

## Research Paper

# Synthesis and direct ink writing of silver ink for fabricating current collecting lines of dye sensitized solar cells

Sajjad Keshavarz<sup>1</sup>, Ali Mashreghi<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. graduated of Materials Science and Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

2. Associate Professor of Materials Science and Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

Received: 2023/05/14

Revised: 2023/07/19

Accepted: 2023/07/24

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31897.1996](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31897.1996)

### Keywords:

Solar cell, Conductive silver ink, Direct ink writing, Current collecting lines, Viscosity

### Abstract

**Introduction:** Conductive gridline is essential part of electronic devices. Direct ink writing is fast and simple method for gridline deposition. In this work, silver ink suitable for direct ink writing was synthesized. Thereafter, the effect of writing process parameters was investigated. Then, silver conductive lines were deposited on electrodes of the dye sensitized solar cell (DSSC) by direct ink writing and its role in increasing the efficiency of DSSC was investigated.

**Methods:** Silver ink was synthesized according to Lewis-Walker method. Silver acetate was dissolved in ammonium hydroxide and formic acid was added as reducing agent. The viscosity of ink was tuned by adding hydroxyethyl cellulose (HEC). Direct ink writing apparatus was built in our lab. Different ink writing process parameters were investigated. Photoanode and counter electrode of DSSC were fabricated on FTO substrates. Photoanode composed of N719 dye sensitized TiO<sub>2</sub> nanoparticles and counter electrode consisted of platinum thin film. The distance between electrodes was filled by electrolyte. Finally, silver lines were written on electrodes of DSSC to obtain conductive gridlines.

**Findings:** 2.3 wt% HEC gave the best result. It was found that nozzle-substrate distance has no influence on shape and electrical resistance. However, at higher distances printed lines became disconnected. Width and thickness of silver gridline increased with injection rate and value of 0.48 ml/min was optimum value. Sintering at 360 °C was proposed for following steps. By applying silver gridlines on DSSC, fill factor and power conversion efficiency ( $\eta$ ) increased significantly.  $\eta$  increased from 1.5% to 2.8%.

**Citation:** Sajjad Keshavarz, Ali Mashreghi, Synthesis and direct ink writing of silver ink for fabricating current collecting lines of dye sensitized solar cells, Quarterly Journal of New Materials. 2022; 13 (49): 41-56.

**\*Corresponding author:** Ali Mashreghi

**Address:** Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

**Tell:** +987137354520

**Email:** mashreghi@sutech.ac.ir

## Extended Abstract

### Introduction

Current collecting gridline is an essential part of electronic and optoelectronic devices. Over past several decades, different methods have been used for deposition of conductive gridlines such as, lithography, vacuum deposition, electrochemical deposition and screen printing methods. Recently, direct ink writing has been proposed as simple, fast and cost effective deposition method for fabricating conductive gridlines. There exist three different types of writable conductive inks; carbon-based inks, polymer-based inks and metal-based inks. Among them, metal-based inks, especially silver ink, are employed extensively in electronic and optoelectronic industries. In addition, writable inks with low temperature sintering are necessary for modern flexible electronics.

In 2012, Lewis and Walker invent a new method for synthesis of low temperature silver ink. This ink was composed of silver acetate dissolved in ammonium hydroxide with small amount of formic acid as reducing agent. However, Lewis-Walker ink is not suitable for direct ink writing, due to its low viscosity. One possible way to increase the viscosity of the ink is adding thickening agents. One of these thickening agents is hydroxyethyl cellulose (HEC).

In the present work, silver ink was synthesized according to Lewis-Walker method and its viscosity was tuned by adding HEC. The novelty and main purpose of this work is to optimize ink writing process parameters in order to fabricate high quality current collecting line of dye sensitized solar cell (DSSC). In the last section of work, DSSC was fabricated and for the first time the role of this type of silver lines in enhancing efficiency was evaluated.

### Materials and Methods

For the synthesis of silver ink, 1 g silver acetate was dissolved in 2.5 ml ammonium hydroxide and 0.2 ml formic acid was added drop wise. After 12 h, it was filtered and a clear ink was obtained. Then, the viscosity of ink was tuned by adding proper amount of HEC. The viscosity of ink was measured by Ostwald viscometer.

We fabricated ink writing apparatus. Different process parameters were investigated and optimized, e.g. substrate moving rate, ink injection rate, nozzle-substrate distance and sintering temperature. The width and thickness of silver lines were measured by caliper and micrometer, respectively. The resistance was measured by ohmmeter.

DSSC was fabricated by attaching photoanode and counter electrode together. The space between them was filled by electrolyte. Fluorine doped tin oxide (FTO) coated glass substrate was fabricated in our lab by spray pyrolysis method. For photoanode  $\text{TiO}_2$  nanoparticle paste was deposited on FTO by doctor blade technique and it was sintered at  $480^\circ\text{C}$  for 40 min. the obtained layer was dipped in ethanol based N719 dye solution for 24 h. For fabricating counter electrode, ethanol based  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  solution was spin coated on FTO at 1100 rpm and it was sintered at  $450^\circ\text{C}$  for 20 min.

Silver ink was deposited on both DSSC electrodes and sintered at  $360^\circ\text{C}$ . Photovoltaic parameters were extracted from current density-voltage ( $J$ - $V$ ) curves, measured under  $100 \text{ mW/cm}^2$  simulated sunlight.

### Findings and Discussion

For tuning viscosity of silver ink, different amounts of HEC were added, i.e. 0, 0.8, 1.6 and 2.3 wt%. These inks were named  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$ , respectively. HEC concentrations of 0, 0.8, 1.6 and 2.3 wt% led to inks with

viscosities of 11, 1820, 26753 and 90127 mPa.S, respectively. Due to the very low viscosity of  $S_0$  and  $S_1$  inks, the deposited line lost its shape and the ink was spread extensively.  $S_2$  ink slightly suffered from this problem. But  $S_3$  ink gave the best deposited line with smooth edges. The width of deposited lines from  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  inks were measured as  $3.74(\pm 1.12)$  mm,  $1.96(\pm 0.32)$  mm,  $1.88(\pm 0.30)$  mm and  $1.51(\pm 0.08)$  mm, respectively. The lowest standard deviation in width for  $S_3$  ink, reveals the smoothness of its edges. Similarly, the thickness of silver layer was measured at 3 different points. The obtained thicknesses for inks  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  were  $6(\pm 2)$   $\mu\text{m}$ ,  $8(\pm 3)$   $\mu\text{m}$ ,  $9(\pm 2)$   $\mu\text{m}$  and  $11(\pm 1)$   $\mu\text{m}$ , respectively. The highest thickness obtained from  $S_3$  ink was due to its lowest spreading on substrate. Also, the electrical resistances were measured  $7(\pm 3) \times 10^6$   $\Omega$ ,  $3.16(\pm 1.65)$   $\Omega$ ,  $1.40(\pm 0.30)$   $\Omega$  and  $0.35(\pm 0.05)$   $\Omega$  for  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$ , respectively.

Then, writing process parameters were studied. It was observed that nozzle-substrate distance has no significant effect, but above a critical value the deposited line becomes discontinuous. Moreover, investigating the effect of injection rate (0.12, 0.3 and 0.48 ml/min) showed that this critical distance increases with injection rate. Also it was observed that width and thickness of silver layer increase with injection rate, but electrical resistance decreased. Injection rate of 0.3 ml/min gave the minimum standard deviation from mean of width and electrical resistance. Finally, the effect of sintering temperature on electrical resistance of deposited silver layer was investigated.  $360^\circ\text{C}$  was found as minimum sintering temperature which gave electrical resistance near zero.

Finally, the role of silver line in enhancing the performance of DSSC was investigated. By applying silver gridlines on DSSC, fill factor and power conversion efficiency ( $\eta$ )

increased significantly. By applying silver gridline,  $\eta$  increased from 1.5% to 2.8%. This increase in efficiency was due to the decrease in series resistance of DSSC, which was obtained from electrochemical impedance spectra. By applying silver gridline, series resistance decreased from 44 to 20  $\Omega$ .

