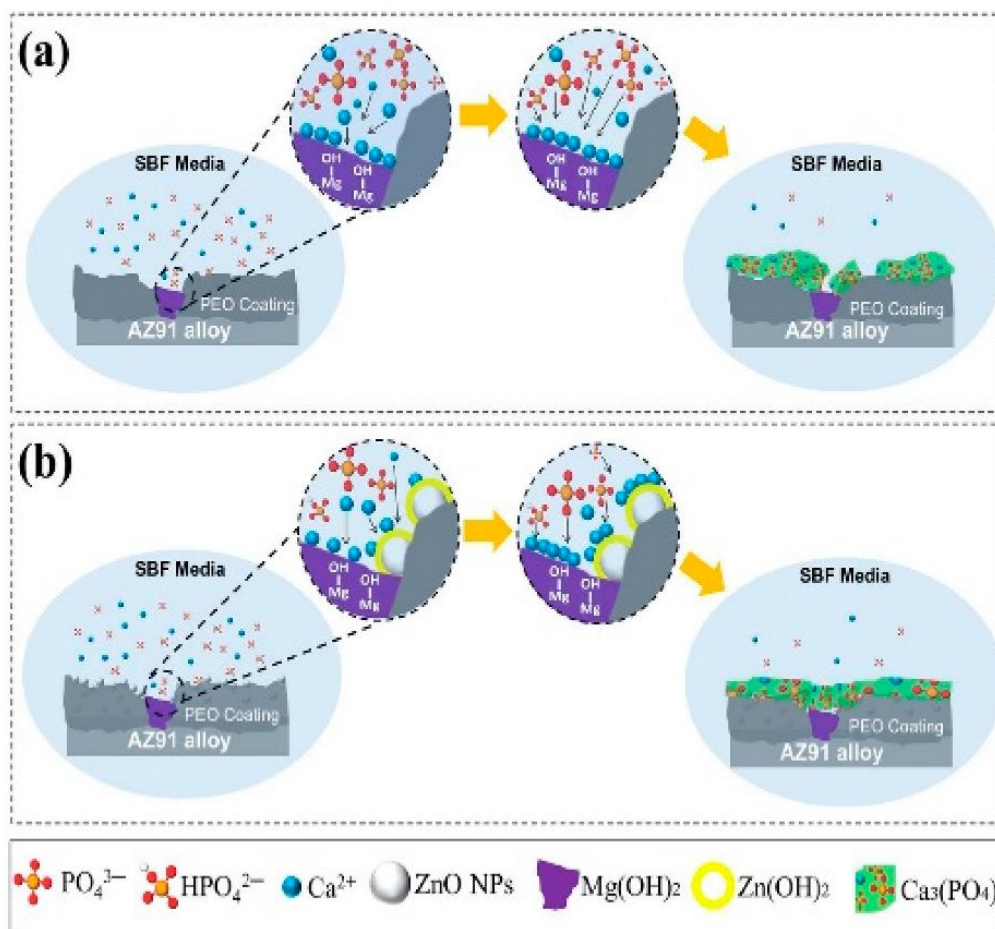
³ Sikdar



شکل ۹: سنجش زنده‌مانی باکتری: (a) تصاویر CLSM از باکتری S. Aureus پس از ۲ ساعت انکوباسیون با نانوذرات اکسید روی و میکرو در ریخت‌شناسی مجزا در غلظت ۵۰۰ میکروگرم بر میلی لیتر. نوار مقیاس: ۱۰ میکرومتر. (b) درصد نسبی سلول‌های زنده و مرده در نمونه در معرض محلول‌های اکسید روی و نمونه شاهد از پنج تصویر میکروسکوپی که به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند (۲۹).

Figure 9: Bacterial viability measurement: a) CLSM images of S. Aureus bacteria after 2 hours of incubation with zinc oxide nanoparticles and micro in separate morphology at a concentration of 500 µg/ml. Scale bar: 10 µm.

b) Relative percentage of live and dead cells in the sample exposed to the solutions Zinc oxide and control sample from five microscopic images that they are randomly selected (29).



شکل ۱۰: تصویری از تشکیل لایه $Ca_3(PO_4)_2$ روی پوشش PEO پس از غوطه ور شدن در محلول SBF که در آن (a) بدون نانوذرات ZnO و (b) با ترکیب نانوذرات ZnO است (۳۶).

Figure 11: Illustration of the $Ca_3(PO_4)_2$ layer formation on the PEO coating after being immersed in an SBF solution where (a) is without ZnO nanoparticles and (b) is with the incorporation of ZnO nanoparticles (36).

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، رفتار الکتروشیمیایی یکسانی برای هر چهار پوشش دیده می‌شود. منحنی PDP همه پوشش‌ها به پتانسیل نجیب‌تر و همچنین چگالی جریان خوردگی کمتر تغییر می‌کند، که نشان دهنده بهبود رفتار خوردگی پوشش‌ها در مقایسه با آلیاژ AZ31B Mg به صورت عریان است.

