

پیش بینی دمای سطح سنگزنی خزشی با استفاده از منطق فازی و به کمک روش هدایت حرارتی معکوس (IHCP)

محمد صدیقی^۱، علیرضا بابائی^۲، داود افشاری^۳

چکیده

هدف از این تحقیق، محاسبه دمای سطح قطعه کار حین سنگزنی خزشی به کمک روش هدایت حرارتی معکوس و تاریخچه دمایی و پیش‌بینی دمای سطح با استفاده از مدل منطق فازی است. به دلیل عدم امکان دسترسی به ناحیه برش و پاشش مایع خنک‌کار با سرعت بالا بر این ناحیه، امکان اندازه‌گیری تجربی دمای سطح سنگزنی وجود ندارد. بنابراین باید از طریق اندازه‌گیری دما در زیر سطح سنگزنی در گام‌های زمانی معین و بکارگیری روش‌های محاسباتی ویژه و تلفیق آنها با مباحث انتقال حرارت، دمای سطح سنگزنی تخمین زده شود. در این تحقیق دمای زیر سطح سنگزنی حین سنگزنی خزشی قطعه کار از جنس سوپرآلیاژ پایه کبالت بوسیله سه عدد ترموکوپل به صورت تجربی اندازه‌گیری شد و سپس به کمک روش هدایت حرارتی معکوس و تاریخچه دمایی ثبت شده تجربی، دمای سطح سنگزنی محاسبه شد. در ادامه با استفاده از اطلاعات تجربی و منطق فازی مدلی برای پیش‌بینی دمای سطح سنگزنی ایجاد گردید. نتایج حاصل میانگین خطای حدود ۳ درصد در مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سنگزنی خزشی - منطق فازی - هدایت حرارتی معکوس - پیش‌بینی دما - ترموکوپل

فهرست علائم

| | | | | | |
|--|-----------------------|------------|------------------------------------|------------------------|-----------|
| عمق برش | a (mm) | جدول (۱) | دمای بی بعد | T^+ | رابطه (۹) |
| سطحی که شار حرارتی سطحی بر آن اثر دارد | A (mm ²) | رابطه (۱۱) | دمای محیط آزمایش | T_0 (°C) | رابطه (۲) |
| رسانندگی گرمایی (۱۴/۵) | K (W/m.k) | رابطه (۱۱) | سرعت چرخش چرخ سنگزنی | V_s (m/s) | جدول (۱) |
| اندیس شماره گام زمانی | M | رابطه (۱) | سرعت پیشروی | V_w (mm/s) | جدول (۱) |
| شار حرارتی سطحی | q (W/m ²) | رابطه (۱) | گام زمانی Δt | λ_i | رابطه (۲) |
| متغیر مکان | r | رابطه (۲) | طول گام زمان | $\Delta \lambda$ (sec) | رابطه (۱) |
| متغیر زمان | t | رابطه (۲) | میزان افزایش دما بر اثر افزایش شار | ϕ | رابطه (۲) |
| زمان بی بعد (عدد فوریه) | t^+ | رابطه (۹) | حرارتی سطحی | | |

۱- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مکانیک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکترا دانشگاه علم و صنعت ایران

