

تولید سطوح آبگریز با پوشش دهی اکسید قلع بر روی پایه آلومینیم: مدل سازی و تحلیل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

سید محمد ساداتی تیلبن^۱، رضا نوروزبگی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۶۵.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۶۵.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۸/۹/۱۶

چکیده

در این پژوهش، بذر لایه های مختلف با روش غوطه وری بر روی پایه آلومینیم کشت شدند. لایه نشانی حمام شیمیایی نیز برای پوشش دهی اکسید قلع بر روی بذرها مورد استفاده قرار گرفته است. ۱۸ آزمایش تجربی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی طرح ریزی گردید. با توجه به نتایج، از بین نوع فعال سطح و غلظت فعال سطح در بذر لایه، تعداد لایه های بذر لایه، جنس بذر لایه و غلظت پیش ماده، غلظت فعال سطح بیشترین تاثیر را بر روی ترشوندگی سطح داشته است. همچنین برای مدل سازی و بهینه سازی فرآیند از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. شبکه عصبی بهینه با ۴ نورون در لایه میانی اول و ۵ نورون در لایه میانی دوم استخراج شد. پیش بینی زاویه تماس قطره آب در نقطه بهینه (بیشترین آبگریزی) با استفاده از طراحی تاگوچی حدود 142° و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی حدود 132° به دست آمد. مقدار تجربی بدست آمده برای آن نیز 137° می باشد که نشان دهنده حدود ۳.۵٪ خطای پیش بینی می باشد.

واژه های کلیدی: سطح آبگریز، اکسید قلع، بذر لایه، طرح تاگوچی، شبکه عصبی مصنوعی.

Hydrophobic Surface Fabrication with Tin Oxide on Al-substrate: Modelling and Assessment Via Artificial Neural Network

S. M. Sadati Tilebon, R. Norouzbeigi*

Faculty of Chemical Engineering, Oil and Gas, Iran University of Science and Technology, P.O. Box: 16765-163, Tehran, Iran.

Received: 19-08-2018

Accepted: 12-03-2019

Available online: 07-12-2019

Abstract

Surface quality is a key point for expressing the specifications of tools that these specifications are improvable by coating methods. In this study, seed layers was deposited on Al - substrate by dip coating process and chemical bath deposition was used for tin oxide coating over deposited seed layers. Taguchi L18 was utilized for designing the experiments and preparation of required samples for studying the effective parameters (surfactant type and concentration in seed layer, seed layer deposition cycles, and seed layer nature and concentration of precursors). Furthermore, surfactant concentration showed the highest effect on surface wettability. In addition, artificial neural network (ANN) was used for modelling and optimization of process. A multilayer perceptron (MLP) ANN with 4 and 5 neurons in the first hidden layer and second hidden layer, respectively, was obtained as the best network. Optimum point prediction of 142° and 132° was calculated by Taguchi design and ANN modelling, respectively. However, prediction error of 3.5% was calculated comparing with experimental results (137°). J. Color Sci. Tech. 13(2019), 211-222©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Hydrophobic surface, Tin oxide, Seed layer, Taguchi design, Artificial Neural Network.

۱- مقدمه

حرارتی به عنوان عوامل تاثیرگذار بر روی ساختار پوشش بررسی شده‌اند [۱۵-۱۰، ۵].

همان‌طور که در مطالعه پژوهش‌های دیگر دیده می‌شود، بذرایه می‌تواند به وضوح سبب تغییراتی در ترشوندگی پوشش گردد. با این حال، مطالعه جامعی برای درک این تاثیرات دیده نمی‌شود. در پژوهش حاضر، نوع فعال سطح، غلظت فعال سطح، لایه‌های بذریه، جنس بذریه لایه و غلظت پیش‌ماده فلزی بذرایه در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بررسی تجربی عوامل ذکر شده، طراحی آزمایش تاگوچی و برای مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها نیز برای اولین بار از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۳ از نوع پرسپترون چند لایه (MLP)^۴ استفاده شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

ورق آلومینیم (کاملاً خالص و خریداری شده از شرکت مرک، آلمان) با جرم مولکولی ۲۶,۹۸ g/mol و ضخامت ۰,۳ mm به عنوان پایه مورد استفاده قرار گرفته است. اتانل شست و شو با خلوص ۹۶,۴٪، ساخته شده شرکت نصر الکل ایران جهت شست و شوی پایه‌ها استفاده شد. آب مقطر دوبار تقطیر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. دیگر مواد استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مواد شیمیایی.

نام ماده	جرم مولکولی (g/mol)	شرکت سازنده (کشور)	خلوص (%)
هگزامین	۱۴۰,۱۹	لباکمی ^۵ (هند)	۹۹,۵
کلرید قلع (II)	۲۲۵,۶۳	لباکمی (هند)	۹۹,۵
استات آلومینیم	۲۰۳,۹۸	لباکمی (هند)	۹۵
استات نیکل	۲۴۸,۸۴	دائچونگ ^۶ (کره جنوبی)	۹۷
استات روی	۲۱۹,۴۹	مرک (آلمان)	۹۹,۵
دوآبه			
پلی‌وینیل پیرولیدون	۴۰۰۰۰	مرک (آلمان)	۹۹
پلی‌اتیلن گلیکول	۶۰۰۰	بایوبیسیک (کانادا)	۹۹
اسید نیتریک	۶۳,۰۱	مرک (آلمان)	۶۵

3- Artificial neural network

4- Multilayer perceptron

5- Lobachemie

6- Daejung chemicals and methals Co. LTD.

ترشوندگی سطوح، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های کیفیت سطح می‌باشد [۱]. مهم‌ترین مشخصه برای سنجش این ویژگی زاویه تماس است. زاویه تماس عبارتست از، زاویه خط مماس بر منحنی قطره مایع در نقطه سه فازی سطح، مایع و سیال احاطه‌کننده. زمانی که از قطره آب در محیط هوا برای سنجش ترشوندگی سطح استفاده شود، با نام زاویه تماس قطره آب (WCA)^۱ شناخته می‌شود [۲، ۳]. عوامل بسیاری بر روی کیفیت این سطوح تاثیر گذارند که از آن جمله می‌توان به انرژی و زبری سطح اشاره کرد. انرژی سطح بالا به همراه زبری کم سبب میل به آبدوستی و زبری زیاد سطح به همراه انرژی سطح کم نیز سبب میل به آب‌گریزی می‌شود [۱، ۲].

بذرایه، یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار جهت دستیابی به یک پوشش مناسب است. در سال‌های اخیر بذرایه‌ها به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند. ترشوندگی سطح، کاملاً وابسته به ساختار است. زبری سطح نیز مهم‌ترین مشخصه ساختاری سطح می‌باشد که سبب تغییرات خواص ترشوندگی سطح می‌شود. انرژی سطح تا حد زیادی وابسته به جنس سطح می‌باشد. بنابراین، تغییر زبری سطح می‌تواند هدف اصلی در دستیابی به سطوحی با شرایط آب‌گریزی و آبدوستی خاص باشد. افزایش زبری سطح می‌تواند باعث به دام انداختن بسته‌هایی از هوا در ساختار خود شود. این پدیده سبب ارتباط قطرات آب با هوای کاملاً آب‌گریز به جای سطح آبدوست می‌شود که افزایش زاویه تماس و آب‌گریزی سطح را به دنبال دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بذرایه‌ها می‌توانند با تاثیرگذاری بر مرحله هسته‌زایی و رشد پوشش بر روی سطح، به بهبود زبری سطح و در نتیجه زاویه تماس، کمک کنند [۴-۷].

