

دستگاه پوششدهی رول به رول باتریهای لیتیم-یون

مژده خادمباشی^{۱*}، سید صالح فضائی^۱، مهدی نجمآبادی^۱، ناهید خسروی^۲

^۱مرکز نوآوری و شتابدهی گروه صنعتی پارت لاستیک، مشهد، ایران

^۲شرکت همگرتوس، گروه صنعتی پارت لاستیک، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mozhde.khadembashi@gmail.com

چکیده

امروزه باتریهای لیتیم-یون^۱ نقش بسیار مهمی را در حمل و نقل برقی و صنعت خودرو ایفا می کنند. از آن جمله می توان به استفاده از آنها در دوچرخه ها و اسکوترهای برقی، انواع خودروهای هیبریدی و خودروهای برقی اشاره کرد. فرآیند ساخت و تولید این باتری ها به نسبت پیچیده بوده و نیاز به دانش فنی و دستگاه های خاص دارد. در پژوهش حاضر نکات طراحی و ساخت دستگاه پوشش دهی رول به رول^۲ بررسی می شود که یکی از مهم ترین دستگاه های تولیدی باتری های لیتیم-یون است. این دستگاه وظیفه پوشش دهی یکنواخت فویل های الکترودی را برعهده دارد. فویل های الکترودی از روی رول ورودی باز شده، عملیات پوشش دهی دوغاب الکترودی بر روی آن انجام شده و سپس توسط خشک کن، دوغاب موجود بر روی سطح فویل خشک می شود. در مرحله آخر فویل ها بر روی رول نهایی پیچیده می شوند. این دستگاه برای اولین بار در ایران توسط شرکت همگرتوس طراحی و ساخته شد.

کلمات کلیدی: باتری لیتیم-یون؛ خودرو برقی؛ دستگاه پوشش دهی رول به رول؛ پوشش دهی یکنواخت فویل های الکترودی؛ دوغاب الکترودی

¹ Lithium-ion battery

² Roll to roll

مقدمه

سرگذشت باتری‌های لیتیم-یون در سال ۱۹۶۲ میلادی آغاز شد. اولین باتری‌های لیتیم-یون بعد از تخلیه، قابلیت شارژ مجدد نداشتند. شرکت سونی اولین باتری لیتیم-یون قابل شارژ را تولید و در سال ۱۹۹۱ میلادی آن را به بازار عرضه کرد. بعد از آن به دلیل وزن کم و مقدار انرژی زیاد از این باتری‌ها به طور گسترده در تلفن‌های همراه و نوت بوک‌ها استفاده شد. در حمل و نقل برقی نیز باتری‌های لیتیم-یون نقش مهم فزاینده‌ای بازی می‌کنند. در صنعت خودرو از باتری‌های لیتیم-یون در انواع خودروهای هیبریدی و خودرو برقی استفاده می‌شود. اتوبوس‌ها و کامیون‌های هیبریدی و اتوبوس‌های برقی نیز به باتری‌های لیتیم-یون مجهز شده‌اند. [۱]

روند تولید باتری‌های لیتیم-یون با مخلوط کردن دوغاب الکتروشیمیایی متشکل از یک ترکیب گرافیتی برای آند [۲] یا یک ترکیب اکسید لیتیومی برای کاتد، که به عنوان جمع کننده الکترون در سلول باتری عمل می‌کند، آغاز می‌شود. [۳]

سپس این دوغاب معمولاً از طریق یکی از فرآیندهای پوشش‌دهی، مانند فرایند پوشش‌دهی دکتر بلید،^۳ بر روی فویل الکترودی پخش می‌شود [۴]. الکترودهای موجود در باتری‌های لیتیوم-یون از فویل مس (آند) و آلومینیوم (کاتد) ساخته شده‌اند [۵]. برای دستیابی به عملکرد ایده آل باتری بسیار مهم است که پوشش دوغاب روی الکترودها یکنواخت باشد. اگر بخشی از الکترود دارای دوغاب بیشتر یا کمتر از بقیه باشد، در غلظت لیتیوم-یون اختلاف ایجاد شده، که باعث ایجاد نقاط داغ در باتری می‌شود. این نقاط داغ منجر به کاهش دوام یا عملکرد باتری می‌شود و در موارد شدید می‌تواند منجر به انفجار باتری شود.

