



دوازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران ۶-۸ دی ماه ۱۳۹۰

تخمین انرژی انتشار ترک قطعات به روش هوش مصنوعی در جوشکاری زیرپودری فولادهای ساختمانی

امیر مصطفی پور^۱، غلامرضا مرامی^۲، سید جواد اعرج خدایی^{۳*}

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۳- کارشناس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز Javadkhodaii@Gmail.com

چکیده

روشهای نوین جوشکاری را می توان به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل پیشرفت کیفیت اتصالات در نظر گرفت. در این میان جوشکاری زیر پودری فرایند یاست که نقش چشمگیری در اتصالات سازه های سنگین نظیر پلها، مخازن تحت فشار و توربین های بادی ایفا می کند. از سویی بیش از هشتاد درصد شکست سازه ها ناشی از شکستهای ناگهانی می باشد که منشأ آن انتشار ترک است، لذا افزایش انرژی انتشار ترک در اتصالات صورت گرفته و پیش بینی آن قبل از انجام فرایند از جمله مواردیست که همواره ذهن طراحان و سازندگان سازه های سنگین را به خود مشغول کرده است. در این تحقیق نمونه هایی از جنس فولاد ساختمانی تحت شرایط مختلف نظیر شدت جریان، سرعت پیشروی و فاصله نوک نازل جوشکاری شده و مقدار انرژی انتشار ترک به صورت عملی به کمک دستگاه تست کشش اندازه گیری شد. در مرحله بعد با استفاده از این اطلاعات تجربی، یک سیستم هوش مصنوعی از نوع شبکه های عصبی در نرم افزار مطلب مدلسازی و آموزش داده شد که ورودی های آن پارامترهای تنظیمی جوشکاری زیرپودری و خروجی آن انرژی انتشار ترک اتصال است. هدف از این سیستم هوشمند فراهم نمودن امکان پیش بینی انرژی انتشار ترک در اتصال، پیش از انجام فرایند و با معلوم بودن پارامترهای مختلف ورودی است. این سیستم هوشمند بعد از آموزش، آزمایش شد. نتایج کار نشان داد که با استفاده از شبکه عصبی با دقت بسیار بالائی می توان انرژی انتشار ترک را قبل از انجام جوشکاری تخمین زد.

واژه های کلیدی: جوشکاری زیرپودری- انرژی انتشار ترک- پارامترهای جوشکاری- فولادهای ساختمانی- شبکه عصبی هوش مصنوعی

۱- مقدمه

پارامترهای تنظیمی فرایند دارای رفتار غیر خطی می باشد [۳]، در سالهای اخیر کارهای زیادی برای مدل سازی این فرایند با استفاده از روشهای هوش مصنوعی صورت گرفته است [۴]، زیرا استفاده از شبکه های عصبی برای مدلسازی روابط سیستم های پیچیده بسیار مفید می باشد [۵]. شبکه های عصبی توانایی بی نظیری جهت یادگیری و مدلسازی برای متغیرهای ورودی و خروجی پیچیده دارند. در تحقیقات انجام شده روی جوشکاری زیر پودری، متغیرهایی نظیر ورودی نظیر آمپر، سرعت پیشروی^۲، دمای پیش گرم، طول موثر الکتروود^۳ و ... بعنوان پارامترهای ورودی و شکل هندسی گرده جوش بعنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است و در نهایت به کمک شبکه های

جوشکاری زیرپودری^۱ یکی از مهمترین روشهای جوشکاری قوس الکتریکی است از اشکالات عمده این روش شار حرارتی اعمالی بالای این فرایند می باشد امکان ظهور عیوب در حوضچه را افزایش می دهد با این وجود این فرایند به طور معمول برای جوشکاری سازه های سنگین نظیر پلها، توربین های بادی و مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. اساسا کیفیت جوش زیر پودری به شکل هندسی حوضچه مذاب و گرده جوش وابسته است و شکل حوضچه به پارامترهای ورودی نظیر آمپر، سرعت پیشروی، دمای پیش گرم و... بستگی دارد [۲]. با توجه به اینکه فرایند جوشکاری زیرپودری نسبت به