برخی از داده‌های الکتروشیمیایی مانند پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی از منحنی‌های PDP به دست آمده و در جدول ۲ آمده است (۳۲).

رابطه اشترن-گری^۲ (۳۲) می‌تواند برای محاسبه مقدار مقاومت قطبش استفاده شود:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) i_{corr}} \quad (9)$$

این امر یک سد فیزیک حائل بین محلول خورنده و ماده ایجاد می‌کند و سبب کمتر شدن نرخ خوردگی می‌شود. بطور کلی این امر یکی از رایج‌ترین سازوکارهای مقابله با خوردگی می‌باشد (۳۶).

۱۲- تاثیر نانوذرات اکسیدروی بر خوردگی پوشش

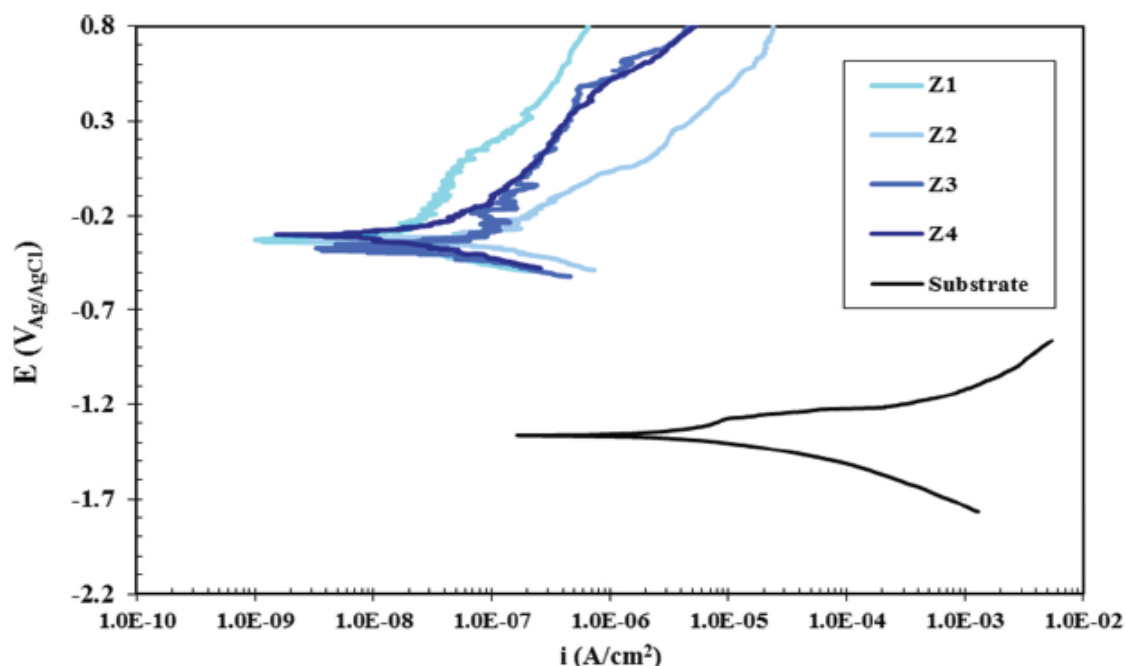
سیفی و همکارانش (۲۸) اندازه‌گیری PDP^۱ را به منظور پی بردن به اثر ناشی از غلظت نانوذرات اکسید روی بر رفتار خوردگی پوشش‌های سرامیکی تولید شده با روش PEO انجام دادند. در شکل ۱۱ نمودار اندازه‌گیری PDP نشان داده شده است.

غلظت‌های زیر برای این بررسی مورد استفاده قرار گرفت؛

Z1: ۱ گرم در لیتر، Z2: ۲ گرم در لیتر، Z3: ۱ گرم در لیتر و Z4: ۱ گرم در لیتر.

² Stern-Geary

¹ Potentiodynamic Polarization



شکل ۱۱: منحنی‌های PDP برای زیرلایه‌ها و نمونه‌های پوشش داده شده در غلظت‌های مختلف اکسیدروی (۳۲).

Figure 11: PDP curves for substrates and coated samples in different concentrations of zinc oxide (32).

جدول ۲: استخراج داده‌های الکتروشیمیایی از منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بسترها و پوشش‌های تولید شده در غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی (۳۲).

Table 2: Extraction of electrochemical data from the potentiodynamic polarization curve of substrates and coatings produced in different concentrations of zinc oxide nanoparticles (32).

