



ارائه یک مدل پیش بین هوشمند در فرآیند رسوب فیزیکی بخار (PVD) توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA

عابد جعفری^۱، علی خرم^۲، علی محمد عمویی^۳ و سید غلامرضا میرحسینی^۴

^۱. دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران (کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی)

^۲. دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی، تهران (دکترای مکانیک)

^۳. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (دانشجوی دکتری مهندسی متالورژی)

^۴. دانشگاه تکنولوژی هوایی مسکو، مسکو (کارشناسی ارشد هوافضا)

چکیده

فرآیندهای رسوب فیزیکی بخار (PVD)، از جمله روش‌های پوشش‌دهی است که امروزه در صنایع ساخت موتورهای توربینی به خصوص در بخش پوشش کمرسور توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. در این تحقیق با استفاده از دو نوع پوشش TiN و TiNC مورد استفاده در پره‌های کمپرسور موتور توربینی هوایی به روش PVD، براساس ۱۵۶ داده حاصل از نتایج تست‌های آزمایشگاهی در طی فرآیند پوشش‌دهی یک مدل پیش بین هوشمند ارائه شده است. مدل سازی خواص و متغیرهای برای پیش بینی ضخامت و سختی نوع پوشش توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA انجام خواهد شد و در نهایت مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی با نتایج تست آزمایشگاهی، صحت و دقت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: PVD، پوشش TiN و TiNC، الگوریتم رقابت استعماری، شبکه عصبی مصنوعی،

۱- مقدمه

پوشش‌های سخت، دوام مواد زیرلایه در برابر سایش، فرسایش و محیط‌های خوردنده را بهبود می‌دهند، بنابراین عمر پره‌های کمپرسور طولانی می‌شوند. پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش براساس ویژگی‌های پیوند شیمیایی دسته‌بندی می‌شوند: مواد سخت فلزی، کوالانسی یا یونی. مواد سخت فلزی، فلزات واسطه بورید، کاربیدی و

^۱. abedjafari@hitech.iuim.ac.ir

نیتزیدی می‌باشند [۲۰۱]. فرآیندهای رسوب فیزیکی بخار از جمله روش‌هایی هستند که امروزه توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. فرآیند PVD ماهیتی جهت‌دار دارد و معمولاً امکان پوشش‌دهی قطعات با اشکال هندسی پیچیده را فراهم می‌کند و دمای لایه نشانی در این فرآیند نسبتاً پایین است [۴۳]. به این منظور فرآیند رسوب فیزیکی بخار به کمک قوس کاتدی (Arc-PVD) ایجاد لایه‌های سخت مقاوم به فرسایش، سایش و خوردگی از جمله TiN و TiNC روی قطعات با اشکال هندسی پیچیده را فراهم می‌کند [۵]. پوشش‌هایی همچون TiN و TiNC به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فردی مانند سختی بسیار بالا، مقاومت به فرسایش عالی و همچنین چسبندگی مناسب، بر روی پره‌های کمپرسور موتورهای توربینی برای محافظت، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷۶].

در این تحقیق به منظور ارائه دستاوردی نوین در حوزه محاسبات هوش مصنوعی و همچنین افزایش دقت مدل شبکه عصبی و کاهش دامنه موثر MSE شبکه، شبکه عصبی با الگوریتم رقابت استعماری که یک الگوریتم بهینه سازی متاهوریستیک با قابلیت جستجوی عام یا Global است، تلفیق می‌شود که با نام اختصاری Nero-ICA شناخته می‌شود. لذا با توجه به دو نوع پوشش پر کاربرد در صنعت هوایی شامل: TiN و TiNC برای پوشش پره-های کمپرسور موتور توربینی هوایی به روش PVD، براساس الگوریتم ترکیبی Nero-ICA تخمین دقیقی از ضخامت و سختی هر کدام از پوشش‌های فوق انجام می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی با نتایج تست آزمایشگاهی صحت و دقت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است با دسترسی به ضخامت و سختی پوشش و با استفاده از روابط تجربی، می‌توان عمر خوردگی پوشش را نیز محاسبه نمود [۱۰ و ۹].

۲- فرآیند پوشش دهی PVD

امروزه دامنه جدیدی از پوشش‌ها با ساختار نانومتری توسعه یافته است که می‌توان خواص مهندسی ویژه‌ای را در لایه‌های سطحی بوجود آورد که در روش‌های معمولی مقدور نیست. طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی براساس خواص سطح بوده و تنوع ساختارهای نانومتری سبب شده که هر روز کاربردهای وسیع‌تری مطرح شود. شکل ۱ دسته‌بندی نانوپوشش‌ها بر مبنای مواد اولیه مورد استفاده را نشان می‌دهد. در بین روش‌های PVD روش کندوپاش، پوشش‌های صاف‌تر و ریزدانه‌تر تولید می‌کند؛ در صورتی که روش تبخیر قوس الکتریکی پوشش‌های چگال‌تری بدلیل نسبت بالایی از بخار فلز یونیزه شده را ایجاد می‌کند. حین فرآیند تبخیر

