

استفاده از پوست سبز گردو به عنوان رنگدانه جدید در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه، مبتنی بر

نانوذرات TiO_2

کامبیز حسین پناهی^۱، محمد حسین عباسپور فرد^{۲*}، جواد فیضی^۳، محمودرضا گلزاریان^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار، گروه شیمی مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد

۴. استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۸/۱۰)

چکیده

در این تحقیق برای اولین بار رنگدانه پوست سبز گردو به عنوان حساس کننده طبیعی در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه مبتنی بر نانوذرات TiO_2 استفاده شد. رنگدانه‌ها با استفاده از دستگاه فراصوت استخراج و به روش صابونی سازی داغ پالایش شدند. از طیف سنجی جذبی UV-Vis برای بررسی ویژگی‌های جذبی رنگدانه و همچنین از طیف-سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای شناسایی گروه‌های عاملی در رنگدانه استفاده شد. منحنی I-V و بازده تبدیل فوتون به جریان (IPCE)، برای بررسی ویژگی‌های فتوولتائیکی رنگدانه تحلیل شد. نتایج نشان داد که سلول ساخته شده تحت شرایط استاندارد دارای چگالی جریان $9.39/100 \text{ mA/cm}^2$ ، ولتاژ مدار باز 0.792 V ، ضریب پرشدگی 0.71 و بازده کلی 6.528% می‌باشد، که در مقایسه با کارهای مشابه مقادیر قابل توجه و خوبی را نشان می‌دهد. این بهبود بازده نتیجه استخراج و پالایش صحیح رنگدانه و همچنین ناشی از ساختار رنگدانه پوست سبز گردو است که انتقال بار به نانوذرات نیمه‌رسانا را میسر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فتوولتائیک، رنگدانه طبیعی، بازده، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، DSSC.

مقدمه

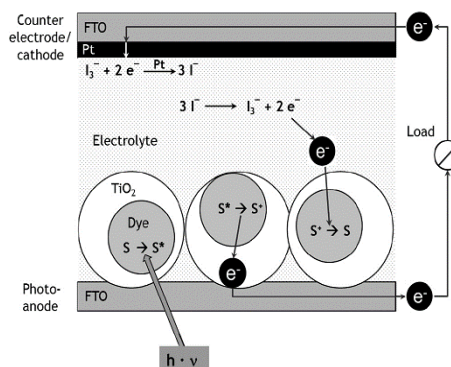
طبق آمارها ۸۰ درصد از انرژی مورد استفاده در کشورهای صنعتی از سوخت‌های فسیلی در قالب نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ به دست می‌آید (Statistics., 2014). پایدارترین و ارزان ترین منبعی که می‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی شود، منابع انرژی تجدیدپذیر است. انرژی تجدیدپذیر عبارت است از انرژی که از فرآیندهای طبیعی استخراج می‌شود و تمام نشدنی است (Ellabban *et al.*, 2014). در بین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، خورشید اولین و بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود. برای مثال اگر بتوان ۱۰ درصد انرژی خورشیدی را که به زمین می‌رسد مورد بهره برداری قرار داد، حدود ۶۰ تراوات انرژی حاصل می‌شود (Reza and Ahmadi, 2012) که این مقدار بیش از دو برابر انرژی است که در سال ۲۰۵۰ نیاز است. در این بین بخش کشاورزی و بخصوص

مهندسان بیوسیستم هم از نقطه نظر تولید انرژی خورشیدی و هم استفاده از آن برای فراوری محصولات کشاورزی فعالیت‌های تحقیقاتی متنوعی ارائه داده اند (Hancock and Boxworth, 1997, Jung and Lee, 2013). که نشان دهنده جذابیت این موضوع برای این متخصصین می‌باشد.

یکی از راه‌های به دست آوردن انرژی از خورشید، روش‌های فتوولتائیک است. فتوولتائیک به معنی تبدیل مستقیم نور به الکتریسیته است. سال‌ها تحقیق در حوزه فتوولتائیک، منجر به معرفی چهار نسل مختلف از سلول‌های فتوولتائیک شده که عبارتند از: ۱- نسل اول شامل ویفرهای سیلیکونی. ۲- نسل دوم شامل سیلیکون بی‌شکل، سیلیکون چند بلوری، کادمیوم تلوراید و آلیاژ ایندیوم گالیم. ۳- نسل سوم شامل سلول‌های نانو بلور، سلول‌های فتوالکتروشیمیایی، سلول‌های پلیمری و سلول‌های حساس به رنگدانه. ۴- نسل چهارم شامل بلورهای معدنی شده داخل ماتریکس پلیمری (Dasgupta and Soga, 2006., Dasgupta, 2007). نسل اول و دوم به مرحله تجاری رسیده‌اند، اما قیمت آنها به دلیل خالص‌سازی پرهزینه و

* نویسنده مسئول: m.abbaspourfard@gmail.com

می‌شود. رنگدانه اکسید S^+ از طریق انتقال الکترونی که به واسطه الکترولیت انجام می‌گیرد، ترمیم می‌شود. مایع الکترولیتی که اغلب استفاده می‌شود سیستم اکسایش - کاهش یه - تری دیدید (I^-/I_3^-) در حلالی ارگانیک است که به ساختارهای نانوحفره‌ای نفوذ می‌کند. سطح داخلی کاند شامل گرافیت یا ذرات پلاتین است که نقش کاتالیزور را دارند. در آنجا I_3^- به I^- کاهش پیدا می‌کند و چرخه تکمیل می‌شود (Rowley *et al.*, 2010).