مطالعات محدودی برای نشان دادن نوع و میزان تاثیرگذاری بذرایه بر روی پوشش‌ها در سال‌های اخیر گزارش شده است. سانگ و لیم [۸] در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی را در زمینه نوع و ضخامت بذرایه در پوشش‌دهی انجام داده‌اند. در نتیجه این پژوهش بیان شده است که نوع بذریه بر روی نوع ساختار نانوپوشش (ضخامت و چگالی نانوسیم‌ها) تاثیرگذار است. همچنین افزایش ضخامت بذریه با افزایش قطر نانوسیم‌ها گزارش شده است. لی و همکارانش [۹] نیز در سال ۲۰۰۸، بذرنشانی، دما و ضخامت را مورد بررسی قرار داده‌اند. روش لیزر ضربانی در پژوهش مذکور مورد استفاده قرار گرفته است که در نتیجه تغییرات دما در بذرنشانی با استفاده از این روش، یک دمای بهینه گزارش شده است. همچنین افزایش ضخامت بذریه سبب افزایش چگالی میله‌ها و همچنین کاهش^۲ FWHM می‌شود. در پژوهش‌های دیگر نیز فشار جزئی اکسیژن در محیط بذرنشانی و عملیات حرارتی، وجود و عدم وجود بذریه، زمان رشد، تابش فرابنفش و دمای عملیات

1- Water contact angle

2- Full Width at Half-Maximum

۲-۲- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش تاگوچی، یکی از روش‌های رایج بررسی تاثیر عوامل مختلف بر فرآیند می‌باشد که با مشخص کردن آزمایش‌های تجربی خاصی، امکان مطالعه تاثیر عوامل مختلف را فراهم می‌سازد. البته در این طراحی فرض بر این است که برهم‌کنش قابل توجهی بین این عوامل وجود ندارد. از آنجا که پیش از این در مورد پوشش آبگریز اکسید قلع و تعیین اثر عوامل مرتبط با بذری لایه بر روی ترشوندگی مطالعه جامعی انجام نگرفته بود، اطلاعاتی از میزان برهم‌کنش بین آنها وجود نداشت. پس از طراحی تاگوچی صرفاً به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها، غربال کردن فاکتورها و تعیین میزان اهمیت و رتبه‌بندی آنها استفاده شده است. در این پژوهش برای مطالعه تاثیر نوع فعال سطح، غلظت فعال سطح، مراحل بذرنشانی، جنس بذری و غلظت پیش‌ماده بذری بر ترشوندگی سطوح اکسید قلع، طراحی تاگوچی مورد استفاده قرار گرفته است. هر کدام از این پارامترها در سطوح خاصی در نظر گرفته شدند که این سطوح در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۲- تهیه نمونه‌ها

فرآیند تجربی ایجاد پوشش بر روی سطح آلومینیم، طی سه مرحله صورت پذیرفت؛ آماده‌سازی پایه، بذرنشانی و پوشش دهی. در مرحله اول آماده‌سازی پایه‌ها انجام گرفت. برای این کار در ابتدا پایه‌ها با آب به طور کامل شسته شدند. در ادامه شست و شوی پایه در آب مقطر و حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. سپس پایه‌ها در حمام فراصوت (۲۰۰ W) با اتانل به مدت ۱۵ دقیقه شسته شدند. اچ کردن^۱ اسیدی نیز با اسید نیتریک ۴ M به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد.

بذرنشانی بر روی پایه‌های آماده شده نیز با استفاده از فرآیند غوطه‌وری^۲ انجام گرفت. هر مرحله بذرنشانی شامل سه قسمت غوطه‌وری ۴۵ دقیقه ای بود که بین آنها نیز یک مرحله خشک کردن ۱۵ دقیقه‌ای در دمای ۱۵۰°C در نظر گرفته شد. مرحله تکمیلی هر بذرنشانی نیز کلسیناسیون در دمای ۴۰۰°C به مدت ۹۰ دقیقه بوده است.

1- Etching

2- Deep-coating

جدول ۲: عوامل و سطوح در نظر گرفته شده برای طراحی آزمایش.

مشخصه	واحد	علامت اختصاصی	سطح
نوع فعال سطح	-	A	PEG A1
			PVP A2
			۰,۰۱ B1
غلظت فعال سطح	(mM)	B	۰,۰۳ B2
			۰,۰۵ B3
			۱ C1
مراحل بذرنشانی	-	C	۲ C2
			۳ C3
			Zn D1
جنس بذری	-	D	Ni D2
			Al D3
			۵ E1
غلظت پیش‌ماده بذرنشانی	(mM)	E	۱۰ E2
			۱۵ E3

روش لایه‌نشانی حمام شیمیایی (CBD)^۱ نیز به عنوان روش پوشش‌دهی بر روی بذریه‌ها در دستور کار قرار گرفت. برای دستیابی به یک محیط پوشش‌دهی یکنواخت، از یک همزن مغناطیسی با سرعت ۳۵۰ rpm استفاده شد. پس از رسیدن به دمای جوش، محلول پوشش‌دهی به مدت یک ساعت در دمای ثابت نگه داشته شد تا پوشش یکنواختی بر روی سطح ایجاد شود. به این ترتیب بر اساس جدول طراحی آزمایش (جدول ۳) تمام نمونه‌های مورد نیاز ساخته شدند.

گرفت. در ادامه FESEM (model MIRA3, operating at 15.0 kV) برای بررسی ریخت سطح استفاده شد. نقطه اساسی برای مشخصه‌یابی در این مطالعه، اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب بر روی سطح بوده است. زاویه تماس با استفاده از یک میکروسکوپ نوری دیجیتالی (DINOLITE, model AM-4113ZT, Taiwan) و قرارگیری قطرات آب ۵ میکرولیتری بر روی سطح محاسبه شد.

1- Chemical bath deposition

2- Fourier-transform infrared spectroscopy

۴-۲- مشخصه‌یابی نمونه‌ها

سطح پوشش بهینه در ابتدا با استفاده از آزمون FT-IR^۲

جدول ۳: آزمایش‌های انجام شده در طراحی آزمایش تاگوچی L₁₈.