Sample	E_{corr} ($V_{Ag/AgCl}$)	I_{corr} (nA/cm^2)	$a\beta$ (mV/dec)	β_c (mV/dec)	R_p ($M\Omega \cdot cm^2$)	P (%)
Substrate	-1.215	26500	98.37	79.30	0.0037	-
Z1	-0.331	8.20	136.6	237.98	3.59	0.10
Z2	-0.327	25.42	84.77	74.78	0.67	0.59
Z3	-0.378	19.71	103.00	155.66	1.26	0.29
Z4	-0.303	10.32	118.07	108.77	2.97	0.12

چن و همکارانش^۱ (۳۴) اثر زمان اکسیدشدن بر رفتار خوردگی اکسیدشدن میکرو قوس تولید آلیاژهای منیزیم AZ31 در مایع بدن شبیه‌سازی کرده‌اند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که نمونه Z1 دارای کمترین چگالی جریان خوردگی $1/2 \text{ nA/cm}^2$ و در نتیجه دارای بالاترین مقاومت به خوردگی $3/59 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ و نمونه Z2 دارای بالاترین چگالی جریان خوردگی است. یعنی $25/49 \text{ nA/cm}^2$ و در نتیجه دارای کمترین مقاومت در برابر خوردگی $0/67 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ است.

تخلخل یکی از مهم‌ترین عیوب پوشش‌ها است که نقش مهمی در مقاومت به خوردگی پوشش‌ها دارد، زیرا الکترولیت خورنده

β_a و β_c به ترتیب شیب شاخه‌های آندی و کاتدی و مقاومت قطبش R_p نامیده می‌شوند. درصد تخلخل در پوشش P را می‌توان از طریق جایگزینی داده‌هایی که از نمودار PDP در رابطه ۱۰ به دست آمد به دست آورد:

$$P = \left(\frac{R_{ps}}{R_p} \right) \times 10 - (\Delta E_{corr} / \beta_a) \times 100 \quad (10)$$

R_p و R_{ps} مقاومت به خوردگی زیرلایه و پوشش را نشان می‌دهند، β_a شیب شاخه آندی زیرلایه و ΔE_{corr} تفاوت پتانسیل خوردگی بین بستر و پوشش را نشان می‌دهد.

پس از آن به عملکرد ضدباکتری و همچنین ضدخوردگی نانوذرات اکسیدروی پرداخته شد و نتایج آنالیز خوردگی مذکور در مقاله که طبق روابط و داده‌های بدست آمده نشان داده شد، مطابق انتظار بیان کرد که نانوذرات اکسید روی با کاهش میزان تخلخل در پوشش مقاومت خوردگی آن را بالا می‌برند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان اثر از حمایت‌های دانشگاه تهران و پژوهشگاه رنگ کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

می‌تواند از طریق این تخلخل‌ها به داخل پوشش نفوذ کرده و در نهایت با تخریب پوشش به زیرلایه برسد. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه Z1 دارای کمترین درصد تخلخل و در نتیجه بهترین رفتار خوردگی است (۳۲).

۱۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری سعی بر آن شد که در ابتدا مروری بر خود زیر لایه منیزی، کاربردهای آن و رفتار خوردگی آن شود. سپس مروری بر فرآیند پوشش‌دهی یعنی اکسیدشدن پلاسمای الکتروشیمیایی انجام شد و سازوکار انجام این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

سپس به مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر خواص پوشش حاصل از فرآیند یعنی ترکیب الکترولیتی که در فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد به ویژه نانوذرات رنگدانه اکسیدروی، پرداخته شد. در این میان به رفتار کاتالیزور نوری این نانوذرات و سپس نظریه‌هایی که در مورد سازوکار فعالیت ضدباکتری اکسیدروی مطرح شده است، پرداخته شد.