## Conclusion

It was found that adding 2.3 wt% HEC to silver ink gave the best result and the gridlines written by this ink had the smooth edge and uniform thickness. Ink writing process parameter were studied and optimized. Nozzle-substrate distance had no significant effect, but above a critical value, the deposited ink became discontinuous. It was observe that this critical distance depends on injection rate. This critical value for injection rates of 0.12, 0.3 and 0.48 ml/min was 0.5, 1 and 1.5 mm, respectively. Different sintering temperatures were investigated. The minimum temperature, which gave near zero electrical resistance, was  $360^\circ\text{C}$ . The role of fabricated silver gridline in enhancing efficiency of DSSC was studied. It was observed that using silver gridline enhanced the efficiency of DSSC from 1.5% to 2.8 %, which was due to decrease of series resistance from 44 to 22  $\Omega$ .

## Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

## Funding

This research was financially supported by Iran National Science Foundation (INSF) and Shiraz University of Technology.

## Authors' contributions

Both authors had equal contribution.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## سنتز جوهر نقره و چاپ مستقیم آن به عنوان جمع کننده جریان در سلول های خورشیدی حساس شده با رنگینه

سجاد کشاورز<sup>۱</sup>، علی مشرفی<sup>۲\*</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** چاپ جوهر رسانا یکی از روشهای ایجاد خطوط رسانای نقره در ادوات الکترونیکی است. در این پژوهش، جوهر رسانای نقره با گرانبوی مناسب سنتز شد. سپس جوهر سنتز شده به روش چاپ مستقیم جوهر روی الکترودهای سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه اعمال و نقش آن در افزایش بازده سلول بررسی گردید.

**روش:** جوهر نقره به روش لویس-واکر سنتز شد. ابتدا استات نقره در آمونیوم هیدروکسید حل و سپس فرمیک اسید به عنوان عامل احیا کننده به صورت قطره قطره به آن اضافه شد. برای افزایش گرانبوی جوهر، هیدروکسی اتیل سلولوز به آن افزوده شد. دستگاه چاپ جوهر در آزمایشگاه ساخته و پارامترهای مختلف فرآیند چاپ مستقیم جوهر مورد بررسی قرار گرفت. سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه از اتصال الکتروده فوتوآنود و الکتروده مقابل و تزریق الکترولیت به فضای بین آن دو ساخته شد. فوتوآنود از لایه متخلخل حساس شده با رنگینه N719 روی FTO و الکتروده مقابل از لایه پلاتین روی FTO تشکیل شده است. در آخر خطوط رسانای نقره روی دو الکتروده اعمال شد و پارامترهای فوتوولتاییک آن تحت نور خورشید شبیه سازی شده با شدت ۱۰۰ وات بر سانتیمتر مربع اندازه گیری شد.

**یافته ها:** از بین غلظت های مختلف هیدروکسی اتیل سلولوز، غلظت جرمی ۲/۳٪ بهترین نتیجه را حاصل کرد. فاصله بین نوک نازل از زیرلایه، کمتر از یک مقدار بحرانی، تأثیری بر خط نقره اعمال شده نداشت اما بیشتر از آن خطوط حاصل ناپیوسته شد. با افزایش نرخ تزریق جوهر، این فاصله بحرانی افزایش یافت. افزایش نرخ تزریق جوهر منجر به افزایش ضخامت و عرض لایه اعمال شده گردید. دمای ۳۶۰ درجه سانتیگراد به عنوان کمترین دمای تفجوشی که منجر به مقاومت الکتریکی نزدیک به صفر می شود اندازه گیری شد. مشاهدات نشان داد که اعمال خطوط نقره ساخته شده در این پژوهش بر سلول های خورشیدی حساس شده با رنگینه سبب افزایش بازده آنها از ۱/۵٪ به ۲/۸٪ می شود.

**نتیجه گیری:** جوهر نقره با موفقیت سنتز شد و پارامترهای بهینه فرآیند اعمال آن بر زیرلایه بدست آمد. از جوهر سنتز شده برای ساخت خطوط رسانای سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه استفاده شد و افزایش بازده مشاهده گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31897.1996](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31897.1996)

## واژه‌های کلیدی:

سلول خورشیدی، جوهر رسانای نقره، چاپ مستقیم جوهر، خطوط جمع کننده جریان، گرانبوی.

\* نویسنده مسئول: علی مشرفی

نشانی: دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

تلفن: ۰۷۱۳۳۳۵۴۵۲۰

پست الکترونیکی: mashreghi@sutech.ac.ir

## مقدمه

یکی از مهمترین اجزای تشکیل دهنده ادوات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی خطوط رسانا است [۱]. از گذشته تا کنون با روش های مختلفی خطوط رسانا را ایجاد کرده اند که تمامی روش های استفاده شده مشکلاتی به همراه داشته اند. از جمله این روش ها می توان لیتوگرافی تصویری [۲ و ۳]، روش های لایه نشانی در خلأ [۴ و ۵]، رسوب گذاری الکتروشیمیایی [۶ و ۷] و چاپ توری [۸ و ۹] را نام برد. به طور مثال، روش چاپ توری که روشی غالب برای ایجاد الکترودهای رسلانا در بردهای الکترونیکی، صفحه های نمایش و دستگاه های فوتولتائیک بوده روشی هزینه بر و با تلفات بسیار است. در این روش، استفاده از ماسک های مخصوص و قالب های شبکه مانند امری ضروری است که در نتیجه روند ساخت را پیچیده کرده و موجب افزایش هزینه نهایی و مدت زمان ساخت می گردد. علاوه بر این، پس از هر بار استفاده و برای ایجاد ساختارهای با شکل جدید، می بایست ماسک های جدیدی ساخته شود. نه تنها در روش چاپ توری بلکه در دیگر روش های توسعه یافته لایه نشانی نیز همچون انواع روش های لایه نشانی در خلأ و یا روش های الکتروشیمیایی نیز هزینه بر بودن در مقیاس های صنعتی و کند بودن روند انجام عملیات به عنوان ایرادهای بزرگ وجود داشته و دارد. به همین جهت تلاش های اخیر برای کم کردن هزینه ها و افزایش سرعت فعالیت صنایع تولیدی، منجر به کشف و ابداع تکنیک های جدیدی همچون مجموعه روش های چاپ مستقیم جوهر<sup>۵</sup> شده است [۱۰]. در فناوری چاپ مستقیم که به عنوان چاپ دیجیتال<sup>۶</sup> نیز شناخته می شود، انواع روش های مختلف همچون جوهر افشانی، لیزر، فشار مکانیکی و دیگر فرآیندها استفاده می شود تا در نتیجه آن، انتقال مواد و اعمال آن بر روی انواع زیرلایه ها و با جزئیات در حد چند نانومتر تا چند میلی متر و با حداکثر سرعت و کمترین تلفات انجام پذیرد [۱۱].

یکی از انواع روش های فناوری چاپ مستقیم جوهر، چاپ مستقیم با استفاده از میکروپلم است که برای ساخت مدارات مجتمع الکترونیکی به کار گرفته می شود. اولین مطالعات و فعالیت های اصلی بر روی چاپ مستقیم با استفاده از میکروپلم در سال ۱۹۹۷ میلادی، توسط یک محقق به نام دایموس<sup>۷</sup> انجام گرفت که در پی آن کار و مطالعات بر روی این روش توسط لوئیس<sup>۸</sup> ادامه و توسعه یافت [۱۲]. لوئیس جوهر رسلانای مورد استفاده در این روش را به شیوه ای جدید و با مزایای بسیار ابداع کرد. جوهرهای رسلانای یکی از مؤلفه های حاضر در ساخت اکثر تولیدات الکترونیکی به منظور ایجاد الکترودهای رسلانا هستند. تاکنون سه دسته جوهر رسلانا سنتز شده است که عبارتند از: جوهر رسلانای بر پایه کربن، جوهر رسلانای پلیمری و جوهر رسلانای

فلزی، که در میان این سه دسته، جوهر رسلانای فلزی و آن هم از نوع جوهر نقره، به طور وسیع تری در تولیدات الکترونیکی استفاده شده است. زیرا که رسلانای الکتریکی بالاتری نسبت به سایر جوهرها دارد [۱۰ و ۱۳].

بسیاری از جوهرهای نقره توسعه داده شده تا این زمان اشکالات متعددی داشته اند که از آن جمله می توان به روش سنتز پیچیده آن اشاره کرد. همچنین نیاز به دمای تف جوشی بالا از دیگر مشکلات جوهرهای نقره ابداع شده است، زیرا که در عصر حاضر صنایع الکترونیکی به سمت تولید مدارات الکتریکی بر روی انواع زیرلایه های انعطاف پذیر همچون کاغذ، پارچه و مواد پلاستیکی پیش می رود که این مواد تحمل دماهای بالا را ندارند [۱۰، ۱۴].