پس از پوشش‌دهی، فویل‌های الکترودی باید در حرارت مناسب و شرایط کنترل شده، خشک شوند. این مرحله در تثبیت و حفظ یکنواختی پوشش بسیار مهم است.

عمل پوشش‌دهی فویل‌های مسی و آلومینیومی، توسط دستگاه پوشش‌دهی رول‌به‌رول باتری‌های لیتیم-یون انجام می‌شود. دستگاه‌های رول‌به‌رول در صنایع مختلف، برای پوشش‌دهی و یا چاپ بر روی مواد انعطاف پذیر مانند کاغذ، پلاستیک و یا فویل فلزی استفاده می‌شوند.

نکته بسیار مهم در پوشش‌دهی فویل‌های الکترودی، لزوم در دقت بسیار بالای پوشش‌دهی آن‌ها است که دستگاه رول‌به‌رول ساخته شده را از دیگر نمونه‌های مشابه، متمایز می‌کند. این امر مستلزم دقت‌های ساختی بالا و استفاده از مکانیزمهای دقیق در سیستم پوشش‌دهی، کشش یکنواخت فویل در سرتاسر خط و تحت کنترل بودن فرآیند خشک کردن فویل‌ها و سرعت خط است. فویل الکترودی از روی رول ورودی باز شده، عملیات پوشش‌دهی دوغاب الکترودی به روش دکتر بلید، بر روی آن انجام شده و سپس توسط خشک کن هوای داغ^۴، دوغاب موجود بر روی سطح فویل خشک می‌شود. در مرحله آخر فویل‌ها بر روی رول نهایی پیچیده می‌شوند. در این پژوهش به شرح قسمت‌های مختلف این دستگاه پرداخته شده‌است.

۱- کلیات طراحی دستگاه

دستگاه پوشش‌دهی رول‌به‌رول باتری‌های لیتیم-یون مطابق شکل (۱)، از تعدادی رول محرک و تعدادی رول هرزگرد تشکیل شده است. رول‌های محرک، وظیفه باز کردن فویل، تنظیم سرعت خط و جمع کردن فویل را برعهده دارند. رول‌های هرزگرد نیز به طور کلی هدایت فویل را برعهده دارند. مفروضات اولیه که دستگاه با توجه به آن طراحی گردید، در ادامه آورده شده است.

- پوشش‌دهی یکنواخت فویل‌های الکترودی
- کشش یکنواخت و قابل تنظیم فویل در طول خط
- عرض و ضخامت پوشش‌دهی قابل تنظیم با دقت بالا

³ Doctor blade

⁴ Hot air

- سرعت قابل تنظیم خط

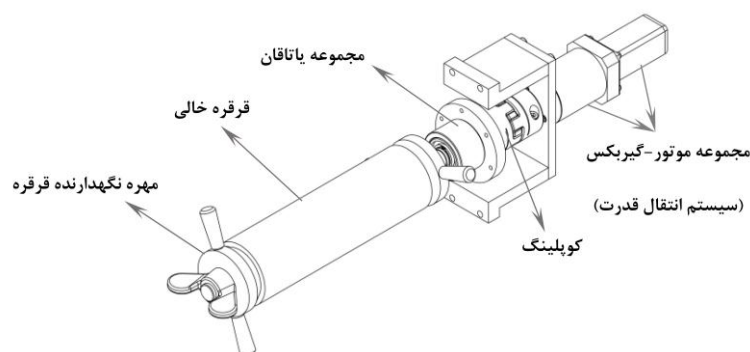


شکل ۱. دستگاه پوشش دهی رول به رول باتری های لیتیوم-یون

طراحی دستگاه را می توان به بخش های سیستم انتقال قدرت، سیستم پوشش دهی فویل، سیستم خشک کن و سیستم کنترل تقسیم کرد. هر بخش به صورت جداگانه در این پژوهش بررسی شده است.