قوسی بمباران یون‌های پرنرزی فلزی ممکن است سبب نفوذ آنها به زیرلایه در حدود آنگستروم و به بیرون راندن برخی از اتم‌های سطح شده که سبب بهبود چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌شود. بنابراین چگالی و چسبندگی پوشش‌های PVD حاصل از تبخیر کاتدی قوس الکتریکی، بهتر از روش کندوپاشی می‌باشد. در رسوب فیزیکی بخار یا PVD، پوشش‌ها روی سطوح جامد از طریق چگالش عنصرها و ترکیب‌ها از فاز گازی تولید می‌شوند. تبخیر در خلاء، عمومی‌ترین روش تهیه لایه‌های بسیار خالص و تحت شرایط نسبتاً کنترل شده است. اصول این روش عموماً بر اساس اثرهای کاملاً فیزیکی پایه‌ریزی می‌شود، اما PVD ممکن است در بعضی موارد با واکنش‌های شیمیایی نیز همراه باشد. بعضی از این واکنش‌های شیمیایی عمدتاً در فناوری انباشت لایه-های خاص به کار می‌روند [۸]. با توجه به خواص فیزیکی مناسب پوشش‌های نوع TiN و TiNC جهت کاربرد در صنایع هوایی و موتورهای توربینی هوایی، خواص این دو نوع پوشش برای فرآیند PVD انتخاب شده و براساس ۱۵۶ داده آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، نتایج حاصل از آزمایش با مدلسازی مقایسه خواهد شد. فرآیند پوشش دهی به روش PVD می‌تواند به سه مرحله تقسیم شود: تبخیر^۱، انتقال^۲ و تغلیظ^۳. در این تحقیق، مواد پوشش در دمای بین ۱۸۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و ولتاژ ۶۵ ولت در شرایط خلاء تبخیر می‌شوند. این مواد بمباران یونی شده و بر روی سطح کار فشرده و تغلیظ می‌شوند. قطعات یا سطوح مورد نظر بر روی یک مجموعه گردان با سرعت ۲ تا ۴ دور بر دقیقه قرار داده شده و تحت فشار گازهای نیتروژن و متان قرار می‌گیرند.

۳- ساختار الگوریتم ترکیبی Nero-ICA

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) روشی کاربردی جهت مدلسازی سیستم‌های خطی و غیرخطی، ارائه مدل-های پیش‌بین، کنترل هوشمند فرآیندهای صنعتی و دسته‌بندی مجموعه داده‌ها بکار می‌رود. عنصر کلیدی این ایده، ساختار جدید سیستم پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی بهم پیوسته به نام نرون^۲ تشکیل شده که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می‌کند. یک ANN برای انجام وظیفه‌های مشخص مانند شناسایی الگوها و دسته‌بندی اطلاعات در طول یک پروسه یادگیری تنظیم می‌شود [۹]. در این قسمت الگوریتم جدیدی برای بهینه‌سازی معرفی می‌شود که نه از یک پدیده طبیعی، بلکه از یک پدیده اجتماعی-انسانی الهام گرفته است. بطور ویژه این الگوریتم به فرآیند استعمار، به عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی-سیاسی بشر نگریسته و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده تاریخی، از آن به عنوان منشا الهام یک

¹ evaporation

² transportation

³ condensation

الگوریتم قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. روش‌های هوشمند متداول برای بهینه‌سازی می‌توانند در دو دسته‌ی عمده طبقه‌بندی شوند؛ بهینه‌سازی محلی^۱ و بهینه‌سازی فراگیر یا عام^۲. برای بهینه‌سازی عام، اغلب از روش‌های تکاملی استفاده می‌شود؛ این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی گروه ذرات، بازپخت شبیه‌سازی شده و ... می‌باشند. تکامل فکری و فرهنگی بشر بسیار سریع‌تر از تکامل جسمی و ژنتیکی او صورت می‌پذیرد. بنابراین تکامل فرهنگی و دیدگاهی بشر نیز نادیده گرفته نشده و دسته‌ای از الگوریتم‌ها، موسوم به الگوریتم‌های فرهنگی معرفی شده‌اند. الگوریتم‌های فرهنگی در حقیقت یک دسته کاملاً جدید از الگوریتم‌ها نیستند، بلکه ایده‌ی اصلی این است که این الگوریتم‌ها با افزودن قابلیت تکامل فرهنگی (با افزودن امکان تبادل اطلاعات میان اعضای جمعیت) به الگوریتم‌های موجود، سرعت همگرایی آن‌ها را مطابق انتظار افزایش می‌دهند. این الگوریتم، همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهد [۱۰]. شکل ۲ فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد. لذا به منظور ارائه یک روش جدید در حوزه محاسبات هوش مصنوعی و همچنین افزایش دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی و کاهش دامنه موثر MSE، شبکه عصبی با الگوریتم رقابت تلفیق می‌شود که با نام اختصاری Nero-ICA شناخته می‌شود. در شکل ۳ فلوچارت الگوریتم ترکیبی Nero-ICA ارائه شده است. در این روش ترکیبی تابع MSE بعنوان تابع هدف به الگوریتم ICA اعمال می‌شود که با بهینه‌سازی وزن‌های حاصل از آموزش شبکه عصبی، موجب می‌نمیشود آن می‌گردد. در واقع الگوریتم ICA شبکه عصبی را به منظور تعیین وزن‌های بهینه آموزش می‌دهد. در شکل ۴ بلوک دیاگرام و منطق الگوریتم ترکیبی Nero-ICA ارائه شده است.

