

پیش بینی میدان سرعت و توزیع کرنش در منطقه تغییر شکل فرآیند نورد داغ ورق

سیامک سراج زاده

دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی و علم و مواد - دانشگاه صنعتی شریف

علی کریمی طاهری

استاد دانشکده مهندسی و علم و مواد - دانشگاه صنعتی شریف

منصور نجاتی، جهاندار ایزدی، مهرداد فتاحی

واحد تحقیق و توسعه فولاد مبارکه

(تاریخ دریافت ۷۸/۶/۹، تاریخ تصویب ۷۹/۲/۲۴)

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش اجزا محدود میدان سرعت در منطقه تغییر شکل در حین نورد داغ ورق تعیین می گردد و به کمک آن توزیع کرنش در منطقه تغییر شکل و همچنین نیروی نورد پیش بینی می شود. آنالیز مورد استفاده قادر است اثر عوامل مختلف از قبیل دمای تغییر شکل، کار سختی فلز، سرعت نورد، و اصطکاک را بر میدان سرعت ارائه دهد. مقایسه نتایج بدست آمده از تئوری با نتایج آزمایش مربوط به نورد ورقهای فولادی نشان دهنده آن است که نتایج تئوری تطابق خوبی با نتایج عملی دارند.

واژه های کلیدی: نورد داغ ورق، روش اجزا محدود، میدان سرعت

مقدمه

شده است [۲]، به عنوان مثال Johnson [۳] به کمک روش خطوط میدان لغزش مقدار نیروی لازم برای نورد سریع ورق را با فرض برقرار بودن حالت آدیباتیک پیش بینی نموده است و Seredynski [۴] به کمک روش پیشنهادی Sims و توسعه آن روش، مقدار نیروی لازم برای نورد ورق را محاسبه کرده است. با پیشرفت و توسعه کامپیوترها به تدریج روشهای عددی نیز اهمیت خاصی پیدا کرده و از آنها برای تحلیل فرآیند نورد ورق استفاده گردیده است. به عنوان مثال Liu [۵] پخش در نورد ورق را با استفاده از روش اجزا محدود در سه بعد مورد بررسی قرار داده است و Mori [۶] میدان سرعت در نورد سرد ورق را در حالت کرنش صفحه ایی پیش بینی کرده است. Mori [۷] در مقاله دیگری نورد ورق در حالت تکدم را در حالت سه بعدی شبیه سازی نموده و Yamada [۸] نورد ورق را با استفاده از روش اجزا محدود دوبعدی در حالت صلب پلاستیک^۱ مورد بررسی قرار داده

فرآیند نورد فلزات یکی از مهمترین فرآیندهای صنعتی برای تولید محصولات نیمه نهایی و یا حتی نهایی می باشد. در این فرآیند به منظور کاهش نیروی نورد و افزایش کارپذیری فلز، اغلب از دامنه دمایی کار گرم استفاده می شود. با توجه به این نکته دانستن توزیع دما و نحوه سیلان فلز یا عبارتی میدان کرنش اعمالی در این فرآیند از جهات مختلف حائز اهمیت می باشد، چرا که از یکسو تغییر حالت‌های متالورژیکی مانند تبلور مجدد استاتیکی و یا سرعت رشد دانه ها در بین پاسهای نورد، تحت تاثیر درجه حرارت و میدان سرعت کرنش اعمالی بر فلز هستند [۱] و از سوی دیگر اطلاعات غیردقیق از میدان سرعت منجر به تخمین نادرست نیروی نورد و مقدار تغییر شکل در هر پاس شده و در نتیجه بعد از انجام نورد دقت ابعادی موردنظر حاصل نمی شود [۱]. تاکنون برای پیش بینی نیرو و سیلان فلز در فرآیند نورد فلزات و آلیاژها روشهای تجربی و عددی مختلفی ارائه

