



## فهرست مطالب

|    |       |                     |
|----|-------|---------------------|
| ۳  | ..... | ۱ چکیده             |
| ۳  | ..... | ۲ مقدمه             |
| ۴  | ..... | ۳ فرمولاسیون راه حل |
| ۹  | ..... | ۴ نتایج و بحث       |
| ۹  | ..... | ۴-۱ نتایج مدل       |
| ۱۹ | ..... | ۴-۲ تصدیق تجربی مدل |
| ۲۴ | ..... | ۵ نتایج             |

## ۱ چکیده

راه حل منابع حرارتی توزیع شده متحرک بر روی یک صفحه نیمه بی نهایت، اطلاعاتی در مورد هردوی اندازه و شکل حوضچه جوش قوسی فراهم می کند. نتایج نشان می دهد که هردوی متغیرهای فرآیند جوشکاری (جریان، طول قوس و سرعت حرکت) و پارامترهای ماده (ضریب انتقال حرارتی) بر شکل جوش تاثیرات قابل توجهی می گذارند. پیش بینی های نظری با نتایج تجربی روی فولاد کربنی، فولاد ضدزنگ، تیتانیوم و آلومینیوم تطابق قابل قبولی دارند.

## ۲ مقدمه

بیش از ۴۰ سال از ارائه راه حل رزنتال برای منبع حرارتی نقطه ای متحرک می گذرد (مرجع ۱) که مبنایی برای بیشتر مطالعات پسین در زمینه جریان حرارت در جوشکاری گردیده است. کریستنسن نتایج را به صورت بی بعد ارائه کرده است تا نشان دهد که راه حل پیشنهادی را می توان برای مواد زیادی در رنج گسترده ای از حرارت ورودی استفاده کرد (مرجع ۲). از آن زمان، اصلاحات و معادلات دقیق تری پیشنهاد شده است (مراجع ۳، ۴ و ۶)، ولی هیچکدام کل میدان دمایی برای یک منبع توزیع شده متحرک را حل نکرده اند. اخیراً، یک فرم کلی منبع حرارتی توزیع شده متحرک پیشنهاد شده است، ولی محاسبات میدان حرارتی محدود شده و بدون توضیح باقی گذاشته شده است. نتایج تجربی کریستنسن نشان می دهد که راه حل رزنتال با اندازه گرده جوش واقعی برای اندازه های متعدد تطابق خوبی دارد. به هر حال، پراکندگی می تواند به بزرگی یک فاکتور سه باشد. علاوه بر آن، راه حل منبع نقطه ای هیچ گونه ای اطلاعاتی در مورد شکل حوضچه جوش ارائه نمی کند، زیرا همه خطوط هم دمای عرضی، نیم دایره فرض می شوند. سوال شکل حوضچه جوش، از دیرباز توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. چون تغییرات گسترده ای در رفتار جوش با توجه به حرارت وجود دارد. یکی از مقاصد مطالعه حاضر این است که چه اطلاعاتی در خصوص شکل را با استفاده از حل منبع حرارتی توزیع شده متحرک می توان تعیین کرد. خوشبختانه، محققان بسیاری، توزیع حرارت واقعی در قوس ها را روی آندهای مسی آب خنک اندازه گیری کرده اند (مراجع ۹ و ۱۰). با استفاده از این نتایج، این امکان وجود دارد که آیا وجود یک منبع توزیع شده به جای منبع نقطه ای حرارت می تواند گستره ای از تغییرات شکل جوش با معادلات کریستنسن و دیگران توضیح دهد.

در بخش‌های زیر، یک راه حل عمومی منبع حرارتی توزیع شده متحرک به صورت خلاصه ارائه شده است. پس از آن، یک حل بی‌بعد توزیع حرارتی گوسی متحرک با تعدادی نتایج بیان شده است. سپس این مقادیر با شکل‌های حوضچه جوش تجربی مقایسه شده است.

باید خاطرنشان ساخت که در ابتدا، این حل همه فرض‌های ساده‌کننده استفاده شده توسط رزنتال به جز یکی از آنها را حفظ می‌کند. آن فرضیات شامل صرف نظر کردن از جریان حرارت جابه‌جایی یا تشعشعی، ثابت فرض کردن خواص حرارتی و فرض یک محیط نیمه‌بی‌نهایت شبه پایدار می‌شود. تنها تغییر، استفاده از منبع حرارتی توزیع شده به جای حالت نقطه‌ای است. برخلاف این فرض‌های ساده‌کننده، نشان داده خواهد شد که نتایج نه تنها با حل رزنتال در حد مطابقت دارد، بلکه قادر است بیشتر پراکنش تجربی را توضیح دهد. علائم مورد استفاده در فرمول‌های زیر در جدول ۱ تعریف شده است.

### ۳ فرمولاسیون راه حل

راه حل رزنتال برای توزیع دمای ایجاد شده به وسیله یک منبع حرارتی نقطه‌ای حالت پایدار بر روی سطح صفحه نیمه بی‌نهایت به صورت فرمول زیر ارائه می‌شود:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi kR} e^{-\frac{v(w+R)}{2a}} \quad (1)$$

کریستنسن (مرجع ۲) فرمول فوق را به صورت بی‌بعد، به شکل زیر ارائه کرده است:

$$\theta = n \frac{e^{-(\xi + R^*)}}{R^*} \quad (2)$$

که در فرمول (۲) پارامتر  $n$  شامل سرعت حرکت، ضریب انتقال حرارت و حرارت خالص ورودی به قطعه کار می‌شود. راه حل برای یک منبع حرارتی توزیع شده در شکل ۱ را می‌توان با استفاده از توابع گرین فرمول‌بندی کرد. معادله انتقال حرارت جابه‌جایی حالت پایدار با سرعت حرکت  $v$  (مرجع ۱):

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^2} - \left(\frac{v}{2a}\right)^2 T^* = -e \frac{\frac{vw}{2a} Q^*}{k} \quad (3)$$

که  $T^* = (T - T_0) e^{-\frac{vw}{2a}}$  و  $Q^*$  منبع حرارتی با سرعت  $v$  است. یک تابع مشتق شده از تابع گرین که معادله ۳ را ارضا می کند و شرایط مرزی مناسب با آن در ضمیمه آورده شده است. تابع گرین منتج برای یک منبع حرارتی صفحه ای عبارت است از:

$$G(w|w', y|y') = \frac{2 e^{-\frac{v}{2a} (\{w - w'\}^2 + \{y - y'\}^2 + z^2)^{1/2}}}{(\{w - w'\}^2 + \{y - y'\}^2 + z^2)^{1/2}} \quad (4)$$

که  $(w', y', z')$  موقعیت منبع حرارت بوده و  $(w, y, z)$  موقعیت نقطه دلخواه است. توزیع دمایی توسط یک انتگرال ضرب تابع گرین و توزیع حرارت روی سطح دلخواه بیان شده است (مرجع ۱۱):

$$T - T_0 = \iint G(w|w', y|y') \left\{ e^{-\frac{v}{2a} (w - w') \frac{Q^*(w', y')}{k}} \right\} ds' \quad (5)$$

این یک حل عمومی برای منبع حرارتی متحرک با توزیع حرارتی دلخواه است. با این وجود، راه حل به دلیل انتگرال دوگانه پیچیده است و نتایج را نمی توان به راحتی به فرم بی بعد ارائه کرد. بعضی ساده سازی ها را می توان انجام داد، در صورتی که حرارت ورودی  $(Q^*)$  را بتوان با یک تابع گوسی تقریب زد.  $\sigma$  که پارامتر توزیعی است بعد اندازه دارد و می توان به عنوان نیم عرض قوس در نظر گرفت.  $Q$  با فرمول زیر داده شده است:

$$Q(x, y) = \frac{q}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2} \quad (6)$$

