شبیه‌سازی و پیش‌بینی ترکنندگی لعاب خام روی بدنهٔ کاشی انگوب‌خورده با استفاده از شبکهٔ عصبی

محمد خوئینی[۱]، محمد عابدینی[۱]، مسعود محبی[۲]

[۱] دانشگاه ملایر، [۲] دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین

ehsan327@yahoo.com

چکیده: *برای ایجاد چسبندگی مناسب بین لعاب و بدنه بیسکوییتی، باید لعاب در حالت خام چسبندگی مناسبی روی بدنه داشته باشد. میزان این چسبندگی به عوامل متعددی وابسته است که از مهمترین آنها درصد آب، افزودنی‌ها و زبرهٔ لعاب است. در این تحقیق با ساخت لعاب‌های با درصد چسب، روانساز، آب و زبرهٔ متفاوت، چسبندگی لعاب بر بدنه اندازه‌گیری شده است. کمیتی که به منظور تعیین چسبندگی لعاب و بدنه استفاده شده است، زاویهٔ ترکنندگی می‌باشد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با تعلیم شبکهٔ عصبی مناسب، چگونگی تغییرات شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی از شبکه دو لایه‌ای پیشخور و روش پس‌انتشارخطا استفاده شده و نتایج قابل قبولی برای پیش‌بینی تغییرات به دست آمد.*

کلمات کلیدی: *لعاب، بدنه بیسکویت، شبکهٔ عصبی، زاویهٔ ترکنندگی.*

۱- مقدمه

بسیاری از عیوب سطح کاشی ناشی از عدم چسبندگی و اتصال لعاب بر بدنهٔ بیسکوییت است و لذا یکی از مسائل مهم در صنعت کاشی برای به حداقل رساندن عیوب، رسیدن به حداکثر اتصال و نیز تناسب بدنه با لعاب می‌باشد که در این راستا پارامتر ترکنندگی بدنه توسط لعاب از پارامترهای با اهمیت شمرده می‌شود. بحث ترکنندگی بدنه توسط لعاب در دو مرحله قابل طرح است: یکی ترکنندگی سوسپانسیون لعاب روی بیسکوییت به هنگام اعمال لعاب و دیگری ترکنندگی لعاب مذاب روی بدنه به هنگام پخت.

در این مقاله سعی شده است میزان ترکنندگی لعاب روی بدنه انگوب‌خورده در حالت خام بررسی شود. فاکتورهای متعددی روی ترشوندگی بیسکوییت توسط لعاب و بهبود اتصال لعاب و بیسکوییت مؤثرند که از مهمترین آن‌ها می‌توان ترکیب بیسکوییت و انگوب مصرفی، دمای پخت و درصد تخلخل بدنه، ترکیب و زبرهٔ لعاب و نحوه لعاب‌زنی را نام برد.

با تغییر هریک از موارد فوق می‌توان چسبندگی لعاب روی بدنهٔ بیسکوییت را کنترل کرد. در این بررسی نقش آب، روانساز، چسب و زبرهٔ لعاب بر چسبندگی لعاب و بیسکوییت مطالعه شده است.

یکی از فاکتورهای مناسب قابل اندازه‌گیری برای بیان کمی میزان چسبندگی، "زاویهٔ تماس بین سطح انگوب‌خوردهٔ بیسکوییت و خط مماس بر قوس قطرهٔ لعاب در نقطهٔ برخورد" می‌باشد که ما اختصاراً آن را تحت عنوان "زاویهٔ ترکنندگی" می‌شناسیم. زاویهٔ ترکنندگی کمتر بیانگر پوشش‌دادن بهتر لعاب روی سطح بیسکوییت خواهد بود.