شماره نمونه	مشخصه‌ها و سطوح					پاسخ (°)
	E	D	C	B	A	
Y01	E1	D3	C1	B1	A1	۱
Y02	E2	D2	C2	B1	A1	۲
Y03	E3	D1	C3	B1	A1	۳
Y04	E2	D3	C1	B2	A1	۴
Y05	E3	D2	C2	B2	A1	۵
Y06	E1	D1	C3	B2	A1	۶
Y07	E1	D2	C1	B3	A1	۷
Y08	E2	D1	C2	B3	A1	۸
Y09	E3	D3	C3	B3	A1	۹
Y10	E3	D1	C1	B1	A2	۱۰
Y11	E1	D3	C2	B1	A2	۱۱
Y12	E2	D2	C3	B1	A2	۱۲
Y13	E3	D2	C1	B2	A2	۱۳
Y14	E1	D1	C2	B2	A2	۱۴
Y15	E2	D3	C3	B2	A2	۱۵
Y16	E2	D1	C1	B3	A2	۱۶
Y17	E3	D3	C2	B3	A2	۱۷
Y18	E1	D2	C3	B3	A2	۱۸

۲-۵- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی، شبکه‌ای از اجزا متصل به هم می‌باشد که اجزا اصلی آن نیز نورون‌ها^۱ و خطوط انتقال‌دهنده سیگنال هستند. این روش، برای شبیه‌سازی یک ساختار تابع گونه جهت پاسخگویی به سیگنال‌های ورودی و خروجی از نورون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نورون‌ها یک پردازشگر می‌باشند که یک یا چند ورودی را گرفته و با انجام پردازش‌هایی بر آن، خروجی متناسب آن را ارائه می‌دهند. در این مطالعه شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP)^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. یک شبکه MLP شامل سه لایه و یا بیشتر می‌باشد. هر MLP شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه میانی است که لایه‌های میانی وظیفه انجام پردازش بر روی داده‌های ورودی را دارند. تبدیل ورودی به خروجی با استفاده از یک سری ضرایب وزنی انجام می‌شود که این ضرایب همواره در بازه [۱، -۱] هستند.

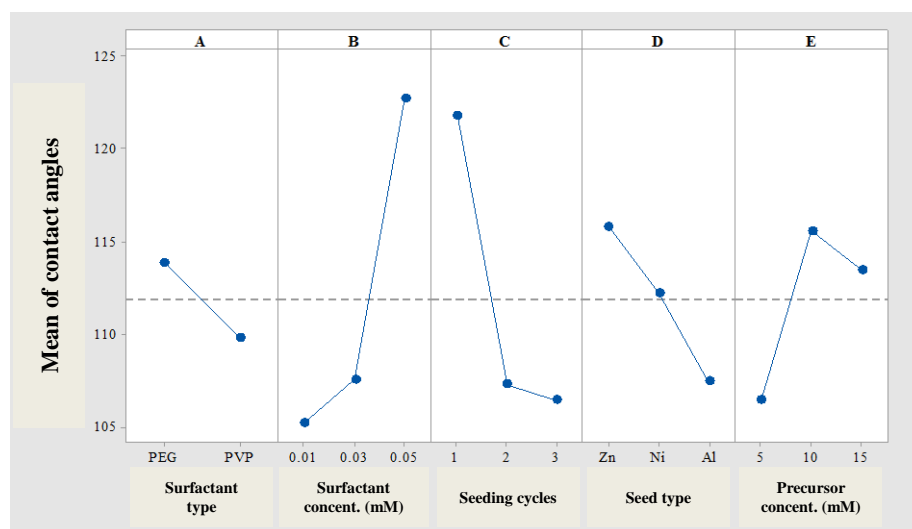
داده‌های ورودی به یک MLP به سه قسمت تقسیم‌بندی می‌شوند که دسته اول آن شامل آموزش می‌باشد. معمولاً ۷۰٪ داده‌های موجود در فرآیند، برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۱۵٪ داده‌ها نیز برای اعتبارسنجی و در نهایت ۱۵٪ از داده‌ها نیز برای آزمودن شبکه استفاده می‌شوند. MSE^۳ یک مشخصه مهم برای آزمودن MLP می‌باشد. در این مطالعه، یک شبکه عصبی با دو لایه میانی مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب تعداد نورون‌های بهینه در لایه‌ها با در نظر گرفتن MSE بهینه انجام شد.

۳- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن نمونه‌های سنتز شده طبق جدول تاگوچی می‌توان اثرات اصلی مشخصه‌های مهم را پیش‌بینی کرد. در این پژوهش،

زاویه تماس قطره آب به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شده و براساس آنالیز میانگین پاسخ‌ها، میزان اثر فاکتورها مشخص شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، افزایش غلظت فعال سطح سبب بهبود کیفیت سطح (افزایش زاویه تماس) و افزایش مراحل بذرنشانی نیز سبب کاهش زاویه تماس قطره آب بر روی پوشش شده است. همچنین، PEG در بذر لایه، پوشش را به سمت آبگریزی و PVP نیز سطح را به سمت آب‌دوستی میل داده است. همان‌طور که پیش از این نیز مورد اشاره قرار گرفت، استات نیکل، روی و آلومینیم به عنوان پیش‌ماده بذرنشانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این بین، استات روی سبب بیشترین آبگریزی و استات آلومینیم به بیشترین آب‌دوستی بین سه نوع بذر یاد شده منجر شده است. با توجه به مطالعات پیشین، بذر روی در بسیاری از مطالعات برای دستیابی به پوشش‌های فوق آب‌گریز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶، ۱۷]. بذر روی برای دستیابی به پوشش‌های فوق آب‌گریز در مطالعات مختلفی استفاده شده است که از جمله آنها می‌توان به مطالعه تیان^۴ و همکارانش [۱۸] اشاره کرد. ژنگ و کیو^۵ [۱۹] نیز نشان دادند که حضور Al می‌تواند یکنواختی بذر را کم کرده و با ضخیم‌تر کردن بذر، نقش آن در ایجاد ساختارهای عمود بر سطح و افزایش زاویه تماس را کم می‌کند. برای غلظت مواد استاتی در محلول غوطه‌وری نیز یک پاسخ بیشینه در غلظت ۱۰ mM دیده شده است. به این ترتیب، میزان بیشینه زاویه تماس در بازه‌های مفروض طی یک مرحله لایه‌نشانی با استفاده از PEG با غلظت ۰،۰۵، استات نیکل با غلظت ۱۰ mM به دست می‌آید.

- 1- Neurons
- 2- Multi-layer perceptron
- 3- Mean Squared Error
- 4- Tian
- 5- Zheng and que



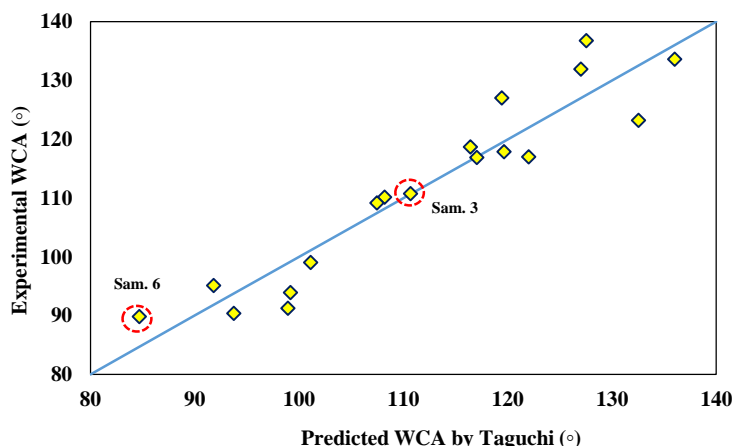
شکل ۱: نمودار تاثیر مشخصه‌های مختلف.