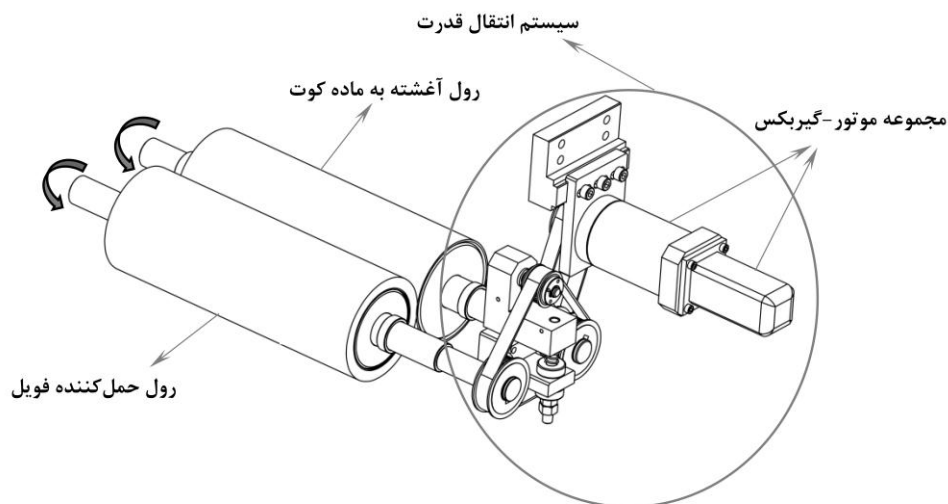
۱-۱ سیستم انتقال قدرت

همان طور که در قبل اشاره شد، مجموعه ای از رول ها در این دستگاه محرک هستند که در این بخش به بررسی سیستم انتقال قدرت در آن ها پرداخته شده است. در بخش باز کن و جمع کن دو قرقره محرک مستقل وجود دارد که فویل از روی یکی باز شده و بر روی دیگری پیچانده می شود. این قرقره ها باید به صورت مستقل عمل کنند، زیرا به دلیل تغییر شعاع قرقره های باز کن و جمع کن در طی پروسه ی پوشش دهی، سرعت زاویه ای این رول ها با یکدیگر متفاوت است و نمی توان نسبت ثابتی را بین آن ها در نظر گرفت. پس سیستم انتقال قدرت برای این دو رول به صورت مستقل و جداگانه، ولی کاملاً مشابه با یکدیگر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۲)، مجموعه سروو موتور-گیربکس به صورت مستقیم به وسیله یک کوپلینگ اتصال دهنده به قرقره متصل شده است.



شکل ۲. سیستم انتقال قدرت در قرقره ی باز کن/جمع کن

در قسمت پوشش‌دهی نیز دو رول محرک وجود دارد، یکی از رول‌ها آغشته به دوغاب است و رول دیگر که فویل بر روی آن قرار دارد، دارای پوشش پلی‌اورتان است. حرکت این دو رول هم جهت با یکدیگر است و سرعت آن‌ها برابر است. رول‌ها هم قطر نیز هستند و سرعت خطی فویل به وسیله‌ی سرعت خطی این رول‌ها تعیین می‌شود. در شکل (۳)، سیستم انتقال قدرت این رول‌ها مشخص شده است. این دو رول توسط مجموعه‌های تسمه و پولی تایم به یکدیگر و به منبع اصلی قدرت، کوپل شده‌اند.