در سوسپانسیون‌هایی که به صورت ذرات جامد معلق در محلول آبی می‌باشند، خواص فاز مایع سوسپانسیون عامل مهمی در تعیین زوایهٔ‌ترکنندگی است. هر چه میزان آب لعاب خام افزایش یابد،کشش سطحی مابین بدنه و قطره کاهش می‌یابد، لذا زاویهٔ ترکنندگی کاهش‌یافته و در نتیجه ترکنندگی بهتر صورت می‌گیرد. افزایش میزان چسب به دلیل اینکه سبب افزایش کشش سطحی مابین بدنه و قطره می‌شود، زوایهٔ ترکنندگی را افزایش می‌دهد و لذا خاصیت ترکنندگی لعاب خام را کاهش می‌دهد. کاهش اندازهٔ دانه سبب افزایش

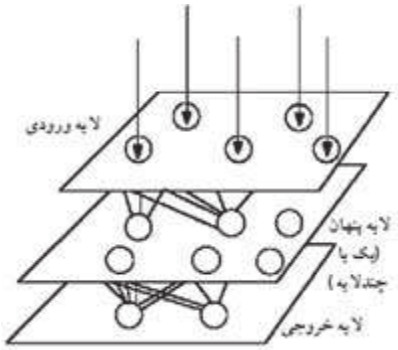
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

ویسکوزیتهٔ لعاب خام و افزایش کشش سطحی مابین بدنه و قطره می‌شود. در نتیجه همانند حالت افزایش میزان چسب، زاویهٔ ترکنندگی افزایش خواهد یافت و ترکنندگی لعاب خام کمتر می‌شود. افزایش میزان روان‌ساز سبب کاهش کشش سطحی مابین بدنه و قطره می‌شود. در نتیجه زاویهٔ ترکنندگی با افزایش میزان روان‌ساز کاهش می‌یابد. البته در مقادیر مختلف درصد آب، چسب، زبره و روان‌ساز، تاثیر تغییر هر پارامتر بر زاویهٔ ترکنندگی نتیجه‌ای از پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی است که در آن شرایط اتفاق می‌افتد. لذا ممکن است در حالت‌هایی از مقادیر درصد آب، چسب، زبره و روان‌ساز، تغییر یک پارامتر سبب تغییر زاویهٔ ترکنندگی بر خلاف انتظار (توضیحات فوق) گردد.

پیشرفت در زمینهٔ بهبود خواص لعاب به استفاده از روش‌های مختلف بررسی خواص و مدل‌های شبیه سازی نیاز دارد. شبکه‌های عصبی از جمله سیستم‌های هوشمندی هستند که با بکارگیری داده‌های آزمایشگاهی، قانون نهفته در ورای داده‌ها را استخراج و سیستم را مدل می‌کنند. لذا توجه قابل ملاحظه‌ای را در تحقیق روی خواص و فرایند ساخت مواد به خود جلب کرده‌اند. از آنجا که فرمول مشخصی برای تعیین نرخ تغییرات زاویهٔ ترکنندگی لعاب با فاکتورهای سازنده و مؤثر بر آن موجود نیست، برای پیش‌بینی این تغییرات نیاز به طراحی شبکهٔ عصبی است. بدین منظور باید میزان ترکنندگی لعاب برای حالت‌های کافی اندازه گیری شده و نتایج حاصل برای آموزش شبکه و تست کارایی آن استفاده گردد.

هر شبکه عصبی متشکل از نرون‌هایی می‌باشد که در لایه‌های مختلف جای گرفته‌اند. هر نرون به تنهایی قابلیت چندانی ندارد ولی هنگامی که نرون‌ها با هم ترکیب می‌شوند و تشکیل شبکه می‌دهند قابلیت‌های بالایی از خود نشان می‌دهند. مدل نرون مصنوعی برگرفته از نرون‌های واقعی (سلول‌های عصبی مغز انسان) می‌باشد. در ساختار شبکه‌های عصبی، نرون‌ها علاوه بر آنکه در لایهٔ خود به شکل محدودی به یکدیگر اتصال داده شده‌اند، از طریق اتصال بین لایه‌ها نیز به نرون‌های طبقات مجاور ارتباط داده می‌شوند. در واقع نرون‌ها توسط ضرایب وزنی به هم مربوط می‌شوند. ضریب وزنی بیانگر قدرت اتصالی یک نرون است و آستانه تحریک آن نرون را تعیین می‌کند. بنابراین هر نرون یک ضریب وزنی ورودی و یک ضریب وزنی خروجی دارد. رفتار یک شبکه توسط تابع انتقال تعیین می‌شود. این تابع توسط طراح و بر اساس قوانین آموزش شبکه تعیین می‌گردد. به هنگام آموزش شبکه روابط بین نرون‌ها بهینه شده و خطا به حداقل مقدار ممکن کاهش می‌یابد. در شکل ۱ نمونه‌ای از ساختار لایه‌ای یک شبکهٔ عصبی مصنوعی نمایش داده شده است[۱].