شکل ۱. مکانیسم تولید جریان در یک سلول خورشیدی حساس به رنگدانه (Hug *et al.*, 2014).

در واقع این رنگدانه است که باعث آزاد کردن الکترون و انتقال آن به نیمه رسانا می‌شود و نقش اصلی را در تولید الکتروسیسته بازی می‌کند. رنگدانه‌هایی که در سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شوند به دو دسته سنتزی و طبیعی تقسیم‌بندی می‌شوند (Ludin *et al.*, 2014). رنگدانه‌های سنتزی تجاری مانند ترکیبات پلی فریدیل روتینیوم علاوه بر این که حاوی فلزات سنگین و سمی هستند، سنتز آنها نیز هزینه‌بر است و در تماس با آب دچار افت می‌شوند. بطوری که این موضوع باعث کاهش بازده سلول خواهد شد (Zhang *et al.*, 2008). تلاش برای رفع این نواقص در رنگدانه‌های تجاری، سبب شد تا ایده‌ی استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه مطرح شود. در طبیعت گل‌ها، برگ‌ها و میوه‌ها دارای چندین رنگدانه هستند که رنگ‌های مختلفی را از خود نشان می‌دهند. این رنگدانه‌ها بنحوی قابل استخراج هستند و در نتیجه می‌توان از آنها در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه استفاده کرد. دلیل و انگیزه تمایل محققان به استفاده از رنگدانه‌های طبیعی، تکنولوژی ساده‌تر استخراج رنگ، هزینه پایین، تجزیه بیولوژیکی کامل، در دسترس بودن، درجه خلوص بالا، دوستدار محیط زیست و مهم‌تر از همه کاهش بالای فلزات نجیب^۳ و هزینه استخراج و

مشکل سیلیکون، بالاست. به طوری که گزارش شده است درحالی‌که هزینه یک مدول DSSC^۱ ۰/۰۶ دلار در هر وات می‌باشد، هزینه یک مدول خورشیدی نسل اول و دوم ۰/۸ دلار در هر وات است (Jung and Lee, 2013). سلول‌های خورشیدی نسل‌های سوم و چهارم دلیل بازده پایین هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند، اما قیمت بسیار پایین، ساخت آسان، سبک بودن، انعطاف‌پذیری، در دسترس بودن مواد اولیه، دوست‌دار محیط زیست بودن و تولید الکتروسیسته در شرایط نور کم، سبب شده است تا این سلول‌ها، به موضوعی جذاب برای محققان تبدیل شوند. از میان سلول‌های خورشیدی نسل سوم و چهارم، سلول خورشیدی حساس به رنگدانه به دلیل داشتن بسیاری از مزایای بالا، بیش از دیگر سلول‌های این دو نسل قابلیت تجاری شدن را دارد؛ به طوری که در حال حاضر شرکت‌های مختلفی بر روی این سلول‌ها سرمایه‌گذاری کرده‌اند (Giuseppe *et al.*, 2015). اصول و کارکرد این نوع از سلول‌ها دقیقاً شبیه به فرآیند فتوسنتز در گیاهان است. فرآیند تولید الکتروسیسته در این سلول در چهار مرحله انجام می‌گیرد که عبارتند از: ۱- جذب نور ($S + h\nu \rightarrow S^*$), ۲- انتقال الکترون از رنگدانه به نانوذرات TiO_2 ($S^* \rightarrow S^+ + e^- (TiO_2)$), ۳- کاهش رنگ و اکسایش دیدید ($2S^+ + I_3^- \rightarrow 2S + 3I$), ۴- کاهش تری دیدید ($I_3^- + 2e^- \rightarrow 3I$) (Yeh and Yeh, 2013).

ساختار این نوع سلول که در شکل ۱ نشان داده شده، شامل الکترودها، الکترولیت، ماده‌ای نیمه‌رسانا در قالب نانو ذرات و رنگدانه است. رنگدانه مهم‌ترین قسمت این سلول محسوب می‌شود. این سلول‌ها دارای دو الکتروده هستند که حداقل یکی از آنها شفاف است تا نور ناحیه مرئی را از خود عبور دهد (Nazeeruddin *et al.*, 2011). در سطح رسانای آند یک نیم رسانا با گاف انرژی زیاد و با ساختار نانوحفره‌ای (اندازه ذرات ۵۰-۲۰ نانومتر) استفاده می‌شود، که سطح نیمه‌رسانا را تا ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌دهد (Kalyanasundaram, 2010). در این سلول‌ها رنگدانه‌ی مورد استفاده جذب نور بوده که با سطح دی اکسید تیتانیوم پیوند برقرار می‌کند (Henning *et al.*, 2013). تحریک نوری رنگدانه از حالت پایه S به حالت برانگیخته S^* منجر به تزریق یک الکترون به باند رسانش تیتانیوم دی اکسید خواهد شد. این الکترون از طریق نانوحفره‌های تیتانیوم دی اکسید پخش می‌شود و سرانجام از لایه اکسید رسانای شفاف^۲ (TCO) عبور می‌کند و به جریان الکترونیکی تبدیل

1. Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)

2. Transparent Conductive Oxide.

3. Noble metals

که Chl-c بهتر از سایر مشتقات کلروفیل می‌تواند بعنوان حساس‌کننده در DSSC‌ها عمل کند (Wang *et al.*, 2007). بر همین اساس، در این مقاله برای اولین بار رنگدانه پوست سبز گردو، که از ضایعات کشاورزی محسوب می‌شود و حاوی رنگدانه کلروفیل از نوع Chl-c است (Hancock and Boxworth, 1997)، بعنوان حساس‌کننده در سلول‌های حساس به رنگدانه طبیعی بکارگرفته شد. در مقایسه با سایر رنگدانه‌های طبیعی دیگر، طیف عمل کلروفیل‌ها به طیف جذب فتوسنتز نزدیک‌تر است. به عبارت دیگر، کلروفیل بیش از سایر رنگدانه‌های دیگر در فتوسنتز نقش دارد و نور مرئی و موثر بیشتری را می‌تواند جذب کند (Hopkins.V.J., 2007). این ویژگی بسیار مهم، بازده سلول‌های خورشیدی را با جذب الکترون‌های بیشتر، بهبود می‌بخشد.

مواد و روش‌ها

استخراج و خالص‌سازی رنگدانه پوست سبز گردو

گردوها از یک درخت مشخص و از یک باغ در نیشابور جمع آوری شد. پوست سبز آنها را از خود گردو جدا کرده و با آب دی‌یونیزه شسته شدند. سپس پوست‌های سبز گردو در سایه و به دور از نور مستقیم آفتاب خشک گردید تا ساختار کلروفیل آن تخریب نشود. پس از آن پوست سبز گردوها را با آسیاب خرد کرده و با استفاده از حلال اتانول خالص و به وسیله امواج فراصوت تحت شدت ۱۰۰ درصد و به مدت ۱۵ دقیقه، رنگدانه پالایش نشده از پوست سبز گردو استخراج شد. این کار با دستگاه فراصوت مدل Sonic VCX 750، ۷۵۰ وات با ظرفیت ۱ لیتر انجام گرفت. با توجه به وجود ترکیبات اضافی در رنگدانه استخراج شده، با استفاده از روش صابونی‌سازی داغ (Schertz, 1983) کلروفیل از سایر ترکیبات جدا شد.

ساخت و آماده‌سازی سلول

شیشه رسانا SnO₂ دوپ شده با فلور (FTO) با مقاومت ۱۵Ω/cm² به عنوان الکترود استفاده شد. شیشه FTO با یک محلول پاک‌کننده در حمام آلتراسونیک، به مدت ۱۵ دقیقه تمیز و آنگاه با آب مقطر و اتانول شسته، و سپس خشک شد. برای دستیابی به ضخامتی یکنواخت، TiO₂ بر روی شیشه رسانای FTO به روش دکتر بلید بر روی فتوآند لایه نشانی شد (Hemalatha *et al.*, 2012). بعد از لایه نشانی، لایه TiO₂ به مدت ۵ دقیقه در هوای آزاد خشک شد، تا بی‌نظمی‌های سطحی آن کاهش یابد. فیلم TiO₂، لایه نشانی شده بر روی شیشه FTO در دمای ۵۰۰ °C قرار گرفت، تا تراکم خلل و

خالص‌سازی آن است (Sinha *et al.*, Nishantha *et al.*, 2012). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در DSSC‌ها انجام شده که در جدول ۱ به اختصار به برخی از مهمترین آنها اشاره شده است (Calogero *et al.*, 2015).

جدول ۱. بازده برخی از تحقیقات مربوط به سلول‌های خورشیدی حساس به

رنگدانه‌های طبیعی		
نوع رنگدانه	بازده (%)	منبع
کلم بنفش (آنتوسیانین)	۰/۷۵	چانگ و همکاران (۲۰۱۳)
انگور (آنتوسیانین)	۰/۵۷	کالوگرو و همکاران (۲۰۱۲)
پرتقال خونی (آنتوسیانین)	۱	کالوگرو و همکاران (۲۰۱۲)
انجیر (بتالاین)	۰/۵	کالوگرو و همکاران (۲۰۱۰)
گلایبی (بتالاین)	۲/۰۶	کالوگرو و همکاران (۲۰۱۲)
یاسمن زرد (کاونوئید)	۰/۳۴	پارک و همکاران (۲۰۱۳)
اسفناج (کلروفیل)	۰/۲۵	چانگ و همکاران (۲۰۱۱)
چای سبز (کلروفیل)	۰/۱۹	ژانگ و همکاران (۲۰۰۲)
جلیک (کلروفیل)	۰/۱۷۸	کالوگرو و همکاران (۲۰۱۳)