۱- مقدمه

فرآیند سنگزنی خزشی^۱ به دلیل قابلیت در ایجاد سطوح دقیق با صافی سطح بالا در صنایع هوافضا کاربرد وسیعی دارد. از مزایای این روش، ماشینکاری مواد سخت و فوق سخت می‌باشد. با وجود مزایای مذکور، این فرآیند دارای یک محدودیت ذاتی می‌باشد و آن بهره‌وری پایین این عملیات می‌باشد. راهکار بهبود بهره‌وری، افزایش عمق برش و سرعت پیشروی سنگ می‌باشد. اما با افزایش این دو پارامتر در ناحیه برش میان ابزار و قطعه‌کار، دما نیز افزایش می‌یابد. بنابراین باید این دو پارامتر به نحوی انتخاب شوند که علاوه بر دستیابی به حجم براده برداری مناسب، باعث افزایش بیش از حد دمای سطح سنگزنی نشوند. با دانستن میزان دمای سطح سنگزنی و کنترل دمای این ناحیه از طریق بهینه نمودن پارامترهای ورودی موثر بر دما می‌توان از بروز آسیب‌های حرارتی و سوختگی سطح و همچنین آسیب رسیدن به چرخ سنگزنی جلوگیری نمود که این مطلب خود بیانگر اهمیت ویژه دمای سطح سنگزنی می‌باشد. از آنجا که امکان اندازه‌گیری تجربی دمای سطح سنگزنی به دلیل عدم امکان دسترسی به ناحیه برش و پاشش مایع خنک‌کار حین عملیات مگر با استفاده از تجهیزات خاص وجود ندارد، بنابراین تنها راه ممکن جهت تخمین دما در این منطقه استفاده از روش‌های محاسباتی ویژه می‌باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، پیش‌بینی دمای سطح سنگزنی پیش از انجام عملیات همواره یکی از موضوعات مورد علاقه محققین و صاحبان صنایع بوده است و تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است. بدیهی است که پیش‌بینی و مدلسازی یک فرآیند می‌تواند موجب صرفه‌جویی بسیار زیادی در هزینه‌های اقتصادی و زمان گردد. با توجه به ماهیت پیچیده دمای سطح سنگزنی، روشهای مبتنی بر تجزیه و تحلیل آماری و ارائه فرمول‌های خطی بر اساس پارامترهای کاری فرآیند، دارای قابلیت اطمینان مناسبی در پیش‌بینی این پارامترها نمی‌باشد. فرمول‌های ارائه شده در این خصوص تنها در محدوده‌های خاصی دارای دقت مناسبی می‌باشند و امکان پیش‌بینی دمای سطح با دقت مناسب در تمامی شرایط سنگزنی را دارا نمی‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی و امکان محاسبات

طولانی در زمانهای بسیار کوتاه، روشهای مبتنی بر هوش مصنوعی در مدلسازی فرایندهای تولید و پیش‌بینی پارامترهای خروجی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲،۱].

کوریاگاوا [۳] با اندازه‌گیری دمای زیر سطح سنگزنی خزشی بوسیله ترموکوپل، به مطالعه اثر سرعت چرخش سنگ، سرعت پیشروی ابزار و قطر سنگ پرداخته و پارامترهای بهینه جهت سنگزنی خزشی قطعه سرمتی (Ti(C,N)) را معرفی کرد. جین [۴] در بررسی خود بر روی دمای سطح قطعه‌کار در عملیات سنگزنی خزشی به این نتیجه رسید که عمده دمای تولید شده در این عملیات (حدود ۹۰٪) توسط مایع خنک‌کاری منتقل می‌شود. کیم و همکارانش [۴] جهت بررسی توزیع شار دمایی و دمای سطح قطعه‌کار در سنگزنی خزشی از روش هدایت گرمایی معکوس استفاده نمودند. زهنگ [۱] از منطق فازی برای پیش‌بینی شرایط کاری فرآیند سنگزنی که در آن سوختگی سطحی در قطعه کار حاصل می‌شود، در جهت بهینه سازی این فرآیند، استفاده کرد. نیبل گیندی [۵] منطق فازی را برای تشخیص الگوی سیگنالهای آکوستیک امپشنی در پیش‌بینی سوختگی سطح در سنگزنی به کار برد. فو و وانگ [۲] با استفاده از شبکه عصبی نتایج بسیار جالبی را در پیش‌بینی نیرو و دمای حاصل از سنگزنی خزشی بدست آوردند.