در سال ۲۰۱۲ میلادی لوئیس و واکر<sup>۹</sup> روشی جدید برای سنتز جوهر رسلانای نقره را ابداع کردند که منجر به حل بسیاری از مشکلات پیشین شد [۱۴ و ۱۵]. البته جوهر رسلانای جدید دارای گرانروی پایینی است و در نتیجه امکان استفاده از آن را در روش چاپ مستقیم جوهر ناممکن می کند که با روشهایی باید گرانروی جوهر مذکور را افزایش داد، که این امر یکی از اهداف مقاله حاضر است.

یکی از حوزه هایی که چاپ خطوط رسلانا در آن حائز اهمیت است، سلول های خورشیدی رنگینه ای است که به عنوان نسل سوم سلول خورشیدی به حساب می آید [۱۶].

سنتز این نوع جوهر نقره جدید نیست و در مقالات دیگر آمده است، اما تاکنون تاثیر پارامترهای دستگاهی اعمال این خمیر بر ساخت خطوط جمع کننده جریان مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این مقاله برای اولین بار بهینه سازی خمیر (از منظر گرانروی) و بهینه سازی پارامترهای دستگاهی اعمال آن بر زیر لایه، مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این تاکنون ساخت خطوط رسلانای نقره در سلول های خورشیدی حساس شده با رنگینه با استفاده از این نوع جوهر گزارش نشده است و در این مقاله برای اولین بار صورت می گیرد. لذا در مقاله حاضر، هدف سنتز جوهر نقره مناسب برای چاپ مستقیم و اعمال خطوط رسلانای نقره با روش چاپ مستقیم جوهر است. پس از تهیه جوهر نقره، عوامل دستگاهی مؤثر بر اعمال خطوط رسلانا و پس از آن اثر دما بر مقاومت الکتریکی بررسی شد. در پایان نیز به بررسی کارایی جوهر سنتز شده در ساخت خطوط رسلانای نقره جمع کننده جریان در سلول های خورشیدی رنگینه ای پرداخته شد.

## مواد و روش ها

در این پژوهش ابتدا جوهر رسلانای نقره با گرانروی مناسب سنتز و پس از آن دستگاه چاپ مستقیم جوهر ساخته شد. فلوجارت روش ساخت در شکل ۱ آمده است. در ادامه به شرح جزئیات پرداخته می شود.

6-Digital printing

7-Dimos

8-Lewis

9-Walker

1-Photolithography

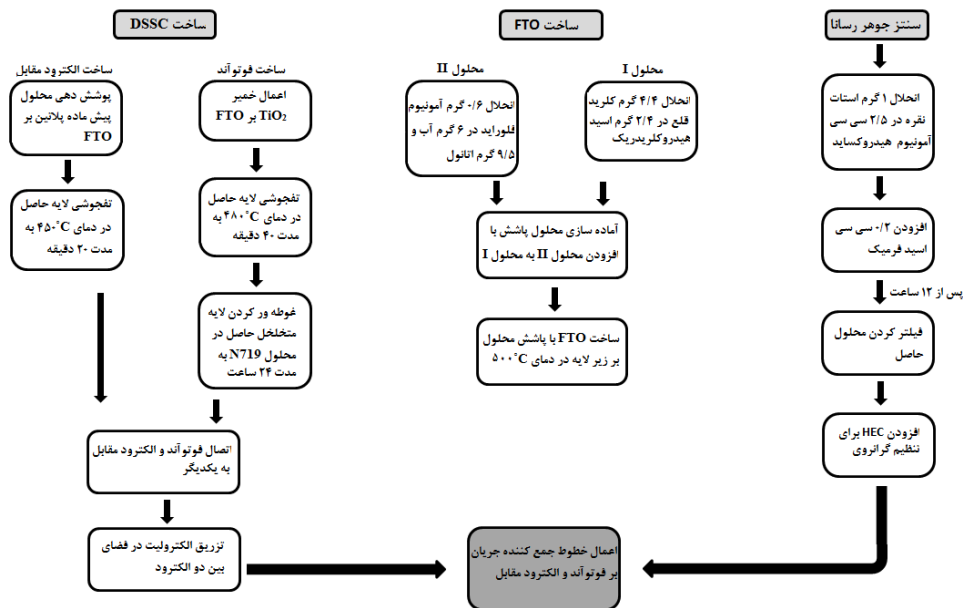
2-Vacuum Deposition

3-Electrochemical Deposition

4-Screen printing

5-Direct ink writing





شکل ۱- فلوجارت روش ساخت استفاده شده در این تحقیق

۱-۲- سنتز جوهر رسانای نقره: جوهر نقره رسانا با استفاده از روش جدید لویس-واکر [۱۴ و ۱۵] ساخته شد. مواد اصلی این جوهر عبارت است از یک نمک نقره که به عنوان منبع فلز نقره عمل می کند و یک عامل کاهنده که وظیفه تبدیل نمک نقره به فلز نقره را دارد. اما با ترکیب این دو ماده در همان لحظه اول، واکنش صورت گرفته و فلز نقره حاصل می شود. پس به منظور ایجاد تاخیر در انجام این واکنش، از یک ماده دیگر به عنوان عامل کامپلکس زا<sup>۱</sup> استفاده می شود، که با ایجاد ترکیب کامپلکس مانع از وقوع واکنش مذکور شده و تنها هنگام حرارت دهی جوهر، از ترکیب اصلی خارج شده و در نتیجه وقوع واکنش و تشکیل فلز نقره را امکان پذیر می کند. در میان ترکیبات مختلف نقره، از استات نقره به عنوان منبع نقره استفاده شد. حلال مورد استفاده آمونیوم هیدروکساید بود که علاوه بر نقش حلال، نقش کامپلکس کننده را هم به عهده دارد. عامل کاهنده نیز فرمیک اسید انتخاب شد که نقطه جوش پایینی داشته و مواد جانبی فرار تولید می نماید که به راحتی از سیستم خارج می شود. برای سنتز خمیر نقره، ابتدا مقدار ۱ گرم استات نقره در ۲/۵ میلی لیتر آمونیوم هیدروکساید حل شد. سپس به محلول حاصل و در حین هم خوردن، مقدار ۰/۲ میلی لیتر اسید فرمیک به صورت قطره قطره اضافه شد. در اثر این کار، به طور ناخواسته و نامطلوب، برخی از یون های نقره تحت عمل کاهش، به ذرات نقره تبدیل می گردند و به صورت معلق در محلول باقی می ماند که بایستی با فیلتر کردن حذف شوند. محلول بدست آمده ۱۲

۲-۲- ساخت دستگاه چاپ مستقیم جوهر: دستگاه ساخته شده برای اعمال خطوط نقره به روش چاپ مستقیم جوهر دارای سه جزء چهارچوب دستگاه، سیستم تزریق جوهر و سیستم حرکت دهنده زیرلایه می باشد. شکل ۲ تصویری از مجموعه دستگاه مذکور را که در آزمایشگاه ساخته شده است نشان می دهد. جوهر درون یک سرنگ ریخته می شود و زیر دستگاه پوشش دهی غوطه وری<sup>۲</sup> قرار می گیرد. نرخ تزریق جوهر از سرعت حرکت بازوی این دستگاه بدست می آید. زیر لایه روی صفحه شیشه ای زیر نازل سرنگ قرار گرفته و با حرکت خطی سیستم حرکت دهنده زیرلایه، با سرعت مشخص حرکت می کند. این سرعت مشخص کننده سرعت خطی چاپ جوهر نقره است.

۲-۳- ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه: به طور کلی مراحل ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه عبارت است از ساخت فوتوآند، ساخت الکترود مقابل، مونتاژ دو الکترود و تزریق الکترولیت. در این پژوهش زیر لایه FTO به روش پیرولیز

2- Dip Coater

1- Complexing agent

دلیل عدم استفاده از جوهر های با نسبت های جرمی بیشتر هیدروکسی اتیل سلولوز، گرانروی بسیار زیاد جوهر حاصل و عدم امکان تزریق آن با روش چاپ مستقیم جوهر بود. مقادیر گرانروی جوهر های S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۱۱، ۱۸۲۰، ۲۶۷۵۳ و ۹۰۱۲۷ میلی پاسکال ثانیه اندازه گیری شد.