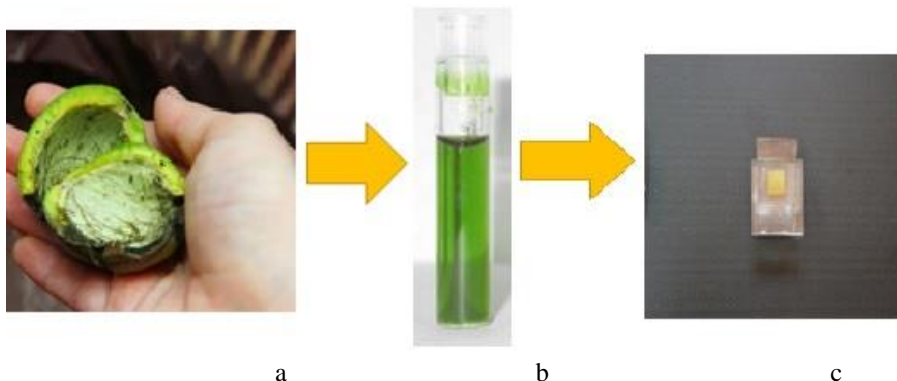
هر حساس‌کننده طبیعی، باید بتواند طیف ناحیه مرئی و فرابنفش را جذب کند و انرژی الکتریکی برانگیخته‌اش بالاتر از لبه^۱ CB تیتانیوم دی‌اکسید باشد (Giuseppe *et al.*, 2014). یکی از این رنگدانه‌های طبیعی، کلروفیل است. کلروفیل سبز رنگ و مسئول جذب نور در فرآیند فتوسنتز است. در کنار فراوانی و قابلیت جذب انرژی خورشید در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، در مقایسه با سایر رنگدانه‌ها مزیت‌هایی نیز دارد. در حقیقت، عمر حالت تهییج کلروفیل می‌تواند با تغییر فلز مرکزی (Zn, Mg, etc) کنترل و در نتیجه اوربیتال LUMO^۲ حساس‌کننده می‌تواند با توجه به سطح انرژی CB نیمه‌رسانا، تنظیم شود (Calogero *et al.*, 2015). با این ویژگی‌ها، کلروفیل نیز بعنوان حساس‌کننده در DSSC‌ها استفاده شده است. نتایج این تحقیقات نشان داد که Chl-a در مقایسه با سایر مشتقات کلروفیل، جذب و حساس‌کنندگی ضعیفی هنگام قرارگیری بر روی نانوذرات TiO₂ دارد؛ زیرا Chl-a در ساختار خود دارای گروه فیتول است (Jin *et al.*, 2010). همچنین زنجیره طولانی آلکن یک مانع فضایی قوی ایجاد می‌کند که سبب جلوگیری از قرارگیری منظم و صحیح مولکول‌های کلروفیل بر روی سطح نانوذرات TiO₂ خواهد شد. تحقیقات وانگ و همکاران نشان داد

1. Conduction Band.

2. Lowest unoccupied Molecular Orbit (LUMO)

اتانولی رنگدانه طبیعی جای گرفت (Ito et al., 2008) تا مولکول‌های رنگدانه، به‌خوبی بر روی نانوذرات TiO_2 جذب شوند. بعد از ۲۴ ساعت که رنگدانه‌ها جذب نیمه رسانا شدند، آند با اتانول خالص شسته شد تا رنگ‌های جذب نشده برداشته شود و در نهایت سلول برای تست آماده شد (شکل ۲).

فرج‌های درونی لایه افزایش یابد و بارهای اضافی مواد برداشته شود. این کار عملکرد جذب آن را افزایش خواهد داد. پس از آن، فیلم TiO_2 به مدت ۳۰ دقیقه در محلول ۴۰ میلی مولار TiCl_4 در دمای 70°C قرار گرفت، و بعد از خنک شدن در دمای اتاق، الکتروود حاوی فیلم نازک TiO_2 به مدت ۲۴ ساعت در محلول



شکل ۲. پوست سبز گردو (a)، عصاره کلروفیل استخراجی و خالص شده پوست سبز گردو (b)، سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه پوست سبز گردو.

اندازه گیری و تست سلول

چگالی جریان و V_{\max} (V) ولتاژ در نقطه‌ای از منحنی I-V است که بیشترین توان خروجی را می‌دهد.