شکل ۱- نمونه‌ای از ساختار لایه‌ای یک شبکهٔ عصبی

اخیراً تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از شبکه‌های عصبی به منظور دستیابی به بهترین نمونه‌ها با حداقل آزمایشات و تجارب عملی صورت گرفته است که نتایج آن منجر به تولید محصولات بهتر و هزینه کمتر شده است. به عنوان مثال در یکی از این تلاش‌ها تأثیر پارامترهای مختلف بر ویسکوزیتهٔ ظاهری سوسپانسیون‌های آلومینا-پارافین با استفاده از شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی شد[۲]. در کوشش دیگری خواص مکانیکی ابزارهای سرامیکی با استفاده از شبکه‌های عصبی مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار گرفت[۳].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

۲- فعالیت‌های تجربی

در انجام این پروژه از بیسکوییت کاشی و انگوب مصرفی در خط تولیدکاشی دیوار یک کارخانهٔ تولید کاشی استفاده شد و بر پایه فرمولاسیون لعاب مصرفی(نقطهٔ کاری[1])، درصد زبره، درصد آب و میزان افزودنی‌های لعاب (چسب و روانساز) تغییر داده شد تا تغییرات حاصله در زاویهٔ ترکنندگی لعاب روی بیسکوییت انگوب‌خورده مطالعه شود.

چهار متغیر مستقل مقدار روانساز، مقدار چسب، مقدار آب و زبرهٔ لعاب به عنوان متغیرهای آزمایش تعریف شده و سایر پارامترها در طول آزمایش ثابت نگه داشته شدند. این پارامترها عبارتند از: میزان تخلخل سطح بدنهٔ بیسکوییت (که خود تابعی از پرس، پخت، اندازهٔ دانه و فرمولاسیون بدنه می‌باشد) میزان رطوبت بدنهٔ بیسکویت هنگام اعمال انگوب، دمای بدنهٔ بیسکویت هنگام اعمال انگوب، میزان گرد و غبار سطح بدنهٔ بیسکویت، میزان آب انگوب، میزان روانساز و چسب انگوب، اندازهٔ دانه (زبره) انگوب، فرمولاسیون انگوب و لعاب.

۳- مراحل انجام آزمایش

برای آماده‌سازی نمونه‌های کاشی بیسکوییت، کاشی‌های بیسکوییت در ابعاد ۴cm×۴cm توسط دستگاه کاشی‌بُر برش داده شدند.

برای آماده‌سازی لعاب خام، از یک فست میل با حجم ۵۰۰ سی سی استفاده شد. درون فست میل، ۱۵۰ گرم ماده خشک شامل ٪۹۲ فریت و ٪۸ کائولن WBB (فرمولاسیون پایه، که در تمام حالات آزمایش ثابت است) شارژ و به مقدار ٪۳۳ بچ خشک، آب افزوده شد. ٪۰/۰۵ روان‌ساز (سدیم تری پلی فسفات[2]) و ٪۰/۰۱ چسب (کربوکسی متیل سلولز[3]) اضافه شد. زمان کار فست میل برای رسیدن به درصد زبرهٔ ۱، ۳، ۵ و ۷ به ترتیب ۶۴، ۵۳، ۴۷ و ۴۲ min بود.

مقدار مشخصی آب، چسب و روان‌ساز برای رسیدن به حالات مختلف دوغاب به بچ اضافه و لعاب خام به خوبی هم زده شد و به مدت ۲۴ ساعت به منظور همگن‌سازی در فضای بسته زمان دهی[4] شد.

مقادیری که برای هریک از پارامترها در نظر گرفته‌ایم در جدول زیر بیان شده‌اند:

جدول ۱- پارامترهای مؤثر بر زاویهٔ ترکنندگی و مقادیر درنظر گرفته شده برای هر یک

نوع پارامتر	مقادیر منظور شده (بر حسب درصد)	اندازهٔ گام (برحسب درصد)
زبره	۱، ۳، ۵ و ۷	۲
درصد آب	۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵	۵
درصد چسب	۰/۰۱، ۰/۰۴، ۰/۰۷، ۰/۱۰	۰/۲۰
درصد روان‌ساز	۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵	۰/۱

گام‌های در نظر گرفته‌شده برای هر یک از پارامترها با توجه به حساسیت زاویهٔ تماس نسبت به تغییرات آن پارامتر و نیز محدوده‌های کاری معمول هر یک، تعیین شده‌اند.