^۲ Feed Rate

^۳ Stick Out

^۱ Arc Welding Submerged

$$\frac{d}{da}(U - F + W) = 0 \quad (1)$$

که در آن U انرژی الاستیک جذب شده در ورق، F کار انجام شده توسط بار خارجی و W انرژی لازم برای شکل گیری ترک می باشد. به این ترتیب نرخ رهایی انرژی و مقاومت رشد ترک به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\frac{d(F-W)}{da} = G \quad (2)$$

$$R = \frac{dw}{da} \quad (3)$$

ورقی با ضخامت B تحت بار p را در نظر بگیرید (شکل ۱) محل اعمال بار P به اندازه V تغییر مکان می دهد وقتی طول ترک به اندازه da اضافه می شود تغییر شکل محل بار به اندازه dv افزایش می یابد بنابراین کار انجام شده توسط بار خارجی $p.dv$ می باشد به این ترتیب نتیجه می شود:

$$G = \frac{d}{da}(F - U_I) = \frac{1}{B} \left(P \frac{dv}{da} - \frac{dU_I}{da} \right) \quad (4)$$

ضخامت ورق: B

U_I : کل انرژی الاستیک در ورق:

چون تغییر شکلهای الاستیک در نظر گرفته می شوند مادامی که ترک رشد نکند تغییر مکان V متناسب با بار تغییر می کند:

$$C = \frac{V}{P} \quad (5)$$

که در آن C نرمی ورق است. برای ورق بدون ترک به طول l و عرض w و ضخامت B ، نرمی عبارتست از

$$C = \frac{L}{wBE} \quad (6)$$

که در آن E مدول الاستیسیته می باشد.

بنابراین انرژی الاستیک موجود در ورق دارای ترک عبارت است از:

$$U_I = \frac{1}{2} PV = \frac{1}{2} CP^2 \quad (7)$$

با مساوی قراردادن معادلات ۴ و ۵ و ساده سازی نتیجه خواهد شد:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial U_I}{\partial a} \right) P = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial U_I}{\partial a} \right) V \quad (8)$$

G همواره متناسب با مشتق انرژی الاستیک است

مقدار نیروی لازم جهت شروع پیشرفت ترک P_C که متناظر با مقدار بحرانی مقاومت G_C باشد که برای حالت I برابر است با:

$$G_{IC} = \frac{P_C^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (9)$$

مختلف پارامتر خروجی تخمین زده شده است [۶]. جوانگ و همکاران جهت بهینه سازی فرآیند جوشکاری به روش تاگوچی، سعی در انتخاب بهینه ترین حالت پارامترهای ورودی نمودند [۷]. دوگا و همکاران نشان دادند که بیش از ۸۰٪ شکست سازه ها، ناشی از شکست های ناگهانی "رشد ترک" می باشد [۸]. در این مقاله شبکه عصبی پس انتشار خطا^۴ (BPN) برای مدلسازی فرایند جوشکاری زیر پودری مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه عصبی بیشترین کاربرد را در زمینه پیش بینی پارامترها در مهندسی دارد. کاربرد زیاد این شبکه عمدتاً به خاطر این است که شبکه پس انتشار خطا یک شبکه چند لایه ای است و شبکه های چند لایه ای دارای قدرت نمایش بالا جهت استفاده در مسائل غیر خطی می باشند. در این مقاله ابتدا ۲۱ نمونه برای جوشکاری آماده شدند. سپس طراحی آزمایشات به روش تاگوچی انجام گرفته و نمونه ها تحت شرایط مختلف اعم از شدت جریان الکتریکی، سرعت پیشروی و طول موثر الکترود، جوشکاری شدند. پس از جوشکاری نمونه ها، انرژی بحرانی انتشار ترک در طول ترک اولیه (mm) ۱۷ اندازه گیری شدند. در نهایت یک سیستم هوشمند برای تخمین استحکام جوش بر اساس پارامترهای تنظیمی ورودی جوشکاری طراحی و آموزش داده شد که در آن می توان بدون صرف هزینه و وقت، مقدار استحکام در برابر انتشار ترک قطعات جوشکاری شده را بر اساس پارامترهای تنظیمی جوشکاری زیر پودری تخمین زد.