در این بخش براساس داده‌های آزمایشگاهی، مدل فرآیند پوشش دهی برای تعیین ضخامت و سختی پوشش آلیاژ تیتانیوم توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA انجام می‌شود. با استفاده از ۱۵۶ داده آزمایشگاهی فرآیند آموزش الگوریتم ترکیبی Nero-ICA جهت حصول بهترین تابع هدف (کمترین مقدار MSE) انجام شده است. به الگوریتم ترکیبی فوق ۵ ورودی شامل: زمان بمباران یونی^۳، زبری زیرلایه^۴، دمای زیرلایه^۵، فشار کاری^۶ و

¹ Local Optimization

² Global Optimization

³ Ion bombardment time

⁴ Sub-layer roughness

⁵ Sub-layer temperature

⁶ Work pressure

فشار محفظه^۱ و دو خروجی شامل: ضخامت^۲ و سختی پوشش^۳ نسبت داده می‌شود. برای هر کدام از پوشش‌های فوق بطور جداگانه، الگوریتم ترکیبی Nero-ICA توسط ۱۵۶ داده آزمایشگاهی، با ۷۰ درصد داده‌ها آموزش می‌بیند. پس از مرحله آموزش با ۳۰ درصد حجم داده‌ها، مورد ارزیابی و تست قرار گرفته و مجموع مربعات خطا^۴ حداقل می‌گردد. لذا به ازای هر کدام از دو نوع پوشش فوق، داده‌های مربوطه به منظور آموزش شبکه ارائه شده و خروجی‌های مورد نظر شامل سختی و ضخامت پوشش مورد ارزیابی و آزمون قرار می‌گیرد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌سازی سختی (برحسب ویکرز) و ضخامت (برحسب میکرومتر) پوشش‌های TiN و TiNC بصورت جداگانه توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA ارائه می‌شود. شکل ۵ منحنی همگرایی الگوریتم ترکیبی Nero-ICA را در می‌نیم سازی تابع هدف مورد نظر نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، الگوریتم فوق پس از ۱۰۰ تکرار به مقدار نهایی خود رسیده و همگرا شده است. تابع هدف الگوریتم ترکیبی Nero-ICA مجموع مربعات خطای (MSE) حاصل از تفاضل خروجی هدف یا ایده‌آل و خروجی تقریب زده شده توسط شبکه عصبی است. لذا هرچه تابع هدف فوق دارای مقدار کمتری باشد، نتایج حاصل از الگوریتم بهینه و در محدوده قابل قبول خواهد بود. پس از چند تکرار الگوریتم مطابق با منطبق تکرار پذیر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و ذخیره نتایج حاصل، بهینه‌ترین نتیجه حاصل برای مقدار تابع هدف سیستم برابر با $10^{-6} \times 7/2$ بدست آمد. شکل ۶ منحنی انطباق (fitting) داده‌های خروجی شامل: ضخامت و سختی پوشش را نسبت به داده هدف در مرحله آموزش برای پوشش TiN و شکل ۷ برای پوشش TiNC نشان می‌دهد. خط آبی رنگ میانگین خطی سازه شده داده‌های ورودی به شبکه، و خطوط دایره‌ای مقادیر تقریب زده شده توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد داده‌های تقریب زده شده در اکثر نقاط بر تابع هدف شبکه منطبق شده و دارای انحراف معیار محدودی هستند. از خطوط دایره‌ای، یک خط بیانگر سختی پوشش برحسب ویکرز و دیگری ضخامت پوشش برحسب متر در مرحله آموزش می‌باشد. همچنین مطابق ماهیت الگوریتم ترکیبی فوق، هرچقدر تکرارهای بیشتری از مرحله آموزش سپری می‌شود و با تعیین و بهینه‌سازی وزن‌های شبکه، خطای خروجی‌های حاصل در مرحله آموزش محدودتر شده و به مقدار

¹ Chamber pressure

² Coating thickness

³ Coating hardness

⁴ Mean Squared Error (MSE)

بهینه همگرا می‌گردد. شکل ۸ منحنی انطباق (fitting) داده‌های خروجی شامل: ضخامت و سختی پوشش را نسبت به داده هدف در مرحله تست برای پوشش TiN و شکل ۹ برای پوشش TiNC نشان می‌دهد. خط آبی رنگ میانگین خطی سازه شده داده‌های ورودی به شبکه، و خطوط دایره‌ای مقادیر تقریب زده شده توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA را ارائه می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌گردد داده‌های تقریب زده شده در اکثر نقاط بر تابع هدف شبکه منطبق شده و دارای انحراف معیار محدودی است. از خطوط دایره‌ای، یک خط بیانگر سختی پوشش برحسب ویکرز و دیگری ضخامت پوشش برحسب متر در مرحله تست است. قابل ذکر است در دسته بندی داده‌های ورودی به الگوریتم ترکیبی Nero-ICA براساس داده‌های آزمایشگاهی، ۷۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای مرحله تست تخصیص داده شده است و برخلاف مکانیزم عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، در این روش از مرحله ارزیابی صرفنظر شده است. شکل ۱۰ میانگین خطای خروجی الگوریتم Nero-ICA را برای پوشش TiN و شکل ۱۱ برای پوشش TiNC نشان می‌دهد. این گراف حاصل میانگین تفاضل خروجی‌های هدف (سختی و ضخامت پوشش) و خروجی تقریب زده شده توسط الگوریتم فوق است. همانگونه که مشاهده می‌گردد تابع خطا در محدوده صفر نوسان می‌نماید و بیشتر دامنه آن دارای مقدار 10^{-6} است. 10^{-7} و میانگین خطای خروجی $2,08 \times 10^{-7}$ است که دامنه‌ای بهینه و قابل قبول است.