برای این نمونه بهینه ۳،۵٪ خواهد بود. تصویر ریز ساختاری حاصل از SEM در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شمار بسیار زیادی از حفرات و زبری‌های میکرو-نانو بر روی سطح ایجاد شده است. این حفرات علت اصلی دست‌یابی به زاویه تماس‌های بالا و خواص آب‌گریزی می‌باشند. به طور کلی، برهم‌کنش‌های سه‌فازی قطره آب، هوا و سطح جامد تعیین‌کننده زاویه تماس می‌باشند. انرژی سطح و زبری نیز دو مشخصه اصلی سطح می‌باشند که زاویه تماس را مشخص می‌کنند. به طور کلی، سطوح فلزات دارای انرژی سطح بالا و در نتیجه، خواص آب‌دوستی می‌باشند [۲۱، ۲۰]. این درحالی است که میزان زبری سطح را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف، نظیر بذرنشانی کنترل کرد. افزایش زبری سطح سبب به دام افتادن بسته‌های هوا بین ساختار زبری سطح می‌شود. در نتیجه، به جای ارتباط قطره آب با سطح آب‌دوست، در تماس با هوای کاملاً آب‌گریز خواهد بود.

پس از بذرنشانی و پوشش‌دهی، به منظور اطمینان از شکل‌گیری ترکیبات Sn بر روی سطح، آزمون FT-IR را می‌توان مورد استفاده قرار داد. ساگادوان^۱ و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۱۵ بر روی خواص نوری-الکتریکی پوشش‌های نانو ساختار SnO₂ مطالعاتی را انجام داده‌اند. در این مطالعه، طیف FT-IR پوشش SnO₂ تولید شده به روش CBD گزارش شده است. بر این اساس، پیک‌های موجود در ۶۱۰ و ۶۷۴ cm⁻¹ به ترتیب مربوط به پیوندهای Sn-O و O-Sn-O می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۴ آورده شده است، در نمونه پودر محلول CBD حاصل از این پژوهش نیز قله‌های اشاره شده دیده می‌شود که حکایت از شکل‌گیری پیوندهای مورد نظر و در نتیجه تشکیل اکسید قلع دارد. علاوه بر این قله‌ها، قله‌هایی در

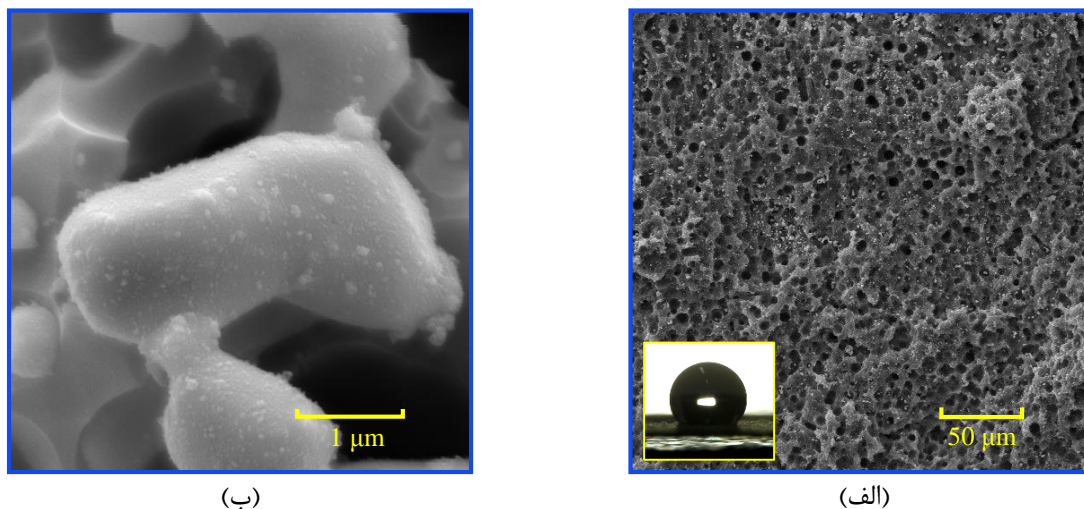
مطالعات پیشین نشان می‌دهند که برای غلظت بذرایه نیز یک مقدار بهینه وجود دارد. افزایش غلظت بذرایه در محلول بذرنشانی می‌تواند به افزایش ضخامت بذر و کاهش آن نیز منجر به کاهش ضخامت بذر خواهد شد. ضخامت بسیار زیاد و بسیار کم باعث از بین رفتن تاثیر بذرایه می‌شود [۹، ۸]. علاوه بر این، با استفاده از نتایج شکل ۱ می‌توان در مورد رتبه‌بندی مشخصه‌ها نیز صحبت کرد. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییرات غلظت فعال سطح منجر به بیشترین تغییرات در پاسخ شده است. از این رو، غلظت فعال سطح از نظر میزان تاثیر، دارای بیشترین اهمیت می‌باشد. پس از آن نیز مراحل بذرنشانی، غلظت پیش‌ماده بذر، جنس بذر و نوع فعال سطح به ترتیب رتبه‌های تاثیرگذاری بعدی را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین در شکل ۲ نیز مقایسه مقادیر تجربی حاصل از ساخت نمونه‌های به دست آمده از طراحی آزمایش در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی تاگوچی آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج تجربی مطابقت خوبی با نتایج حاصل از طراحی تاگوچی داشته‌اند. به طور مثال برای نمونه شماره ۳، نتایج تجربی کاملاً بر روی نتایج حاصل از پیش‌بینی تاگوچی منطبق شد. برای نمونه شماره ۶ نیز نتایج تجربی مقدار بیشتری نسبت نتایج پیش‌بینی تاگوچی نشان می‌دهد. جدول نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مربوط به پاسخ‌های جدول طراحی (زاویه تماس قطره آب) با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز برای پاسخ‌ها در فایل داده‌های پشتیبان به مقاله پیوست شده است.

با توجه به شکل ۱، نمونه‌ای با فعال سطح PEG و غلظت ۰،۰۵ mM در یک مرحله فرآیند بذرنشانی با استفاده از استات روی با غلظت ۱۰ mM دارای بیشترین زاویه تماس خواهد بود. از این رو، نمونه مذکور ساخته شد و زاویه تماس آن نیز مورد محاسبه قرار گرفت. زاویه تماس این نمونه برابر ۱۳۷° به دست آمد (شکل ۳ الف). میزان بیشینه زاویه تماس برای این نمونه طبق پیش‌بینی تاگوچی نیز ۱۴۲،۳۹° محاسبه شد. بنابراین میزان خطای پیش‌بینی