۲-تئوری آزمایش

برای تحلیل و تعیین مقاومت مواد در مقابل انتشار ترک^۵ دو نظریه اساسی وجود دارد [۹]

- ۱- نظریه تمرکز تنش
- ۲- نظریه آهنگ رهایی انرژی

در نظریه تمرکز تنش، فاکتور شدت تنش k معرفی شده است هر گاه این فاکتور به حد بحرانی رسید ترک شروع به رشد می کند. در نظریه آهنگ رهایی انرژی بیان می شود که انرژی اشاعه ترک در جسم ذخیره می شود و هنگامی که به حد بحرانی رسید ترک آغاز به رشد میکند. در این قسمت توضیحات کلی در مورد نظریه آهنگ رهایی انرژی بیان می شود.

۲-۱- نظریه آهنگ رهایی انرژی

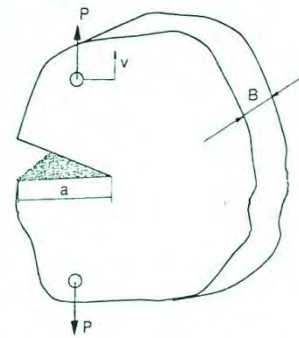
معیار انرژی گریفت برای شکست اجسام ترد دلالت بر این دارد که رشد ترک هنگامی اتفاق می افتد که انرژی لازم برای ایجاد افزایش طول ترک با اندازه da توسط سیستم فراهم شود. انرژی لازم برای رشد ترک بایستی به صورت رها شدن انرژی الاستیک صورت پذیرد. برای ورقی با ضخامت واحد شرط رشد ترک عبارت است از:

^۴ back-propagation network

^۵ Crack propagation



۳-نمونه های اولیه



۱- ورق دارای ترک تحت اثر بار P [۱۰]

نرخ رهایی انرژی برای مدل‌های مختلف به صورت های G_I و G_{II} و G_{III} نمایش داده می شود که با جمع این ها می توان نرخ رهایی انرژی کلی را برای مدهای مختلف بارگذاری بدست آورد :

$$G = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (10)$$

ترک هنگامی گسترش می یابد که G معادل انرژی لازم برای رشد ترک باشد.

۳- ویژگی های آزمایش

ابتدا ۴۲ نمونه به ابعاد 120×40 mm از ورقی به ضخامت ۵ mm بریده شد (شکل ۳ و ۲). سپس به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف (پیشروی، شدت جریان و فاصله نازل) بر انتشار ترک، نمونه ها تحت شرایط مختلف جوشکاری و سپس شماره گذاری شدند. مقادیر پارامتر ها در جدول (۱) ارائه شده است. به جهت بهینه سازی آزمایش، به کمک نرم افزار Minitab ۱۸ حالت از ۳۶ حالت ممکنه انتخاب و بر روی نمونه ها اعمال گردید. مقادیر پارامترهای مختلف برای هر نمونه در جدول (۲) نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری از وزش قوس، نمونه ها بر روی صفحه ای به ابعاد $120 \times 40 \times 5$ mm قرار گرفتند و اتصال به این صفحات اعمال شد (شکل ۴). پس از اتمام جوشکاری نمونه ها مطابق استاندارد (ASTM E99-74) آماده سازی شدند (شکل ۵).

جدول ۱- مقادیر پارامترهای جوشکاری در حالات مختلف

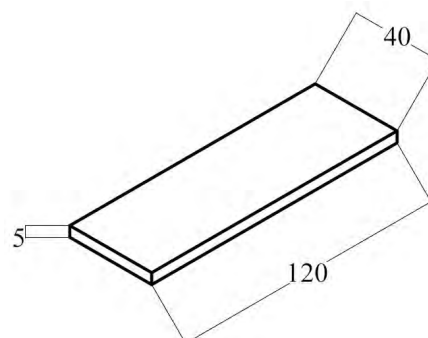
پارامتر مستقل	I	II	III	III
شدت جریان (A)	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	
سرعت پیشروی (mm)	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰
طول موثر الکترود [S.O](mm)	۱۵	۲۰	۲۵	



۴-جوشکاری نمونه روی صفحه فلزی به منظور اجتناب از وزش قوس



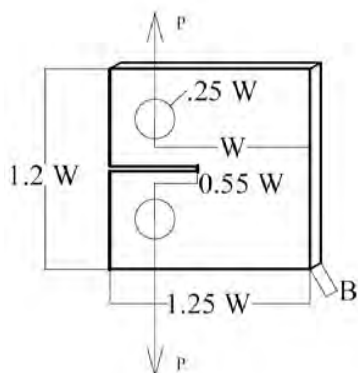
۵- نمونه آماده برای تست



۲-ابعاد نمونه اولیه

جدول ۲-مقادیر پارامترهای جوشکاری اعمال شده بر نمونه ها

بحرانی انتشار ترک در طول ترک (mm) ۱۷ در جدول (۳) ارائه شده است.