همچنین به منظور ارزیابی تجربی عملکرد الگوریتم ترکیبی فوق و بعنوان تست نتایج خروجی به ازای نمونه داده، خروجی‌های حاصل از الگوریتم شامل: سختی و ضخامت پوشش را با مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده، مقایسه نموده و خطای حاصل در جدول ۱ برای پوشش TiN و در جدول ۲ برای پوشش TiNC ارائه شده است. مقادیر خطای حاصل در این جدول دقت و صحت عملکرد الگوریتم ترکیبی Nero-ICA را نشان می‌دهد. مطابق جدول فوق، سختی اندازه گیری شده برحسب ویکرز مقدار حاصل از تست آزمایشگاهی و سختی پیش بینی شده مقدار حاصل از تقریب الگوریتم ترکیبی Nero-ICA می‌باشد. همچنین ضخامت اندازه گیری شده برحسب میکرومتر مقدار حاصل از تست آزمایشگاهی و ضخامت پیش بینی شده، مقدار حاصل از الگوریتم Nero-ICA است. همانطور که مشاهده می‌گردد میانگین خطا برای خروجی متاثر از نوع پوشش کمتر ۰/۱ درصد و برای خروجی متاثر از نوع ضخامت کمتر از ۱/۸۹ درصد (قدر مطلق دامنه خطا) می‌باشد که حاکی از دقت و صحت عملکرد الگوریتم است و با افزایش تعداد داده‌های ورودی می‌توان قدرت تقریب الگوریتم را بهبود بخشید.

۵- نتیجه گیری

- ۱- با استفاده از الگوریتم ترکیبی Nero-ICA، سختی و ضخامت پوشش‌های TiN و TiNC با استفاده از داده‌های ورودی معین قابل تخمین بطور دقیق خواهد بود.
- ۲- مدل‌های هوش مصنوعی پیشنهاد شده، توانایی ویژه‌ای به منظور افزایش عمر مفید و بهبود عملکرد پره-های کمپرسور متاثر از نوع پوشش دارد. همچنین با دسترسی به داده‌های مربوط به سختی و ضخامت پوشش و با استفاده از روابط تجربی، می‌توان عمر خوردگی پوشش را تقریب زد.
- ۳- نتایج پیش‌بینی شده توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA در مقایسه با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی دارای حداقل خطای قابل قبول است و بطور میانگین مطابق گراف‌های ارائه شده، سختی پوشش PVD پیش‌بینی شده دارای دقت بیش از ۹۹/۵٪ است.
- ۴- زمان لازم برای فرآیند مدل‌سازی توسط الگوریتم ترکیبی Nero-ICA، معمولاً بین ۳ تا ۷ دقیقه (با توجه قدرت پردازنده و حافظه RAM کامپیوتر) می‌باشد؛ در حالی که مطالعات آزمایشگاهی جهت تخمین ضخامت و سختی پوشش‌های PVD ممکن است تا چندین روز زمان‌بر باشد. لذا استفاده از روش‌های پیشنهاد شده، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه خواهد شد.

مراجع

1. M. Raoufi, Sh. Mirdamadi, F. Mahboubi, Sh. Ahangarani, et al., Correlation between the surface characteristics and the duty cycle for the PACVD-derived TiN nanostructured films, *Surface and Coatings Technology*, 2011. 205: pp.4980-4984.
2. K. Holmberg, and A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Elsevier Limited, Oxford, 2009.
3. S.J.Suresha, Processing, microstructure and hardness of TiN/(Ti, Al)N multilayer coatings. *Materials Science and Engineering*, 2006. 429(1-2): pp. 252-260.
4. R. Mishra, B. Basu, and R. Balasubramaniam, Effect of grain size on the tribological behavior of nanocrystalline nickel. *Materials Science and Engineering: A*, 2004. 373(1): pp. 370-373.
5. E. Badisch, C. Mitterer, P. H. Mayrhofer, G. Mori, R. J. Bakker, J. Brenner, H. Störi, "Characterization of tribo-layers on self-lubricating PACVD TiN coatings", *Thin Solid Films* 2004. 460: pp. 125-132.
6. A. Anders, A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching. *Thin Solid Films*, 2010. 518(15): pp. 4087-4090.

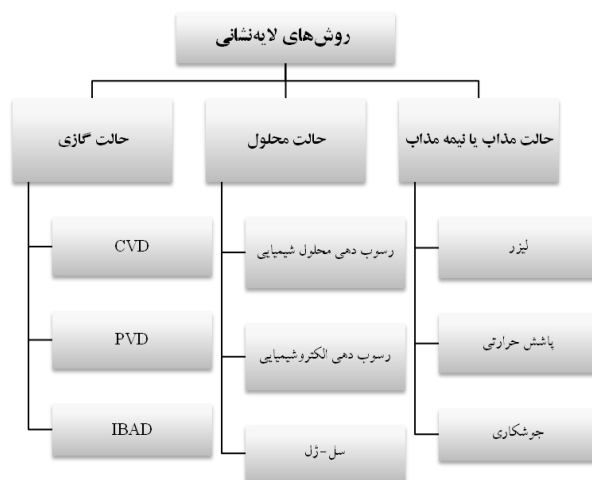
7. Y. He, I. Apachitei, J. Zhou, T. Walstock, J. Duszczyk, "Effect of prior plasma nitriding applied to a hot-work tool steel on the scratch-resistant properties of PACVD TiBN and TiCN coatings", *Surface and Coatings Technology* 2006. 201: pp. 2534–2539.
8. M. Pfeiler, J. Zechner, M. Penoy, C. Michotte, C. Mitterer, M. Katherin, "Improved oxidation resistance of TiAlN coatings by doping with si or B", *Surface & Coatings Technology* 203 (2009), 3104- 3110.
9. Philippe De Wilde, "Neural Network Models", *Springer*, second edition, 1997.
10. E. Atashoaz Gargari, "Imperialistic Competitive Algorithm (ICA) prespective", *IEE conference*, 2009.