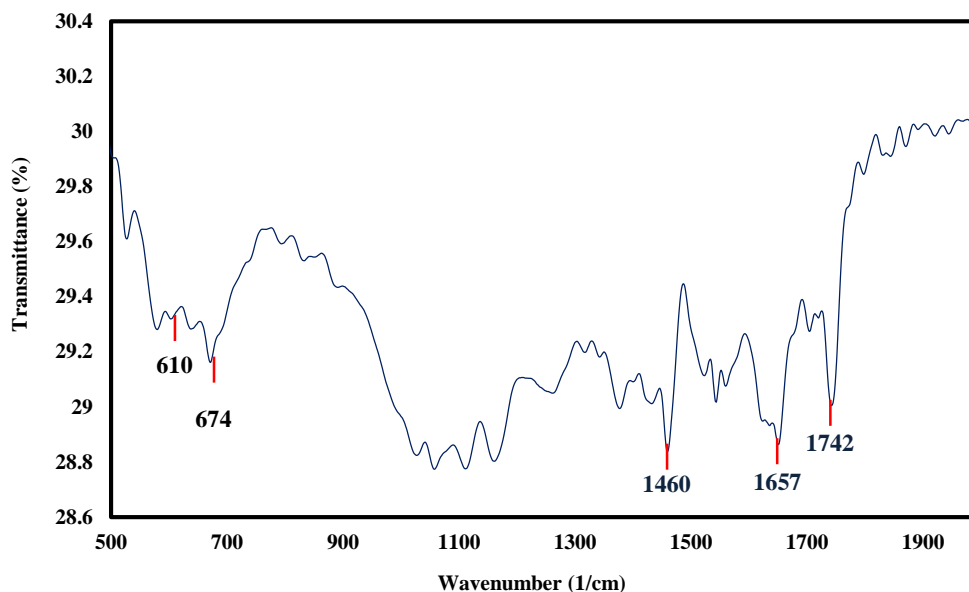


شکل ۲: پیش‌بینی‌های حاصل شده از طراحی تاگوچی در مقایسه با مقادیر تجربی زاویه تماس در نمونه‌های مختلف.

1- Sagadevan



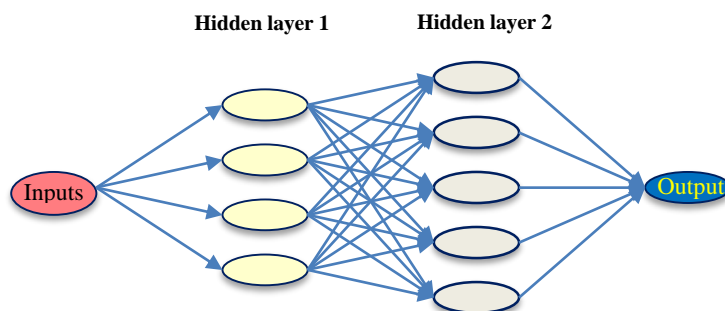
شکل ۳: تصویر SEM و زاویه تماس پوشش ایجاد شده بر روی بذر بهینه الف) مقیاس ۵۰ μm به همراه تصویر زاویه تماس و ب) مقیاس ۱ μm.



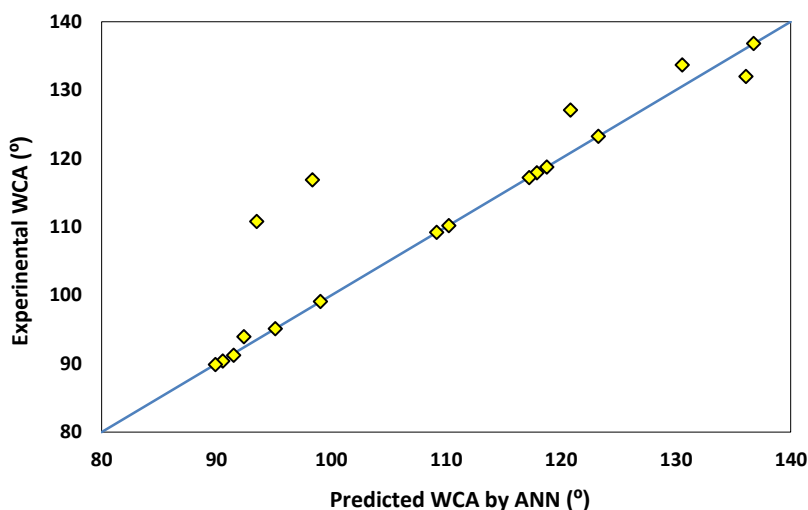
شکل ۴: طیف FT-IR مربوط به پودر پوشش دهی بر روی بذر بهینه.

شمای شبکه عصبی بهینه در شکل ۵ آورده شده است. میزان R عمومی برای مدل به دست آمده برابر ۰,۹۲۹۸ محاسبه شد. در شکل ۶ نیز مقایسه داده‌های تجربی و نتایج حاصل از شبکه عصبی آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این دو دسته از مقادیر زاویه تماس، مطابقت مطلوبی با هم دارند. بر همین اساس، شبکه مدل شده می‌تواند جهت پیش‌بینی دیگر مشخصه‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.

۱۴۶۰ و 1657 cm^{-1} وجود دارد که نشان‌دهنده پیوندهای کربن-کربن می‌باشد. همچنین قله موجود در 1742 cm^{-1} نمایانگر پیوند اتم کربن با اتم اکسیژن است. این پیوندها، حاصل از حضور فعال سطح PEG در نمونه بهینه است. MLP برای مدل‌سازی داده‌های تجربی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. شبکه عصبی بهینه با توجه به داده‌های ورودی شامل ۴ نورون در لایه میانی اول و ۵ نورون در لایه میانی دوم می‌باشد.



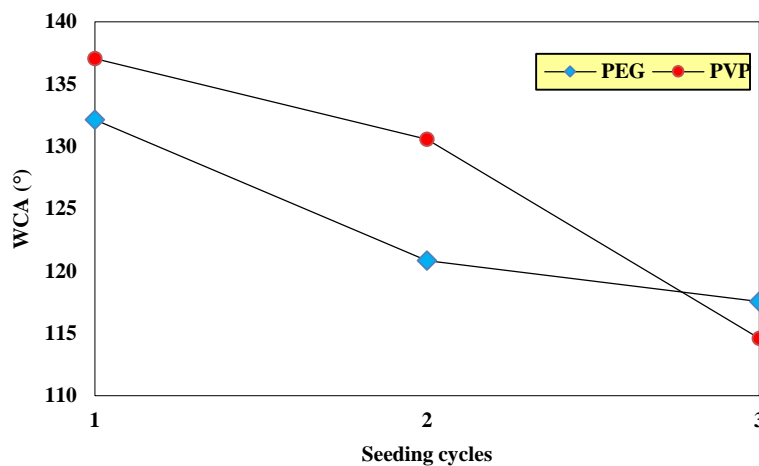
شکل ۵: شبکه بهینه طراحی شده برای پیش‌بینی نتایج این پژوهش.