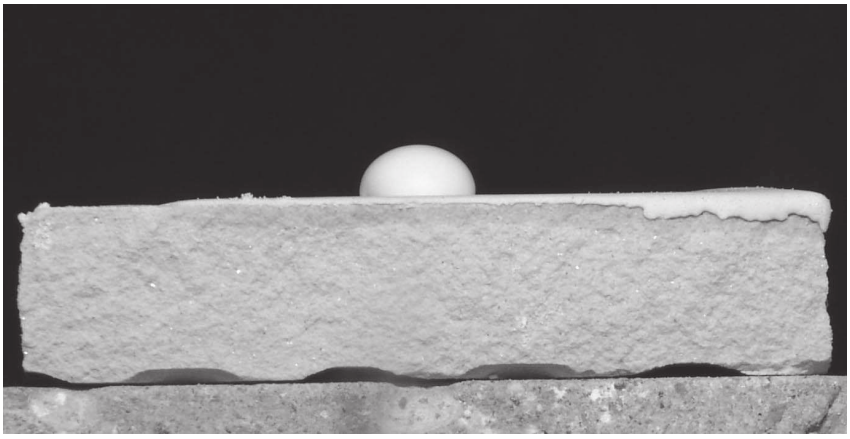
با توجه به محدوده‌های مذکور، برای هر پارامتر چهار مقدار در نظر گرفته‌شد و لذا مجموعاً ۲۵۶ حالت برای ساختن لعاب و محاسبه زاویهٔ ترکنندگی قابل تعریف خواهد بود که هر حالت ترکیب متفاوتی نسبت به سایرین دارد.

[1] Working point
[2] STPP
[3] CMC
[4] aging

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

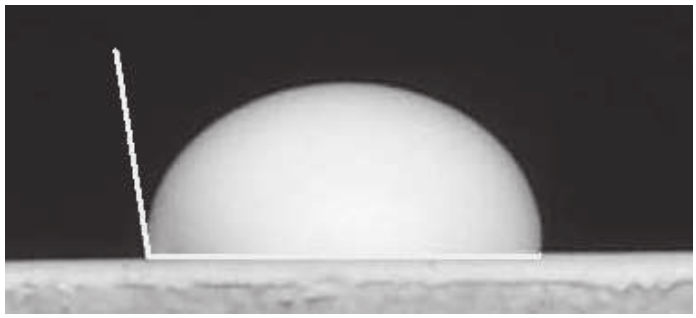
[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

کاشی بیسکوییت برش داده شده، پس از غبارگیری توسط پارچه به روش غوطه‌وری انگوب زده شدند (ضخامت انگوب اعمالی برابر با ضخامت انگوب در خط تولید می‌باشد) و پس از تقریباً ۱۰ ثانیه که در جانمونه‌ای قرار گرفت، قطرهٔ لعاب خام توسط قطره‌چکان آزمایشگاهی به صورت تقریباً استاتیکی (رهایی از ارتفاع تقریباً ۱ سانتیمتری) بر روی بدنهٔ بیسکوییت انگوب‌خورده قرار گرفته و همزمان توسط دوربین عکس‌برداری انجام شد.



شکل ۲- نمای جانبی قطرهٔ لعاب اعمال شده روی بیسکوییت انگوب‌خورده

برای عکس‌برداری از بیسکوییت و قطره لعاب از دوربین عکاسی دیجیتال ۱۰ مگا پیکسلی استفاده شد و شرایط نوری و تنظیمات دوربین به گونه‌ای انتخاب شد که حداکثر وضوح و اختلاف رنگ بین مرزهای بدنه، انگوب و لعاب دیده شود (شکل۲). همچنین برای بهبود وضوح تصویر و مشخص‌تر کردن خطوط مرزی و نیز ترمیم عکس‌هایی که هنگام زوم کردن دچار افت کیفیت شده اند، نرم‌افزار فتوشاپ بکار گرفته شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ImageJ و رسم "خط مرزی انگوب و لعاب" و "خط مماس بر قطرهٔ لعاب در نقطهٔ برخورد" اندازهٔ زاویه ترکنندگی تا دو رقم اعشار اندازه‌گیری شد.