جدول ۱- فهرست علائم

|                |  |
|----------------|--|
| a              | - thermal diffusivity  |
| c              | - specific heat  |
| G              | - Green's function   |
| k              | - thermal conductivity   |
| n              | - operating parameter ( $n = qv / 4\pi a^2 \rho c [T_c - T_o]$ )                                 |
| q              | - net heat input per unit time (power)   |
| Q              | - power distribution   |
| Q*             | - heat source moving at a speed of v   |
| R              | - distance to the center of arc ( $R = (w^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ )                                |
| R*             | - dimensionless distance from the center of the arc ( $R^* = [\xi^2 + \psi^2 + \zeta^2]^{1/2}$ ) |
| T              | - temperature  |
| T <sub>o</sub> | - initial temperature  |
| T <sub>c</sub> | - critical temperature   |
| u              | - dimensionless distribution parameter ( $u = v\sigma/2a$ )                                      |
| v              | - travel speed of arc  |
| w              | - distance in x direction in a moving coordinate of speed v ( $w = x - vt$ )                     |
| y              | - distance in y direction  |
| z              | - distance in z direction  |
| $\sigma$       | - distribution parameter   |
| $\rho$         | - density  |
| $\delta Q$     | - incremental amount of heat   |
| $\tau$         | - dimensionless time   |
| $\theta$       | - dimensionless temperature ( $\theta = [T - T_o] / [T_c - T_o]$ )                               |
| $\xi$          | - dimensionless distance in the moving coordinate ( $\xi = vw/2a$ )                              |
| $\psi$         | - dimensionless distance y   |
| $\zeta$        | - dimensionless distance z   |
| $\infty$       | - infinity   |

با منبع حرارتی گوسی، یک حلی به جز تابع گرین استخراج می‌شود که انتگرال دوگانه را به انتگرال یگانه کاهش می‌دهد و امکان ارائه به فرم بی‌بعد را فراهم می‌کند. ابتدا معادله انتقال حرارت جابه‌جایی در یک دستگاه مختصات ثابت با استفاده از یک منبع حرارتی گوسی لحظه‌ای حل می‌شود. پس از آن با توجه به زمان، در یک دستگاه مختصات متحرک حل می‌شود تا یک حل شبه پایدار ارائه کند. این حل که معادله دیفرانسیلی انتقال حرارت جابه‌جایی در مختصات ثابت را ارضا می‌کند عبارت است از (مرجع ۱۲):

$$dT_{t'} = \frac{\delta Q dt'}{\rho c (4\pi a [t - t'])^{3/2}} e^{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')}} \quad (7)$$

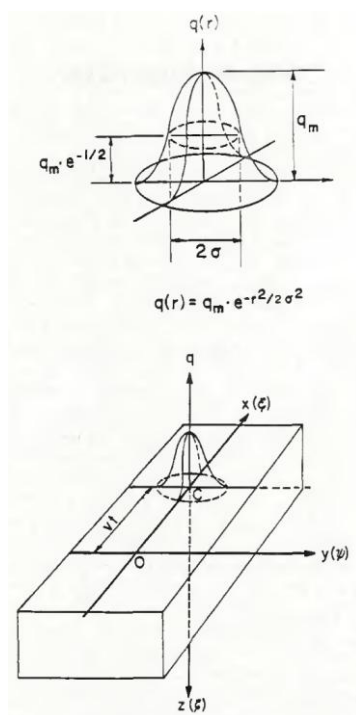
که  $\delta Q$  میزان حرارت موجود در موقعیت  $(x', y', z')$  در لحظه  $t'$  است. راه حل یک منبع حرارتی گوسی لحظه‌ای به صورت برهم‌نهی یک سری از حل‌های منابع حرارتی نقطه‌ای در ناحیه توزیع شده به دست می‌آید. با جایگزینی منبع حرارتی توزیع یافته گوسی برای منبع حرارتی نقطه‌ای، این برهم‌نهی توسط انتگرال به شکل زیر و ضمیمه B صورت می‌گیرد.

$$dT_{t'} = \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \quad (8)$$

$$\frac{q e^{-\frac{(x'^2 + y'^2)/2\sigma^2}}{2\pi\sigma^2}}{\rho c [4\pi a(t - t')]^{3/2}} dt'$$

$$e^{-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}{4a(t - t')}} =$$

$$\frac{[q dt'] \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{4a(t - t') + 2\sigma^2} - \frac{z^2}{4a(t - t')}\right]}{2\pi\rho c [4\pi a(t - t')]^{1/2} [2a(t - t') + \sigma^2]}$$



شکل ۱- شماتیک یک منبع گرمایی توزیع شده که روی سطح ورق نیمه بی نهایت حرکت می کند.

این معادلات با افزایش دما در مدت زمان کوتاه مطابقت دارد که به دلیل حرارت  $q dt'$  آزاد شده روی سطح می باشد.

زمانی که منبع حرارتی گوسی با سرعت ثابت  $v$  حرکت می کند، افزایش دمای نهایی، مجموع همه سهم ها از زمان  $t_0$  تا زمان  $t$  به حساب می آید. یک عبارت ساده تر حل در صورتی که دستگاه مختصات متحرک با سرعت  $v$  در نظر گرفته شود،

به دست می آید. این مجموع را می توان با انتگرال زیر انجام داد:

$$T - T_o = \frac{1}{2} \int_{t'=0}^{t'=t} dT_{t'}$$

$$= \frac{q}{\pi \rho C (4\pi a)^{1/2}} \int_0^t \frac{dt' (t-t')^{-1/2}}{2a(t-t') + \sigma^2}$$

$$e^{-\frac{(x-vt')^2 + y^2}{4a(t-t') + 2\sigma^2} - \frac{z^2}{4a(t-t')}} \quad (9)$$

این مشابه حل به دست آمده توسط کلاین و انتونی (مرجع ۱۳) است. با ساده‌سازی‌های زیر به معادله (۱۰) دست پیدا

می‌کنیم:

$$t'' = t - t', dt'' = dt', x - vt' = w + vt'', w = x - vt$$

$$T - T_o = \int_0^t dt'' \frac{q}{\pi \rho C (4\pi a)^{1/2}} \frac{t''^{-1/2}}{2at'' + \sigma^2}$$

$$e^{-\frac{w^2 + y^2 + 2wvt'' + v^2 t''^2}{4at'' + 2\sigma^2} - \frac{z^2}{4at''}} \quad (10)$$

این حل توزیع دمایی برای منبع حرارتی توزیع شده گوسی روی یک صفحه نیمه بی‌نهایت بدون تغییر فاز است. با

استفاده از متغیرهای بی‌بعد، می‌توان معادله را به فرم بی‌بعد زیر درآورد. بنابراین معادله (۱۰) به شکل زیر کاهش می‌یابد:

$$\theta = \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{v^2 t}{2a}} d\tau \frac{\tau^{-1/2}}{\tau + u^2}$$