۱۴- مراجع

- Fattah-Alhoseini A, Molaiee M, Babiee K. Influence of Electrolyte Composition and Voltage on the Microstructure and Growth Mechanism of Plasma. *Anal. Bioanal. Electrochem.* 2020;12(4):517-535. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125214>.
- Moosbrugger C. Introduction to Magnesium Alloys. In *Engineering Properties of Magnesium Alloys*. Detroit: ASM International; 2017.
- Armani A. Development of corrosion resistant coatings using natural biopolymer and pollen.[M.S thesis]. [Stockholm]: KTH Royal Institute of Technology ; 2020.
- Li CY., Fan XL., Cui LY., R.C. Zeng. Effects of Hydroxide and Silicate ions on the Plasma Electrolytic Oxidation of AZ31 Mg Alloy. *Cor Sci.* 2020; 47(4):. 147-154. <https://doi.org/10.22059/jufgnsm.2022.01.01>.
- Molaiee M, Babiee K, Fattah-Alhoseini. Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano- and micro-sized additives into the electrolytes. *JOM.* 2020; 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.11.016>.
- Sundararajan L, Rama K . Aqueous Corrosion Behavior of Micro Arc Oxidation (MAO)-Coated Magnesium Alloys. Springer *JOM.* 2014;66:1045-1060. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-0952-9>.
- Xiaopeng L, Carsten B, Yuanding H, Henry O, Mikhail L. Zheludkevich, Karl Ulrich Kainer. Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles. *Electrochimica Acta.* 2016;187:20-33. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.033>.
- van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARSCoV-19. *N Engl J Med.* 2020;382:1564-1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
- Veerachandra K, Yen-Con H. Using Photocatalyst Metal Oxides as Antimicrobial Surface Coatings to Ensure Food Safety—Opportunities and Challenges. *J. Food Saf.* 2017; 16(4): 617-631. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12267>.
- Khan VP. ZnO-based antimicrobial coatings for biomedical applications. *Bioprocess Biosyst Eng.* 2022; 45: 1421-1445. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12267>.
- Aboorvakani R., S. John K, Vethanathan DY, and Madhu K. U. nfluence of Znconcentration on zinc oxide nanoparticles and their anti-corrosion property. *J Alloys Comp.* 2020;843. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155078>.
- Maldhure AS, Aswar AK. Preparation of Zinc Oxide Nanomaterial using Unsymmetrical. *J Chem.* 2018;7(2). <https://doi.org/10.3390/nano13111795>.
- Babayevska N, Lucja P, Iatsunsky I, Grzegorz N, Marcin J, Janiszewska E. ZnO size and shape effect on antibacterial activity and cytotoxicity profile. *Sci Rep.* 2022; 12(1): 8148. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12134-3>.
- Chaharmahali R, Fattah-alhoseini A, Babaei K. Surface characterization and corrosion behavior of calcium phosphate (Ca-P) base composite layer on Mg and its alloys using plasma electrolytic oxidation (PEO): a review. *J. Magnes. Alloy.* 2021;9(1): 21-40. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.07.004>.
- Mashtalyar DV, Imshinetsky IM, Sinebryukhov SL. Formation and properties of composite nanostructured PEO-coatings on metals and alloys. In *International Conference on Modern Trends in Manufacturing*

¹ Chen

- Technologies and Equipment; 2017 ; Sevostopol , Russia Federation.
16. Barati Darband Gh, Aliofkhaezai M, Hamghalam P , Valizade N. Plasmaelectrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism. *J Magnes* .2017;5(1): 74-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004> .
 17. Gu Y, Bandopadhyay S, Chen C. Effect of oxidation time on the corrosion behavior of micro-arc oxidation produced AZ31 magnesium alloys in simulated body fluid. *J Alloys Compd*. 2012;543:109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.130> .
 18. Hadeer Mohammed S, Ali Taleb B, Hazim Yahya AG. Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles via Thermal Decomposition for Zn(II) SchiffBase Complex. *Indon J Chem*. 2022; 22(5): 11396-1406. <https://doi.org/10.22146/ijc.74753> .
 19. Iran Sh, Sheikshoae M, Ramezanpour S. Synthesis and Characterization of Nano Sized ZnO and CdO. *Chem Meth* . 2018;2(2):103-113. <https://doi.org/10.22034/chemm.2018.60129>.
 20. KavitaK, Chhabra V, and Prasad N. Antibacterial activities of zincoxide nanoparticles: a mini review. *J Phys : Conference Series*. 2022; 2267(1): 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2267/1/012049> .
 21. Leśniak-Ziołkowska K, Kazek-Kęsik A, Rokosz K. Electrochemical modification of the Ti-15Mo alloy surface in solutions containing ZnO and Zn₃(PO₄)₂ particles. *Mater Sci Eng*. 2020;111098. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111098> .
 22. Mahmoud Walaa H, Omar MM, Sayed N, Gehad GM. Synthesis, characterization, spectroscopic and theoretical studies of transition metalcomplexes of new nano Schiff base derived from L-histidine and 2-acetylferrocene and evaluation of biological and anticancer activities. *Appl Organomet Chem* . 2018;32(7):4386. <https://doi.org/10.1002/aoc.4386>
 23. Marzoli F, Bortolami A, Pezzuto A. A systematic review of human coronaviruses survival on environmental surfaces. *Sci Tot Env*. 2021;778:146191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146191>
 24. Roknian M, Fattah-alhosseini A, Gashti SO, Keshavarz M K. Study of the effect of ZnO nanoparticles addition to PEO coatings on pure titanium substrate: microstructural analysis, antibacterial effect corrosion behavior of coatings in Ringer's physiological solution. *J. Alloys Compd*. 2018;740:330–345. <https://doi.org/10.1016/j.JALLCOM.2017.12.366> .
 25. Vakili-Azghi M, Fattah-alhosseini A, Keshavarz M K. Effects of Al₂O₃ nano-particles on corrosion performance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on 6061 aluminum alloy. *J. Mater. Eng. Perform*. 2016;25:5302–5313. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2405-9> .
 26. Puspasari V, Ridhova A, Hermawan A, Ikhlasul Amal M, Mansoob Khan M. ZnO-based antimicrobial coatings for biomedical applications. *Bioproc and biosys eng*. 2022; 45(9): 1421-1445.
 27. Hussein RO, Nie X, Northwood DO, Yerokhin A , Matthews A. Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process. *J Phys D: App Phys*. 2010; 43. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/10/105203>
 28. Seyfi M, Fattah-alhosseini A, Pajohi-Alamoti M , Nikoomanzari E. Effect of ZnO nanoparticles addition to PEO coatings on AZ31B Mg alloy. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2021; 9(3): 1114-1127. <https://doi.org/10.1080/21870764.2021.1940728> .
 29. Rehman ZU, Hun Shin S, Hussain I, Heun Koo B. Structure corrosion properties of the two-step PEO coatings formed on AZ91D Mg alloy in K₂ZrF₆-based electrolyte solution. *Surf. Coat. Technol*. 2016; 307: 84-490. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.030> .
 30. Yong KL, Kangsoo L, Taeho J. Study on microarc oxidation of AZ31B magnesium alloy in alkaline metal silicate solution. *Electrochem Communi*. 2008; 10(11): 1716-1719. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.08.048>
 31. Xianghua S, Jianhong L , Xijiang Y , Jianping J , Jing W. The effect of pulse frequency on the electrochemical properties of micro arc oxidation coatings formed on magnesium alloy. *J Mag*. 2013; 1(4): p. 318-322. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.12.003> .
 32. Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-19". *N Engl J Med*. 2020; 382: 1564–1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
 33. Ullrich, Sina S., Penelope CE Fitzgerald, Iris Nkamba, Robert E. Steinert, Michael Horowitz, and Christine Feinle-Bisset. Intragastric lysine lowers the circulating glucose and insulin responses to a mixed-nutrient drink without slowing gastr.
 34. Stern M, Geary L. Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *J electrochem soci*. 1957; 104(1): 56. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2428496>.
 35. Sharma R, Firoz A, Sharma AK., Dutta V, Dhawan SK. Role of zinc oxide and carbonaceous nanomaterials in non-fullerene-based polymer bulk heterojunction solar cells for improved cost-to-performance ratio. *J Mat Chem* . 2015; 3(44): 22227-22238. <https://doi.org/10.1039/C5TA06802A>.
 36. Sikdar S, Pramod VM, Raven M, Timo J, Pradeep LM. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomat* . 2021 May; 11(6). <https://doi.org/10.3390/nano11061375> .