شکل ۳- نحوهٔ رسم خطوط مماس برای تعیین زاویهٔ ترکنندگی

هدف نهایی این پژوهش، پیش‌بینی میزان ترکنندگی لعاب روی بیسکوییت، با در اختیار داشتن درصد زبره، آب، روان‌ساز و چسب لعاب آن می‌باشد.

٤- نتایج و بحث

با توجه به محدوده‌های ترکیبی در نظر گرفته شده، مجموعاً ۲۵۶ حالت مختلف برای ساختن لعاب قابل تعریف خواهد بود. در مواردی به علت مناسب نبودن شرایط دوغاب برای ایجاد قطره، داده‌های اندازه‌گیری شده برای تعیین زاویهٔ ترکنندگی قابل استفاده نبوده لذا داده‌های مربوطه حذف شده‌اند. از آنجایی که دوغاب‌های نامناسب مربوط به مرز محدوده‌های ترکیبی (مقادیر پایین درصد آب، چسب و روان‌ساز) است، حذف داده‌های مربوط به آن‌ها مشکلی در شبیه‌سازی ایجاد نمی‌کند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

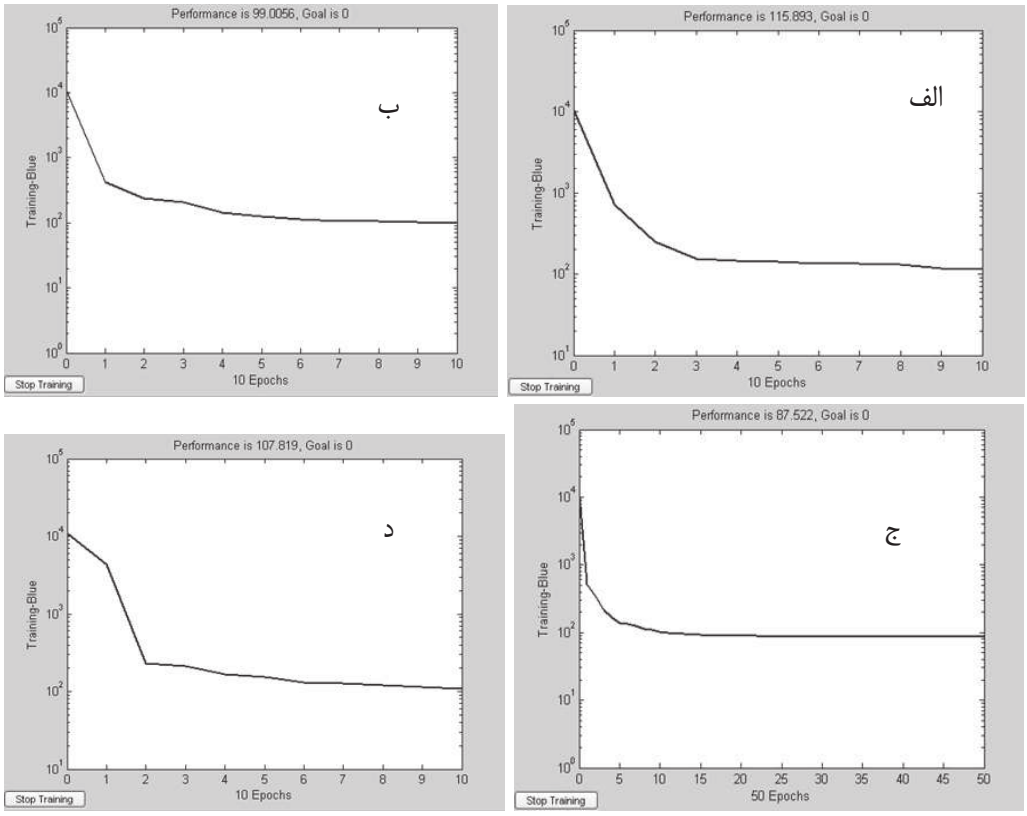
[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

کل داده‌های به دست آمده از مجموع آزمایشات، ۲۲۴ داده می‌باشد که از این تعداد، ۱۵۸ داده برای آموزش شبکه و ۶۶ مورد نیز برای تست شبکه استفاده شدند.