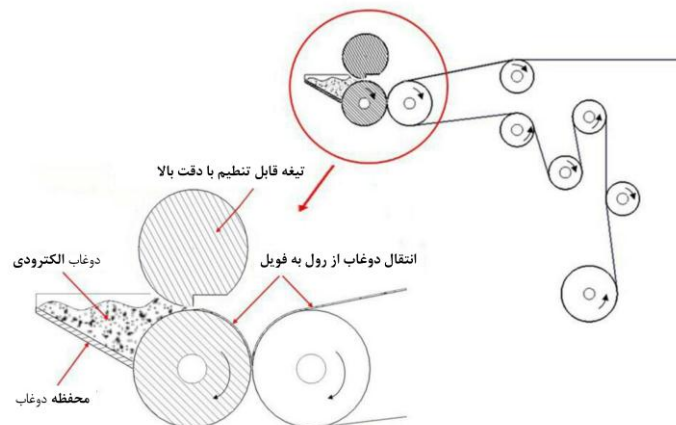


شکل ۳. سیستم انتقال قدرت در رول‌های پوشش‌دهنده

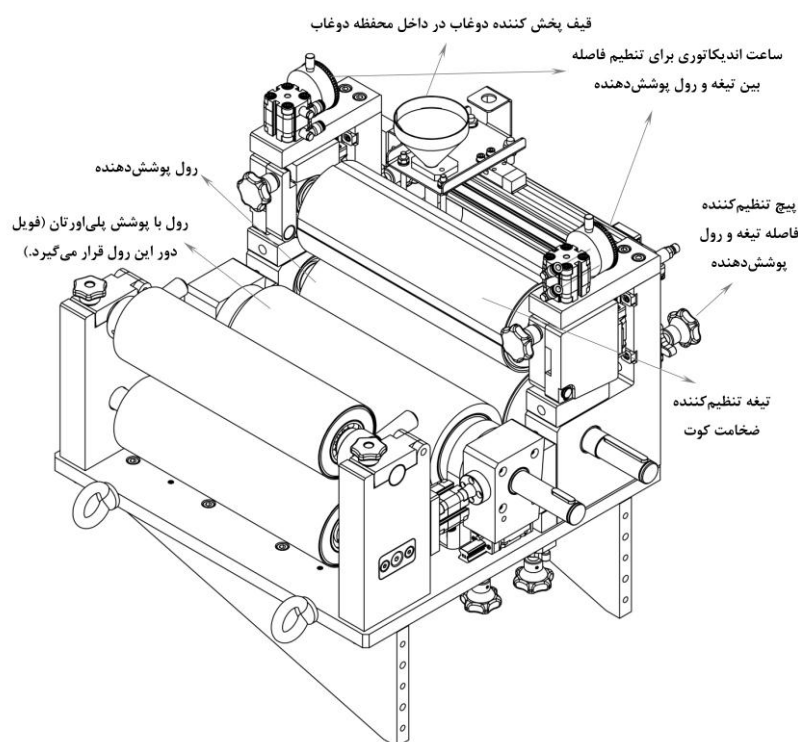
فویل‌های الکترودی از جنس‌های مس با ضخامت $9\mu\text{m}$ و آلومینیوم با ضخامت $30\mu\text{m}$ موجود هستند. ماکزیمم عرض فویل‌ها ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در فرآیند، برای پوشش‌دهی یکنواخت، فویل باید تحت کشش قرار بگیرد. دامنه تنظیم مناسب کشش فویل با توجه به تغییرات جنس و عرض فویل‌ها بین ۳۰-۱۱۰ نیوتن است. ایجاد کشش ثابت برای فویل در طول خط، یک پارامتر بسیار مهم است. با توجه به فرضیات ذکر شده، در این دستگاه از سه سروو موتور ۲۰۰ وات استفاده شده است که با گیربکس‌های خورشیدی با نسبت ۲۵، کوپل شده‌اند.

۲-۱ سیستم پوشش‌دهی فویل

همان‌طور که در شکل (۴)، مشاهده می‌شود، در قسمت پوشش‌دهی یک رول دوار که به دوغاب آغشته است با فویل در تماس است و از طریق این تماس دوغاب را از روی سطح خود به روی سطح فویل منتقل می‌کند. ضخامت پوشش‌دهی، تابع فاصله موجود بین رول دوار و رول ثابتی است که در بالای آن قرار دارد و نقش تیغه‌تنظیم‌کننده ضخامت را بر عهده دارد. رول ثابت دارای یک لبه‌ی تیغه مانند است که ضخامت دوغاب موجود بر روی رول دوار را تنظیم می‌کند و دقت ساخت بسیار بالایی دارد. این روش پوشش‌دهی به روش دکتر بلید معروف است. فاصله‌ی بین رول دوار و تیغه، توسط یک پیچ تنظیم که در شکل (۵) نشان داده شده است، قابل تغییر است.