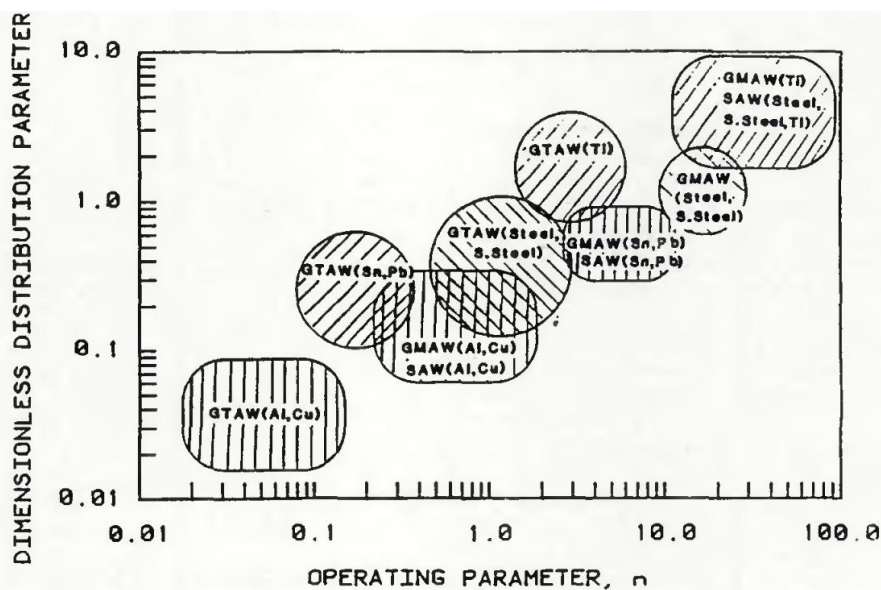
$$e^{-\frac{\xi^2 + \psi^2 + 2\xi\tau + \tau^2}{2\tau + 2u^2} - \frac{\zeta^2}{2\tau}} \quad (11)$$

حل بیشتر این معادله نیازمند روش‌های حل عددی است. شایان توجه است که دو متغیر بی‌بعد اولیه که منبع حرارتی

را مشخص می‌کنند،  $u$  و  $n$  هستند. مقدار  $u$  نماینده عرض منبع حرارتی است درحالی که  $n$  با شدت یا مقدار انرژی

ورودی مرتبط است. سرعت حرکت، قسمت انتگرالی هردوی  $u$  و  $n$  است. مقادیر معمول  $u$  و  $n$  به‌طور برجسته برای

مواد مختلف و فرآیندهای متفاوت جوشکاری به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- شرایط جوشکاری: نمودار پارامتر توزیع بی بعد و پارامتر عملکرد برای فرآیندها و مواد مختلف.

## ۴ نتایج و بحث

### ۴-۱ نتایج مدل

به منظور ارائه راه حل برای معادله (۱۱)، لازم است مقادیر پارامتر توزیع انتخاب گردد. خوشبختانه، نستور (مرجع ۹) و شوئک (مرجع ۱۰) توزیع حرارتی قوس‌ها را برای آندهای مسی آب‌خنک اندازه‌گیری کرده است. با این وجود مقادیر اندازه‌گیری شده توزیعی دقیقاً گوسی نیستند و نتایج آنها را می‌توان توسط یک رگرسیون حداقل مربعات به عنوان گوسی تقریب زد تا بزرگ توزیع گوسی منطبق گردد. لازم به ذکر است قید مساحت کلی منحنی‌های تجربی و گوسی برابر نیز باید اعمال گردد. این یک توزیع گوسی برابر با گرمای ورودی کلی توزیع نتایج تجربی ایجاد می‌کند. این تحلیل مقادیر  $\sigma$  را بین ۱/۶ تا ۴ میلیمتر برآورد می‌کند. این مقادیر تطابق قابل قبولی با نتایج ریکالین (مرجع ۳) دارد.

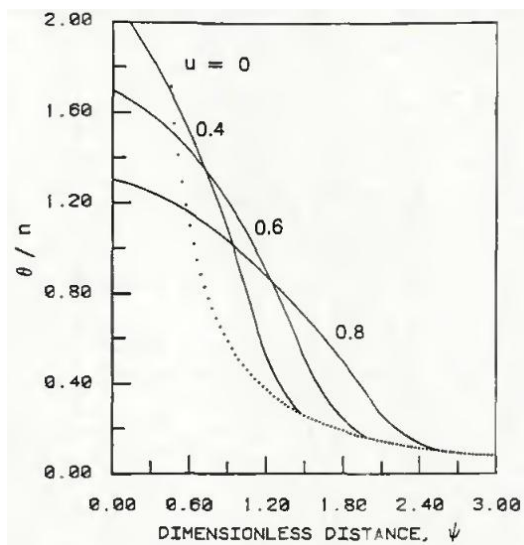
به طور کیفی، می‌توان بحث کرد که  $\sigma$  با افزایش جریان، افزایش طول قوس (مثلاً ولتاژ) و افزایش زاویه نوک الکترود تنگستن افزایش می‌یابد. اثر تغییرات ترکیبات گاز محافظ کمتر مشهود است (مرجع ۱۴). یک بررسی کمی دقیق‌تر در مورد شرایط جوشکاری قوسی در انتشارات پیش رو بیان خواهد شد (مرجع ۱۵). برای اهداف مدنظر این مقاله، مقادیر  $\sigma$  را بین ۱/۶ تا ۴ میلیمتر برای جوشکاری قوسی تنگستن-گاز در نظر گرفته شده است. برای سرعت‌های



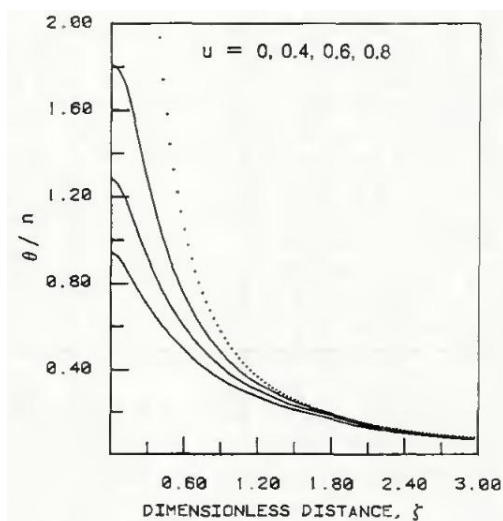
حرکت  $2 \text{ mm/s}$ ، این مقادیر  $\sigma$  مقدار پارامتر توزیع بی بعد  $u$  را بین  $0.4$  تا  $0.8$  برای فولاد کربنی سبب می شود. در حد که  $u=0$ ، پارامتر گوسی هیچ عرضی ندارد و حل معادله (۱۱) به حل رزنتال تقلیل می یابد. شایان توجه است که پارامتر  $u$  به طور مستقیم با سرعت حرکت جوشکاری و معکوس شرایط یک ماده (مثلا ضریب انتقال حرارت) تغییر می یابد. این بدان معنی است که سرعت حرکت آهسته و ضریب انتقال حرارت بالای مواد مانند آلیاژهای آلومینیوم یا مس تقریباً بهتری توسط معادله رزنتال نسبت به جوش های سریع روی موادی مانند فولاد ضدزنگ یا تیتانیوم با  $u$  بزرگتر ارائه می دهند. برای راحتی کار، نتایج ارائه شده در این جا برای مقادیر  $0$  (رزنتال)،  $0.4$ ،  $0.6$  و  $0.8$  به کار رفته است.