جدول ۱: نتایج ارزیابی تجربی برای پوشش TiN.

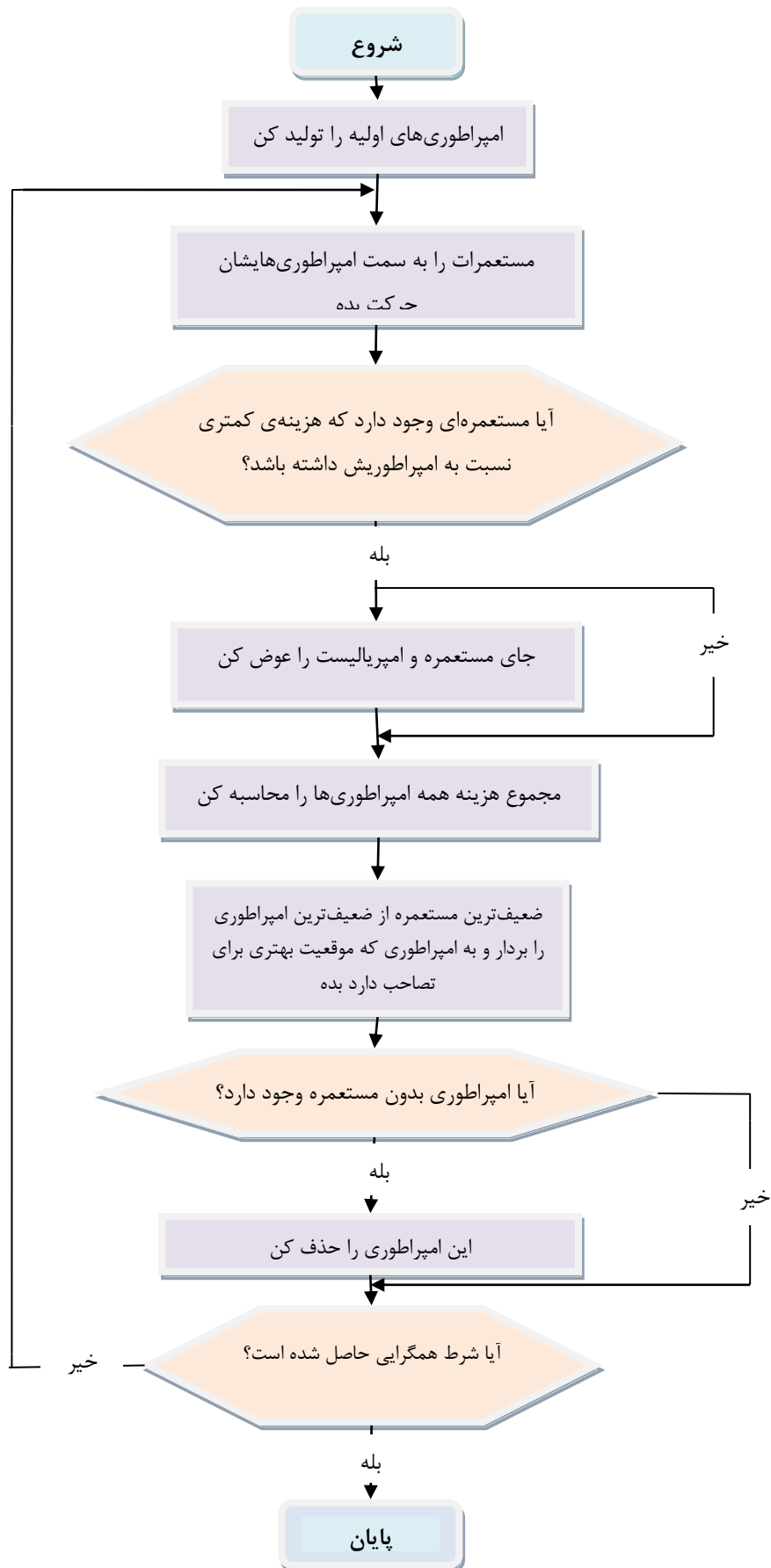
تکرار	سختی اندازه گیری شده (vickers)	سختی پیش بینی شده (vickers)	خطا	ضخامت اندازه گیری شده (μm)	ضخامت پیش بینی شده (μm)	خطا
۱	۶۴۲,۱۲۹	۶۴۱,۹۹۸	۰,۰۱۹۳	۴,۲۲	۴,۲۱۹	۰,۰۲۲۳
۲	۶۴۴,۶۲۵۸	۶۴۴,۰۹۰۱	۰,۰۷۹۱۱	۴,۰۲	۴,۰۶۹	-۱,۰۹۳۷
۳	۶۴۷,۱۲۲۶	۶۴۷,۱۱۰۳	۰,۰۰۱۸۱	۴,۰۹	۴,۰۸۸۷	۰,۰۲۹
۴	۶۴۹,۶۱۹۴	۶۴۹,۵۱۷	۰,۰۱۵	۳,۱۷	۳,۱۸۴۷	-۰,۳۲۸۱
۵	۶۵۲,۱۱۶۱	۶۵۲,۳۹	-۰,۰۴۰۴	۴,۲۶	۴,۲۵۹۸	۰,۰۰۴۴
۶	۶۵۴,۶۱۲۲	۶۵۴,۰۴۶	۰,۰۸۳۶	۴,۲۸	۴,۲۷۱۱	۰,۱۹۸۶۶
۷	۶۵۷,۱۰۹۷	۶۵۷,۱۹	-۰,۰۱۱۸	۴,۳	۴,۲۴۱	۱,۳۱۶۹
۸	۶۵۹,۶۰۶۵	۶۵۹,۷۱	-۰,۰۱۵۲	۳,۹۲	۳,۹۱۷	۰,۰۶۶۹
۹	۶۶۲,۱۰۳۲	۶۶۲,۱۷۳۶	-۰,۰۱۰۳۹	۴,۳۱	۴,۳۶۰۱	-۱,۱۱۸۳
۱۰	۶۶۴,۶	۶۶۴,۳۰۸۸	۰,۰۴۳	۳,۶۵	۳,۶۵۲۷	-۰,۰۶۰۲
۱۱	۶۶۷,۰۹۶۸	۶۶۷,۹۰۱	-۰,۱۱۸۷	۳,۵۲	۳,۵۲۶۹	-۰,۱۵۴
۱۲	۶۶۹,۵۹۳۵	۶۶۸,۳۲۱۷	۰,۱۸۷۸	۴,۳۹	۴,۳۹۸۴	-۰,۱۸۷۵
۱۳	۶۷۲,۹۰۳	۶۷۲,۱۲۲۲	۰,۱۱۵۳	۴,۳۴	۴,۳۴۰۹	-۰,۰۲
۱۴	۶۷۴,۵۸۷۱	۶۷۴,۵۶	۰,۰۰۴	۴,۴۷	۴,۴۷۹	-۰,۲۰۰۸
۱۵	۶۷۷,۰۸۳۹	۶۷۷,۱	-۰,۰۰۲۳	۴,۴۸	۴,۴۷۶۳	۰,۰۸۲۵