How to cite this article:

Hasankhani TGh, Gharagozlou M, Allahkaram SR, A Review on Providing Nanocoating Based on Nanoparticles of Zinc Oxide on magnesium alloy AZ31B by Plasma Electrolytic Oxidation Methode and its Corrosion and Antibacterial Properties. *J Stud color world*. 2023;13(4):421-436. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.6.4> [In Persian].

واژه‌نامه انگلیسی – فارسی

Consolidant coating	پوشش‌های استحکام‌بخش
Field survey	بررسی میدانی
Drilling Resistance Measurement System (DRMS)	سیستم اندازه‌گیری نیروی دریل‌زنی
Organic light-emitting diodes (OLEDs)	دیودهای نورتاب آلی
Full Color	رنگ کامل
Host-guest systems	سیستم‌های میزبان-مهمان
Excimer	اکسایمر
Exciplex	اکسی‌پلکس
Electroplex	الکتروپلکس
Fluorescent OLEDs (FOLEDs)	دیودهای نورتاب آلی فلورسنت
Phosphorescent OLEDs (PHOLEDs)	دیودهای نورتاب آلی فسفری
Alternating-current thin-filmelectroluminescent (ACTFEL)	جریان متناوب لایه نازک الکترولومینسانس
Transparent OLEDs (TOLEDs)	دیودهای نورتاب شفاف
One-pot method	روش تک گلدانه
Water footprint	ردپای آبی
Geothermal	زمین‌حرارتی
Volatile fatty acids	تراز پذیرنده
Donor level	تراز دهنده
Printed electronics	الکترونیک چاپی
Functional inks	جوهرهای موظف
Functional Materials	مواد موظف
Wearable electronics	الکترونیک پوشیدنی
Pulsed Electric Field	میدان‌های الکتریکی پالسی
Plasma Electrochemical Oxidation	پلاسمای اکسیداسیون الکترولیت
Cytoplasm	میان یاخته یا سیتوپلاسم

راهنمای نگارش مقاله نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

الف) نحوه ارسال

نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ، آمادگی دارد تا مقالات پژوهشی، مروری (شامل تالیف، ترجمه و گردآوری) در زمینه‌های مرتبط با علوم و فناوری رنگ و پوشش (به بخش اهداف و چشم انداز در وبگاه نشریه مراجعه شود) در قالب راهنمای ارائه شده در زیر منتشر کند. خواهشمند است مقاله را از طریق وبگاه نشریه به آدرس <http://jscw.icrc.ac.ir> ارسال نمایید. برای مقاله‌های ترجمه شده ارسال اصل مقاله انگلیسی ضروری است. مسئولیت کامل مطالب علمی و منابع چاپ شده بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود و نسخه نهایی مقاله پیش از چاپ به امضا نویسنده مسئول می‌رسد. نویسنده یا نویسندگان متعهد خواهند شد که مقالات ارسالی در نشریه دیگری انتشار نیافته است (فرم تعهد با امضاء نویسنده مسئول ارسال گردد). نشریه در پذیرش، ویرایش، اصلاح و یا کوتاه کردن مقالات با رعایت امانت در ارائه مطالب نوشتاری برای چاپ آزاد است. میانگین زمان داوری برای نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ ۵ ماه می‌باشد.