در این تحقیق از طریق آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف پارامترهای کاری فرآیند، دمای ۲ mm پائین‌تر از سطح سنگزنی اندازه‌گیری شد و سپس به کمک روش هدایت حرارتی معکوس و تاریخچه دائمی ثبت شده تجربی، دمای سطح سنگزنی محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از منطق فازی و اطلاعات تجربی، مدلی برای پیش‌بینی دمای سطح سنگزنی ایجاد گردید. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که مدل ارائه شده دارای دقت و توانایی بالایی در پیش‌بینی دمای سطح سنگزنی می‌باشند.

۲- آزمایش‌های تجربی

در این تحقیق، مقادیر تجربی دما از فرآیند سنگزنی خزشی قطعاتی از جنس سوپر آلیاژ پایه کبالت (MAR-M-509) بوسیله دستگاه سنگزنی خزشی ELB-SCHLFE CNC و چرخ سنگزنی اکسید آلومینیوم به قطر ۱۶۹ mm و با استفاده از ۳

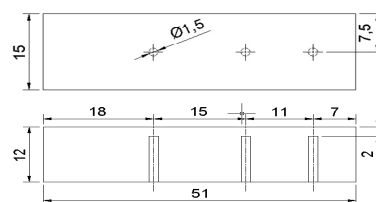
حاکم نمی‌باشد که این ناپایداری باعث ایجاد نوسانات و ناپایداری‌هایی در پارامترهای خروجی ماشینکاری از جمله دمای سطح سنگ‌زنی می‌شود. بنابراین سعی بر آن است که اندازه‌گیری دما در نواحی پایدار انجام پذیرد که بر اساس همین اصل هر چه چرخ سنگ‌زنی به سمت انتهای قطعه‌کار نزدیک می‌شود، فاصله میان ترموکوپل‌ها نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱).

یکی از مهمترین کارهای انجام شده در این مطالعه، تقسیم طول سنگ‌زنی به بازه زمانی مناسب و استخراج دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در هر گام زمانی می‌باشد که گام زمانی و دمای اندازه‌گیری شده در هر گام به عنوان داده در روش معکوس مورد استفاده قرار گرفت.



عدد ترموکوپل نوع k در عمق ۲ میلیمتری زیر سطح قطعه‌کار با فاصله مشخص از یکدیگر استخراج شده است. کلیه آزمایشات تجربی در شرکت صها انجام شد. علت انتخاب این ماده کاربرد وسیع این ماده در صنایع هوافضا می‌باشد.

برای اندازه‌گیری دمای زیر سطح، تعداد ۲۷ قطعه‌کار به ابعاد ۱۲×۱۵×۵۱ میلیمتر با استفاده از پارامترهای ماشینکاری مشخصی سنگ‌زنی شد. پارامترهای ماشینکاری متغیر در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارتند از: سرعت چرخش سنگ، سرعت پیشروی قطعه‌کار و عمق برش که در هر پارامتر ۳ اندازه مختلف در نظر گرفته شد. کلیه تست‌های سنگ‌زنی با استفاده از مایع خنک‌کاری پایه آبی ایزوگرین انجام شده است. در ابتدای عملیات سنگ‌زنی بدلیل درگیری کامل چرخ سنگ‌زنی با قطعه‌کار، تعادل نیرویی مناسبی بر فرآیند سنگ‌زنی



شکل (۱): نحوه قرار گرفتن ترموکوپل‌ها در قطعه‌کار

۳-۱- تئوری دوهمال

برای استخراج معادلات هدایت حرارتی معکوس، از تئوری دوهمال^۳ استفاده شده است [۷]. تئوری دوهمال بیان می‌کند که شار حرارتی وارده به قطعه‌کار تنها تابع زمان می‌باشد و در هر گام زمانی متغیر است. طبق این تئوری، شار حرارتی وارده به سطح در کل زمان هر گام زمانی جهت بدست آوردن معادلات مد نظر نمی‌باشد بلکه تنها شار حرارتی در نقطه میانی هر بازه زمانی مد نظر است. در اینجا شار حرارتی تنها تابع زمان می‌باشد و در هر گام زمانی متغیر است بنابراین اثری که شار در هر گام بر دما می‌گذارد، مد نظر می‌باشد. بازه زمانی که شار در آنها تغییر می‌کند بصورت صفر تا λ_1 ، λ_1 تا λ_2 ، λ_2 تا λ_{M-1} ، λ_{M-1} تا t_M می‌باشد.