۶- نمونه استاندارد CT [۱۷]



۷- نمونه حین تست

جدول ۳- مقادیر G_{IC} ، G_{IC} نمونه ها

Num	$G_{IC}(N/mm)$	Num	$G_{IC}(N/mm)$
۱	۲/۰۳	۱۰	۱/۸۵
۲	۲/۰۲	۱۱	۱/۳۳
۳	۲/۳۹	۱۲	۰/۹۰
۴	۰/۷۱	۱۳	۱/۸۴
۵	۱/۸۵	۱۴	۱/۳۳
۶	۰/۸۳	۱۵	۲/۰۸
۷	۰/۶۲	۱۶	۲/۰۱
۸	۱/۱۳	۱۷	۰/۹۲
۹	۰/۶۹	۱۸	۱/۵۱

۴- طراحی سیستم هوشمند از نوع شبکه عصبی

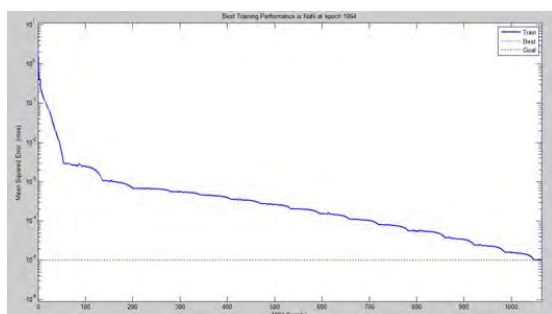
Num	Feed rate (mm/Min)	Current (A)	Stick Out (mm)
۱	۵۵۰	۴۰۰	۲۵
۲	۴۵۰	۳۵۰	۱۵
۳	۴۵۰	۴۵۰	۲۵
۴	۵۵۰	۳۵۰	۱۵
۵	۶۰۰	۴۵۰	۱۵
۶	۵۰۰	۳۵۰	۲۵
۷	۵۵۰	۳۵۰	۲۵
۸	۴۵۰	۴۵۰	۱۵
۹	۵۵۰	۳۵۰	۲۰
۱۰	۵۰۰	۴۰۰	۱۵
۱۱	۵۰۰	۴۰۰	۲۵
۱۲	۴۵۰	۴۰۰	۲۰
۱۳	۶۰۰	۴۰۰	۲۰
۱۴	۵۰۰	۴۰۰	۲۰
۱۵	۵۵۰	۴۵۰	۲۵
۱۶	۵۰۰	۴۵۰	۲۵
۱۷	۵۰۰	۳۵۰	۱۵
۱۸	۴۵۰	۴۰۰	۱۵
۱۹	۴۵۰	۳۵۰	۲۰
۲۰	۶۰۰	۳۵۰	۲۰
۲۱	۴۵۰	۴۰۰	۲۵

بعد از آماده سازی، نمونه ها روی گیره بسته شدند و روی آنها تست انجام شد (شکل ۷). برای هر نمونه پس از آغاز تست و رسیدن انرژی به مقدار بحرانی ترک به آرامی شروع به رشد کرد. پس از رشد ترک به مقدار چند میلی متر، تست متوقف شد و فکها به مقداری به هم نزدیک شدند که به موقعیت اولیه خود رسیدند. مقدار طول ترک به کمک گونیا و کاغذ میلی متری اندازه گیری و ثبت گردید و مجدداً تمامی مراحل تکرار شد. بر روی هر نمونه چهار تست انجام شد. مقادیر انرژی