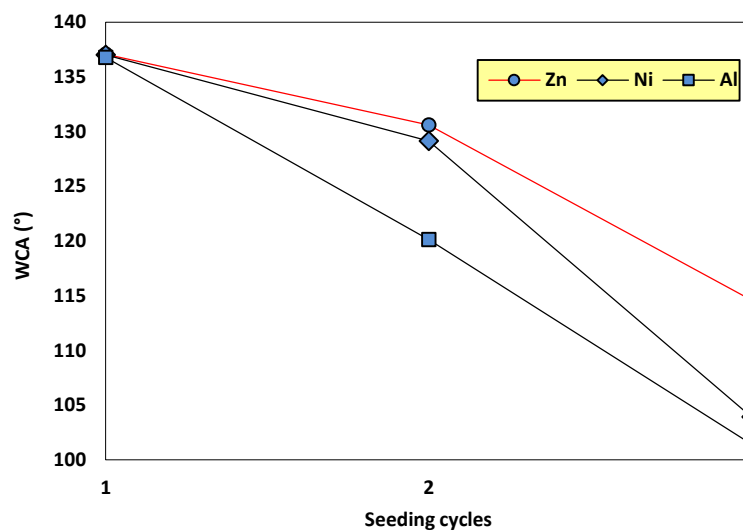
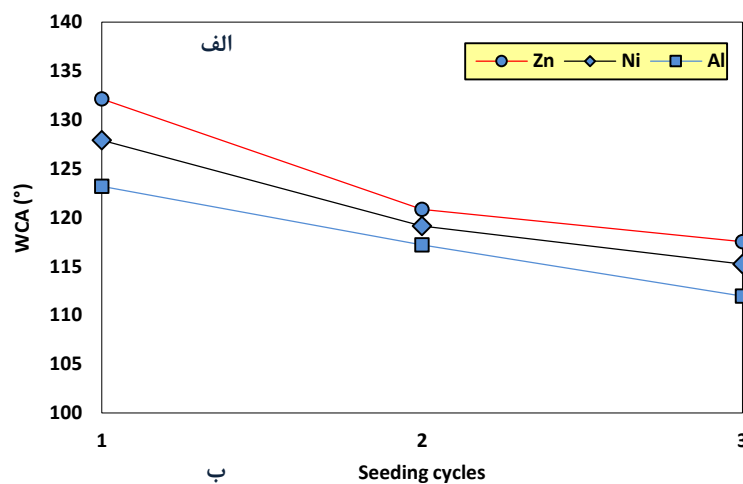
شکل ۶: پیش‌بینی‌های حاصل شده از ANN در مقایسه با مقادیر تجربی زاویه تماس در نمونه‌های مختلف.

قطرات آب، کاهش پیدا خواهد کرد. در شکل ۸ نیز تاثیر مراحل بذرنشانی، نوع فعال سطح و نوع بذر بر روی WCA آورده شده است. در قسمت الف نتایج مربوط به فعال سطح PEG آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در همه نقاط، بذر لایه حاوی Zn دارای آب‌گریزی بیشتری نسبت به بذرهای دیگر می‌باشد. همچنین بذرایه AI آب‌دوست‌ترین سطح بین بذرهای موجود را ارائه می‌دهد. در قسمت ب نیز بذرهای ایجاد شده با استفاده از PVP آورده شده‌اند. نتایج حاصل از این قسمت نیز مشابه حالت الف می‌باشد و برای تمام حالات، بذرایه حاوی Zn بیشترین آب‌گریزی را ایجاد کرده است. به طور کلی، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزایش تعداد مراحل بذرنشانی می‌تواند سبب افزایش ضخامت بذر و تبدیل آن از یک لایه نازک بذر به پوششی پیوسته شود. بنابراین، نقش بذرایگی نخواهد داشت و کاهش زاویه تماس را بدنبال خواهد داشت. همچنین در بسیاری از موارد دیده شده است که بذرایه حاوی روی سبب دستیابی به پوشش‌های فوق آب‌گریز شده است [۱۶، ۱۷].

از نتایج شبکه عصبی نیز برای پیش‌بینی نقطه بهینه می‌توان استفاده کرد. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، با توجه به نتایج طراحی تاگوچی، پوشش‌دهی بر روی بذر حاوی روی با غلظت ۰,۰۵ mM در محلول غوطه‌وری به همراه PVP با غلظت ۰,۰۵ mM طی یک مرحله بذرنشانی، به بیشینه زاویه تماس منجر خواهد شد. با توجه به نتایج تجربی، در نقطه بهینه میزان زاویه تماس 137° به دست آمد. نتایج ANN در این نقطه نیز $132,15^\circ$ می‌باشد که نشان‌دهنده حدود ۳,۵٪ خطا می‌باشد. البته باید توجه داشت که با توجه به نتایج اشاره شده در شکل ۷، مدل‌سازی ANN سطوح پوشش داده شده بر روی بذر حاوی PVP را آب‌گریزتر نشان می‌دهد. با این حال میزان اختلاف بین دو ماده در نقطه بهینه حدود ۵ درجه می‌باشد که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تاثیر کم نوع فعال سطح باشد. به هر حال در همه حالات، با افزایش تعداد لایه‌های بذر، میزان زاویه تماس کاهش پیدا می‌کند. با توجه به مباحث مطرح شده در مقدمه، افزایش ضخامت بذر می‌تواند سبب افزایش ضخامت پوشش و در نتیجه کاهش به دام افتادن هوا در ساختارهای میکرونانویی موجود در سطح گردد. از همین رو میزان زاویه تماس



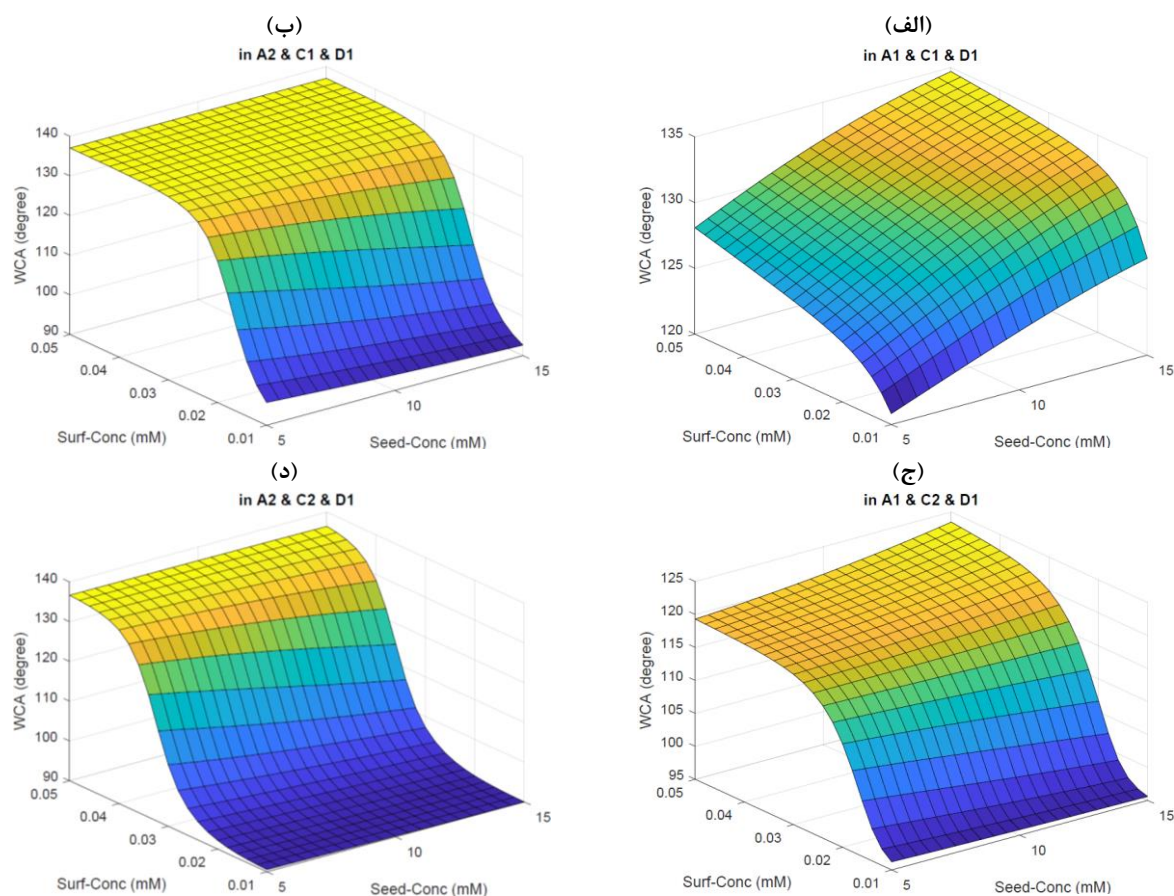
شکل ۷: تاثیر مراحل بذر نشانی بر روی زاویه WCA با بذر Ni در غلظت ۱۰ mM و غلظت فعال سطح ۰.۰۵ mM.