شکل های ۳ و ۴ توزیع دمای بیشینه بی بعد به ترتیب در راستای عرض و ضخامت بی بعد نمایش می دهد. شایان ذکر است که دمای بی بعد بر پارامتر عملیاتی کریستنسن ( $n$ ) تقسیم شده است تا قادر باشیم تمام حل ها را در یک نمودار نمایش دهیم. حل منبع حرارتی توزیع شده دمای خط مرکزی را مانند حل رزنتال بی نهایت پیش بینی نمی کند. با این وجود، باید توجه شود که دمای خط مرکزی معمولاً از دمای جوش فلز بسته به مقادیر  $u$  و  $n$  فراتر می رود. این یک وضعیت ناممکن است. با این حال، برای مقادیر  $u$  و  $n$  که اتلاف توان تبخیر (مرجع ۱۶) بیش از حد نیست، حل ارائه شده توسط معادله (۱۱) معتبر است. در بقیه موارد، این هنوز تقریباً بهتری نسبت به حل رزنتال محسوب می شود.

لازم به ذکر است که شکل های ۳ و ۴ اطلاعاتی در مورد شکل حوضچه جوش ارائه می کنند. در مقادیر  $\theta/n$  مربوط به دمای ذوب، شکل ۳ عرض جوش را پیش بینی می کند. معمولاً و نه همیشه این مقدار بزرگتر از مقدار پیش بینی شده توسط حل رزنتال است. شکل ۴ عمق جوش را که همیشه کمتر از مقدار پیش بینی شده توسط حل رزنتال است را ارائه می کند.

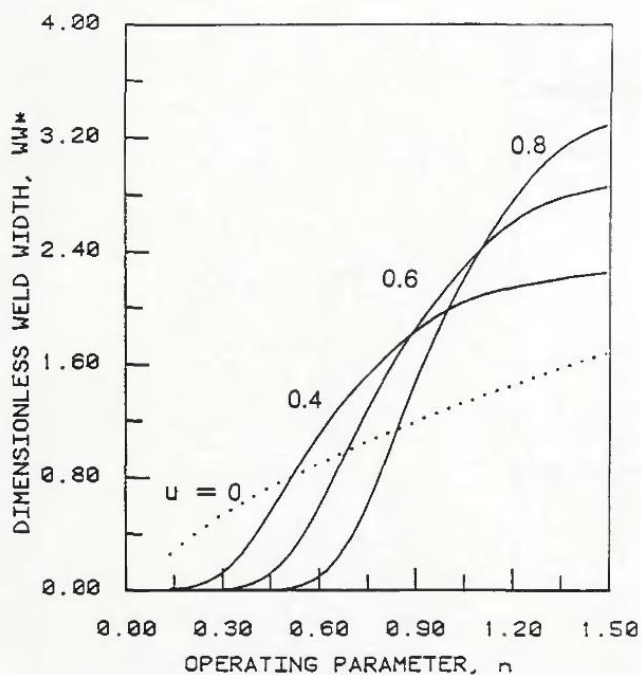


شکل ۳- توزیع دمایی بیشینه در راستای فاصله عرضی بی بعد.

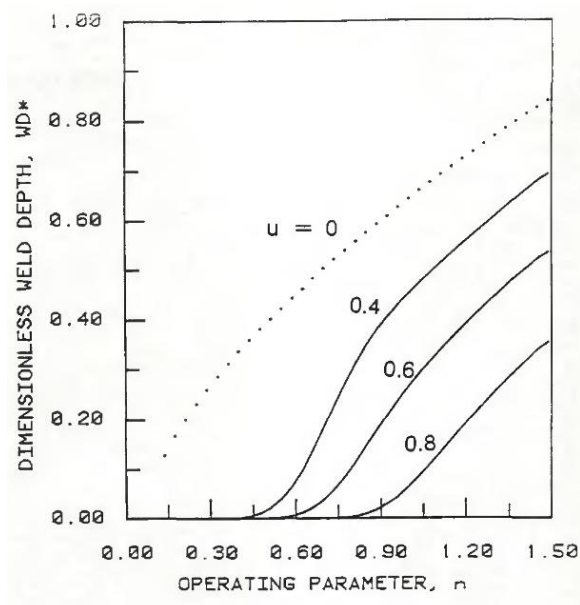


شکل ۴- توزیع دمایی بیشینه در راستای فاصله عرضی بی بعد.

این نقاط در ادامه در شکل ۵ و ۶ به نمایش گذاشته شده است که عرض و عمق جوش بی بعد را به عنوان تابعی از پارامتر عملیاتی  $\eta$  نشان می دهد. اینها خطوط با  $\theta$  ثابت و برابر یک است. به راحتی می توان دید که در  $\eta$  های کمتر (مربوط به حرارت ورودی و سرعت حرکت کمتر) عرض جوش کمتر از مقدار حاصل از معادله رزنتال است.



شکل ۵- عرض بی بعد جوش بر حسب پارامتر عملکرد.



شکل ۶- عمق بی بعد جوش بر حسب پارامتر عملکرد.

شکل ۷، نسبت عمق به عرض به عنوان تابعی از پارامتر عملکردی برای مقادیر مختلف پارامتر توزیع است. ممکن است تغییرات گسترده باعث شود تا حداقل نسبت های عمق به عرض حوضچه جوش که در کارهای گذشته گزارش شده



## گزارش پروژه درس جوشکاری پیشرفته میدان دمایی ناشی از منابع حرارتی

است زمانی که پارامترهای جوشکاری تغییر می‌یابد را تفصیل کند (مرجع ۱۷). به هر حال، این مدل قادر نیست که نفوذ متغیر در پارامترهای فرآیند ثابت که با انتقال حرارت جابه‌جایی ایجاد می‌شود را پیش‌بینی کند. همان‌طور که پیش از این گفته شد، انتقال حرارت جابه‌جایی در حل ارائه‌شده لحاظ نشده است (مرجع ۱۸). با این وجود، در بیشتر موارد مدل ارائه شده پیش‌بینی خوبی از وضعیت حوضچه جوش ارائه می‌کند.

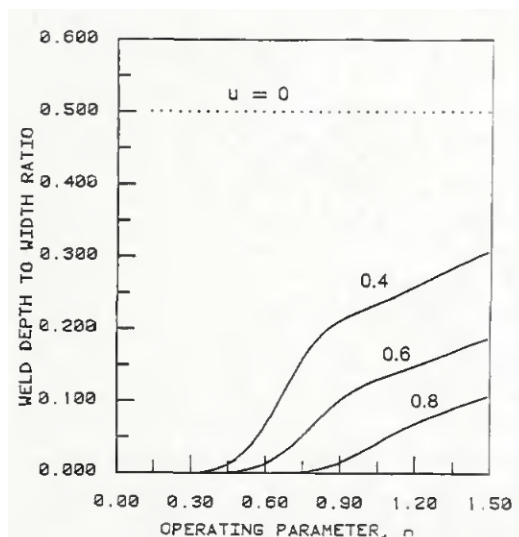
در مواردی که الگوی انتقال حرارت جابه‌جایی در حوضچه جوش ثابت است ولی فرآیندهای پارامتر تغییر می‌کنند، این مدل رابطه عملکردی مناسبی بین پارامترهای فرآیند جوش و اندازه حوضچه جوش ارائه می‌کند. زمانی که الگوی انتقال حرارت جابه‌جایی از یک جوش به جوش دیگر تغییر می‌یابد، هیچ مدلی مانند مدل کنونی که از همرفت صرف‌نظر می‌کند نتایج دقیقی از شکل حوضچه ارائه نمی‌کند. در این موارد یک تحلیل پیچیده‌تری مورد نیاز است.