مدارک مورد نیاز ارسال مقاله:

- فایل کامل ورد مقاله بدون نام نویسندگان
- فایل PDF مقاله بدون نام نویسندگان
- فایل مشخصات نویسندگان: ارائه نام، آدرس الکترونیکی و شماره تلفن همراه تمام نویسندگان به زبان فارسی و انگلیسی و معرفی ۲ داور متخصص پیشنهادی در هنگام بارگذاری مقاله الزامی است.
- فایل فرم تعهد نامه (کپی رایت)
- فرم تعارض منافع
- پوشه عکس برای چکیده تصویری فارسی و انگلیسی

ب) نحوه نگارش

مقالات با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Word و روی کاغذ A4 نگارش شود. در ضمن، متن اصلی به صورت تک ستونی، بخش فارسی مقالات با قلم B nazanin و متن لاتین آن با قلم Times New Roman باشد. حاشیه بالا، پایین، چپ و راست در تمام صفحات ۲/۵ سانتی‌متر باشد فاصله خطوط ۱/۵ سانتی‌متر و متن از سمت راست به چپ تنظیم شود.

بخش‌های هر مقاله به ترتیب زیر می‌باشد:

عنوان فارسی و انگلیسی: مختصر و متناسب با محتوا با قلم B nazanin ۱۴ پرننگ

نام و نشانی نویسنده (نویسندگان) به فارسی و انگلیسی: نام، نام خانوادگی، نشانی محل کار و E-mail (نویسنده مسئول)، آدرس کامل پستی به همراه صندوق پستی و محل انجام تحقیق در یک صفحه جداگانه آورده شود.

چکیده فارسی و انگلیسی: حداکثر ۲۵۰ کلمه در یک پاراگراف شامل چکیده‌ای از کار انجام شده و یافته‌ها

چکیده تصویری فارسی و انگلیسی: به صورت تصویر با وضوح ۳۰۰ dpi در یک صفحه جداگانه آورده شود.

واژه‌های کلیدی فارسی و انگلیسی: چهار تا شش واژه که محتوای دقیق مقاله را بیان می‌کند باید در زیر چکیده آورده شود.

بدنه اصلی مقاله: با مقدمه آغاز و با نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد. این قسمت به صورت تک ستونی با قلم B nazanin ۱۲ نازک و Times New Roman ۱۰ نازک نگارش می‌شود. عنوان‌های متن مقاله با قلم B nazanin ۱۲ پرننگ می‌باشد.

جدول‌ها، شکل‌ها (شکل، نمودار و عکس)

جدول‌ها و شکل‌ها به ترتیب، شماره‌گذاری شده و در متن مقاله به آن ارجاع داده شود. عنوان‌های (بالانویس) جدول‌ها در بالای هر جدول و عنوان‌های شکل‌ها (زیرنویس) در زیر هر شکل با قلم B nazanin ۱۰ نازک و قلم Times New Roman ۸ نازک آورده شود. مطالب داخل جدول و شکل با قلم B nazanin ۱۰ نازک و قلم Times New Roman ۸ باشد. عنوان مورد استفاده در محورهای شکل باید دارای واحد باشند و توضیح مربوط به نمودارها در شکل آورده شود. عکس‌ها باید دارای وضوح (Resolution) تقریبی ۳۰۰ dpi باشند و با فرمت Tif یا JPEG آورده شود. مراجعی که جداول و اشکال از آن استخراج شده است می‌بایست در عنوان جداول و اشکال ذکر شوند. شکل ۱ و جدول ۱ برای نمونه آورده شده است.

* زیرنویس شکل‌ها و عناوین جدول‌ها به دو زبان فارسی و انگلیسی نوشته شود. اعداد و متن در تمامی اشکال می‌بایست به صورت انگلیسی باشند.

رابطه‌ها و واکنش‌های شیمیایی

رابطه‌های ریاضی و واکنش‌ها نباید به شکل تصویر باشند و از قسمت درج رابطه‌ها در نرم‌افزار ورد استفاده شود. رابطه‌ها باید به صورت متوالی در سراسر

مقاله شماره گذاری شوند.

نتیجه گیری: در این بخش، نکات مهم مقاله به طور خلاصه مرور و نتایج برگرفته از آن توضیح داده می شود.