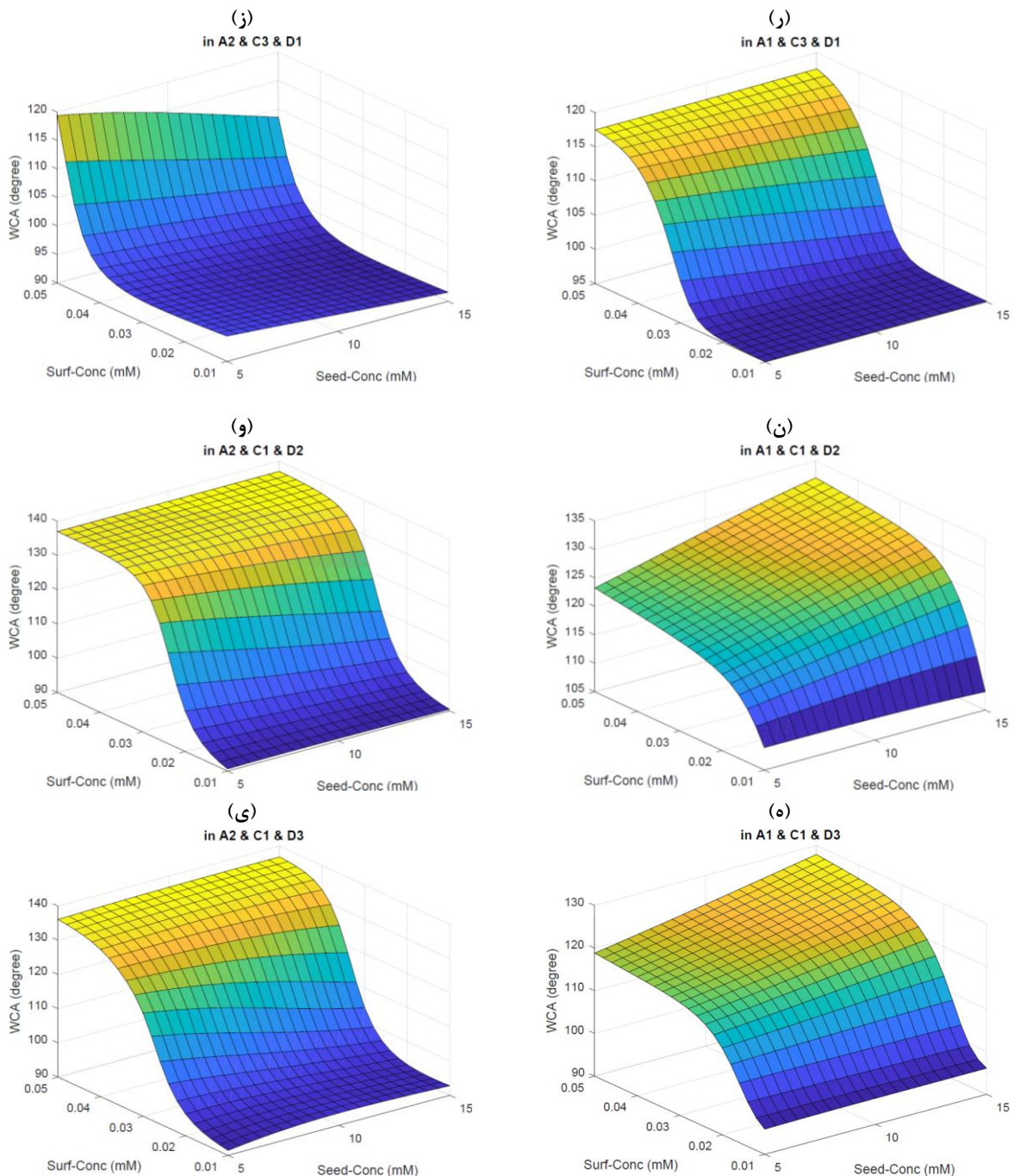
شکل ۸: تغییرات WCA نسبت به مراحل بذر نشانی با الف) استفاده از PEG در محلول غوطه‌وری و ب) با استفاده از PVP در محلول غوطه‌وری.

این پدیده نیز قدرت PVP در مقایسه با PEG در ایجاد پوشش و نشانیدن بذرها بر روی سطح است. PVP در غلظت‌های مختلف می‌تواند منجر به بذری برابر شود. بنابراین، تاثیر تغییرات غلظت استات روی از بین می‌رود. در قسمت (ج) و (د) از شکل ۹ نیز دو مرحله بذرنشانی با فعال سطح‌های PEG و PVP در نظر گرفته شده است. به صورت کلی، افزایش مراحل بذرنشانی سبب کاهش زاویه تماس شده است. با وارد شدن به سه مرحله بذرنشانی (ر) و (ز)، میزان زاویه تماس به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، در شکل‌های بعدی تنها یک مرحله بذرنشانی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در (ن) و (و) دیده می‌شود، اضافه شدن استات نیکل به جای استات روی سبب کاهش زاویه تماس شده است و در قسمت (ه) و (ی) نیز این زاویه تماس با اضافه شدن استات آلومینیم به مقدار حداقلی می‌رسد. نکته مهمی که از این شکل‌های می‌توان دریافت کرد، عدم وجود تغییرات بسیار زیاد برای فعال سطح PVP در شرایط مختلف است. به نظر می‌رسد، تغییر شرایط چندان نمی‌تواند بر روی ساختار بذرایه حاصل از PVP تاثیرگذار باشد.

غلظت فعال سطح در بذرایه و غلظت پیش‌ماده فلزی، دو مشخصه عددی پیوسته در این پژوهش می‌باشند که رسم رویه‌ها با توجه به تغییرات این مشخصه‌ها قابل انجام می‌باشد. رویه‌های سه‌بعدی، ابزاری مناسب برای درک تغییرات مشخصه‌های مختلف طی یک فرآیند می‌باشند. در شکل ۹، برخی از مهم‌ترین رویه‌های ممکن برای داده‌های حاضر آورده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی مناسبی در مورد افزایش زاویه تماس با افزایش غلظت فعال سطح دارد. این در حالی است که پیش‌بینی آن در مورد وجود نقطه بحرانی (بیشینه زاویه تماس در غلظت ۱۰ mM از پیش‌ماده فلزی) چندان مناسب نیست. در تمام قسمت‌های شکل ۹، محورهای نشان دهنده مشخصه‌های ثابتی می‌باشند و تفاوت آنها تنها در شرایط ۳ مشخصه دیگر است. در قسمت (الف)، فعال سطح PEG در یک مرحله بذرنشانی و با استفاده از استات روی در محلول بذرنشانی آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش غلظت فعال سطح و استات روی، افزایش در میزان زاویه تماس دیده می‌شود. این در حالی است که اضافه کردن PVP به جای PEG سبب کم شدن تاثیر افزایش غلظت استات روی می‌شود (قسمت ب). دلیل



شکل ۹: رویه‌های سه‌بعدی میزان WCA بر حسب غلظت فعال سطح و غلظت پیش‌ماده فلزی در شرایط مختلف.