نتایج و بحث

طیف جذبی UV-Vis

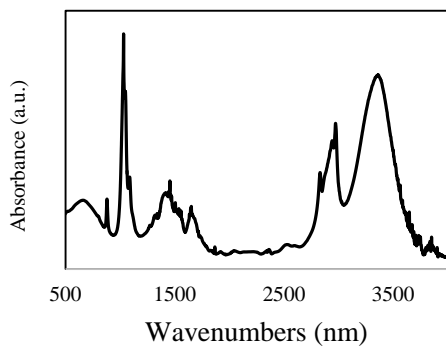
برای درک این موضوع، که رنگدانه استخراجی از پوست سبز گردو چه طول موج‌هایی از نور مرئی را جذب می‌کند، طیف جذبی این رنگدانه همانگونه که در شکل ۳-b نشان داده شده است، گرفته شد. همانطور که ملاحظه می‌شود عصاره استخراجی از پوست سبز گردو در 460 نانومتر دارای بیشترین جذب است. با افزایش طول موج، دو پیک اصلی بطور واضحی قابل مشاهده هستند. همچنین طیف جذبی رنگدانه پوست سبز گردو هنگامی که بر روی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم قرار گرفت، در شکل ۳-a نشان داده شده است. بیشترین جذب این طیف در محدوده 530 نانومتر مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، طیف جذبی رنگدانه قرار گرفته بر روی نانوذرات TiO_2 نسبت به طیف رنگدانه استخراجی به سمت راست شکل رفته و اصطلاحاً "تغییر به قرمز" اتفاق افتاده است. این موضوع نشان می‌دهد که کلروفیل بخوبی بر روی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید جذب شده و توانسته با این نیمه رسانا پیوند برقرار کند؛ چون که جذب نور در طول موج‌های بلندتر رخ داده است (Giuseppe et al., 2015).

طیف جذبی UV-Vis با استفاده از طیف سنج Perkin Elmer L25 ثبت شد. برای شناسایی گروه های عاملی در رنگدانه کلروفیل از طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) مدل Perkin Elmer Spectrum RX I استفاده شد. منحنی جریان ولتاژ با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانوستات مدل Palmsens تحت تابش 100 mW/cm^2 شبیه ساز خورشیدی (مدل Luzchen) در شرایط استاندارد (AM 1.5، دمای هوای 25°C و تحت تابش 100 mW/cm^2) به دست آمد. دستگاه شبیه ساز خورشیدی دارای محدوده جریان 10 نانو آمپر تا 10 آمپر، محدوده ولتاژ $+10$ تا -10 ولت و محدوده فرکانس 10 میلی هرتز تا 10 مگاهرتز است. بازده تبدیل فوتون به جریان (IPCE)، با استفاده از مونوکروماتور مدل Jarrel Ash اندازه گیری شد. پارامترهای مهم و موثر در مشخصه‌یابی سلول مانند فاکتور پرشدگی^۱ (FF) و بازده کلی سلول بر اساس معادلات زیر به دست می‌آیند (کالوگرو ۲۰۱۵):

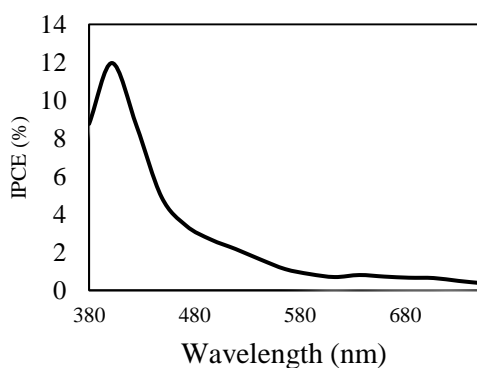
$$FF = \frac{J_{\max} \times V_{\max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\eta(\%) = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{I_{mc}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این روابط J_{sc} (mA/cm^2) چگالی جریان اتصال کوتاه و V_{oc} (V) ولتاژ مدار باز هستند. همچنین J_{\max} (mA/cm^2)



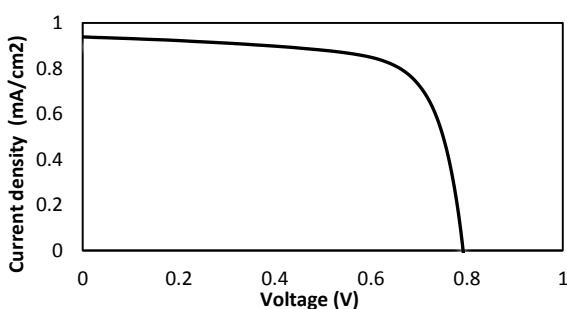
شکل ۴. طیف مادون قرمز تبدیل فوریه رنگدانه پوست سبز گردو



شکل ۵. منحنی IPCE سلول خورشیدی حساس به رنگدانه پوست سبز گردو.

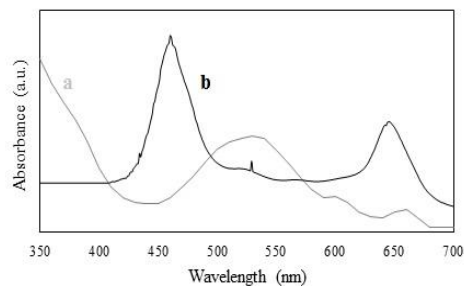
بازده فتوولتاییکی DSSC^۲ ساخته شده

منحنی جریان - ولتاژ سلول خورشیدی حساس به رنگدانه پوست سبز گردو در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی جریان - ولتاژ سلول خورشیدی حساس به رنگدانه پوست سبز گردو

برای سلول ساخته شده بیشترین چگالی جریان برابر 0.939 mA/cm^2 ، بیشترین ولتاژ برابر 0.792 V ، ضریب پرشدگی برابر 0.71 و بازده کلی آن معادل 0.582% تحت شرایط استاندارد مشاهده شد.