شار حرارتی وارده به سطح در بازه زمانی M برابر است با:

$$q_M = q(\lambda_{M-1/2}) = q(M - 1/2) \Delta \lambda \quad (1)$$

۳-۲ تئوری روش هدایت حرارتی معکوس

روش هدایت گرمایی معکوس (IHCP^۲) عبارتست از تخمین تاریخیچه شار حرارتی سطحی بر اساس تاریخیچه دمایی اندازه‌گیری شده درون جسم هادی. دلیل بکار بردن کلمه تخمین، وجود خطاهایی است که در اندازه‌گیری تجربی دما اتفاق می‌افتد و بر دقت محاسبات اثر گذار می‌باشد [۶]. این روش حساس به خطاهای اندازه‌گیری می‌باشد و به همین دلیل معروف به مسائل ill-posed می‌باشد. همچنین این روش در گام‌های زمانی کوچک همراه با درصدی خطا خواهد بود که به دلیل کمبود اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین شار حرارتی سطحی می‌باشد. نحوه مدل‌سازی قطعه کار حین فرآیند سنگ‌زنی بصورت یک صفحه تخت که تحت شار حرارتی ثابت q_c در هر گام در $x=0$ (سطح سنگ‌زنی) قرار دارد و در $x=L$ (سطح دیگر قطعه‌کار) عایق شده است، می‌باشد.

دما در هر گام در اثر تغییر شار حرارتی سطحی در گام‌های قبلی می‌باشد زیرا تأخیر و میرایی وجود دارد.

پس از چند مرحله ساده‌سازی، رابطه (۲) را می‌توان در فرم ماتریسی و اصلاح شده به صورت رابطه (۳) بازنویسی نمود.

$$T = Xq + \hat{T}|_{q=0} \quad (3)$$

دمای قطعه‌کار در هر لحظه برابر است با دمای محیط بعلاوه تغییرات دمایی ناشی از تغییرات شار حرارتی سطحی در گام‌های زمانی گذشته که معادله آن عبارتست از:

$$T(r, t_M) = T_0 + q_1 [\phi(r, t_M - \lambda_0) \quad \phi(r, t_M - \lambda_1)] \\ + q_2 [\phi(r, t_M - \lambda_1) \quad \phi(r, t_M - \lambda_2)] \\ \vdots \\ + q_M [\phi(r, t_M - \lambda_{M-1}) \quad \phi(r, t_M - \lambda_M)] \quad (2)$$

در رابطه (۲)، T_0 دمای محیط و ثابت می‌باشد و q_M شار حرارتی در زمان t_M ، r متغییر مکان و $\phi(r, t_M)$ بیانگر تغییر اجزاء مختلف رابطه (۳) عبارتند از:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_M \\ T_{M+1} \\ \vdots \\ T_{M+r-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\phi_0 & & & & & & \\ \Delta\phi_1 & \Delta\phi_0 & & & & & \\ \Delta\phi_2 & \Delta\phi_1 & \Delta\phi_0 & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \\ \Delta\phi_{M-1} & \Delta\phi_{M-2} & \Delta\phi_{M-3} & \dots & \Delta\phi_0 & & \\ \Delta\phi_M & \Delta\phi_{M-1} & \Delta\phi_{M-2} & \dots & \Delta\phi_1 & \Delta\phi_0 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & & \\ \Delta\phi_{M+r-2} & \Delta\phi_{M+r-3} & \Delta\phi_{M+r-4} & \dots & \Delta\phi_{r-1} & \Delta\phi_{r-2} & \dots & \Delta\phi_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_M \\ q_{M+1} \\ \vdots \\ q_{M+r-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{T}_M|_{q_M=0} \\ \hat{T}_{M+1}|_{q_M=q_{M+1}=0} \\ \vdots \\ \hat{T}_{M+r-1}|_{q_M=q_{M+1}=0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