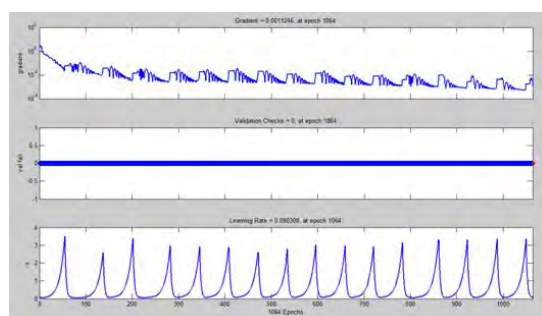
نیز کاهش می‌یابد. زیاد بودن تعداد گره‌های مخفی نیز باعث افزایش زمان آموزش شبکه می‌شود. به این علت بصورت سعی و خطا تعداد ۱۴ عدد گره در لایه مخفی مناسب تشخیص داده شد. تابع تبدیل بکار رفته در شبکه از نوع تابع سیگموئید باینری بصورت زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1 \quad (11)$$

جهت آموزش شبکه از اطلاعات حاصل از آزمایشهای عملی استفاده شد. نتیجه هر آزمایش یک دسته داده آموزشی برای آموزش شبکه است که در آن مقادیر ورودی و خروجی معلوم می‌باشد. در شبکه ارتباط بین نورونها توسط مقدار وزنی تعیین می‌شود. در ابتدا مقدار این بردار وزنی بصورت مقادیر تصادفی انتخاب می‌شود. در هر آموزش، شبکه با اطلاعات ورودی مقدار خروجی را محاسبه می‌کند و در صورت وجود اختلاف بین مقدار خروجی واقعی و خروجی محاسبه نموده، خطا را به عقب منتشر کرده و مقادیر وزنی بین گره‌ها را تصحیح می‌کند. این کار تا زمانی که مقدار خطای شبکه برای نمونه‌های آموزشی از مقدار 0.00001 کمتر باشد ادامه داده می‌شود. منحنی خطای آموزش شبکه و روند آموزش شبکه تا رسیدن به خطای مطلوب بعد از ۱۰۶۴ تکرار آموزش در شکل (۹و۸) ارائه شده است.



۸- منحنی خطای آموزش شبکه جهت نیل به خطای مطلوب



۹- روند آموزش شبکه تا رسیدن به خطای مطلوب

۵- نتایج:

بعد از آموزش شبکه، با استفاده از اطلاعات آزمایشی که ۵۰٪ آن‌ها از نمونه‌های آموزشی شبکه و ۵۰٪ آن‌ها از نمونه‌های جدید بودند جهت سنجش میزان دقت عملکرد شبکه عصبی مدل‌سازی شده در نرم افزار مطلب بررسی شدند. با وارد کردن ورودی‌ها، شبکه مدل‌سازی شده مقدار انرژی ترک نمونه‌ها را مطابق جدول (۳) تخمین می‌زند.

جدول ۵- پیش بینی انرژی انتشار ترک به کمک شبکه عصبی

با در دست داشتن داده‌های تجربی، یک سیستم هوشمند از نوع شبکه عصبی طراحی شد. بدین منظور در محیط نرم‌افزار مطلب یک شبکه عصبی BP طراحی شد که دارای سه لایه (یک لایه ورودی، یک لایه

جدول ۴- نتایج تست شبکه عصبی (G_{IC})

شماره نمونه	Real $G_{IC}(N/mm)$	Estimated $G_{IC}(N/mm)$	Accuracy Percent
۱	۲/۰۳	۲/۰۱۲	۹۹/۲
۲	۲/۰۲	۲/۰۰۷	۹۹/۴
۳	۲/۳۹	۲/۲۱	۹۲/۵
۴	۰/۷۱	۰/۶۹	۹۷/۲
۵	۱/۸۵	۱/۵۶	۸۴/۴
۶	۰/۸۳	۰/۷۹	۹۵/۲
۷	۰/۶۲	۰/۵۹	۹۵/۲
۸	۱/۱۳	۰/۹۹	۸۷/۶
۹	۰/۶۹	۰/۶۱	۷۸/۵
۱۰	۱/۸۵	۱/۶۸	۹۰/۸
۱۱	۱/۳۳	۱/۲۸	۹۶/۲
۱۲	۰/۹۰	۰/۸۴	۹۳/۳
۱۳	۱/۸۴	۱/۵۳	۸۳/۲
۱۴	۱/۳۳	۱/۵۱	۸۶/۵
۱۵	۲/۰۸	۱/۹۵	۹۳/۲
۱۶	۲/۰۱	۱/۹۱	۹۵/۰
۱۷	۰/۹۲	۰/۹۰	۹۷/۸
۱۸	۱/۵۱	۱/۴۷	۹۷/۴