در شکل ۵ در مورد تغییرات عرض جوش به همراه تغییر طول قوس که توسط گلیکستین (مرجع ۱۴) ارائه شده است و تایید آن در آزمایشگاه توضیحاتی بیان گردید. در حرارت ورودی اندک با افزایش طول قوس، عرض کاهش می‌یابد. این درحالی است که در حرارت ورودی بالاتر، با افزایش طول قوس، عرض جوش نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸). این مطلب از آنجا استنباط می‌شود که افزایش طول قوس افزایش پارامتر توزیع را بدون تغییرات چشمگیر حرارت ورودی را در پی دارد.<sup>۱</sup> بنابراین، افزایش طول قوس ضرورتاً افزایش پارامتر توزیع در پارامتر عملکرد ثابت را موجب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شد، این مساله منجر به ایجاد جوش‌های باریک‌تر با افزایش طول قوس در پارامترهای عملکرد پایین می‌شود ولی عرض جوش با افزایش طول قوس در پارامترهای عملکرد بالا افزایش می‌یابد. در بعضی مقادیر  $n$  که خطوط مقدار ثابت  $n$  با یکدیگر تلاقی دارند، عرض جوش در میانه طول قوس بیشینه خواهد بود.

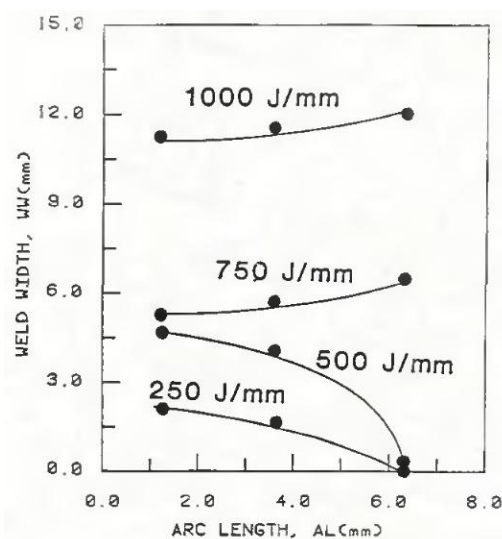
توضیح فیزیکی برای نتایج به‌دست آمده آن است که توزیع حرارت بسیار وسیعی در حرارت ورودی اندک هیچگونه ذوبی ایجاد نخواهد کرد. به همان میزان که توزیع باریک می‌شود، ولی حرارت ورودی خالص ثابت می‌ماند، میزان ذوب افزایش و عرض جوش رشد می‌کند. در حرارت‌های ورودی بالاتر، همیشه حرارت کافی برای ذوب وجود

<sup>۱</sup> تغییرات طول قوس (ولتاژ) گرمای خالص ورودی را که بازده کمتری نسبت به طول کوتاه دارد افزایش نمی‌دهد (مرجع ۱۹). این حقیقت از آنجا نشأت می‌گیرد که بیشتر گرما که از طریق الکترون منتقل می‌شود از فضای خالی آند پایین آمده و در فلز سرد می‌شود (مرجع ۲۰). ستون پلاسما بلندتر فرآیندهای انتقال گرما را در ناحیه نازل آند تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. به هر حال، این‌ها اتلافات گرمایی تشعشعی بزرگتری را سبب می‌شوند.

دارد و یک توزیع باریک‌تر منجر به جوش باریک‌تر می‌شود که نزدیک‌تر مقادیر پیش‌بینی شده توسط حل رزنتال را تقریب می‌زند.



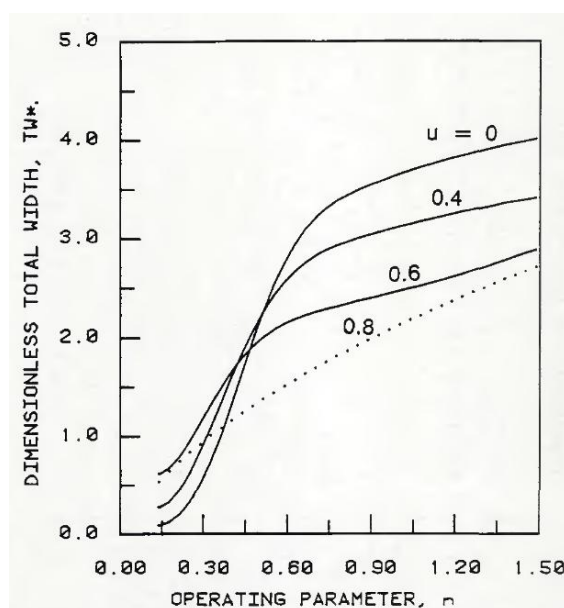
شکل ۷- نسبت عمق به عرض محاسبه شده برحسب پارامتر عملکرد.



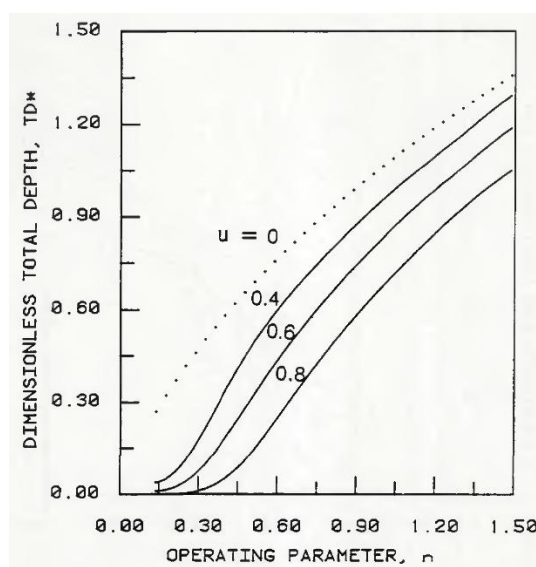
شکل ۸- عرض جوش تجربی برحسب طول قوس به عنوان تابع گرمای ورودی برواحد طول.

شکل ۹ و ۱۰ عرض و عمق ناحیه دگرگون‌شده کلی (ناحیه ذوب به علاوه ناحیه متأثر از حرارت) را به عنوان تابعی از پارامتر عملکردی نشان می‌دهد. این نمودارها مربوط به  $\theta = 0.462$  است که برابر دمای  $723$  درجه سلسیوس برای فولاد کربنی می‌باشد. با کم کردن اطلاعات شکل‌های ۹ و ۱۰ از شکل ۵ و ۶، عرض و عمق ناحیه متأثر از حرارت مطابق

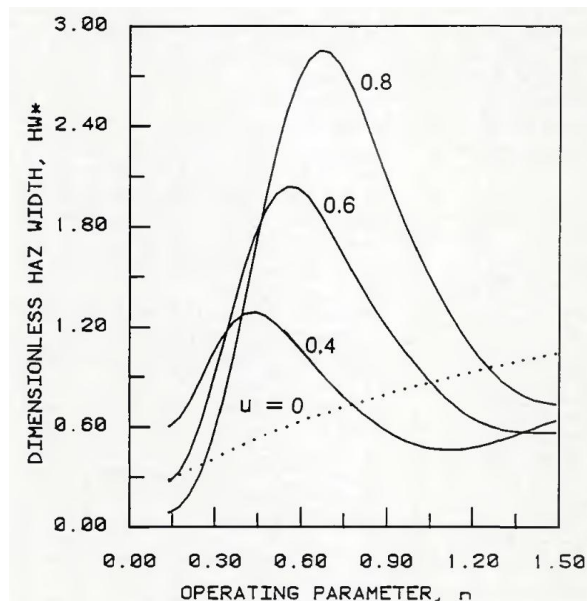
شکل های ۱۱ و ۱۲ به دست می آید. یک بیشینه مشخص در عرض ناحیه متأثر از حرارت در میانه حرارت ورودی رخ می دهد. این گونه اطلاعات برای کسی که سعی در کاهش ناحیه حرارتی در فلز زمینه دارد یا کسی که تلاش می کند از ناحیه متأثر از حرارت جوش برای تغییر پاس های پیشین جوش مشابه گرده های بازپخت شده در فولادهای آلیاژی سنگین استفاده کند. متأسفانه، بیشینه اندازه ناحیه متأثر از حرارت در راستای عمق که بیان شده مطابق شکل ۱۱ روی نمی دهد.