پس از آن، رفتار این جوهر ها در فرآیند چاپ مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی، سرعت حرکت زیرلایه معادل ۱/۵ سانتی متر بر دقیقه، نرخ تزریق معادل ۰/۳ میلی لیتر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه به اندازه ۰/۱ میلی متر بود. خطوط نقره اعمال شده با استفاده از هر چهار نوع جوهر S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> در ابتدا بی رنگ بود، اما پس از دقایقی ماندن در محیط به رنگ قهوه ای تیره در آمد (شکل ۳). اما برخلاف مشابهت رنگ نمونه ها، شکل هندسی نمونه های مربوط به جوهرها تفاوت زیادی نشان داد. مشاهدات نشان داد که خطوط نقره اعمال شده با استفاده از جوهر S<sub>0</sub> و S<sub>1</sub> به دلیل گرانروی پایین، در همان ابتدای قرار گرفتن بر روی زیرلایه پخش شده و شکل غیر یکنواخت به خود گرفت. همچنین این غیر یکنواختی در مورد نمونه های اعمال شده با جوهر S<sub>2</sub> نیز تا حدودی مشاهده شد و خطوط نقره اعمالی، دارای کناره های صاف نبود و حالت موجی داشت. در مورد نمونه اعمال شده با جوهر S<sub>3</sub> مشاهده شد که خطوط اعمالی شکل منظم تری به خود گرفته و با توجه به کناره های نسبتاً صاف، به فرم خط در آمده و عرض در تمام نقاط تقریباً برابر است زیرا که جوهر مذکور گرانروی بالایی داشته و در نتیجه پس از اعمال توانسته انسجام شکلی خود را حفظ کند. این نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. عرض خطوط نقره اعمال شده در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای خط، با استفاده از کولیس اندازه گیری شد. نتایج حاصل برای خطوط حاصل از جوهرهای S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب برابر با (۳/۷۴ ± ۱/۱۲)، (۱/۹۶ ± ۰/۳۰)، (۱/۸۸ ± ۰/۰۸) و (۱/۵۱ ± ۰/۰۸) میلیمتر بدست آمد. همانطور که مشاهده می شود مقدار انحراف از مقدار میانگین برای خطوط حاصل از جوهر S<sub>3</sub> از بقیه جوهر ها کمتر است، که نشان دهنده تکرارپذیری خوب این جوهر در ایجاد خطوط با شکل منظم است. بطور مشابه ضخامت خطوط نقره در سه نقطه ابتدا، وسط و انتها، در طول ۲ سانتی متر از خطوط نقره اندازه گیری شد. نتایج حاصل برای خطوط حاصل از جوهرهای S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب برابر با (۲ ± ۰/۶)، (۳ ± ۰/۸)، (۲ ± ۰/۹) و (۱ ± ۰/۱) میکرومتر بدست آمد. شکل ۵ مقادیر عرض و ضخامت خطوط نقره حاصل را بر حسب درصد نسبت جرمی HEC نشان می دهد.

پاششی<sup>۱</sup> بر روی لام میکروسکوپی ساخته شد. برای ساخت محلول پاشش، دو محلول اولیه آماده شد و در آخر محلول دوم به محلول اول اضافه شد. برای ساخت محلول اول ۴/۴ گرم کلرید قلع(II) دو آبه درون ۲/۴ گرم هیدروکلریک اسید در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد حل شد. برای ساخت محلول دوم، مقدار ۰/۶ گرم آمونیوم فلوئورید درون ۶ گرم آب مقطر و ۹/۴۸ گرم اتانول حل شد. محلول آماده شده تحت فشار گاز نیتروژن و بوسیله قلم پیستوله بر روی زیرلایه با دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به تعداد دفعات ۳۳ بار و هر مرتبه به مدت ۳ ثانیه و با فاصله زمانی ۱ دقیقه پاشش شد و در نتیجه لایه شفاف و رسانای FTO حاصل شد. برای ایجاد لایه متخلخل TiO<sub>2</sub>، خمیر TiO<sub>2</sub> به روش دکتر بلید بر روی FTO اعمال شد. پس از آن لایه حاصل در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۰ دقیقه تف جوشی شد. برای حساس کردن فوتوآند به رنگینه، لایه متخلخل TiO<sub>2</sub> حاصل به مدت ۲۴ ساعت در محلول پایه اتانولی N719 غوطه ور شد. برای ساخت الکتروود مقابل، روی یک شیشه FTO محلول H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>.6H<sub>2</sub>O با سرعت ۱۱۰۰ دور در دقیقه پوشش دهی چرخشی شد و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه تف جوشی گردید. در آخر دو الکتروود به هم متصل شد و در فضای خالی بین آن دو، محلول الکترولیت تزریق شد. برای ساخت سلول خورشیدی دارای خط نقره، پیش از ساخت الکتروود فوتوآند و الکتروود مقابل، جوهر بهینه شده روی FTO اعمال و تفجوشی شد.

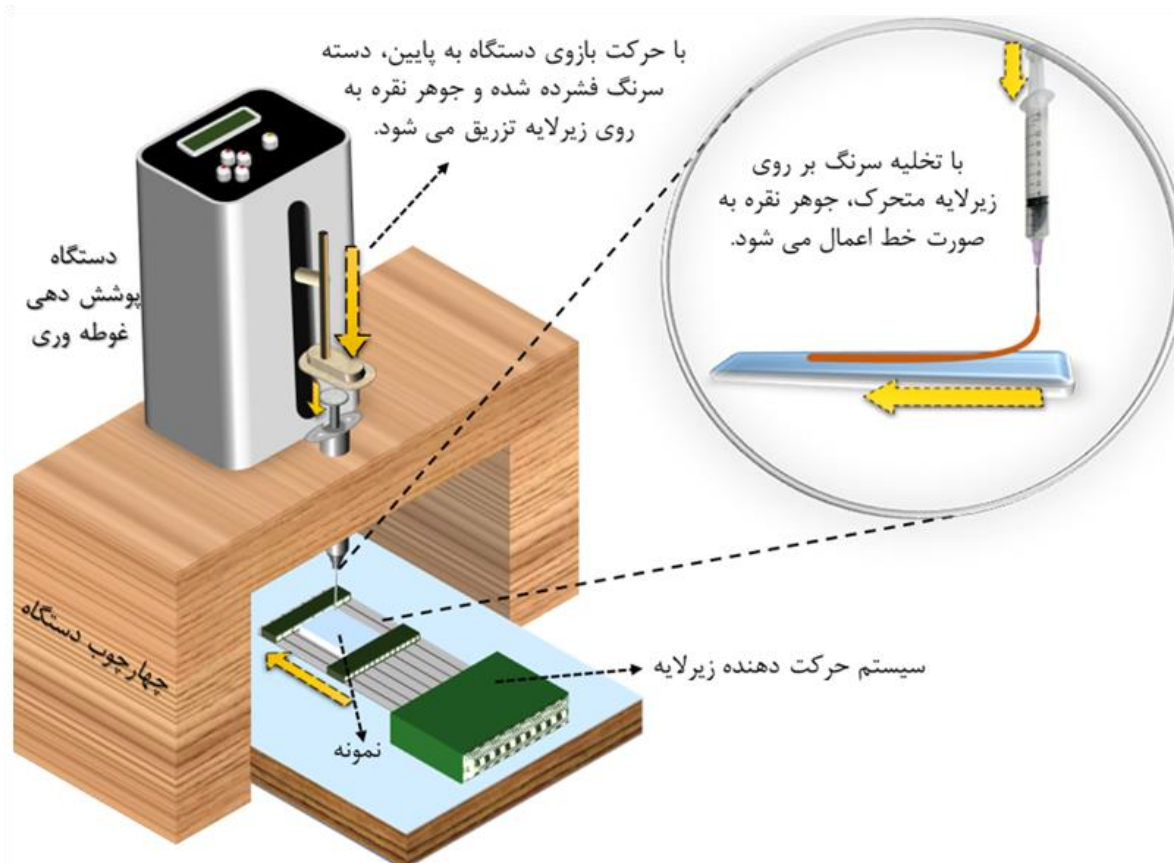
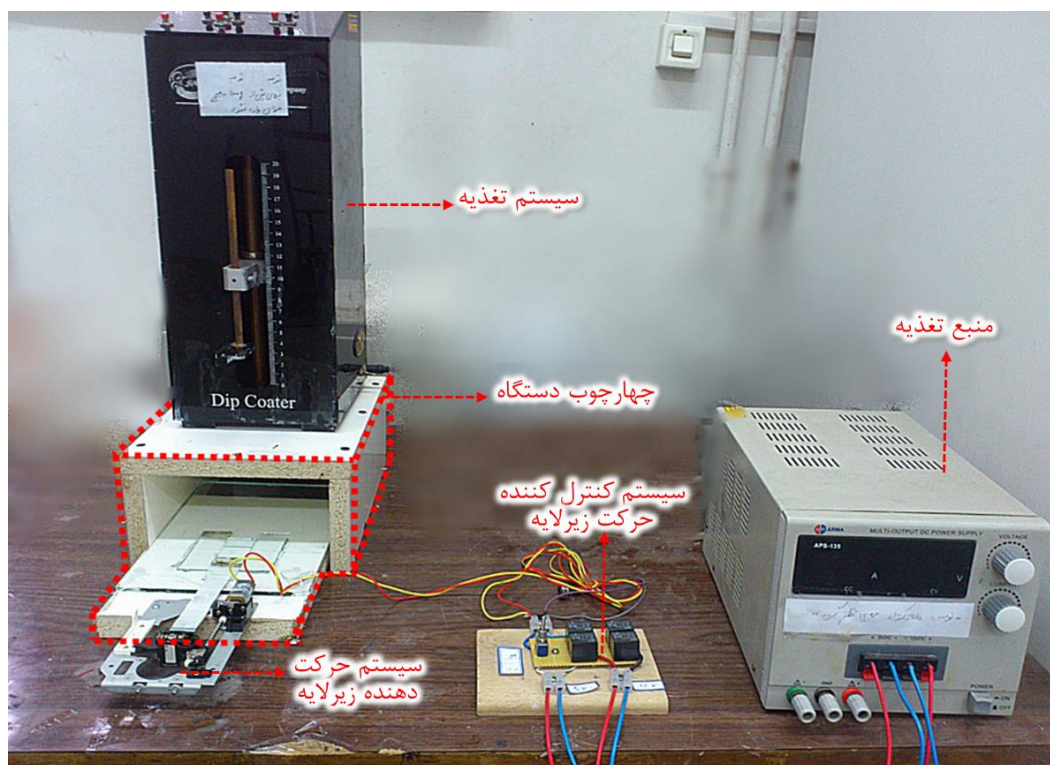
#### ۴-۲- روش های اندازه گیری:

گرانروی جوهر با ویسکومتر اوستوالد<sup>۲</sup> اندازه گیری شد. عرض و ضخامت نمونه ها به ترتیب با استفاده از کولیس و ریزسنج اندازه گیری شد. مقاومت الکتریکی نمونه ها با استفاد از اهم متر اندازه گیری شده. بدین منظور دو پروب دستگاه در فاصله ۲ سانتیمتر از یکدیگر قرار داده شد. برای رسم منحنی جریان-ولتاژ سلول از دستگاه پتانشیواستات تحت نور شبیه سازی شده خورشید با شدت ۱۰۰ میلی-وات بر سانتیمتر مربع استفاده شد. منحنی امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانشیواستات Ivium/Vertex رسم گردید.

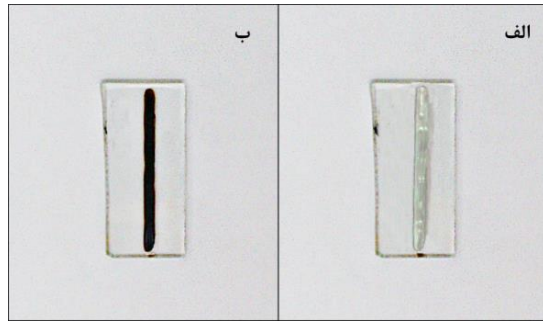
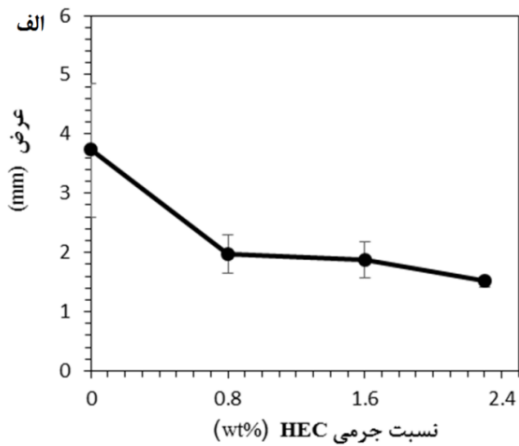
#### نتایج

برای بررسی تاثیر میزان هیدروکسی اتیل سلولوز (HEC) بر گرانروی جوهر حاصل، چهار جوهر با نام های S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب با غلظت های HEC برابر با ۰، ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۳ درصد جرمی ساخته شد.

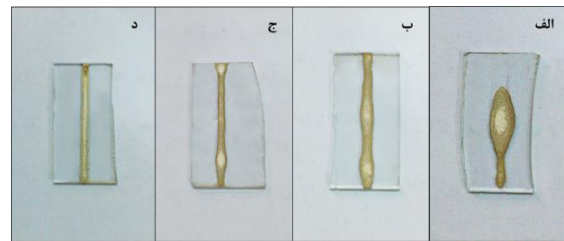
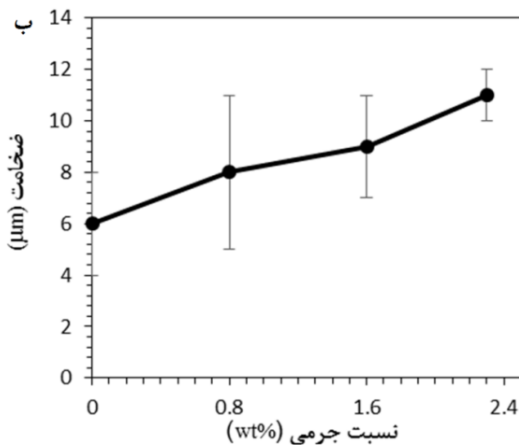




شکل ۲- مجموعه ساخته شده برای اعمال خطوط رسانای نقره

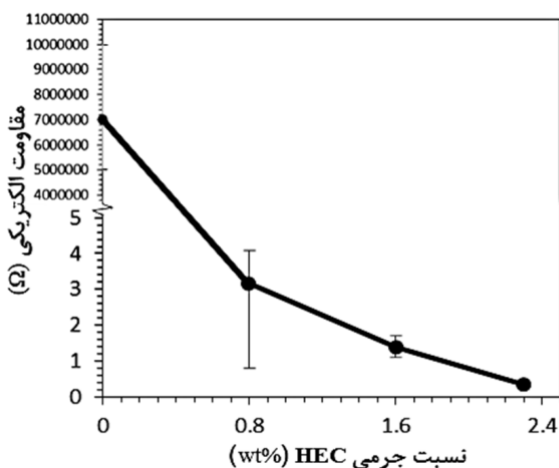


شکل ۳- تصویر خط نقره اعمال شده الف- بلافاصله پس از اعمال ب- پس از دقایقی ماندن در محیط



شکل ۴- تصاویر نمونه های اعمال شده با جوهرهای الف- S<sub>0</sub>، ب- S<sub>1</sub>، ج- S<sub>2</sub>، د- S<sub>3</sub>

شکل ۵- تغییرات الف) عرض و ب) ضخامت خطوط نقره با نسبت جرمی HEC. نرخ تزریق ۰/۳ میلی لیتر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه ۰/۱ میلی متر



شکل ۶- تغییرات مقاومت الکتریکی خطوط نقره با نسبت جرمی HEC. نرخ تزریق ۰/۳ میلی لیتر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه ۰/۱ میلی متر