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i ds_i \quad (1)$$

در رابطه فوق $\dot{\epsilon}$ ، $\bar{\sigma}$ به ترتیب سرعت کرنش موثر و تنش موثر، F_i مولفه های نیروی خارجی می باشد. باتوجه به اصل مینیمم انرژی که بیان می کند از بین تمام میدانهای سرعت میدانی معتبر است که به کمترین مقدار انرژی نیاز دارد، با مینیمم کردن معادله فوق، معادله ای بصورت زیر حاصل می شود:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i ds_i = 0 \quad (2)$$

از طرف دیگر در حالت صلب - ویسکوپلاستیک باید شرط غیر قابل فشردگی نیز ارضا شود، بر این مبنا به معادله فوق باتوجه به روش تابع پنالتی^۳ یک ترم جدید اضافه می شود تا شرط مذکور نیز ارضا گردد [۱۲]، یعنی:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i ds_i = 0 \quad (3)$$

در معادله فوق K معرف عدد مثبت بسیار بزرگ بوده و $\dot{\epsilon}_v$ سرعت کرنش حجمی می باشد. معادله ۳ در واقع یکی از معادله های اساسی اجزا محدود بوده و می تواند برای تحلیل تغییر شکل پلاستیک در فرآیندهای شکل دادن فلزات بکار رود. با استفاده از معادله فوق، معادلات لوی - میرز [۱۱]، و تابع شکل^۴ تعریف شده برای المانهای مورد آنالیز در روش اجزا محدود، معادله ۳ برحسب سرعت گره ها قابل نوشتن می باشد، یعنی:

$$\frac{\partial \pi}{\partial v} = \sum_i \left[\int_{V_i} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\epsilon}} B^T DB v dV + \int_{V_i} K C^T C v dV - \int_{S_{Fi}} N F ds \right] = 0 \quad (4)$$

در رابطه فوق B ماتریس سرعت کرنش و D ماتریس قطری است، که بسته به شرایط تغییر شکل درایه های قطر اصلی آن مقادیر $\frac{1}{3}$ یا $\frac{2}{3}$ را اختیار می کند، C بردار سرعت کرنش حجمی و v بردار سرعت المان مورد آنالیز می باشد. در این پژوهش برای حل معادله فوق شرایط مرزی تغییر شکل در حین نورد به صورت زیر فرض می گردد:

۱ - در ناحیه تماس با غلطکها سرعت عمودی نقاط در تماس با غلطک را به صورت زیر می توان بیان کرد

است. Iguchi [۹] نیز با استفاده از روش اجزا محدود سه بعدی شرایط مختلف اصطکاکی را در نورد ورق تحلیل کرده است. Chen [۱۰] به کمک روشهای تفاضل و اجزا محدود توزیع دما و میدان سرعت را در حین نورد کاری خشن^۱ تعیین نموده است. همچنین Dvorkin [۱۱] با استفاده از روش اجزا محدود نورد ورق را در حالتیهای متقارن و غیر متقارن مورد بررسی قرار داده است.

با ارزیابی مقالات و پژوهشهای انجام شده ملاحظه می شود که در بسیاری از تحقیقات قبلی آنالیز فرآیند نورد داغ با فرض دمای ثابت انجام گردیده و یا اینکه فرآیند نورد سرد مورد توجه بوده است. مضافاً در اکثر آنها از فرض ثابت بودن تنش سیلان و خواص فیزیکی ماده تحت نورد استفاده شده است. در پژوهش حاضر نه تنها توزیع دما در تختال و تاثیر دما، سرعت کرنش و کرنش بر تنش سیلان مورد توجه می باشد بلکه تغییرات دمای غلطک در حین نورد و تاثیر آن بر توزیع دما و کرنش نیز مدنظر قرار می گیرد. به این ترتیب که با حل معادلات پلاستیسیته در حالت صلب - ویسکوپلاستیک^۲ و با درنظر گرفتن تغییرات دمای فلز در حال نورد و غلطک نورد، میدان سرعت در منطقه تغییر شکل در نورد داغ ورق به کمک روش اجزا محدود دوبعدی تعیین می گردد. قابل ذکر است که در این تحقیق برای حل معادلات غیرخطی پلاستیسیته و انتقال حرارت حاصل از فرمولاسیون اجزا محدود از دو روش تکرار مستقیم و نیوتن - رافسون استفاده می شود [۱۲]. آنالیز ارائه شده قادر است اثر پارامترهای مختلفی از قبیل دمای تغییر شکل، کار سختی فلز، سرعت نورد و اصطکاک بین تختال و غلطک را بر نیروی نورد و میدان سرعت کرنش در تختال پیش بینی نماید. در این راستا به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده از آنالیز تئوری، نتایج عملی نیروی نورد برای فولاد کم کربن با نتایج آنالیز مقایسه می شوند.