در اینجا تنها شار حرارتی در سه گام زمانی پایانی هر بازه صعودی مورد نظر می‌باشد. بنابراین الگوریتم فوق برای سه گام بسط داده شده است.

$$\hat{q}_1 = \frac{y_1 - T_0}{\phi_1} \quad (6)$$

$$\hat{q}_2 = \frac{y_2 - \hat{q}_1 \Delta\phi_1 - T_0}{\phi_1} \quad (7)$$

$$\hat{q}_3 = \frac{y_3 - \hat{q}_1 \Delta\phi_2 - \hat{q}_2 \Delta\phi_1 - T_0}{\phi_1} \quad (8)$$

$$\phi_i = T^+ (t_i^+)^{X/K}, \Delta\phi_1 = \phi_2 - \phi_1, \Delta\phi_2 = \phi_3 - \phi_2 \quad (9 \text{ و } 10)$$

پس از بدست آمدن شار حرارتی سطحی از الگوریتم استلر، به کمک معادله رسانش گرمایی:

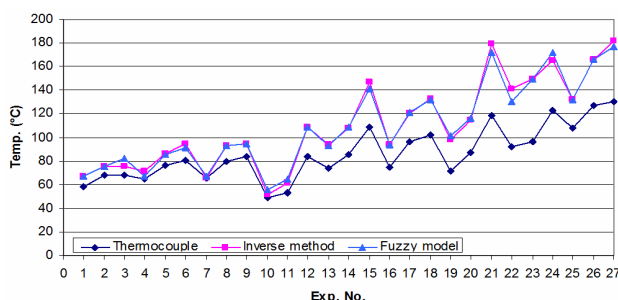
$$q/A = K \Delta T / \Delta x \quad (11)$$

اختلاف دمای سطح سنگزنی در محل ترموکوپل و به تبع آن دمای سطح سنگزنی بدست می‌آید.

$\Delta\phi$ برابر است با افزایش دما در محل ترموکوپل در گام زمانی اول بر اثر افزایش شار حرارتی سطحی به اندازه یک گام زمانی و به همین ترتیب بقیه $\Delta\phi$ ها و T_M برابر دمای اندازه‌گیری شده در زمان t_M می‌باشد که برابر y_M (دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل) می‌باشد.

$$\hat{q}_M = \frac{y_M - \sum_{i=1}^{M-1} \hat{q}_i \Delta\phi_{M-i} - T_0}{\phi_1}, \Delta\phi_0 = \phi_1 - \phi_0 = \phi_1 \quad (5)$$

رابطه (۵)، الگوریتم استلر نام دارد و در مورد طیف وسیعی از هندسه‌ها کاربرد دارد و خاصیت مهم آن ترتیبی بودن ذاتی آن است، می‌باشد زیرا شار حرارتی در هر گام زمانی که متأثر از شارهای قبلی می‌باشد، به ترتیب گام‌های زمانی محاسبه می‌شوند. خاصیت دیگر این الگوریتم، خطی بودن آن نسبت به دماهای اندازه‌گیری شده (y_M ها) می‌باشد.



نمودار (۱): مقایسه دمای سطح سنگزنی حاصل از روش معکوس، مدل منطق فازی و دمای زیر سطح در محل ترموکوپل سوم

۴- نتایج

سرعت پیشروی، عمق برشی و دمای سطح سنگزنی به ترتیب به ۳، ۳، ۲ و ۹ مجموعه فازی دسته‌بندی شده است. محدوده پارامترهای ورودی و خروجی و همچنین نحوه دسته‌بندی آنها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در این دسته بندیها تابع عضویت بکار رفته برای تمام متغیرها از نوع مثلثی با شیب ثابت می‌باشد. این دسته بندیها با یکسری حروف مخفف کدبندی شدند. جزئیات این کدهای دسته‌بندیها در جدول ۲ آورده شده است.