مخفی و یک لایه خروجی) می‌باشد. لایه ورودی شبکه دارای ۳ ورودی شامل آمپر جوشکاری، سرعت جوشکاری و طول موثر نازل و لایه خروجی دارای یک خروجی یعنی انرژی بحرانی انتشار ترک در طول ترک mm ۱۷ می‌باشد. تعداد گره‌های لایه مخفی نیز ۱۴ عدد می‌باشد. علت انتخاب ۱۴ گره آن است که با انتخاب تعداد گره‌های مخفی پائین، تعداد تکرارهای لازم برای آموزش شبکه خیلی زیاد شده و دقت تخمین

- [1] Y. Yang, "The Effect of Submerged Arc Welding Parameters on The Properties of Pressure Vessel and Wind Turbine Tower." University of Saskatchewan, 2008
- [2] N. Murugana, V. Gunaraj, "Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes", Journal of Materials Processing Technology 168, pp. 478-487, 2005.
- [3] R. Dhas, S. Kumanan, "Weld quality prediction of submerged arc welding process using a functional replacing hybrid system", Advanced in Production and Managements, Vol.5, 2010
- [4] R. Yang, L.J. Bibby, M.J. Chandel, Linear regression equation for modeling the submerged-arc welding process", journal of materials Processing and technology, Vol.39, 33-42
- [5] Juang, Y.S. Tarng, Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel, Material Processing Technology, 2002, 33-37
- [6] N. Murugana, V. Gunaraj, "Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes", Journal of Materials Processing Technology, Vol 168, Issue 3, p.p 478-487, 15 October 2005.
- [7] Duga, J.J. Fisher, W.H. Buxbaum, R.W. Rosefield, A.R. Burth, A.R. Honton, E.J. And McMillan, S.C. 1983. "The Economic Effect of Fracture in the United States". In proc. United States Department of commerce. March, Washington, DC, NBS, Special Publication PP. 647-652.
- [8] J. McClelland, D. Rumelhart, "Parallel Distributed Processing", MIT Press, Cambridge, MA, vol. 1, 1986.
- [9] D. Brock, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Martinus Nijhoff Pub, London, 1982.
- [10] G.R. Irwin, "Fracture Dynamics. Fracture of Metals" ASM pub, pp. 147-166, 1948
- [11] G.R. Irwin, "Fracture. In Handbook der Physik pp. 551-590, 1958.

شماره نمونه	Real (N/mm)	Estim G_{TC} (N/mm)	Accuracy Percent
۵	۱/۸۵	۱/۵۳	۸۴/۴
۸	۱/۱۳	۰/۹۹	۸۷/۶
۱۳	۱/۸۴	۱/۵۶	۸۳/۲
۱۹	۱/۷۰	۱/۶۳	۹۵/۹
۲۰	۱/۱۱	۱/۰۲	۹۱/۹
۲۱	۱/۷۲	۱/۶۳	۹۴/۸

شکل (۱۰) مقایسه نتایج خروجی شبکه عصبی طراحی شده و انرژی انتشار ترک واقعی را نشان می‌دهد که دقت تخمین آن برابر ۹۲/۳۶٪ می‌باشد.



۱۰- مقایسه نتایج تخمین شبکه آموزشی با انرژی انتشار ترک واقعی

۵- نتیجه گیری:

به طور کلی ملاحظه می‌شود که به کمک شبکه عصبی می‌توان خواص غیر خطی را با دقت‌های مطلوب شبیه‌سازی نمود. در این مقاله فعالیت‌های انجام شده منجر به شکل‌گیری شبکه عصبی به جهت پیش‌بینی انرژی انتشار در اتصالات صورت گرفته به کمک فرایند زیر پودری با دقت ۹۲/۳۶٪ گردید. توصیه می‌شود که شبکه عصبی به جهت پیش‌بینی تاثیر پارامترهای جوشکاری بر عرض ناحیه HAZ و عمق نفوذ در فرایند جوشکاری زیر پودری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین توصیه می‌شود تاثیر تعداد تکرار "پس انتشار" بر دقت شبکه مورد بررسی و تعداد تکرار بهینه تعیین شود.

مراجع