شکل ۹: ادامه.

غوطه‌پوری با استفاده از PEG در غلظت ۰,۰۵ mM و استات روی در غلظت ۱۰ mM طی یک مرحله بذرنشانی منجر به بالاترین زاویه تماس (حدود 137°) به عنوان نقطه بهینه شده است. هر دو روش طراحی تاگوچی (با پیش‌بینی 142°) و شبکه عصبی مصنوعی (با پیش‌بینی 132°) قادر به پیش‌بینی مقدار بهینه زاویه تماس با خطایی حدود ۳,۵٪ بوده‌اند. به هر حال، در بین مشخصه‌های ذکر شده، غلظت فعال سطح و پس از آن نیز مراحل بذرنشانی بیشتری تاثیر را بر روی میزان آب‌گریزی سطح داشته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

بذرنشانی یکی از روش‌های ایده‌آل برای کنترل خواص سطح برای دستیابی به ویژگی‌های مناسب می‌باشد. بر این اساس، در مطالعه تجربی حاضر، تغییرات ترشوندگی سطح آلومینیم پوشش داده شده با اکسید قلع با تغییر خواص بذر مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی آزمایش تاگوچی و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند بذرنشانی مورد استفاده قرار گرفته است. بذرنشانی به روش

۵- مراجع

1. S. S. Moosavi, R. Norouzbeigi, E. Velayi, Fabrication of flower-like micro/nano dual scale structured copper oxide surfaces: Optimization of self-cleaning properties via Taguchi design. *Appl. Surf. Sci.* 422 (2017), 787–797.
2. E. Velayi, R. Norouzbeigi, Robust superhydrophobic needle-like nanostructured ZnO surfaces prepared without post chemical-treatment. *Appl. Surf. Sci.* 426 (2017), 674–687.
3. E. Velayi, R. Norouzbeigi, Annealing temperature dependent reversible wettability switching of micro/nano structured ZnO superhydrophobic surfaces. *Appl. Surf. Sci.* 441 (2018), 156–164.
4. J. Song, S. Lim, Effect of seed layer on the growth of ZnO nanorods. *J. Phys. Chem. C* 111 (2007) 596–600.
5. Y. Tao, M. Fu, A. Zhao, D. He, Y. Wang, The effect of seed layer on morphology of ZnO nanorod arrays grown by hydrothermal method. *J. Alloys Compd.* 489 (2010), 99–102.
6. S. Wei, J. Lian, X. Chen, Q. Jiang, Effects of seed layer on the structure and property of zinc oxide thin films electrochemically deposited on ITO-coated glass. *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008), 6605–6610.
7. H. Zhou, G. Fang, N. Liu, X. Zhao, Ultraviolet photodetectors based on ZnO nanorods-seed layer effect and metal oxide modifying layer effect. *Nanoscale Res. Lett.* 6 (2011), 147.
8. Z. Zuo, R. Liao, C. Guo, Y. Yuan, X. Zhao, A. Zhuang, Y. Zhang, Fabrication and anti-icing property of coral-like superhydrophobic aluminum surface. *Appl. Surf. Sci.* 331 (2015), 132–139.
9. C. Li, G. Fang, J. Li, L. Ai, B. Dong, X. Zhao, Effect of seed layer on structural properties of ZnO nanorod arrays grown by vapor-phase transport. *J. Phys. Chem. C* 112 (2008), 990–995.
10. L. E. Greene, M. Law, D. H. Tan, M. Montano, J. Goldberger, G. Somorjai, P. Yang, General route to vertical ZnO nanowire arrays using textured ZnO seeds. *Nano Lett.* 5 (2005), 1231–1236.
11. J. Zhang, Z. Liu, J. Liu, E. Lei, Z. Liu, Effects of seed layers on controlling of the morphology of ZnO nanostructures and superhydrophobicity of ZnO nanostructure/stearic acid composite films. *Mater. Chem. Phys.* 183 (2016), 306–314.
12. K. A. Wahid, W. Y. Lee, H. W. Lee, A. S. Teh, D. C. S. Bien, I. A. Azid, Effect of seed annealing temperature and growth duration on hydrothermal ZnO nanorod structures and their electrical characteristics. *Appl. Surf. Sci.* 283 (2013), 629–635.
13. J. S. Park, I. Mahmud, H. J. Shin, M. K. Park, A. Ranjkesh, D.K. Lee, H.-R. Kim, Effect of surface energy and seed layer annealing temperature on ZnO seed layer formation and ZnO nanowire growth. *Appl. Surf. Sci.* 362 (2016), 132–139.
14. T. L. Chen, J. M. Ting, Correlation between seed layer characteristics and structures/properties of chemical bath synthesized ZnO nanowires. *Surf. Coatings Technol.* 303 (2016), 197–202.
15. K. Gautam, I. Singh, P. K. Bhatnagar, K. R. Peta, The effect of growth temperature of seed layer on the structural and optical properties of ZnO nanorods. *Superlattices Microstruct.* 93 (2016) 101–108.
16. P. S. Kumar, J. Sundaramurthy, X. Zhang, D. Mangalaraj, V. Thavasi, S. Ramakrishna, Superhydrophobic and antireflecting behavior of densely packed and size controlled ZnO nanorods. *J. Alloys Compd.* 553 (2013), 375–382.
17. P. S. Kumar, A. D. Raj, D. Mangalaraj, D. Nataraj, N. Ponpandian, L. Li, G. Chabrol, Growth of hierarchical based ZnO micro/nanostructured films and their tunable wettability behavior. *Appl. Surf. Sci.* 257 (2011), 6678–6686.
18. D. Tian, X. Zhang, X. Wang, J. Zhai, L. Jiang, Micro/nanoscale hierarchical structured ZnO mesh film for separation of water and oil. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 13 (2011), 14606–14610.
19. J. Zhang, W. Que, Preparation and characterization of sol-gel Al-doped ZnO thin films and ZnO nanowire arrays grown on Al-doped ZnO seed layer by hydrothermal method. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 94 (2010), 2181–2186.
20. Y. Tian, L. Jiang, Wetting: Intrinsically robust hydrophobicity. *Nat. Mater.* 12(2013), 291-292.
21. W. Hui, G. Guohua, Surface free energy of solid matter and its hydrophilic/hydrophobic nature. *Chemistry (Easton).* 72 (2009), 1091–1096.
22. S. Sagadevan, J. Podder, Optical and electrical properties of nanocrystalline SnO₂ thin films synthesized by chemical bath deposition method. *Soft Nanosci. Lett.* 5 (2015), 55-64.