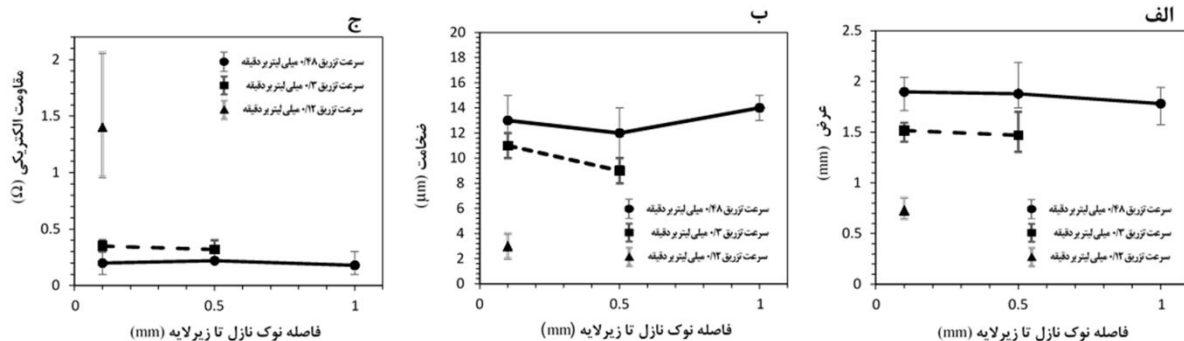
شکل ۶ مقدار مقاومت الکتریکی خطوط نقره حاصل از جوهرهای با مقادیر مختلف HEC را نشان می دهد. برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی، پنج نمونه با هر جوهر اعمال گردید و پس از تفجوشی در دمای ۳۶۰ درجه سانتیگراد، مقاومت الکتریکی نمونه ها در طول ۲ سانتی متر با استفاده از مولتی متر اندازه گیری شد و میانگین آن گزارش گردید. نتایج حاصل برای خطوط حاصل از جوهرهای S<sub>0</sub>، S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب برابر با  $1.0^6 \times (\pm 3)$ ،  $3.1/16 (\pm 1/65)$ ،  $1/40 (\pm 30)$  و  $0.35 (\pm 0.05)$  اهم بدست آمد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش مقدار HEC در جوهر، مقاومت الکتریکی نمونه ها کاهش می یابد که دلیل آن اتصال بهتر میان ذرات نقره در حین تفجوشی به دلیل حضور HEC بیشتر است. همچنین مشاهده می شود که مقاومت الکتریکی خطوط حاصل از جوهر S<sub>3</sub> کمترین انحراف از مقدار میانگین را دارد که نشان دهنده تکرار پذیری خوب این نمونه از نظر مقاومت الکتریکی است.

بر اساس نتایج بدست آمده جوهر S<sub>3</sub> به عنوان بهترین جوهر برای اعمال خطوط نقره برای ادامه پژوهش انتخاب شد، چرا که نمونه های اعمال شده با این جوهر کمترین مقاومت الکتریکی را داشته و همچنین کمترین انحراف مقدار عرض، ضخامت و مقاومت الکتریکی متوسط را نشان داد. شایان ذکر است که جوهرهای با نسبت های جرمی بیشتر HEC از آن جهت استفاده نشد که گرانبوی بسیار زیادی داشته و امکان تزریق آن ها با روش چاپ مستقیم جوهر امکان پذیر نبود.

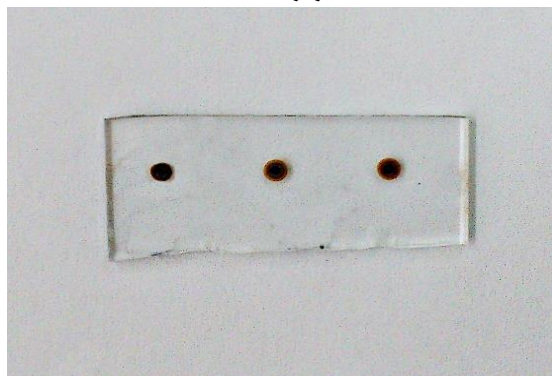
بیشتر نوک نازل تا زیرلایه اتفاق می افتد، زیرا که با افزایش نرخ تزریق، حجم بیشتری از جوهر از نازل جاری شده و بدیهی است که کنش بیشتری را تحمل خواهد کرد. پس به طور کلی نتایج حاکی از آن بود که با افزایش فاصله نوک نازل تا زیرلایه هیچگونه تغییری چشمگیری در عرض و ضخامت و همچنین مقاومت الکتریکی خطوط نقره اعمال شده ایجاد نشد. اما این افزایش فاصله تا مقدار مشخصی که تابعی از سرعت تزریق جوهر است، خطوط نقره پیوسته ایجاد می کند و بیش از آن خطوط اعمالی ناپیوسته می شود. این مقدار حدی فاصله نازل تا زیرلایه، ارتباط مستقیمی با نرخ تزریق جوهر بر روی زیرلایه داشته و با افزایش نرخ تزریق، افزایش یافته و پدیده قطره قطره شدن دیرتر رخ می دهد.

پس از آن تاثیر نرخ تزریق جوهر بررسی شد. با ثابت گرفتن سرعت حرکت زیرلایه و همچنین فاصله نازل تا زیرلایه حدود ۰/۱ میلی متر، تعداد ۳ متغیر نرخ تزریق ۰/۱۲، ۰/۳ و ۰/۴۸ میلی لیتر بر دقیقه بررسی شد. شکل ۹ تغییرات عرض، ضخامت و مقاومت الکتریکی خطوط نقره اعمالی را با تغییر نرخ تزریق نشان می دهد. براساس نتایج حاصل مشاهده می شود که با افزایش نرخ تزریق جوهر، عرض و ضخامت متوسط نمونه ها افزایش و مقاومت الکتریکی کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که نمونه های مربوط به نرخ تزریق ۰/۳ میلی لیتر بر دقیقه، دارای کمترین مقدار انحراف از مقدار میانگین عرض و مقاومت الکتریکی است و بهترین تکرار پذیری را دارد.

سپس، با استفاده از جوهر S<sub>3</sub> اثر پارامترهای دستگاهی بررسی شد. آزمون مربوط به بررسی اثر فاصله نوک نازل تا زیرلایه، در فواصل ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میلی متر در نرخ های تزریق ۰/۱۲، ۰/۳ و ۰/۴۸ میلی لیتر بر دقیقه انجام شد. سپس نمونه ها در دمای ۳۶۰ درجه سانتی گراد نفجوشی شد و آنگاه از لحاظ شکل ظاهری، عرض، ضخامت و همچنین مقاومت الکتریکی بررسی شد. نتایج حاصل در شکل ۷ آمده است. همانطور که مشاهده می شود خطوط نقره اعمال شده در فواصل مختلف نوک نازل تا زیرلایه اما با نرخ تزریق یکسان، هیچگونه تفاوت چشمگیری از لحاظ عرض، ضخامت و مقاومت الکتریکی نداشتند. اما در آزمون مربوط به نرخ تزریق ۰/۱۲ میلی لیتر بر دقیقه و در حالتی که در فاصله بین نوک نازل تا زیرلایه حدود ۰/۵ میلی متر تنظیم شده بود، مشاهده شد که جوهر خروجی از نوک نازل نتوانسته اتصال مناسب را با زیرلایه برقرار کند و به نوک نازل متصل شده و سپس به صورت قطره قطره های با فاصله، بر روی زیرلایه فرود آمده و در نتیجه اعمال خط نقره به صورت خط پیوسته صورت نگرفته است (شکل ۸). دلیل این امر آن است که در فاصله ذکر شده و با توجه به حرکت داشتن زیرلایه، جوهر تزریق شده دچار کنش زیادی شده که در نتیجه آن، قطع اتصال از زیرلایه صورت گرفته و سپس با ادامه روند تخلیه سرنگ، تنها قطراتی از جوهر بر روی زیرلایه اعمال شده است. اما این پدیده با نرخ تزریق ۰/۳ میلی لیتر بر دقیقه در فاصله نوک نازل تا زیرلایه حدود ۱ میلی متر و با نرخ تزریق ۰/۴۸ میلی لیتر بر دقیقه، در فاصله ۱/۵ میلی متر اتفاق افتاد. این نشان داد که حالت قطره قطره شدن با افزایش نرخ تزریق در فواصل