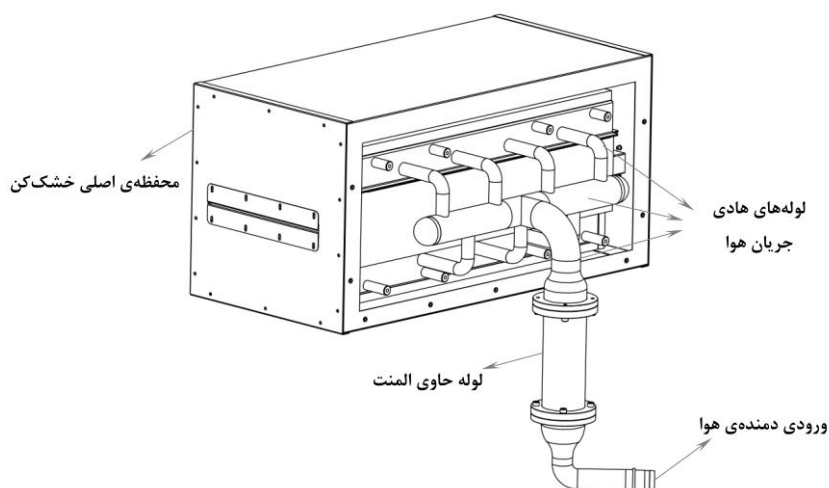
شکل ۴. نحوه پوشش دهی فویل به روش دکتر بلید



شکل ۵. سیستم پوشش دهی در دستگاه پوشش دهی رول به رول باتری های لیتیوم-یون

۳-۱ سیستم خشک کن

سیستم خشک کن هوای داغ از یک دمنده، المنت، مجموعه ی لوله های هدایت کننده جریان هوا و محفظه اصلی خشک کن تشکیل شده است. دمنده، هوا را به داخل لوله ی حاوی المنت می دمد. هوا بعد از عبور از روی المنت تا ماکزیمم ۱۵۰ درجه سانتی گراد، داغ شده و از طریق لوله های هدایت کننده جریان هوا به داخل محفظه اصلی وارد می شود. داخل محفظه اصلی ۱۸ شیارباریک سراسری در بالا و پایین محفظه، تعبیه شده است که هوای داغ از این شیارها بر روی فویل دمیده می شود و دوغاب موجود بر سطح فویل را خشک می کند. در شکل (۶) نمایی از پشت محفظه اصلی خشک کن و لوله های متصل به آن آورده شده است. محفظه اصلی خشک کن دو جداره بوده و دورتادور جداره داخلی، لوله های هدایت کننده جریان هوای داغ و لوله حاوی المنت، عایق حرارتی قرار گرفته است.

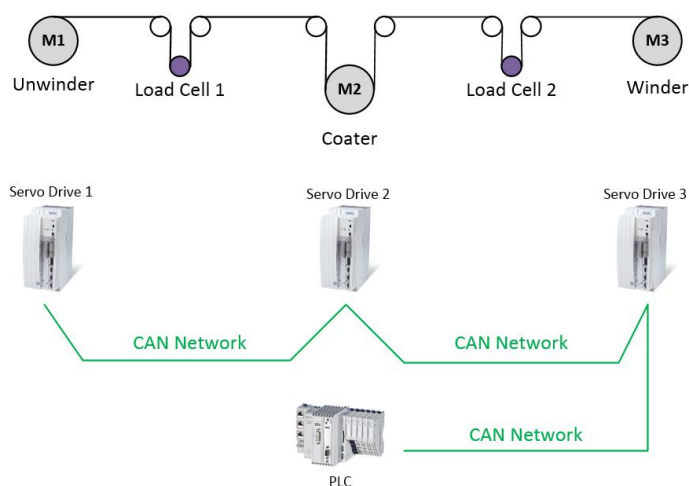


شکل ۶. محفظه اصلی خشک کن و مجموعه لوله های متصل به آن

۴-۱ سیستم کنترل

سیستم کنترل دستگاه رول به رول بطور کلی سه وظیفه به عهده دارد: ایجاد رابط کاربری، کنترل حرکت رول ها و کنترل سیستم خشک کن. یک PLC بعنوان کنترل کننده دستگاه استفاده شده است. رابط کاربری هم توسط HMI متصل به کنترل کننده ایجاد شده است.