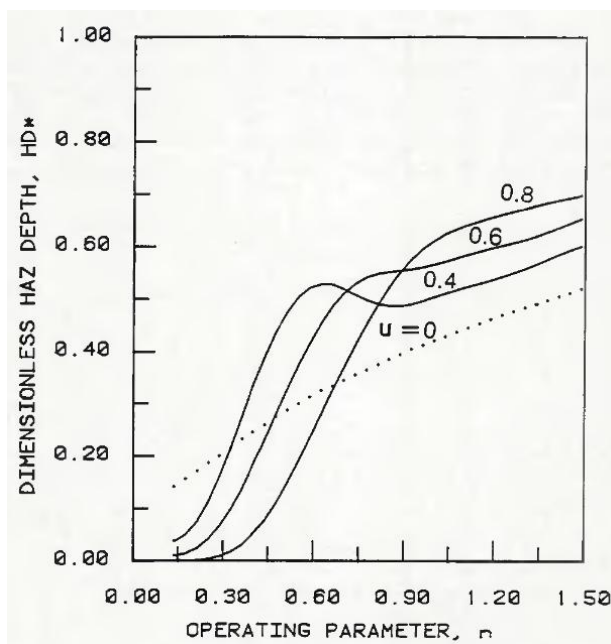
شکل ۹- عرض بی بعد ناحیه تغییر یافته کلی بر حسب پارامتر عملکردی.



شکل ۱۰- عمق بی بعد ناحیه تغییر شکل یافته کلی بر حسب پارامتر عملکردی.



شکل ۱۱- عرض بی بعد ناحیه متأثر از حرارت بر حسب پارامتر عملکرد.

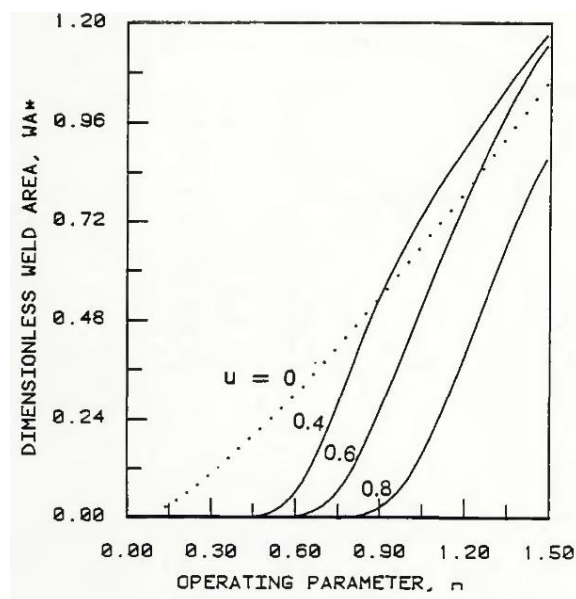


شکل ۱۲- عمق بی بعد ناحیه متأثر از حرارت بر حسب پارامتر عملکرد.

شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب ناحیه جوش، ناحیه تغییر یافته کلی و ناحیه متأثر از حرارت را ارائه می کند. این نواحی توسط حل کامل معادله (۱۱) در دو بعد به دست آمده است. تغییرات اندک در ناحیه دگرگون شده با تغییرات در

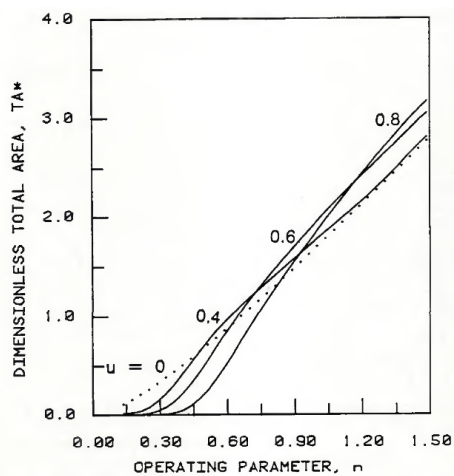
$u$  هماهنگ با این واقعیت است که در فواصل بزرگ، اثر گرمایی کل در فلز متناسب با گرمای خالص ورودی است. یا در وضعیت حاضر، متناسب با پارامتر عملکردی می شود. زمانی که فواصل کوتاه تر باشد مانند ناحیه ذوب، انحراف مطابق شکل ۱۳ قابل توجه خواهد بود.

شکل ۱۶ تا ۱۸ به منظور نمایش اثر مقادیر بزرگ  $u$  و  $\eta$  تهیه شده است. این مقادیر برای موادی با ضریب انتقال حرارت پایین مانند فولاد ضدزنگ یا تیتانیوم به کار گرفته شده است. علاوه بر آن، تخمین مقادیر معمول برای  $\eta$  برای جوشکاری قوسی تنگستن-گاز نشان می دهد که فولاد ضدزنگ و تیتانیوم معمولاً در خطوطی که  $u$  های ثابت با یکدیگر هم پوشانی دارند جوشکاری می شوند. بدین وسیله می توان تا حدودی مساله نسبت شکل گرده جوش را که برای این مواد نسبت به فولاد کربنی، آلومینیوم یا آلیاژ مس غیرعادی گزارش شده است را توجیه کرد. شکل گرده جوش در فولاد ضدزنگ و تیتانیوم نسبت به تغییرات اندک در فرآیند یا فلز به دلیل مقادیر ذاتی بزرگ  $u$  حساسیت بیشتری دارند.

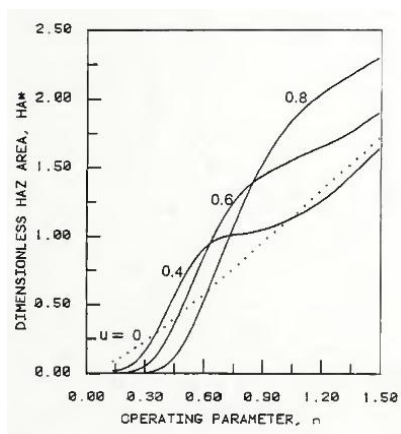


شکل ۱۳- ناحیه بی بعد فلز جوش بر حسب پارامتر عملکرد

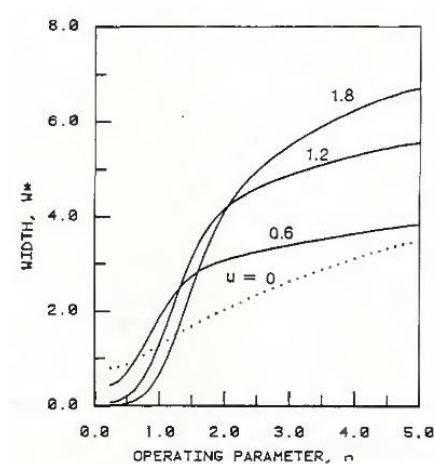




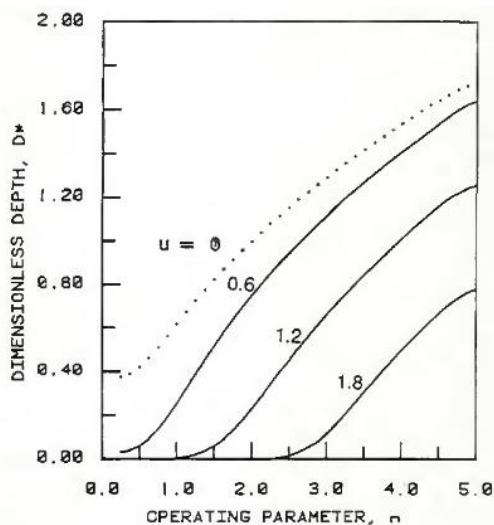
شکل ۱۴- ناحیه بی بعد منطقه تغییر یافته کلی بر حسب پارامتر عملکرد.