برای شبیه‌سازی زاویهٔ ترکنندگی از شبکه پیش‌خور[1] استفاده شد که در آن الگوریتم پس‌انتشار خطا[2] به کار می‌رود. شبکه‌های دو و سه لایه‌ای با توابع محرک زیگموئید (Tansig و Logsig) در لایه‌های پنهان اول و دوم و تابع محرک خطی (Purelin) در لایهٔ خروجی و با تعداد نرون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

در طراحی شبکه و کدنویسی برنامه، اکثر پارامترهای فوق همان پیش‌فرض برنامه[3] انتخاب شدند و تنها برخی از آن‌ها نظیر Epochs، Show و Goal مقداردهی شدند تا به دقت و نتیجهٔ مورد نظر دست یابیم.

در آموزش شبکه، توابع متعددی (مانند trainlm و traingdx) با ۲ و ۳ لایه و با تعداد نرون‌های مختلف (۵، ۷، ۸ و ۱۰) برای رسیدن به بهترین شرایط یعنی عدم حفظ کردن داده‌ها و وجود خطای مینیمم بررسی شدند. شکل ۵ نحوهٔ آموزش تعدادی از شبکه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴- عملکرد تعدادی از شبکه‌ها الف-عملکرد شبکه (دو لایه‌ای با ۸ نرون میانی، ۵۰ تکرار)
ب-عملکرد شبکه (دو لایه‌ای با ۱۰ نرون میانی، ۱۰ تکرار)
ج-عملکرد شبکه (دو لایه‌ای با ۱۵ نرون میانی، ۱۰ تکرار) د-عملکرد شبکه (دو لایه‌ای با ۷ نرون میانی، ۵۰ تکرار)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود شبکهٔ دو لایه‌ای با ۷ نرون در نهایت بیشترین تطابق (کمترین خطا) با داده‌های ورودی و خروجی پیدا کرده است. به طوری که خطای نهایی به ۸۷/۵۲۲ رسیده است. بنابراین از این شبکه برای شبیه‌سازی استفاده شد.

جدول ۲ نتایج مربوط به زاویهٔ ترکنندگی پیش‌بینی شدهٔ ۲۰ فرمولاسیون و اندازه‌گیری شده توسط آزمایشات را نشان می‌دهد. با توجه به این مشاهدات نتیجه می‌شود که داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده تطابق بسیار خوبی با هم دارند.

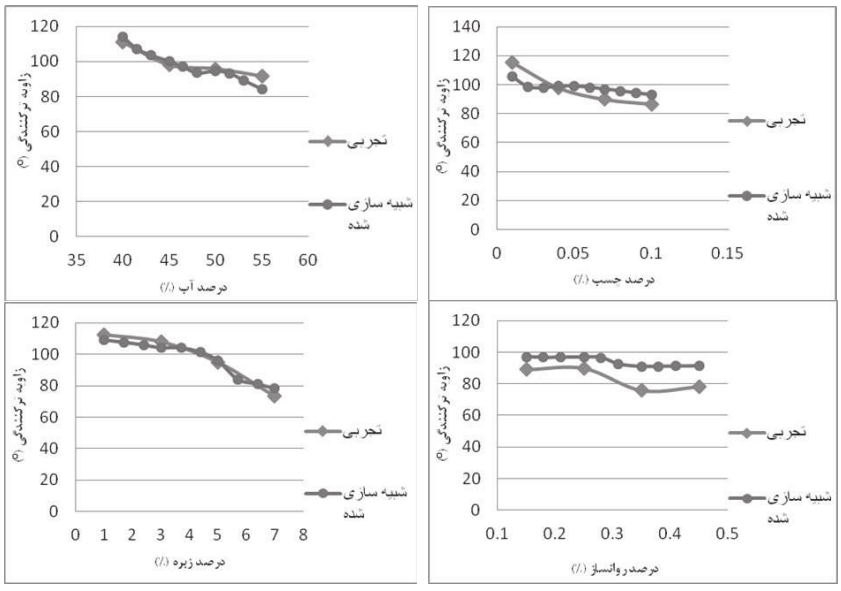
[1] Feed Forward
[2] Back Propagation
[3] default