مدل ریاضی

در این پژوهش برای بررسی تغییر شکل پلاستیک از روش المان محدود استفاده می شود، به این ترتیب که برای تعیین میدان سرعت تابعی مانند π تعیین می شود، بطوریکه شرایط مرزی و معادلات سازگاری را ارضا کند [۱۲]، یعنی:

(شکل ۱)

حدس اولیه حساس نیست. لیکن در نزدیکی جواب شتاب همگرایی بسیار کند است. بنابراین دو روش فوق مکمل یکدیگر هستند، در این پژوهش ابتدا از روش تکرار مستقیم استفاده شده و بعد از اینکه سرعت رسیدن به جواب کند گردد به آن معنی است که میدان سرعت حاصل در نزدیکی جواب واقعی است، بنابراین از این مرحله به بعد از روش نیوتن - رافسون محاسبات ادامه می یابد، بعبارت دیگر حدس اولیه برای این روش آخرین جواب حاصل از تکرار مستقیم می باشد.

به منظور تعیین توزیع دما در ورق و غلطک از معادلات انتقال حرارت زیر استفاده شده است که در آن فرض گردیده؛ ۱ - بعلاوه سرعت زیاد تختال در جهت نورد انتقال حرارت در جهت نورد (در جهت x) ناچیز است، ۲ - در منطقه تغییر شکل انتقال حرارت توسط حرکت افقی تختال و تماس با غلطکها رخ می دهد. بعبارت دیگر می توان از دو ترم جابجایی در مقابل دو ترم هدایتی متناظر آنها صرفنظر کرد، ۳ - از انتقال حرارت محیطی با توجه به سرعت محیطی غلطک صرفنظر می شود، ۴ - لایه خارجی غلطک تغییرات دما را تحمل کرده و در لایه های داخلی، دما در زمانهای مختلف ثابت می باشد. با توجه به این فرضیات و همچنین مداوم^۱ فرض کردن تغییرات دما در غلطک [۱۴]، معادله انتقال حرارت حاکم در ورق و غلطک بصورت زیر بدست می آید [۱۴].

ذکر این نکته ضروری است که ترم زمان در معادله انتقال حرارت مربوط به غلطک به دلیل سرعت محیطی غلطک و وجود ترم انتقال حرارت جابجایی و اعمال قانون زنجیره ایی به آن می باشد.

(تختال)

$$\frac{\partial}{\partial z} (k_p \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_p \frac{\partial T}{\partial y}) + \dot{Q} = \rho c u \frac{\partial T}{\partial x}$$

(غلطک)

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_r \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_r \frac{\partial T}{\partial y}) = \rho_r c_r \frac{\partial T}{\partial t}$$

(۷)

در معادلات فوق $u(x)$ سرعت ماده در جهت نورد بوده و تابعی از x می باشد که بصورت زیر تعریف می گردد [۱]:

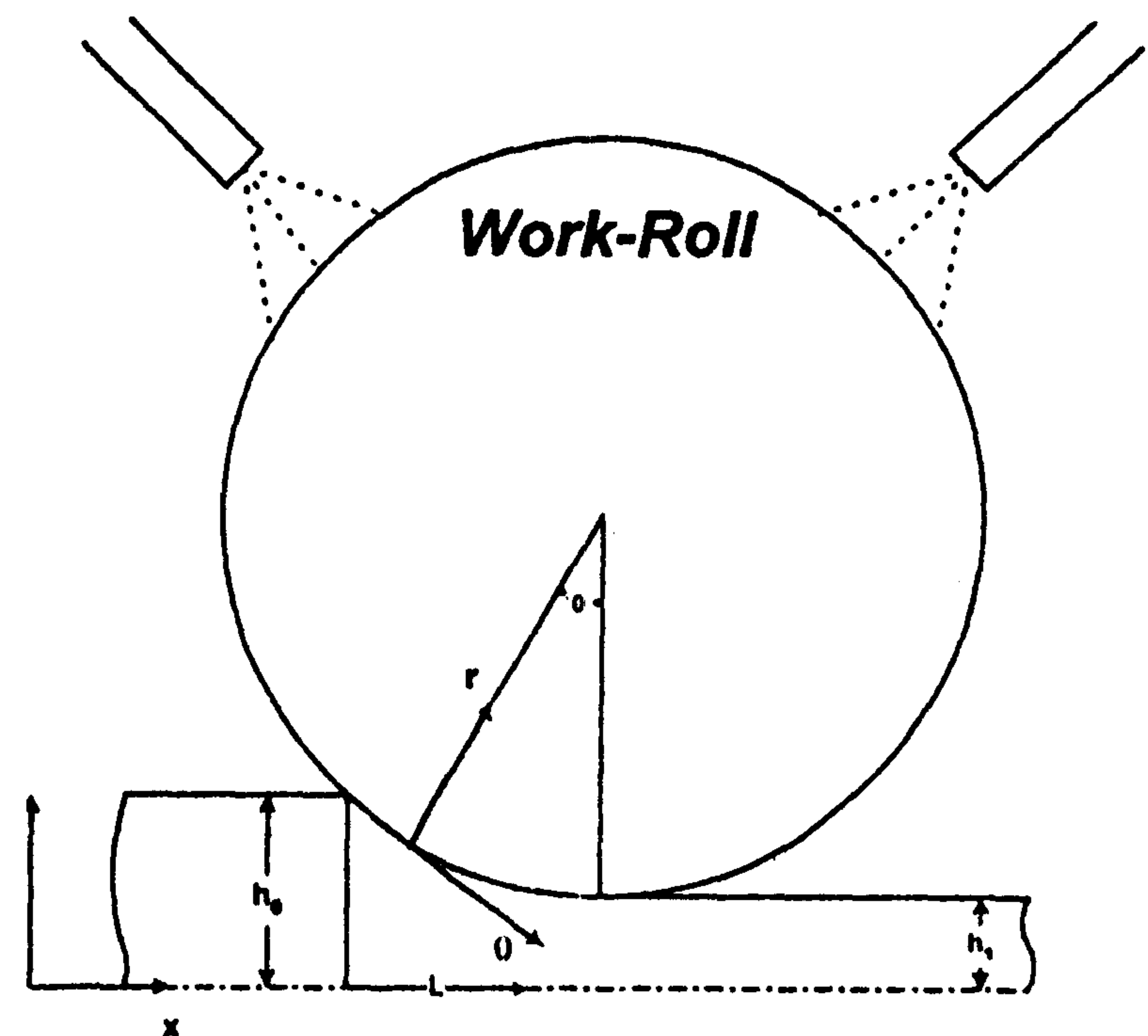
$$u(x) = \frac{A_0 \cdot U_0}{A(x)}$$

(۸)

$$u_r = 0$$

(۵)

که u_r سرعت در راستای شعاع غلطک می باشد.



شکل ۱: نمایش شماتیک منطقه تغییر شکل در نورد ورق.