تاریخچه دمایی اندازه‌گیری شده توسط سه ترموکوپل در ۲۷ آزمایش به عنوان داده وارد الگوریتم استلز گردید و دمای سطح تخمین زده شد. اندازه‌گیری دما توسط سه ترموکوپل انجام گرفت و دلیل آن پایدارتر شدن فرآیند سنگزنی با گذشت زمان می‌باشد. به همین جهت ملاک مقایسه بیشتر دمای ترموکوپل سوم می‌باشد.

۴-۱- مدل منطق فازی

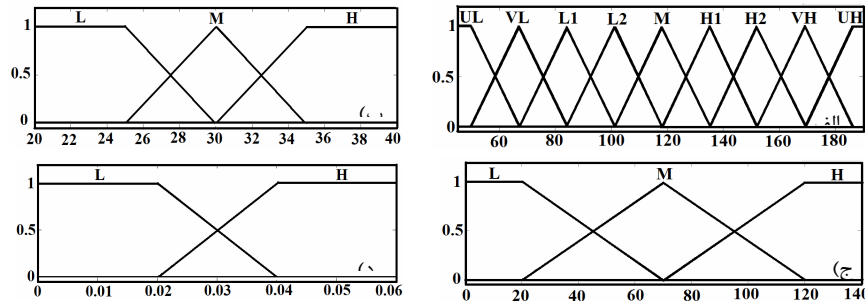
در این مدل‌سازی از سیستم استنباطی نوع ممدانی نرم افزار Matlab استفاده شد. اطلاعات تجربی سرعت چرخش سنگ،

جدول (۱): مقایسه نتایج حاصل از آموزش مدل منطق فازی با نتایج روش هدایت گرمایی معکوس

| شماره آزمایش | مقادیر پارامترهای ماشینکاری متغیر | | | نتایج آزمایش | نتایج روش هدایت حرارتی معکوس (IHCP) | نتایج مدل منطق فازی | مقایسه نتایج |
|--------------|-----------------------------------|---------|-------|-------------------------------------|---|---|--------------|
| | mm/min)(Vw | Vs(m/s) | a(mm) | دمای حس شده توسط ترموکوپل سوم (° C) | دمای سطح سنگزنی در محل ترموکوپل سوم (° C) | دمای سطح سنگزنی در محل ترموکوپل سوم (° C) | درصد خطا |
| ۱ | ۲۰ | ۲۵ | ۰/۰۲ | ۵۸/۳ | ۶۶/۹ | ۶۷ | -۰/۱۴ |
| ۲ | ۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۲ | ۶۸/۰ | ۷۵/۸ | ۷۵/۸ | ۰ |
| ۳ | ۲۰ | ۳۵ | ۰/۰۲ | ۶۷/۹ | ۷۵/۹ | ۸۱/۸ | -۷/۷۷ |
| ۷ | ۲۰ | ۲۵ | ۰/۰۴ | ۶۵/۷ | ۶۵/۵ | ۶۶/۹ | -۲/۱۳ |
| ۸ | ۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۴ | ۷۹/۸ | ۹۳/۲ | ۹۳ | ۰/۲۱ |
| ۹ | ۲۰ | ۳۵ | ۰/۰۴ | ۸۴/۱ | ۹۵/۰ | ۹۵ | ۰ |
| ۱۰ | ۷۰ | ۲۵ | ۰/۰۲ | ۴۸/۶ | ۵۱/۷ | ۵۵/۳ | -۶/۹۶ |
| ۱۱ | ۷۰ | ۳۰ | ۰/۰۲ | ۵۳/۳ | ۶۱/۳ | ۶۵/۱ | -۶/۲ |
| ۱۲ | ۷۰ | ۳۵ | ۰/۰۲ | ۸۳/۶ | ۱۰۹/۰ | ۱۰۹ | ۰ |
| ۱۶ | ۷۰ | ۲۵ | ۰/۰۴ | ۷۴/۵ | ۹۴/۱ | ۹۳/۹ | ۰/۲۱ |
| ۱۷ | ۷۰ | ۳۰ | ۰/۰۴ | ۹۶/۱ | ۱۲۰/۷ | ۱۲۱ | -۰/۲۴ |
| ۱۸ | ۷۰ | ۳۵ | ۰/۰۴ | ۱۰۱/۹ | ۱۳۲/۴ | ۱۳۲ | ۰/۳ |
| ۱۹ | ۱۲۰ | ۲۵ | ۰/۰۲ | ۷۱/۰ | ۹۸/۲ | ۱۰۱ | -۲/۸۵ |
| ۲۰ | ۱۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۲ | ۸۷/۳ | ۱۱۴/۷ | ۱۱۶ | -۱/۱۳ |
| ۲۱ | ۱۲۰ | ۳۵ | ۰/۰۲ | ۱۱۸/۷ | ۱۷۹/۲ | ۱۷۲ | ۴/۰۱ |
| ۲۵ | ۱۲۰ | ۲۵ | ۰/۰۴ | ۱۰۸/۰ | ۱۳۲/۰ | ۱۳۲ | ۰ |
| ۲۶ | ۱۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۴ | ۱۲۷/۳ | ۱۶۵/۷ | ۱۶۶ | -۰/۱۸ |
| ۲۷ | ۱۲۰ | ۳۵ | ۰/۰۴ | ۱۲۹/۹ | ۱۸۱/۵ | ۱۷۷ | ۲/۴۷ |
| | | | | | | میانگین مطلق | ۲/۲۴ |