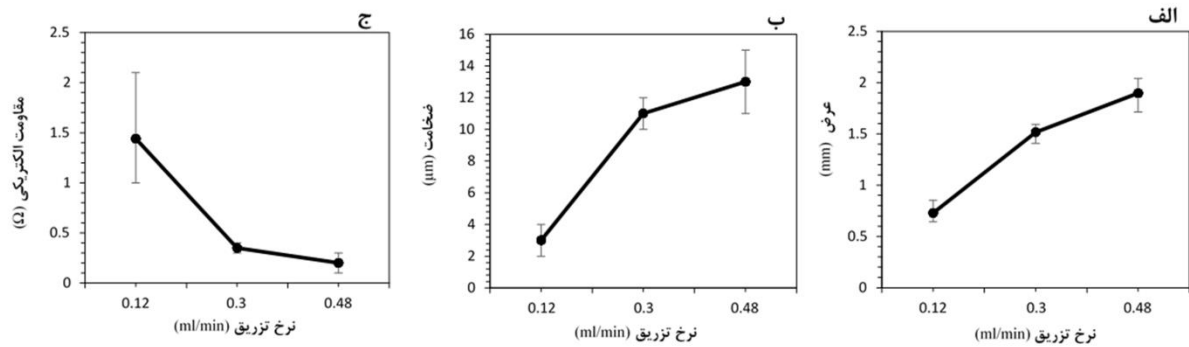
شکل ۷- تغییرات (الف عرض، ب ضخامت و ج) مقاومت الکتریکی خطوط نقره اعمال شده با تغییر فاصله نوک نازل تا زیرلایه



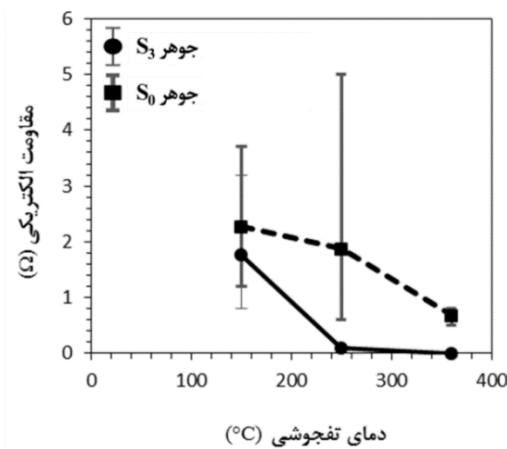
شکل ۸- پدیده قطره قطره ای شدن در نرخ تزریق ۰/۱۲ میلی لیتر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه ۰/۵ میلی متر

در افزایش کارایی سلول های خورشیدی حساس شده با رنگینه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اعمال خطوط نقره بر این سلول های خورشیدی، از جوهر  $S_3$  و پارامتر های نرخ تزریق جوهر  $0.48$  میلی متر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه  $0.1$  میلی متر استفاده شد. با استفاده از این شرایط خطوط نقره بر روی فوتوآند و الکترود مقابل اعمال شد. سپس خط نقره روی فوتوآند، همزمان با تفجوشی لایه  $TiO_2$  در کوره تفجوشی شد و خط نقره روی الکترود مقابل نیز همراه با تفجوشی پوشش پلاتین روی FTO تفجوشی گردید. شکل ۱۱ سلول خورشیدی با خطوط نقره را نشان می دهد. برای ارزیابی پارامترهای فوتولتائیک سلول خورشیدی بدون خطوط نقره و با خطوط نقره، منحنی جریان-ولتاژ ( $J-V$ ) سلول اندازه گیری شد که در شکل ۱۲ آمده است. همچنین در این شکل منحنی های امپدانس الکتروشیمیایی نیز آمده است. پارامترهای فوتولتائیک مستخرج شده از منحنی جریان-ولتاژ عبارتند از چگالی جریان مدار کوتاه ( $J_{sc}$ )، ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ )، فاکتور پر شوندگی (FF) و بازده تبدیل انرژی ( $\eta$ ) که مقادیر آن در شکل ۱۳ آمده است.

تأثیر دمای تفجوشی با استفاده از دو جوهر  $S_0$  و  $S_3$  بررسی شد. اعمال خطوط رسانای نقره با نرخ تزریق جوهر  $0.3$  میلی لیتر بر دقیقه، سرعت حرکت زیرلایه  $1/5$  سانتی متر بر ثانیه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه حدود  $0.1$  میلی متر انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۱۰ آمده است. نتایج حاصل نشان می دهد که مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های اعمال شده با جوهر  $S_0$  در تمام دماهای تفجوشی دارای پراکندگی بسیار بوده در حالی که نمونه های اعمال شده با جوهر  $S_3$  پراکندگی مقاومت الکتریکی سطحی را تنها در دمای  $150$  درجه سانتی گراد نشان داد و در دماهای بالاتر مقاومت الکتریکی سطحی برای تمام نمونه ها یکسان است. همچنین نتایج مربوط به هر دو جوهر حاکی از آن است که با افزایش دمای تفجوشی، مقاومت الکتریکی روند کاهشی را از خود نشان داده تا جایی که مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های اعمال شده با جوهر  $S_3$  در دمای  $360$  درجه سانتی گراد به نزدیک صفر رسید. همچنین در بیشتر دماها، مقاومت الکتریکی خطوط نقره اعمال شده با جوهر  $S_3$  کمتر از مقاومت نمونه های اعمال شده با جوهر  $S_0$  بود. در آخر عملکرد خطوط نقره بهینه به عنوان شبکه جمع کننده جریان،



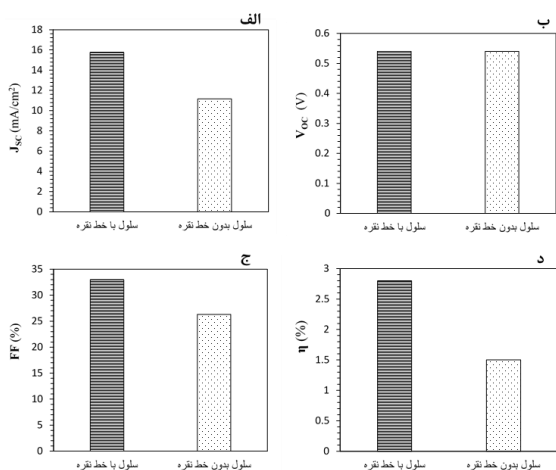
شکل ۹- تغییرات (الف) عرض، (ب) ضخامت و (ج) مقاومت الکتریکی با نرخ تزریق جوهر در فاصله نوک نازل تا زیرلایه  $0.1$  میلی متری



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت الکتریکی با دمای تفجوشی با استفاده از جوهرهای  $S_0$  و  $S_3$  اعمال شده با نرخ تزریق  $0.3$  میلی لیتر بر دقیقه و فاصله نوک نازل تا زیرلایه  $0.1$  میلی متری



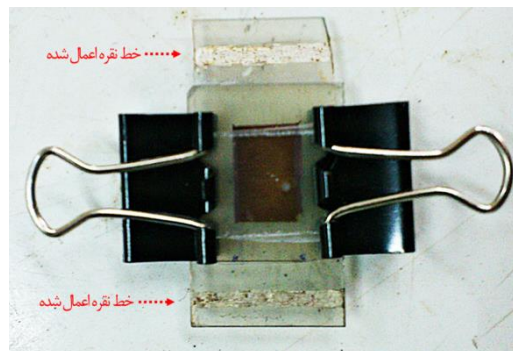
منحنی  $J-V$  در  $V_{oc}$  است. مقادیر  $R_s$  مستخرج شده از منحنی امیدانس الکتروشیمیایی برای سلول با خطوط نقره و بدون خطوط نقره به ترتیب برابر با ۲۰ و ۴۴ اهم اندازه گیری شد. دلیل کاهش  $R_s$ ، انتقال منحنی امیدانس به سمت چپ با اعمال خطوط نقره و کاهش مقاومت در برابر جمع آوری جریان از سطح  $FTO$  می باشد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می گردد،  $J_{sc}$ ،  $FF$  و  $\eta$  مربوط به نمونه با خطوط نقره بیش از نمونه بدون خطوط نقره است که دلیل این امر کاهش مقاومت سری سلول خورشیدی دارای خطوط رسانای نقره است. با این حال  $V_{oc}$  هر دو نمونه نزدیک به یکدیگر است. دلیل آن این است که در شرایط اندازه گیری ولتاژ مدار باز، به دلیل عدم عبور جریان از سلول، تلفات انرژی به دلیل مقاومت سری رخ نداده و در نتیجه مقاومت سری تأثیری بر روی  $V_{oc}$  نمی گذارد. با توجه به نتایج مشاهده می شود که خطوط رسانای نقره اعمال شده در این پژوهش بر سلول های خورشیدی حساس شده با رنگینه، به عنوان خطوط جمع کننده جریان در سطح  $FTO$  عمل کرده و منجر به کاهش مقاومت سری سلول و افزایش چگالی جریان مدار کوتاه و در پی آن افزایش فاکتور پرشوندگی شده است. و این افزایش فاکتور پرشوندگی منجر به افزایش بازده سلول شده است.