جدول ۲: نتایج ارزیابی تجربی برای پوشش TiNC.

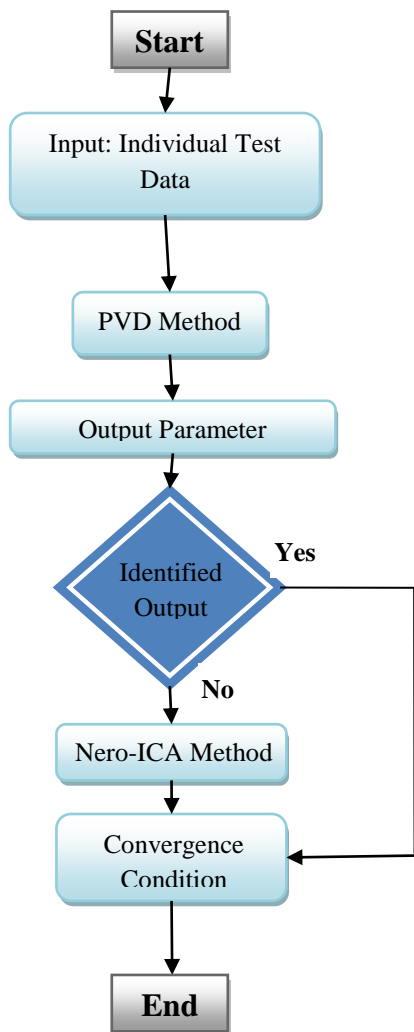
تکرار	سختی اندازه گیری شده (vickers)	سختی پیش بینی شده (vickers)	خطا	ضخامت اندازه گیری شده (μm)	ضخامت پیش بینی شده (μm)	خطا
۱	۷۰۰,۴۸۳۹	۷۰۰,۰۱۸	۰,۰۶۲۴	۰,۱۱۲	۰,۱۱۲۸	-۰,۵۲۹۸
۲	۷۰۳,۷۷۴۲	۷۰۳,۹۹۰۴	-۰,۰۲۸۹	۰,۱۱۳	۰,۱۱۳۶	-۰,۳۹۷۳
۳	۷۰۷,۰۶۴۵	۷۰۷,۶۵۱	-۰,۰۷۸۵	۰,۱۱۴	۰,۱۱۴۱	-۰,۰۶۶۲
۴	۷۱۰,۳۵۴۸	۷۱۰,۶۶۹	-۰,۰۴۲	۰,۱۴۶	۰,۱۴۶۳	-۰,۱۹۸۶
۵	۷۱۳,۶۴۵۲	۷۱۳,۵۵۴	۰,۰۱۲۲	۰,۱۴۲	۰,۱۴۲۱	-۰,۰۶۶۲
۶	۷۱۶,۹۳۵۵	۷۱۶,۸۸۰۷	۰,۰۰۷۳	۰,۱۳۶	۰,۱۳۶۹	-۰,۵۹۶
۷	۷۲۰,۲۲۵۸	۷۲۰,۱۷۸	۰,۰۰۶۴	۰,۱۵	۰,۱۵۰۸	-۰,۵۲۹۸
۸	۷۲۳,۵۱۶۱	۷۲۲,۹۸۸۱	۰,۰۷۰۷	۰,۱۵۱	۰,۱۵۱۱	-۰,۰۶۶
۹	۷۲۶,۸۰۶۵	۷۲۵,۹۸۱	۰,۱۱۰۵	۰,۱۴۹	۰,۱۴۹	۰
۱۰	۷۳۰,۰۹۶۸	۷۲۹,۰۰۸	۰,۱۴۵۸	۰,۱۱۸	۰,۱۱۸۴	-۰,۲۶۴۹
۱۱	۷۳۳,۳۸۷۱	۷۳۳,۶۹۴	-۰,۰۴۱۱	۰,۱۱۶	۰,۱۱۶۵	-۰,۳۳۱۱
۱۲	۷۳۶,۶۷۷۴	۷۳۶,۵۳۳۳	۰,۰۱۹۳	۰,۱۳۴	۰,۱۳۴۵	-۰,۳۳۱۱
۱۳	۷۳۹,۹۶۷۷	۷۳۹,۸۵	۰,۰۱۵۷	۰,۱۳۵	۰,۱۳۴۶	۰,۲۶۴۹
۱۴	۷۴۳,۲۵۸۱	۷۴۳,۵۶	-۰,۰۴۰۴۳	۰,۱۲	۰,۱۲۸۸	-۵,۸۲۷۸۱
۱۵	۷۴۶,۵۴۸۴	۷۴۶,۶۶۵	-۰,۰۱۵۶۱	۰,۱۱۷	۰,۱۱۷۹	-۰,۵۹۶