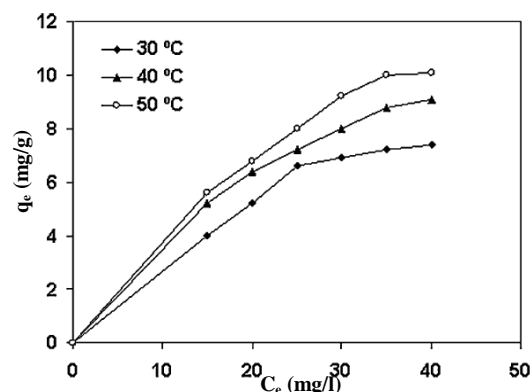
پانویس ها: توضیحات و معادل لاتین اصطلاحات و اسامی مولفانی که ذکر نامشان در منابع ضرورت ندارد، پایین هر صفحه با شماره های مجزا برای هر صفحه آورده شود.

تشکر و قدردانی: در صورتی که مقاله شما حامی مالی یا تامین کننده اعتبار پژوهشی دارد و یا برگرفته از طرح پژوهشی است، ذکر اطلاعات آن در یک بند با عنوان تشکر و قدردانی الزامی است. محل این بند در انتهای مقاله قبل از فهرست منابع می باشد.

جدول ۱: مقایسه انواع نانوجاذب های کامپوزیت آلومینا برای حذف ماده رنگزا

Table 1: Comparative study of different types of alumina composite adsorbent for dye removal

Adsorbent type	Dye type	Adsorbent capacity (mg/g)	Ref.
Nano alumina	Orange G	93.3	[14]
Alumina/activated carbon	Methylen blue	14.3662	[18]
Alumina/chromium oxide	Congo red	35.13	[37]
Magnetic alumina	Methylen blue	1959	[29]
Polyaniline/Alumina	Direct blue 199	475.32	[31]
Alumina/Polystyrene	Methyl Orange	417	[36]



شکل ۱: ایزوترم های جذب برای جذب آمارانت بر ARP در دماهای مختلف [۳۰].

Figure 1: Adsorption isotherms for amaranth adsorption on ARP at different temperatures [30].

مراجعه: نگارش مراجع در این مجله بر اساس شیوه مرجع نویسی Vancouver است. مراجع به ترتیب استفاده در متن مقاله با شماره داخل کروشه [] مشخص شود و در انتهای مقاله آورده شوند. دقت شود که تمام مراجع در متن مورد ارجاع واقع شده باشند. تاریخ مقالات پررنگ باشد، عناوین کتاب های انگلیسی با قلم Times Roman New و از قلم کج (Italic) استفاده شود، تا حد امکان مراجع به صورت انگلیسی نوشته شوند.

۱- کتاب: نام و نام خانوادگی (مؤلفان و مترجمان)، "عنوان اصلی کتاب"، عنوان فرعی کتاب (جزئیات عنوان کتاب در صورت وجود داخل هلالین)، ناشر، محل انتشار، شماره جلد، شماره ویرایش، سال انتشار.

R. W. G. Hunt, "The Reproduction of Colour", 6th ed, England, Jon Wiley & sons, 2004.

۲- مجلات: نام و نام خانوادگی (مؤلفان و مترجمان)، "عنوان مقاله"، عنوان مجله، شماره مجله، شماره صفحات در مجله، سال انتشار.

M. A. Fox, M. T. Dulay, "Acceleration of secondary dark reactions of intermediates derived from adsorbed dyes on irradiated TiO₂ powders", Chem. Rev. 93, 341-357, 1993.

۳- همایش ها: نام و نام خانوادگی (مؤلفان و مترجمان)، "عنوان مقاله"، عنوان کنفرانس، شماره صفحه، کشور یا شهر، سال انتشار.

M. A. Farahmand, "Fabrication of Ultra fine TiO₂ Nanofibers with Electrospinning Technique and Optimization of parameters with Central Composite Design (CCD) Method", 17th Iranian Seminar of Analytical Chemistry, 47, Kashan, Iran, 2010.

۴- پایان نامه: نام و نام خانوادگی مجری، "عنوان پایان نامه"، مقطع، محل انجام، سال ارائه پایان نامه.

J. Y. Hardeberg, "Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches", Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, 1999.

۵- پایگاه الکترونیکی: نام و نام خانوادگی نویسنده، "عنوان مطالب"، عنوان صفحه وب سایت، آدرس کامل صفحه در پایگاه الکترونیکی، تاریخ مطلب.

I. Albanese, "Fairer compensation for air travelers, media release", 29 January, Minister for Infrastructure, Transport, Regional Development and Local Government, viewed 30 January 2009, http://www.minister.infrastructure.gov.au/aa/releases/2009/January/AA007_2009.htm

۶- اختراع: نام و نام خانوادگی دارنده ثبت، "عنوان اختراع"، محل ثبت شده، شماره ثبت، سال ثبت.

G. Bodnar, C. Pearson, K. Seibert, M. J. Vrhel, "Method for Using an Electronic Imaging Device to Measure Color", US Patent No. 7, 057, 641, 2006.

۷- استاندارد: مرجع استاندارد مورد استفاده، "شماره استاندارد"، شماره جلد، سال انتشار مرجع.

International Organization for Standardization, "ISO 4948-1:1982", Steels - Classification - part 1: Classification of steels into unalloyed and alloy steels based on chemical composition, 1982.