در میان وظایف سیستم کنترل، حرکت رول ها از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. برای این منظور از شبکه Canopen میان سه عدد سرو درایو، ماژول ورودی-خروجی و PLC استفاده شده است. شمای کلی سیستم کنترل حرکت در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷. شمای کلی سیستم کنترل حرکت

یکی از مواردی که در سیستم کنترل باید به آن توجه می شود، رنج سرعت کاری سرو موتورها است که در بازه ۵ الی ۷۵ دور بر دقیقه است. این سرعت پایین در قیاس با سرعت نامی سرو موتورها (۳۰۰۰ دور بر دقیقه) باعث می شود که نتوان از روش های رایج کنترل در این دستگاه بهره برد. برای این منظور باید تمهیداتی هم در تیونینگ سرو درایوها و هم در لوپ کنترلی اندیشیده شود. سیستم کنترلی به نحوی چیدمان شده است که فرض سرعت ثابت در موتور شماره ۲ مورد قبول واقع گردیده است. بدین ترتیب دو لوپ مجزا در بازکن و جمع کن وجود خواهد داشت که کشش آن ها بصورت حلقه بسته با فیدبک از لودسل ها تنظیم می گردد. البته فرض استقلال در صورتی قابل قبول خواهد بود که برآیند نیروهای کشش و اصطکاک ایستایی در محل رول متصل به موتور شماره ۲ موجب لغزش فویل نگردد.

کنترل سرو موتورها در مد سرعت صورت می گیرد و پارامترهای آن بصورت لحظه ای از لودسلها و سرعت موتور شماره ۲ اخذ می گردد. همچنین به دلیل سرعت پایین کاری موتورها، گین این حرکت هم بصورت لحظه ای محاسبه و اعمال می گردد.

۲- نتایج

مشخصات نهایی دستگاه پوشش دهی رول به رول باتری های لیتیم-یون ساخته شده در شرکت همگر توس، در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات نهایی دستگاه پوشش دهی رول به رول باتری های لیتیم-یون

واحد	مقدار	نام مشخصه
m/min	0.1-0.75	سرعت پوشش دهی
N	30-110	محدوده میزان کشش فویل الکترو
$^{\circ}C$	150	ماکزیمم دمای خشک کن
μm	30-200	محدوده ضخامت لایه پوششی پس از خشک شدن
μm	± 5	تولرانس ضخامت لایه پوششی پس از خشک شدن
mm	250	حداکثر پهنای پوشش دهی

۳- تشکر و قدردانی

سپاس از پرسنل واحدهای مهندسی، تولید و مونتاژ شرکت همگر توس که طراحی و ساخت دستگاه بدون کمک های آنها میسر نمی شد.

سپاس از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو که ساخت دستگاه بدون اعتماد ایشان به شرکت همگر توس، محقق نمی شد.

مراجع

- [۱] R. Korthauer, *Lithium-ion batteries: basics and applications*. Springer, 2018.
- [۲] D. Liu, L.-C. Chen, T.-J. Liu, T. Fan, E.-Y. Tsou, and C. Tiu, "An effective mixing for lithium ion battery slurries," *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. ۴, no. 04, p. 515, 2014.
- [۳] G. Schuh, R. Neugebauer, and E. Uhlmann, *Future Trends in Production Engineering: Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Berlin, Germany, 8th-9th June 2011*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [۴] K. S. Nanjundaswamy, H. D. Friend, C. O. Kelly, D. J. Standlee, and R. L. Higgins, "Electrode fabrication for Li-ion: processing, formulations and defects during coating," in *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*, 1997, vol. 1, pp. 42-45: IEEE.
- [۵] A. Agarwal, D. Gildin, R. Kiridena, and K. Wiers, "Design and Fabrication of a Li-Ion Battery Electrode Coating Fixture," 2015.