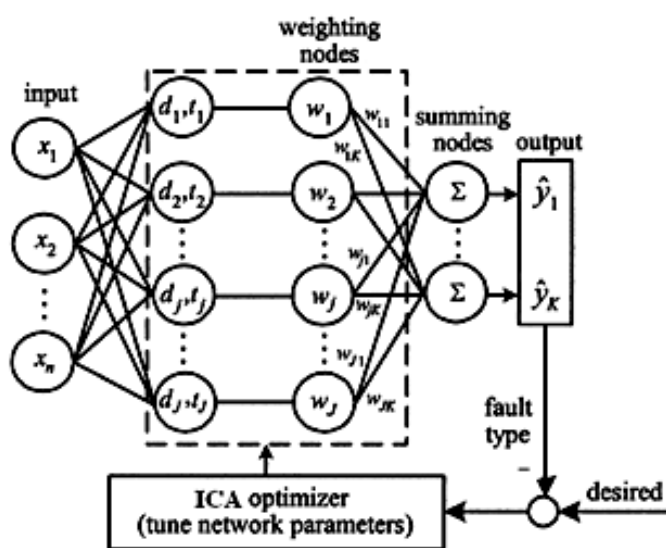
شکل ۱: دسته بندی نانوپوشش ها بر مبنای مواد اولیه مورد استفاده.



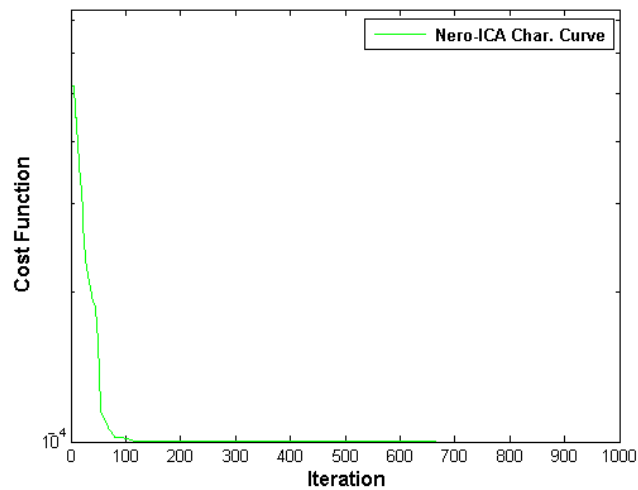
شکل ۲: فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری (ICA).



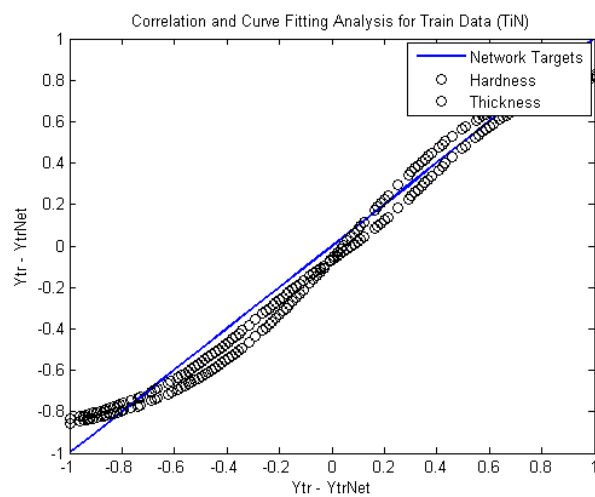
شکل ۳: فلوچارت الگوریتم ترکیبی Nero-ICA



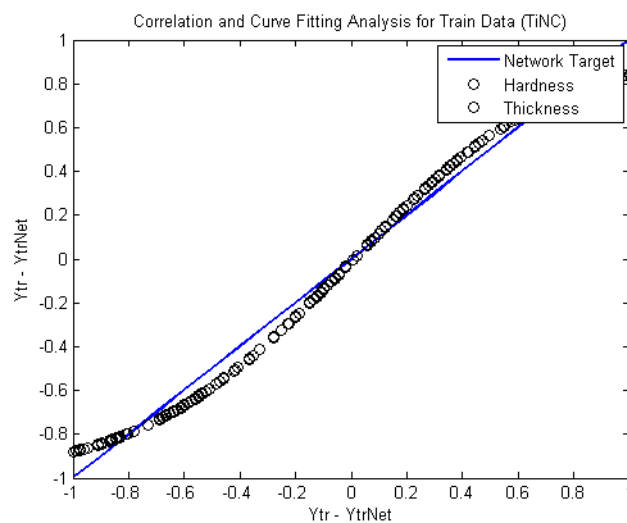
شکل ۴: بلوک دیاگرام منطق کنترلی الگوریتم ترکیبی Nero-ICA