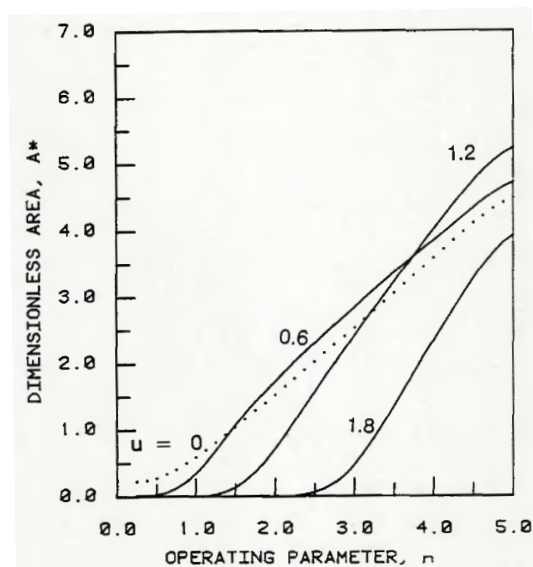
شکل ۱۵- ناحیه بی بعد منطقه متأثر از حرارت.



شکل ۱۶- عرض بی بعد بر حسب پارامتر عملکرد.



شکل ۱۷- عمق بی بعد (در  $\theta$  ثابت و برابر یک) بر حسب پارامتر عملکرد

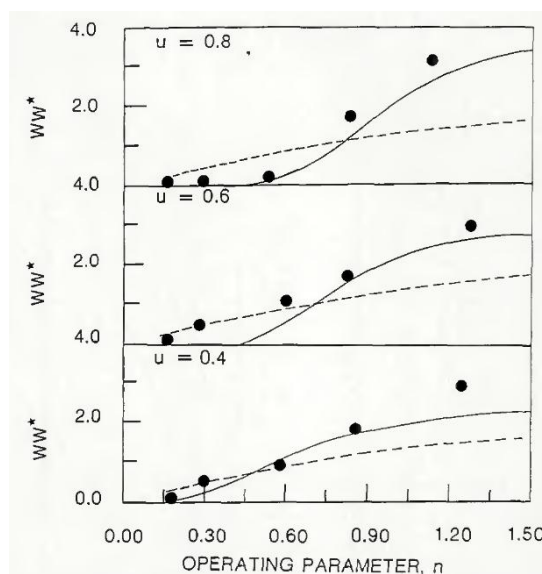


شکل ۱۸- ناحیه بی بعد بر حسب پارامتر عملکرد به عنوان تابعی از پارامتر توزیع بی بعد.

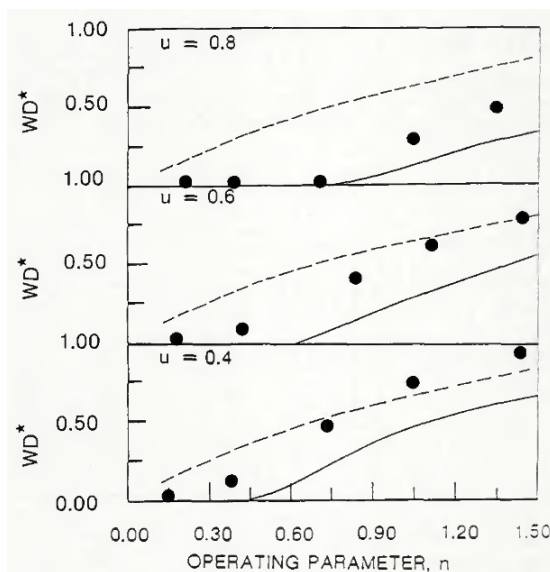
## ۲-۴ تصدیق تجربی مدل

دقت و صحت مدل به دو روش مورد آزمایش قرار گرفته است. در تعدادی از آزمایش‌ها جوش‌های قوسی تنگستن-گاز روی فولاد کربنی انجام شده است در حالی که متغیرهای فرآیند جوشکاری تغییر پیدا می‌کند. در آزمایش دوم، جوش‌ها روی فلزات مختلف برای ارزیابی اثر تغییرات ضریب انتقال حرارت انجام شده است.

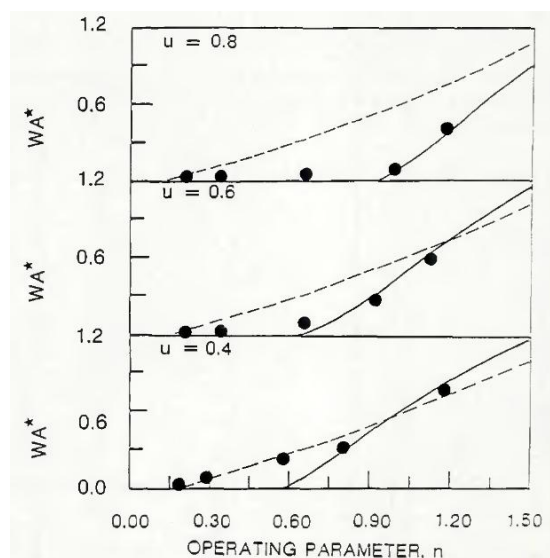
برای اولین مجموعه از جوش‌ها، جریان الکتریکی، طول قوس، زاویه نوک الکتروود، ترکیبات گاز محافظ و سزعت جوشکاری متغیر هستند. تغییرات در چهار پارامتر اول فرآیند با توزیع حرارت روی آند مسی آب‌خنک هم‌بستگی دارد (مرجع ۲۱). این نتیجه بر اساس مجموعه وسیعی از آزمایش‌ها مشابه کار نستور (مرجع ۹) استنباط شده است. عرض جوش‌های منتج، عمق‌ها و مساحت به ترتیب در شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ ارائه شده است. عرض‌ها و نواحی پیش‌بینی شده به‌عنوان تابعی از  $u$  و  $n$  با تئوری تطابق قابل قبولی دارد، اگرچه پیش‌بینی عمق (شکل ۲۰) خطای قابل ملاحظه‌ای دارد. این خطاهای پیش‌بینی عمق به دلیل فرض صفحه ضخیم نیمه‌بی‌نهایت ایجاد شده است. این درحالی است که ضخامت واقعی ورق برابر  $0.5 \text{ in}$  ( $12.7$  میلی‌متر) است. پیش‌بینی ممکن است با استفاده از فاکتور افزایش دما که توسط مایرس (مرجع ۲۲) توضیح داده شده است، بهبود یابد.



شکل ۱۹- مقایسه عرض جوش تجربی و تئوری منبع توزیع شده روی فولاد نرم. منحنی خط چین حل رزنتال را نشان می‌دهد.