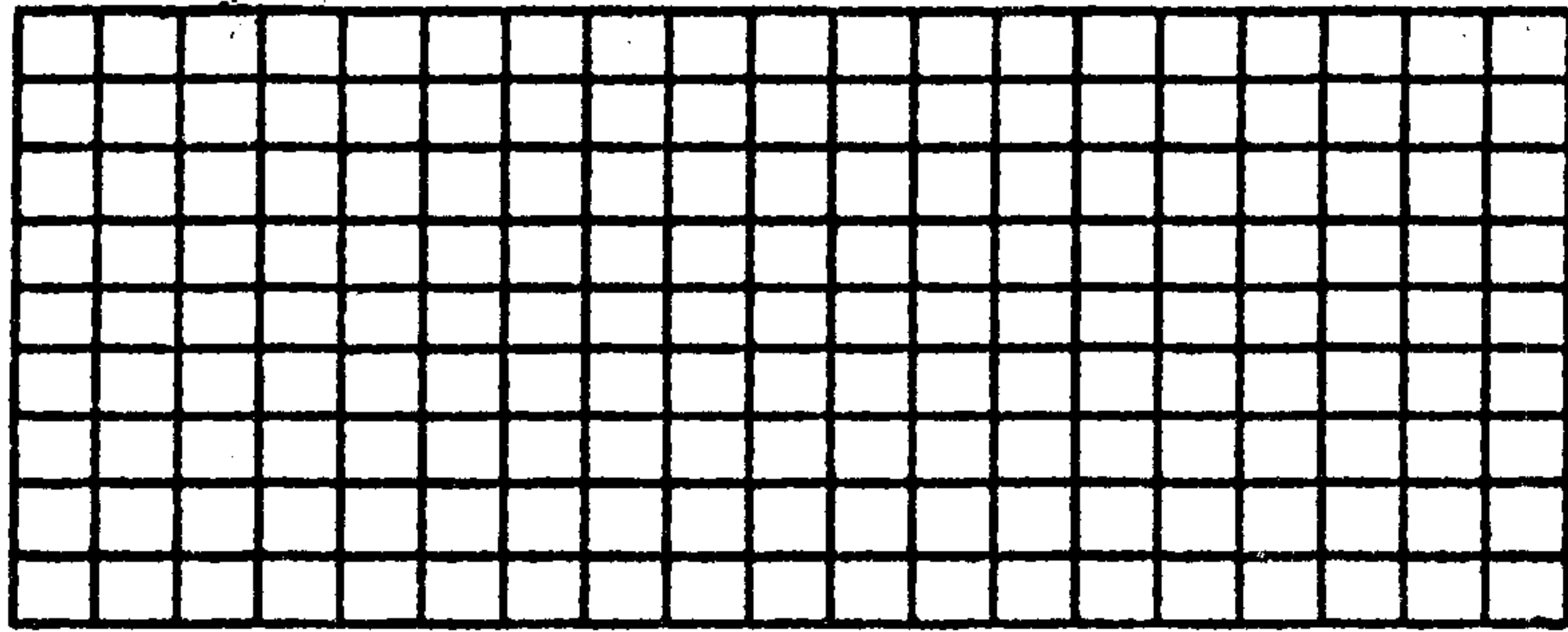
۲ - در ناحیه فصل مشترک قطعه و غلطک، اصطکاک باعث ایجاد نیروی اینرسی می شود که برای در نظر گرفتن این اثر شرایط مرزی زیر را می توان اعمال نمود:

$$\sigma_f = km \left[-\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{u_i - \bar{u}_i}{a v_r} \right) \right]$$

(۶)

که u_i به ترتیب سرعت گره در تماس با غلطک و سرعت مماسی غلطک می باشند و a یک عدد مثبت بسیار کوچک در مقایسه با $u_i - \bar{u}_i$ است و v_r سرعت خطی غلطک می باشد [۱۳].