جدول (۲): کدهای دسته بندی

| Abbreviation | Expresion | Abbreviation | Expresion |
|--------------|-----------|--------------|------------|
| L | low | UL | ultra low |
| M | medium | VL | very low |
| H | high | L | low |
| | | H | high |
| | | VH | very high |
| | | UH | ultra high |



شکل (۲): توابع عضویت الف) دمای سطح (°C) ب) سرعت چرخش سنگ (m/s) ج) سرعت پیشروی (mm/min) د) عمق برش (mm)

جدول ۳ ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده میانگین خطای مطلق حاصل از مدل پیشنهادی ۳/۱۴ درصد می باشد.

جهت تایید صحت مدل فازی ارائه شده با استفاده از ۹ آزمایش باقیمانده، مدل ارائه شده تست شد. نتایج حاصل از تست مدل فازی و مقایسه آن با نتایج روش هدایت حرارتی معکوس در

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل از تست مدل منطق فازی با نتایج روش هدایت گرمایی معکوس

| شماره آزمایش | مقادیر پارامترهای ماشینکاری متغیر | نتایج آزمایش | | | نتایج روش هدایت حرارتی معکوس (IHCP) | | مقایسه نتایج |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|---------------------|-------------------------------------|------|--------------|
| | | دمای حس شده توسط ترموکوپل سوم (°C) | دمای سطح سنگ زنی در محل ترموکوپل سوم (°C) | نتایج مدل منطق فازی | مقایسه نتایج | | |
| ۴ | (mm/min) ۲۰ (m/s) ۲۵ | ۰/۰۳ | ۶۵/۱ | ۷۱/۳ | ۶۷ | ۶/۰۳ | |
| ۵ | (mm/min) ۲۰ (m/s) ۳۰ | ۰/۰۳ | ۷۶/۶ | ۸۶/۲ | ۸۵/۵ | ۰/۸۱ | |
| ۶ | (mm/min) ۲۰ (m/s) ۳۵ | ۰/۰۳ | ۸۰/۴ | ۹۴/۵ | ۹۱/۲ | ۳/۴۹ | |
| ۱۳ | (mm/min) ۷۰ (m/s) ۲۵ | ۰/۰۳ | ۷۴/۲ | ۹۳/۶ | ۹۲/۷ | ۰/۹۶ | |
| ۱۴ | (mm/min) ۷۰ (m/s) ۳۰ | ۰/۰۳ | ۸۵/۳ | ۱۰۸/۲ | ۱۰۹ | ۰/۷۴ | |
| ۱۵ | (mm/min) ۷۰ (m/s) ۳۵ | ۰/۰۳ | ۱۰۸/۹ | ۱۴۷ | ۱۴۱ | ۴/۰۸ | |
| ۲۲ | (mm/min) ۱۲۰ (m/s) ۳۵ | ۰/۰۳ | ۹۲/۴ | ۱۴۱ | ۱۳۰ | ۷/۸ | |
| ۲۳ | (mm/min) ۱۲۰ (m/s) ۲۵ | ۰/۰۳ | ۹۶/۱ | ۱۴۹/۷ | ۱۴۹ | ۰/۴۶ | |
| ۲۴ | (mm/min) ۱۲۰ (m/s) ۳۰ | ۰/۰۳ | ۱۲۳/۱ | ۱۶۵/۵ | ۱۷۲ | ۳/۹۲ | |
| میانگین مطلق | | | | | | | ۳/۱۴ |