شکل ۳. طیف جذبی UV-Vis محلول رنگدانه استخراجی از پوست سبز گردو (b)، و محلول رنگدانه جذب شده بر روی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (a).

طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

برای شناسایی گروه های عاملی ساختار کلروفیل موجود در رنگدانه پوست سبز گردو، از طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه استفاده شد (شکل ۴). با توجه به این شکل پیک کوچک در محدوده 1600 نشان از وجود گروه های کربوکسیل است (Pavia *et al.*, 2008). که از طریق پیوندهای دوگانه به ماکروکیلیک پروفرین متصل شده اند. این رنگدانه باید از طریق گروه عاملی کربوکسیلیک با دی اکسید تیتانیوم پیوند قوی ایجاد کنند، تا تزریق الکترون به باند رسانش دی اکسید تیتانیوم به خوبی انجام گیرد. همچنین از آبشویی که ناشی از تماس با الکترولیت است جلوگیری شود (Giuseppe *et al.*, 2014).

بازده تبدیل فوتون به جریان^۱ (IPCE) تکنیکی قدرتمند برای شناسایی میزان فوتون هایی است که به سطح سلول برخورد می کنند و تبدیل به جریان الکتریکی خواهند شد. طیف IPCE سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه پوست سبز گردو در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین مقدار IPCE، 12% است که در 380 نانومتر رخ می دهد. اگر به طیف IPCE و طیف جذبی UV-Vis رنگدانه دقت شود، ملاحظه می شود که "تغییر به قرمز" در طیف IPCE در مقایسه با طیف UV-Vis رخ نداده است. این موضوع را می توان اینگونه تحلیل کرد که ساختار مولکولی رنگدانه کلروفیل پوست سبز گردو حاوی زنجیره های طولانی آلکن است که این خود یک مانع فضایی قوی ایجاد می کنند که سبب جلوگیری از قرارگیری منظم و صحیح مولکول های کلروفیل بر روی سطح نانوذرات TiO_2 خواهد شد (Chang *et al.*, 2013). همین موضوع سبب می شود تا فوتون های کمتری به جریان الکتریکی در سلول خورشیدی حساس شده به کلروفیل تبدیل شود.

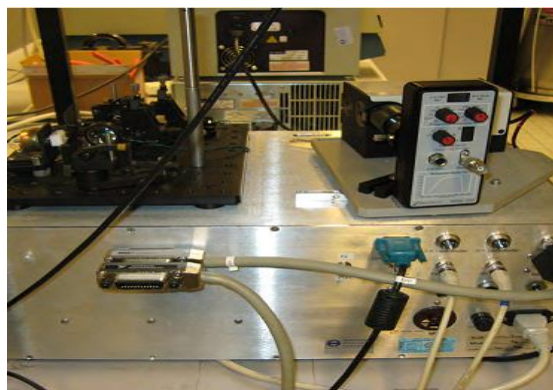
تحقیقات بعدی باید به سمت مهندسی ساختار این رنگدانه‌ها برود. افزودن گروه‌های عاملی مناسب مانند کربوکسیل، پیوند با نانوذرات نیمه‌رسانا را تسهیل می‌کند (Giuseppe *et al.*, 2015) و بازده سلول را تا حد بسیار زیادی بالا می‌برد. همچنین قرارگیری در محیط‌های واقعی موجب افت بازده و کاهش عمر DSSC ها خواهد شد. دلیل این موضوع خشک شدن الکترولیت مایع سلول است. عمر این سلول‌ها تقریباً کمتر از یک سال است درحالی‌که عمر سلول‌های خورشیدی نسل اول به بیش از ۲۵ سال می‌رسد (Jung and Lee, 2013). تلاش برای رفع این مشکل، منجر به معرفی الکترولیت‌های جامدی شد که در شرایط واقعی دچار افت نمی‌شوند (کالوگرو، ۲۰۱۵). اما علیرغم این مشکلات، این سلول‌ها به دلیل قیمت پایین، روش استخراج و پالایش ساده، تولید توان الکتریکی در شرایط نور کم و سازگاری با محیط زیست و سمی نبودن بخش زیادی از تحقیقات مربوط به سلول‌های فتوولتاییکی در دنیا را به خود اختصاص داده‌اند.