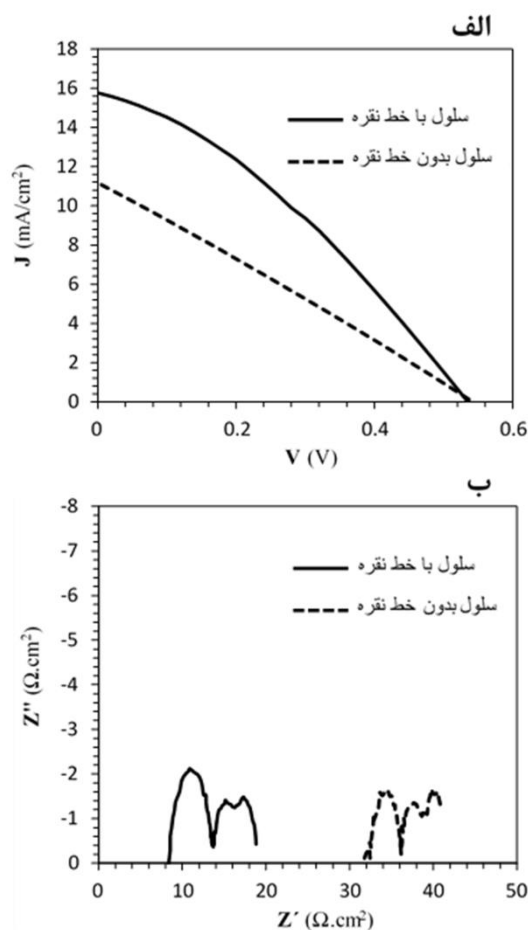
شکل ۱۳- خواص فوتوولتائیک دو نوع سلول خورشیدی دارای خط نقره و بدون خط نقره؛ الف) چگالی جریان مدار کوتاه، ب) ولتاژ مدار باز، ج) فاکتور پرشوندگی و د) بازده تبدیل انرژی

### نتیجه گیری

مقادیر مختلف HEC (۰، ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۳ درصد وزنی) به جوهر اضافه شد و مقدار ۲/۳ درصد وزنی به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. مشخص شد که جوهر نقره با مقدار هیدروکسی اتیل سلولز ۲/۳ درصد وزنی، بهترین نتایج را از لحاظ یکنواختی عرض و ضخامت متوسط خطوط نقره نشان داده و همچنین کمترین مقاومت الکتریکی را حاصل می کند. مشاهده گردید که تا کمتر از یک مقدار بحرانی، فاصله نوک نازل از زیرلایه تأثیری بر فرآیند لایه نشانی جوهر ندارد، اما بیشتر از آن



شکل ۱۱- سلول خورشیدی ساخته شده با خطوط رسانای نقره



شکل ۱۲- الف) منحنی چگالی جریان بر حسب ولتاژ و ب) منحنی امیدانس الکتروشیمیایی تحت نور برای سلول های خورشیدی دارای خط نقره و بدون خط نقره

محل برخورد منحنی امیدانس در فرکانس های کم (یعنی محل برخورد در سمت راست با محور  $Z'$ ) نشان دهنده مقاومت سری سلول ( $R_s$ ) است. همچنین مقاومت سری سلول برابر با عکس شیب

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

از دانشگاه صنعتی شیراز و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور برای حمایت مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می گردد.

### مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در این مقاله مشارکت یکسان داشته اند.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

مقدار بحرانی، خطوط نقره اعمال شده گسسته شده و نقطه نقطه می گردد. آزمایشات نشان داد که این مقدار بحرانی تابع نرخ تزریق جوهر بوده و برای نرخ تزریق های ۰/۱۲، ۰/۳ و ۰/۴۸ میلی لیتر در دقیقه این فاصله بحرانی برابر با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی متر بود. برای تعیین حداقل دمای تفجوشی که مقاومت الکتریکی نزدیک به صفر بدهد، دماهای مختلف تفجوشی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که تفجوشی در دمای ۳۶۰ درجه سانتی گراد مقاومتی نزدیک به صفر حاصل می کند. در پایان خطوط رسانای نقره بر سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه اعمال شد و کارایی آن با سلول بدون خطوط نقره مقایسه شد. با اعمال خطوط نقره چگالی جریان مدار کوتاه، فاکتور پرشوندگی و بازده تبدیل انرژی سلول به ترتیب از مقادیر ۱۱ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، ۲۶٪ و ۱/۵٪ به مقادیر ۱۵/۸ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، ۳۳٪ و ۲/۸٪ افزایش یافت. اعمال خطوط نقره تأثیری بر ولتاژ مدار باز سلول نشان نداد. کاهش مقاومت سری سلول با اعمال خطوط نقره دلیل این افزایش مشاهده شده در پارامترهای فوتولتاییک سلول بود. با اعمال خطوط نقره مقاومت سری سلول از ۴۴ اهم به ۲۰ اهم کاهش یافت.



## References

- Forrest, S.R., Organic electronics: Foundations to Applications, Oxford University Press, 2020.
- Colniță, A., Marconi, D., Dina, N.E., Brezeștean, I., Bogdan, D. and Turcu, I. 2022. 3D silver metallized nanotrenches fabricated by nanoimprint lithography as flexible SERS detection platform, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 276: 121232.
- Aleem, M., Vishnuraj, R., Krishnan, B., Ashok, A., and Pullithadathil, B. 2023. Narrow line width Ni-Cu-Sn front contact metallization patterns for low-cost high-efficiency crystalline silicon solar cells using nano-imprint lithography, *Energy Technol*, doi.org/10.1002/ente.202300090
- Cosnahan, T., Watt, A.A.R. and Assender, H.E. 2018. Modelling of a vacuum metallization patterning method for organic electronics, *Surface and Coatings Technology*, 336: 128-132.
- Wu, P.C., Lai, Y.C., Lee, P.I., Chiang, M.T., Chou, J., and Chuang, T.H. 2021. Sputtering of Ag (111) nanotwinned films on Si (100) wafers for backside metallization of power devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32: 7319-7329.
- Girolamo, D.D. and Dini, D. 2022. Electrodeposition as a versatile preparative tool for perovskite photovoltaics: aspects of metallization and selective contacts/active layer formation, *RRL Solar*, 6: 2100993 (1-10).
- Kim, H., Kim, J.G., Park, J.W., and Chu, C.N. 2018. Selective copper metallization of nonconductive materials using jet-circulating electrodeposition, *Precision Engineering*, 51: 153-159.
- Tsuji, K., Suzuki, S., Dhamrin, M., Adrian, A., Buck, T., and Usami, N. 2022. Fine line screen-printing aluminum for front side p+ metallization of high efficiency solar cells, *AIP Conference Proceedings*, 2487: 130014 (1-8).
- Yüce, C., König, M., and Willenbacher, N. 2018. Rheology and screen-printing performance of model silver pastes for metallization of Si-solar cells, *Coatings*, 8: 406.
- Walker, S.B. 2013. Synthesis and Patterning of Reactive Silver Inks, Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hon, K.K.B., Li, L. and Hutchings, I.M. 2008. Direct Writing Technology—Advances and Developments, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57: 601-620,
- Sun, J. 2010. Micropen Direct-Write Technique for Fabrication of Advanced Electroceramic and Optical Materials, Doctoral dissertation, Rutgers University-Graduate School-New Brunswick.
۱۳. سید احمد هاشم پور چشمه گل، علی مشرقی، بهینه سازی پارامترهای سنتز نانوسیمهای نقره به روش پلی ال، *مجله مواد نوین/ جلد ۱۳/ شماره ۴۵/ پاییز ۱۴۰۰*، صفحه ۲۱-۳۲.
- Walker, S.B. and Lewis, J. A. 2012. Reactive Silver Inks for Patterning High-Conductivity Features at Mild Temperatures, *Journal of the American Chemical Society*, 134, 1419-1421.
- Walker, S.B. and Lewis, J.A. 2012. Ink Composition for Making A Conductive Silver Structure, U.S. Patent Application 14/368,202.
- Richhariya, G., Meikap, B.C. and Kumar, A. 2022. Review on fabrication methodologies and its impacts on performance of dye-sensitized solar cells, *Environmental Science and Pollution Research*, 29: 15233–15251.