شایان ذکر است که به علت تابعیت تنش سیلان و نیروی اصطکاک از میدان سرعت معادلات بدست آمده غیرخطی می باشند، برای حل این معادلات از دو روش تکرار مستقیم و نیوتن - رافسون استفاده گردید [۱۲ و ۱۳]. نکته قابل توجه آن است که روش نیوتن - رافسون حساس به حدس اولیه میدان سرعت می باشد. اگر حدس اولیه به مقدار کافی نزدیک به جواب واقعی نباشد، جوابهای حاصل از این روش واگرا می شوند، اما این روش شتاب همگرایی بالایی دارد و اگر حدس اولیه مناسب باشد با تعداد کم تکرار محاسبات جواب مطلوب بدست می آید. برعکس، روش تکرار مستقیم نسبت به



شکل ۲: المان بندی تختال.

المانهایی چهارضلعی (شکل ۲)، معادلات ریاضی حاکم به هریک از المانها اعمال می شوند. در این پژوهش بعلاوه این که شکل هندسی المانهای چهارضلعی در حین تغییر شکل غیرمشخص می باشند از المانهای ایزوپارامتریک استفاده شد [۱۵]، در این نوع از المانها مراحل عمل به این ترتیب است که محاسبات بر روی یک المان استاندارد انجام شده و سپس نتایج حاصله توسط یک انتقال به المانی با شرایط واقعی منتقل می گردد. به کمک این تکنیک معادلات ارائه شده در بالا برای هر المان استخراج شده و میدان سرعت (میدان کرنش) در ورق تعیین می شود، این عملیات برای هر مرحله نورد قابل تکرار است. بنابراین می توان به کمک آنها در یک خط پیوسته نورد میدان سرعت و نیروی نورد را برای مراحل مختلف نورد تعیین نمود. شکل (۳) فلوچارت برنامه کامپیوتری نوشته شده در تحقیق حاضر را نشان می دهد. این برنامه برای تعیین میدان سرعت کرنش و دما مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

با استفاده از مدل ریاضی و قابلیت تعیین اثر پارامترهای مختلف بر میدان سرعت، می توان با دقت قابل قبولی نیروی نورد و نحوه تغییر شکل ورق در منطقه تغییر شکل را پیش بینی کرد. در شکل (۴) نتایج حاصل از مدل ریاضی در مورد نیروی نورد در خط نورد گرم فولاد مبارکه (قسمت نورد کاری نهایی) با نتایج عملی مقایسه گردیده است، همانطور که ملاحظه می شود تطابق قابل قبولی بین دو سری نتایج وجود دارد، که این موید منطقی بودن فرضیات انجام شده در این پژوهش می باشد.

نحوه تغییر شکل المانها در منطقه تغییر شکل نورد ورق در شکل (۵) آمده است. همانطور که مشاهده

A_0 و U_0 به ترتیب مساحت و سرعت اولیه بوده و $A(x)$ مساحت در فاصله x از شروع منطقه تغییر شکل است. به منظور تعیین شرایط مرزی معادله انتقال حرارت در ورق، فرآیند نورد به مناطق حرارتی مختلف تقسیم بندی می شود و برای مناطق حرارتی مختلف، شرایط مرزی را می توان بصورت زیر بیان نمود:

۱- در منطقه بین قفسه ها، انتقال حرارت توسط جابجایی و تشعشع صورت می گیرد در حالیکه انرژی به محیط اطراف منتقل می شود یعنی:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\infty} (T - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (9)$$

۲- در ناحیه اکسیدزدائی انتقال حرارت توسط جابجایی انجام می شود. در این صورت می توان نوشت:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_w (T - T_w) \quad (10)$$

۳- در منطقه تغییر شکل در اثر وجود اصطکاک بین فلز و غلطکها تولید گرما می شود. همچنین در اثر تماس فلز با غلطک و جابجایی و تشعشع در نواحی بدون تماس دما کاهش می یابد، بطوریکه روابط زیر صادق هستند:

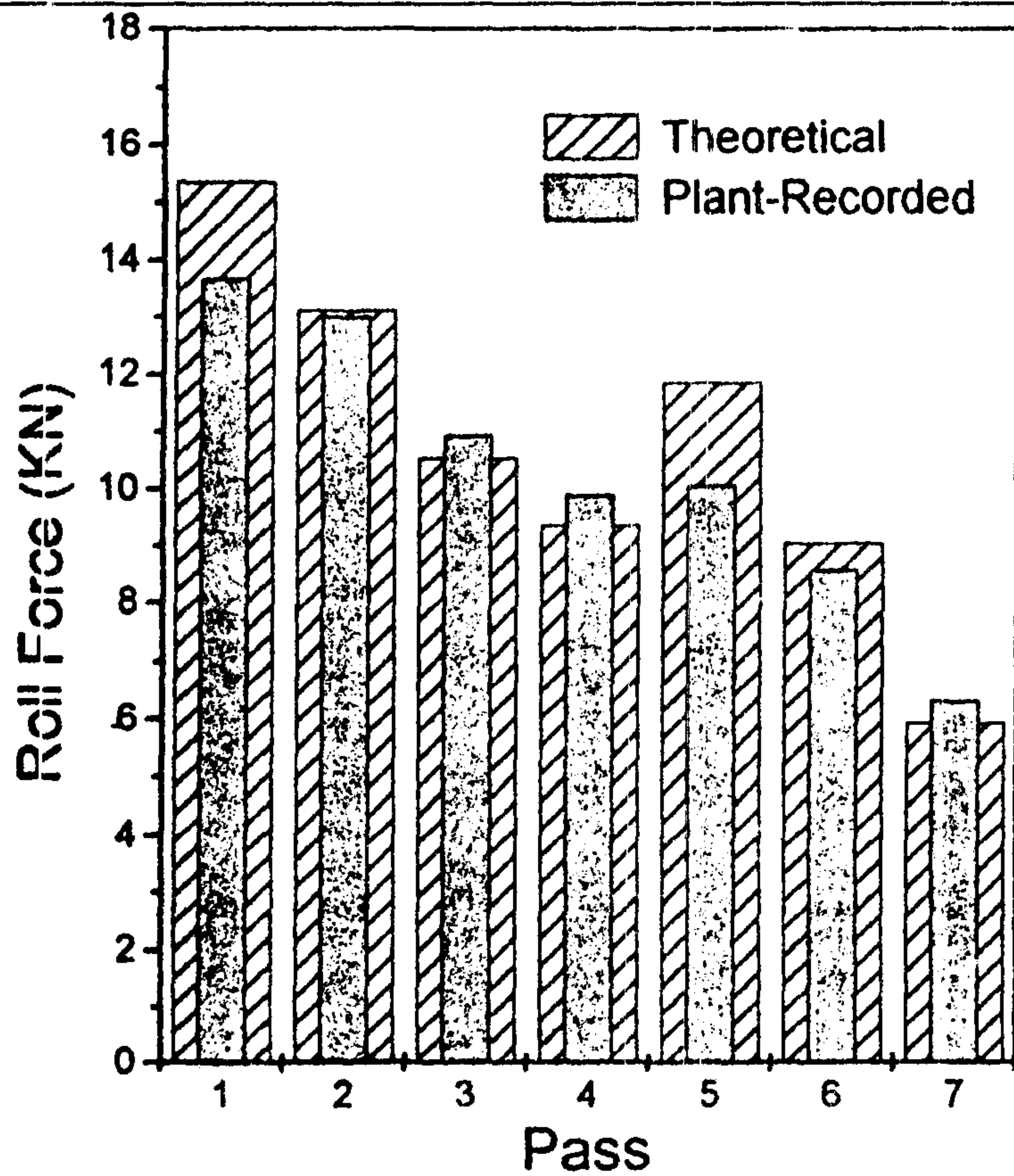
$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial n} &= h_{con} (T - T_{Roll}) - q_f \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} &= h_{\infty} (T - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \end{aligned} \quad (11)$$

۴- در شرایط مرزی در غلطکها نیز بصورت زیر قابل بیان می باشند:

$$\begin{aligned} r = R \quad k \frac{\partial T}{\partial n} &= h(t^*) (T - T_{Roll}) \\ r = r^* \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

در روابط فوق، T_{∞} دمای محیط، T_w دمای آب در منطقه اکسیدزدائی، T_{Roll} دمای سطح غلطک، و q_f گرمای ناشی از اصطکاک می باشند. همچنین r^* معرف لایه خارجی غلطک است که تغییرات دمایی را تحمل می کند.