۸- طرح پژوهشی: نام و نام خانوادگی مجری، "عنوان طرح پژوهشی"، شماره ثبت، نام کامل محل انجام و سفارش دهنده، سال انجام طرح.

A. Soleimani, "3D Inkjet printings", 65996, Institute for Color Science and Technology, 1389.

فرم اشتراک

نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

Journal of Studies in Color World

نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ از انتخاب شما در اشتراک این نشریه قدردانی می‌نماید. جهت اشتراک خواهشمند است به موارد زیر توجه نمایید:

۱. فرم اشتراک را کامل و خوانا تکمیل نمایید.
۲. هزینه اشتراک یکساله فصلنامه با احتساب هزینه پست مبلغ ۱.۰۰۰.۰۰۰ ریال می‌باشد.
۳. هزینه اشتراک را به شماره شبا ۵۰۰۱۰۰۰۰۴۰۰۱۰۲۲۴۰۳۰۱۲۹۷۹ نزد بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، با شناسه پژوهشگاه رنگ ۳۶۵۰۲۲۴۷۴۱۴۰۱۰۷۰۰۱۱۳۵۸۵۰۰۰۰۱۱۷ (به نام خزانه‌داری کل) واریز نموده و کپی فیش را به دفتر نشریه ارسال نمایید.
۴. برای اشتراک می‌توانید از پایگاه الکترونیکی نشریه نیز اقدام نمایید.
۵. در صورتیکه تا ۳ ماه پس از ارسال مدارک، نشریه دریافت نشد با دفتر نشریه تماس حاصل نمایید.

نشانی: بزرگراه صیاد شیرازی شمالی، خروجی لویزان، میدان حسین آباد، خیابان وفامنش، نبش کوچه شمس، پلاک ۵۵، پژوهشگاه رنگ،

دفتر نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

تلفن و نمابر: ۲۲۹۴۷۳۵۸

پایگاه الکترونیکی: www.jscw.icrc.ac.ir

پست الکترونیک: jscw@icrc.ac.ir



نام:.....نام خانوادگی:
رشته تحصیلی:
شماره اشتراک:..... بابت اشتراک تعداد.....
از شماره‌های..... تا..... سال.....
نشانی:.....
کد پستی:..... صندوق پستی:..... تلفن:.....
نمابر:..... رایانامه:.....

تعرفه تبلیغات در نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ

۴/۰۰۰/۰۰۰/- ریال
۴/۰۰۰/۰۰۰/- ریال
۳/۰۰۰/۰۰۰/- ریال
۲/۰۰۰/۰۰۰/- ریال
۱/۵۰۰/۰۰۰/- ریال
۱/۰۰۰/۰۰۰/- ریال

۱. تبلیغ در وبگاه مجله برای هر فصل
۲. یک صفحه رنگی کامل پشت جلد
۳. یک صفحه رنگی کامل داخل جلد (دو طرف مجله)
۴. صفحه روبروی داخل جلد (دو طرف مجله)
۵. صفحه روبروی شناسنامه فارسی و انگلیسی
۶. صفحات رنگی داخلی مجله

تخفیف:

- ۲۵٪ قرارداد های یکساله، که در آخرین صورتحساب منظور خواهد شد.
- ۱۰٪ تخفیف ویژه اعضا
- ۱۰٪ تخفیف ویژه مشترکین مجله
- جهت ارتباطات ارزشمند با صنعت امکان تخفیف با نظر مدیر مسئول، سردبیر و یا مدیر اجرایی مجله وجود دارد.
- تعرفه تصویبی تا پایان سال ۱۴۰۲ معتبر می باشد.



Ministry of Science, Research and Technology
**Institute for Color
Science & Technology**



**Iranian Color Society
(ICS)**

Journal of Studies in Color World

Vol. 13, No. 4 (51) winter 2023

CONTENT

Environmental Preferences and Color Selection Factors in the Night Scene Case Study: Ferdous Garden Axis to Tajrish M. Pourfathollah	331-342
Evaluation of Methods for Estimating the Penetration Depth of Consolidant Material in Porous Materials of Historical Monuments M. Razani, L. Nemani Khiavi	343-358
Review on Organometallic Dyes for Light-Emitting Diodes M. Hosseinnezhad, S. Nasiri	359-375
Printed Solar Cells, an Inevitable Remedy for the Global Energy Crisis M. Mohammad Raei Nayini, M. Jalili, S. Bastani, S. Khamseh	377-406
A Review of the Performance and Applications of Electric Pulse in the Extraction of Natural Dye M. Ghamary, Z. Salehi	407-420
A Review on Providing Nanocoating Based on Nanoparticles of Zinc Oxide on magnesium alloy AZ31B by Plasma Electrolytic Oxidation Methode and its Corrosion and Antibacterial Properties T. Ghaiem Hasankhani, M. Gharagozlou, S. R. Allahkaram	421-436

ISSN: 2251-7278