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

جدول ۲-مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی حاصل از آزمایش

شماره	مقدار شبیه‌سازی شده توسط شبکه(°)	مقدار واقعی حاصل از آزمایش(°)	درصد خطا(٪)
۱	۱۱۴/۳۷	۱۲۲/۲۹	۶/۹۲
۲	۱۰۴/۷۱	۱۰۹/۸۹	۴/۹۵
۳	۹۲/۶۲	۹۳/۶۵	۱/۱۱
۴	۱۰۰/۷۰	۱۱۴/۷۲	۱۳/۹۲
۵	۱۰۱/۳۱	۱۰۰/۷۶	۰/۵۴
۶	۹۳/۸۷	۸۷/۱۹	۷/۱۲
۷	۹۳/۴۶	۷۸/۱۵	۱۶/۳۸
۸	۱۰۲/۶۱	۱۱۷/۹۹	۱۴/۹۸
۹	۷۲/۹۷	۶۸/۴۹	۶/۱۴
۱۰	۷۷/۷۲	۷۵/۲۵	۳/۱۸
۱۱	۱۲۰/۲۲	۱۱۹/۴۲	۰/۶۶
۱۲	۹۸/۵۸	۹۲/۸۷	۵/۷۸
۱۳	۸۸/۹۷	۷۷/۷۶	۱۲/۵۹
۱۴	۷۲/۱۳	۶۹/۵۸	۳/۵۴
۱۵	۷۱/۸۲	۶۶/۵۹	۷/۲۸
۱۶	۷۱/۶۸	۷۳/۴۹	۲/۵۱
۱۷	۶۲/۴۷	۶۷/۳۱	۷/۷۳
۱۸	۶۲/۴۹	۷۱/۰۶	۱۲/۲۶
۱۹	۱۱۰/۷۵	۱۰۶/۰۱	۴/۲۷
۲۰	۱۱۷/۱۹	۱۱۴/۹۸	۱/۸۸

نمونه‌ای از نمودارهای مربوط به حالات مختلف پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در شکل ۵ آمده است. جهت مقایسه بهتر نتایج تجربی نیز آورده شده‌اند.



شکل ۵- (الف) تغییرات زاویه ترکنندگی با درصد آب در۷٪ زبری، ۰/۱٪ چسب، ۰/۳۵٪ روان‌ساز، (ب) تغییرات زاویه ترکنندگی با چسب در ۷٪ زبری، ۴۵٪ آب، ۰/۲۵٪ روان‌ساز، (ج) تغییرات زاویه ترکنندگی با درصد زبره در ۵۰٪ آب، ۰/۳۵٪ رون‌ساز، ۰/۰۷٪ چسب، (د) تغییرات زاویه ترکنندگی با روان‌ساز در ۷٪ زبره، ۴۵٪ آب، ۰/۰۷٪ چسب.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]

با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده تطابق خوبی با هم دارند. علاوه بر این شبکه نقاطی را پیش‌بینی کرده که به صورت تجربی آزمایش نشده بودند.

۵- نتیجه‌گیری

تغییرات زاویه ترکنندگی لعاب خام بر روی بدنه کاشی انگوب خورده بر حسب درصد چسب، روانساز، آب و زبرهٔ لعاب با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شد. داده های شبیه‌سازی شده، همخوانی مناسبی با نتایج عملی نشان می‌دهد و می‌توان مدل ارائه شده را مدلی مناسب جهت پیش‌بینی رفتار چسبندگی لعاب خام بر روی بدنهٔ کاشی انگوب خورده دانست.

مراجع

۱. هوش محاسباتی، جلد اول: مبانی شبکه‌های عصبی، محمدباقر منهاج، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک ایران) واحد تفرش، ۱۳۷۹، دفتر نشر پروفسور محمود حسابی.

2. Drago Torkar, Sasa Novak, Franc Novak. Apparent Viscosity Prediction of alumina-Paraffin Suspensions using artificial neural networks . Journal of Materials processing Technology, 203: 208-215 (2008).

3. C. Z Huang, L. Zhang, L, He, J. Sun, B. Fang, B. Zou, Z. Q. Li, X. Ai, A Study on the prediction of the mechanical properties of a ceramic tool based on an artificial neural network. Journal of Materials processing Technology, 129: 399-402 (2002).

۴. لعاب‌ها و پوشش‌های شیشه‌ای، ریچارد. ا. اپلر، داگلاس. ر. اپلر، مترجم هادی شمس نظری، تهران، ۱۳۸۲، نشر دانش ایران.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1390.7.3.1.6]