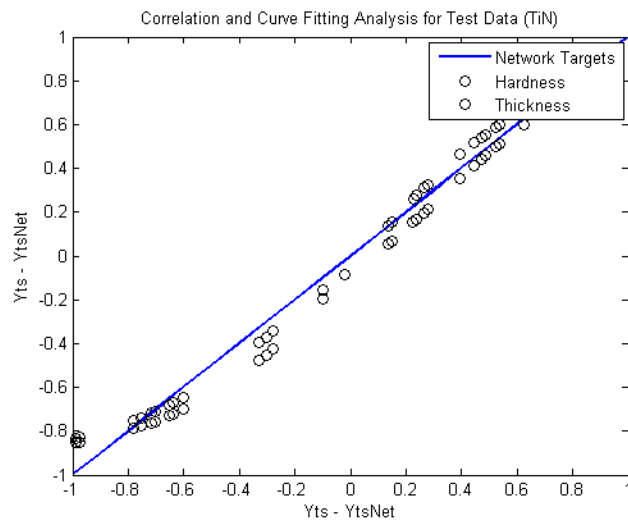
شکل ۵: منحنی همگرایی الگوریتم Nero-ICA



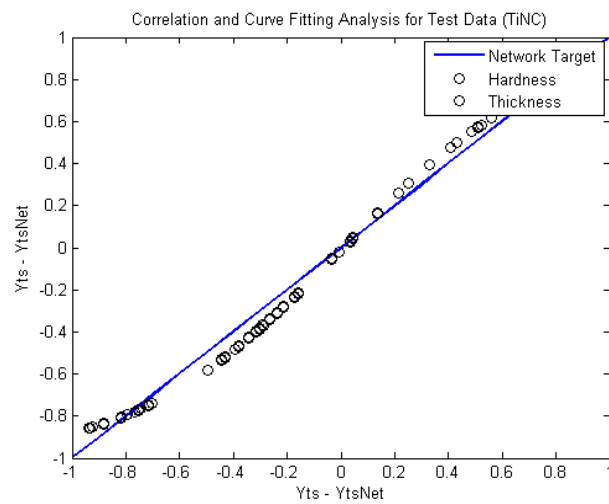
شکل ۶: تطبیق داده های خروجی در مرحله آموزش برای پوشش TiN



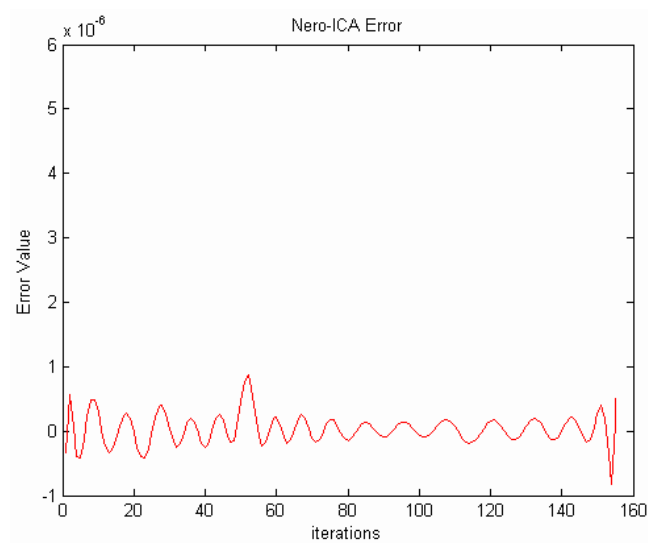
شکل ۷: تطبیق داده های خروجی در مرحله آموزش برای پوشش TiNC



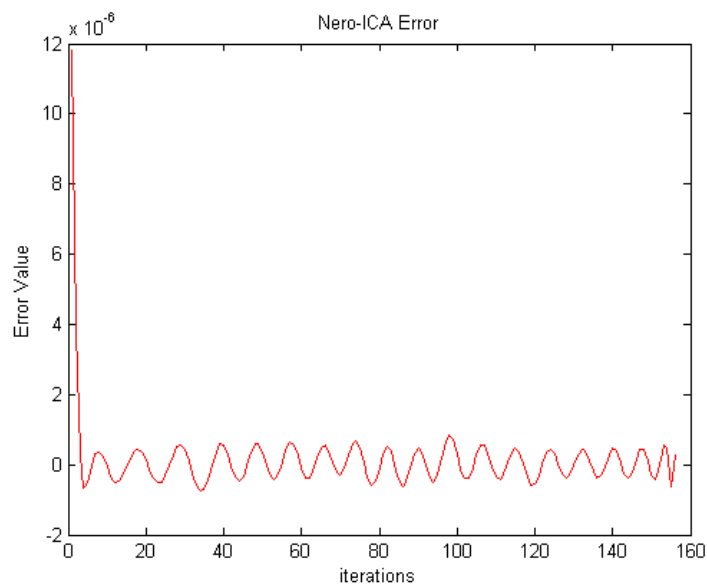
شکل ۸: تطبیق داده های خروجی در مرحله تست برای پوشش TiN



شکل ۹: تطبیق داده های خروجی در مرحله تست برای پوشش TiNC



شکل ۱۰: میانگین خطای خروجی الگوریتم Nero-ICA برای پوشش TiN



شکل ۱۱: میانگین خطای خروجی الگوریتم Nero-ICA برای پوشش TiNC