۶- نتیجه‌گیری

داد که مدل ارائه شده دارای دقت قابل قبولی است. میانگین جمع مطلق خطاهای تست مدل منطق فازی ۳/۱۴ درصد می‌باشد. با استفاده از این مدل، می‌توان پیش بینی بسیار دقیقی از دمای سطح سنگ‌زنی خزشی بدست آورد. از مدل پیشنهادی می‌توان برای بهینه‌سازی پارامترهای کاری فرایند سنگ‌زنی به منظور جلوگیری از آسیب‌های حرارتی و مونیتورینگ فرایند سنگ‌زنی استفاده نمود.

برای محاسبه و پیش‌بینی دمای قطعه‌کار حین سنگ‌زنی خزشی پس از اندازه‌گیری تجربی دمای ۲mm زیر سطح و ثبت تاریخچه دمایی، به کمک روش هدایت حرارتی معکوس دمای سطح سنگ‌زنی محاسبه شد. با توجه به حساسیت روش معکوس به گام‌های زمانی کوچک، یکی از اهداف این تحقیق تعیین اندازه این گام بود که با بررسی نتایج مشخص گردید که در این مدل‌سازی گام‌های زمانی کوچکتر از ۱/۵ ثانیه به عنوان گام زمانی کوچک می‌باشند. در ادامه با استفاده از اطلاعات تجربی و منطق فازی مدلی برای پیش‌بینی دمای سطح سنگ‌زنی ایجاد گردید. مقایسه نتایج حاصل از آموزش و تست این مدل با مقادیر بدست آمده از روش هدایت حرارتی معکوس نشان

پی‌نوشت:

- 1- Creep feed grinding
- 2- Inverse heat conduction problem
- 3- Duhamel
- 4- Stolz

مراجع

- 1- Zhang L.C., Ali Y. M., "A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel", Machine Tools & Manufacture, Vol 44, 2004, PP 563-571.
- 2- Fuh. K.H, Wang. S.B., " Force Modeling and Forecasting in Creep Feed Grinding Using Improved BP Neural Network", Int J Mach tools manufact, Vol 37, 1997, pp 1167-1178.
- 3- Kuriyagawa, T., Syoji, K., Ohshita, H., "Grinding temperature within contact arc between wheel and workpiece in high-efficiency grinding of ultrahard cutting tool materials," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 136, pp. 39-47, 2003.
- 4-Jin, T., Stephenson, D. J., "Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 1129-1134, 2003.
- 5-Kim, H. J., Kim, N. K., Kwak, J. S., "Heat flux distribution model by sequential algorithm of inverse heat transfer for determining workpiece temperature in creep feed grinding," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 2086-2093, 2005.
- 6-Nabil Gindy, Qiang Liu, Xun Chen, "Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn", Machine Tools & Manufacture, Vol 45, 2005, PP 811-818.
- 7- J.V. Beck , "Inverse Heat Conduction Problem", 1985.