نتیجه گیری

در این تحقیق برای اولین بار رنگدانه پوست سبز گردو که جزو ضایعات کشاورزی محسوب می‌شود، بعنوان حساس کننده در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه استفاده شد. استخراج با اموج فراصوت و خالص سازی رنگدانه به روش صابونی سازی داغ انجام گرفت. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی سلول خورشیدی ساخته شده نشان داد که این سلول در مقایسه با کار سایر محققان دارای بازده خوب، ضریب پرتابی و ولتاژ مدار باز، بالایی است. این نتایج خوب را می‌توان به ساختار رنگدانه پوست سبز گردو، روش استخراج و روش پالایش خوب رنگدانه و همچنین ساخت اصولی سلول خورشیدی ربط داد. استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در ساخت سلول‌های خورشیدی نسل سوم در کنار سازگاری با محیط زیست، فراوانی و روش استخراج ساده، سبب می‌شود تا قیمت تمام شده این سلول‌ها در مقایسه با سلول‌های نسل اول بسیار کاهش یابد و این مسئله استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک انرژی جایگزین را بیش از پیش تسهیل می‌کند.

سپاسگزاری

از دانشگاه فردوسی مشهد و ستاد توسعه ویژه فناوری نانو که حمایت‌های مالی از این طرح را بر عهده گرفتند کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.



شکل ۷. نمایی از ست آپ دستگاه شبیه ساز خورشیدی

مقدار ۰/۷۱ برای ضریب پرتابی، ۰/۵۲۸ % برای بازده کلی سلول و ۰/۷۹۲ V برای ولتاژ، مقادیر بسیار خوبی است و در مقایسه با کار بسیاری از پژوهشگران که رنگدانه کلروفیل را بعنوان حساس کننده در DSSC ها استفاده کرده‌اند، مقادیر بسیار قابل توجهی را نشان می‌دهد (El-Agez *et al.*, 2012; Giuseppe *et al.*, 2014; Hao *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2002). در جدول ۲ برخی از نتایج سایر محققان با نتایج تحقیق حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است (Calogero *et al.*, 2015).

جدول ۲. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با کار سایر محققان

تحقیقات انجام گرفته	بازده (%)	ولتاژ مدار باز (mV)	ضریب پرتابی (%)
چانگ و همکاران (۲۰۱۱)	۰/۲۵	۰/۵۵	گزارش نشده است
کالوگرو و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۱۷۸	۰/۳۶	۰/۶۹
هائو و همکاران (۲۰۰۶)	۰/۱۲	۰/۴۴۱	۰/۵۸
چو و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۱۴۱	۰/۵۹۵	۰/۴۱
تحقیق حاضر	۰/۵۲۸	۰/۷۹۲	۰/۷۱

این موضوع را می‌توان ناشی از وجود گروه عاملی کربوکسیلیک در ساختار رنگدانه و همچنین به روش استخراج درست و مناسب و روش پالایش کامل این رنگدانه ربط داد، که سبب می‌شود تا مواد اضافی از رنگدانه جدا شده و در نتیجه امکان برقراری پیوند ساختار کلروفیل رنگدانه پوست سبز گردو با نانوذرات TiO_2 بخوبی انجام گیرد. البته از این نکته نباید غافل شد که بازده این نسل از سلول‌های خورشیدی که به سلول‌های نسل سوم معروفند در مقایسه با سلول‌های خورشیدی نسل اول یا سلول‌های خورشیدی سیلیکونی پایین است. این مسئله ناشی از ساختار رنگدانه‌های طبیعی است که به دلیل وجود برخی گروه‌های نامناسب در ساختارشان، امکان پیوند با نانوذرات تیانیوم دی اکسید کاهش می‌یابد. از این رو روند