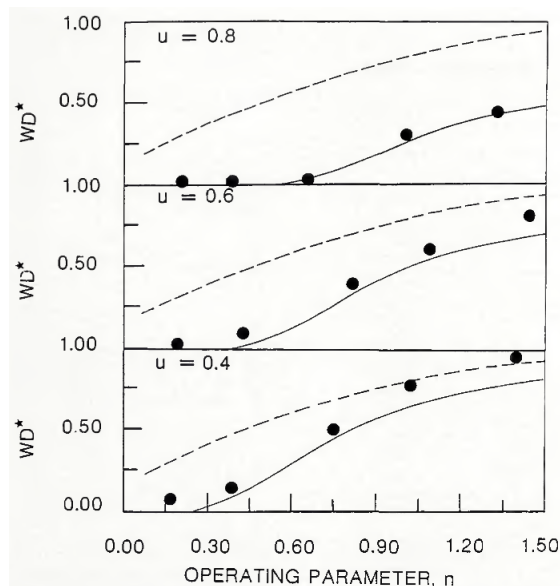


شکل ۲۰- مقایسه عمق جوش تجربی و تئوری منبع توزیع شده روی فولاد نرم.



شکل ۲۱- مقایسه ناحیه جوش تجربی و تئوری منبع توزیع شده روی فولاد نرم.

مایرس از تعدادی منابع حرارتی نقطه‌ای تصویری به منظور توسعه فاکتور افزایشی بهره برده است که پروفیل دمایی ورق با ضخامت محدود را براساس حل نیمه‌بی‌نهایت تخمین می‌زند. این فاکتور افزایش دما برای تصحیح تئوری منبع توزیع شده برای ضخامت محدود ورق استفاده شده است. در این حالت نتایج قابل قبول تری برای عمق حوضچه جوش در شکل ۲۲ ارائه شده است. خطای باقی مانده در شکل حوضچه جوش ممکن است به دلیل همرفت در حوضچه جوش یا فرورفتگی سطح به دلیل نیروهای قوس باشد که هیچ کدام از این دو در تئوری منبع توزیع شده در نظر گرفته نشده است.

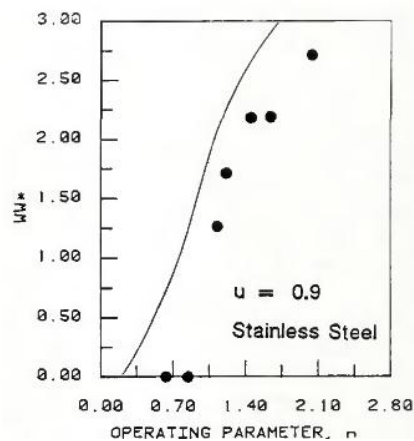


شکل ۲۲- عمق جوش بی بعد به عنوان تابعی از پارامتر عملکرد برای سه مقدار توزیع گرما.

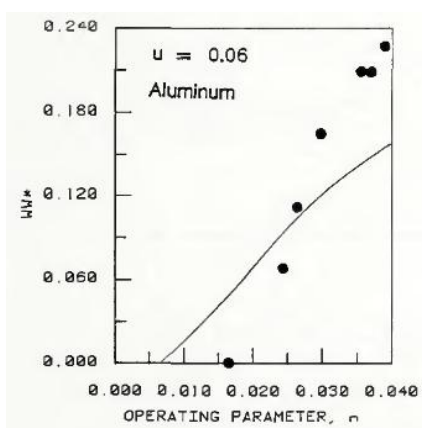
برای آزمایش دوم پارامتر توزیع ثابت و برابر  $2/4 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. به دلیل تفاوت در ضریب انتقال حرارت این فلزات،  $\sigma$  ثابت است ولی  $u$  ثابت نیست. بنابراین باید منحنی متفاوتی برای هر ماده انتظار داشت. شکل های ۲۳، ۲۴ و ۲۵ این منحنی های متفاوت را براساس عرض جوش نشان می دهد. تطابق بین تئوری و آزمایش تجربی قابل قبول است. ممکن است سوال شود که تئوری منبع توزیع شده که از انتقال حرارت جابه جایی و تشعشعی علاوه بر خواص وابسته به دما و تغییرات فاز صرف نظر می کند، قادر است چنین نتایجی نزدیک به آزمایش تجربی ارائه کند. کار گروه (مرجع ۲۳) نشان داده است که حل رزنتال در صورتی که خواص وابسته به دما در نظر گرفته شود، تغییر چندانی نمی کند و مالموت (مرجع ۵) نشان داده است که گرمای نهان تنها اثر اندکی دارد. اخیراً، ارپر و سکلی (مرجع ۲۴) نشان داده اند که همرفت گاهی اوقات می تواند نقش تعیین کننده ای در تعیین شکل حوضچه جوش ایفا کند. ریکالین (مرجع ۲۵) نشان داده است که اتلاف گرما از طریق تشعشع قابل صرف نظر کردن است.

با این وجود، تئوری منبع توزیع شده در این جا همچنان ناقص است. حل این مساله به وضوح مشخص می کند که فرض منبع نقطه ای بزرگترین نقطه ضعف تئوری رزنتال محسوب می شود. این در حالی است که تئوری منبع توزیع شده همیشه قادر نیست شکل حوضچه جوش را پیش بینی کند و یک خط مبنایی برای اندازه گیری اثرات همرفت، فرورفتگی سطح و اتلاف گرمایی ناشی از تبخیر احتمالی می سازد که این موارد شکل گرده جوش را تحت تاثیر قرار می دهند. یکی از

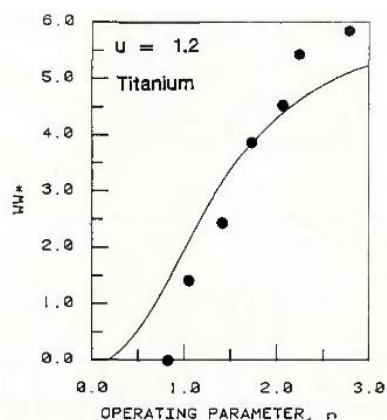
سختی‌های استفاده از تئوری منبع توزیع شده پیش‌بینی زود هنگام مقدار پارامتر توزیع ( $\sigma$ ) است. در مقاله دیگری به این مبحث مهم پرداخته می‌شود (مرجع ۱۵).



شکل ۲۳- عرض جوش اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و محاسبه شده از طریق تئوری برحسب پارامتر عملکرد برای فولاد ضدزنگ.



شکل ۲۴- عرض جوش اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و محاسبه شده از طریق تئوری برحسب پارامتر عملکرد برای آلومینیوم.



شکل ۲۵- عرض جوش اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و محاسبه شده از طریق تئوری برحسب پارامتر عملکرد برای تیتانیوم.

## ۵ نتایج

تئوری منبع حرارتی توزیع شده متحرک، تخمین اولیه‌ای از هندسه حوضچه جوش براساس اصول انتقال حرارت ارائه می‌دهد. اگرچه تعدادی از فرض‌های ساده‌کننده باقی می‌ماند ولی تطابق بین تئوری و تجربی با استفاده از مدل‌های گذشته تا حد زیادی بهبود می‌یابد.

بیشترین ارزش این کار مربوط به توانایی مدل برای پیش‌بینی اندازه مطلق ناحیه جوش نیست. تا حدودی می‌توان قدرت تئوری جدید را به دلیل ارائه رابطه کاربردی دقیق بین هردوی پارامترهای فرآیند و مواد دانست. این تئوری مدلی فراهم کرده است تا بتواند اثرات روی فرآیند یا ماده را که هندسه جوش را تحت تاثیر قرار می‌دهد مورد ارزیابی قرار دهد. چنین مدلی برای استراتژی‌های کنترل و اتوماسیون مورد استفاده در فرآیندهای جوشکاری ضروری است.