REFERENCES

- Calogero, Giuseppe, Antonino Bartolotta, Gaetano Di Marco, Aldo Di Carlo and Francesco Bonaccorso (2015). Vegetable-based dye-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews* 44: 3244-3294. doi: 10.1039/C4CS00309H
- Chang, Ho, Mu-Jung Kao, Tien-Li Chen, Chih-Hao Chen, Kun-Ching Cho and Xuan-Rong Lai. (2013). Characterization of natural dye extracted from wormwood and purple cabbage for dye-sensitized solar cells. *International Journal of Photoenergy* 2013.
- Dasgupta, N., and A. Dasgupta, (2007). Semiconductor Devices, Modelling and Technology. In *Semiconductor Devices, Modelling and Technology*, Paper presented at the Prentic Hall of India. New Delhi.
- El-Agez, Taher M, Ahmed A El Tayyan, Amal Al-Kahlout, Sofyan A Taya and Monzir S Abdel-Latif, (2012). Dye-sensitized solar cells based on ZnO films and natural dyes. *International Journal of Materials and Chemistry*, 2, 105-110.
- Ellabban, O., H; Abu-Rub and F; Blaabjerg (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
- Giuseppe, Calogero,; Bartolotta; Antonino, Di Marco; Gaetano, Di Carlo; Aldo and Bonaccorso; Francesco, (2015). Vegetable-based dye-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews* 44, 3244-3294.
- Giuseppe, Calogero,; Ilaria; Citro, Gaetano; Di Marco, Simona; Armeli Minicante, Marina; Morabito and Giuseppa; Genovese, (2014). Brown seaweed pigment as a dye source for photoelectrochemical solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 117: 702-706. doi: [http:// dx.doi.org /10. 1016/ j.saa. 2013.09.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.019)
- Hancock, Mary and A. Boxworth, (1997). potential for colourants from plant sources in england & wales. in potential for colourants from plant sources in england & wales: arable crops & horticulture division.
- Hao, Sancun, Jihuai Wu, Yunfang Huang and Jianming Lin, (2006). Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell. *Solar Energy* 80: 209-214.
- Hemalatha, KV, SN Karthick, C Justin Raj, N-Y Hong, S-K Kim and H-J Kim, (2012). Performance of *Kerria japonica* and *Rosa chinensis* flower dyes as sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 96. 305-309.
- Henning, A., G; Günzburger, R, Jöhr, Y; Rosenwaks, B; Bozic-Weber, C. E., Housecroft and T; Glatzel (2013). Kelvin probe force microscopy of nanocrystalline TiO₂ photoelectrodes. *Beilstein journal of nanotechnology*, 4, 418-428.
- Hopkins. V. J. (2007). Introduction to plant physiology. University of Tehran Press. In Farsi.
- Hug, H., M; Bader, P; Mair and T; Glatzel, (2014). Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells. *Applied Energy* 115.
- Ito, Seigo, Takurou N Murakami, Pascal Comte, Paul Liska, Carole Grätzel, Mohammad K Nazeeruddin and Michael Grätzel 2008. Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%. *Thin solid films* 516: 4613-4619.
- Jin, En Mei, Kyung-Hee Park, Bo Jin, Je-Jung Yun and Hal-Bon Gu 2010. Photosensitization of nanoporous TiO₂ films with natural dye. *Physica Scripta* 2010: 014006.
- Jung, Hyun Suk and Jung-Kun Lee 2013. Dye Sensitized Solar Cells for Economically Viable Photovoltaic Systems. *J. Phys. Chem. Lett.* 4: 1682-1693.
- Kalyanasundaram, K; 2010. Dye-sensitized solar cells: EPFL press.
- Ludin, Norasikin A., A. M. Al-Alwani Mahmoud, Abu Bakar Mohamad, Abd Amir H. Kadhum, Kamaruzzaman Sopian and Nor Shazlinah Abdul Karim 2014. Review on the development of natural dye photosensitizer for dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 386-396. doi: [http:// dx.doi. org/ 10. 1016/j.rser.2013.12.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.001)
- Nazeeruddin, M. K.; E; Baranoff and M; Grätzel 2011. Dye-sensitized solar cells: a brief overview. *Solar Energy* 85, 1172-1178.
- Nishantha, MR, YPYP Yapa and VPS Perera 2 Sensitization of Photoelectrochemical Solar Cells with a Natural Dye Extracted from *Kopsia flavida* Fruit. In Sensitization of Photoelectrochemical Solar Cells with a Natural Dye Extracted from *Kopsia flavida* Fruit, Proceedings of the Technical Sessions, 54-58.
- Pavia, D;, G; Lampman, G; Kriz and J; Vyvyan, (2008). Introduction to spectroscopy: Cengage Learning.
- Reza, H; and M; Ahmadi 2012. Nano-structured cell with natural pigments. In Nano-structured cell with natural pigments, First National Conference on Nano-electronics Kermanshah. (In Farsi).
- Rowley, John G, Byron H Farnum, Shane Ardo and Gerald J Meyer 2010. Iodide chemistry in dye-sensitized solar cells: making and breaking I- I bonds for solar energy conversion. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 1: 3132-3140.
- Schertz, F. M; 1983. Isolation of chlorophyll, carotene, and xanthophyll by improved methods. *Industrial & Engineering Chemistry* 30: 1073-1075.
- Sinha, K;, P. D; Saha and S; Datta 2012. Extraction of natural dye from petals of Flame of forest (*Butea monosperma*) flower: Process optimization using response surface methodology (RSM). *Dyes and Pigments* 94: 212-216
- Soga, T; 2006. Nanostructured Materials for Solar

Energy Conversion. Fundamentals of Solar Cell.
Statistics. Fundamentals on (2014) Energy Efficiency
Indicators. In Energy Efficiency Indicators.
Fundamentals on Statistics
Wang, Xiao-Feng, Cong-Hong Zhan, Takashi Maoka,
Yuji Wada and Yasushi Koyama 2007.
Fabrication of dye-sensitized solar cells using
chlorophylls c 1 and c 2 and their oxidized forms
and from *Undaria pinnatifida* (Wakame).
Chemical physics letters. 447, 79-85
Yeh, N; and P; Yeh 2013. Organic solar cells: Their

developments and potentials. Renewable and
Sustainable Energy Reviews 21: 421-431.
Zhang, D, N Yamamoto, T Yoshida and H Minoura
2002. Natural dye sensitized solar cells.
transactions-materials research society of japan
27: 811-814.
Zhang, Dongshe, Suzanne M Lanier, Jonathan A
Downing, Jason L Avent, June Lum and Jeanne L
McHale 2008. Betalain pigments for dye-
sensitized solar cells. Journal of Photochemistry
and Photobiology A: Chemistry 195: 72-80.