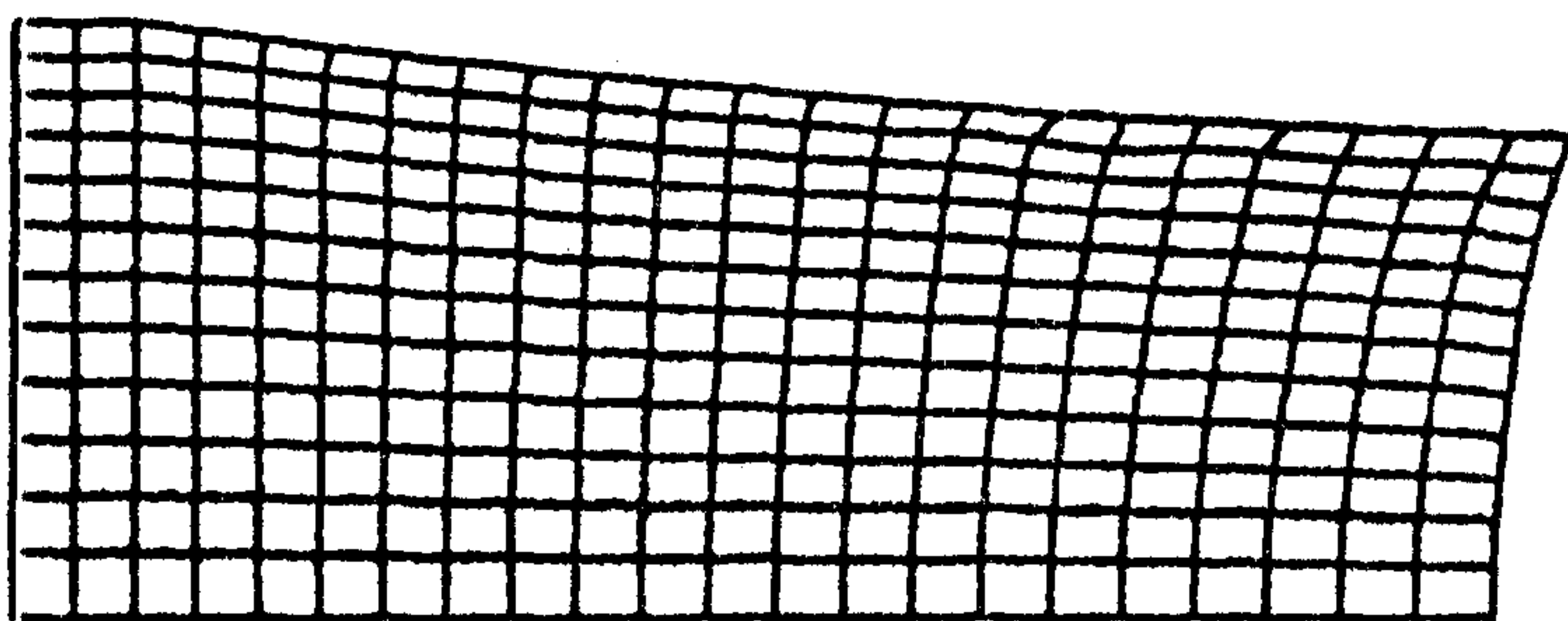
بعد از مشخص شدن معادلات پلاستیسیته و انتقال حرارت باید این معادلات به نحوی به تختال در حال نورد اعمال گردد. برای اینکار باتوجه به تقارن موجود در منطقه تغییر شکل فقط نیمی از ورق مورد تحلیل قرار می گیرد، به این ترتیب که بعد از تقسیم بندی ورق به



شکل ۴: مقایسه نتایج تجربی و عملی نیروی نورد.

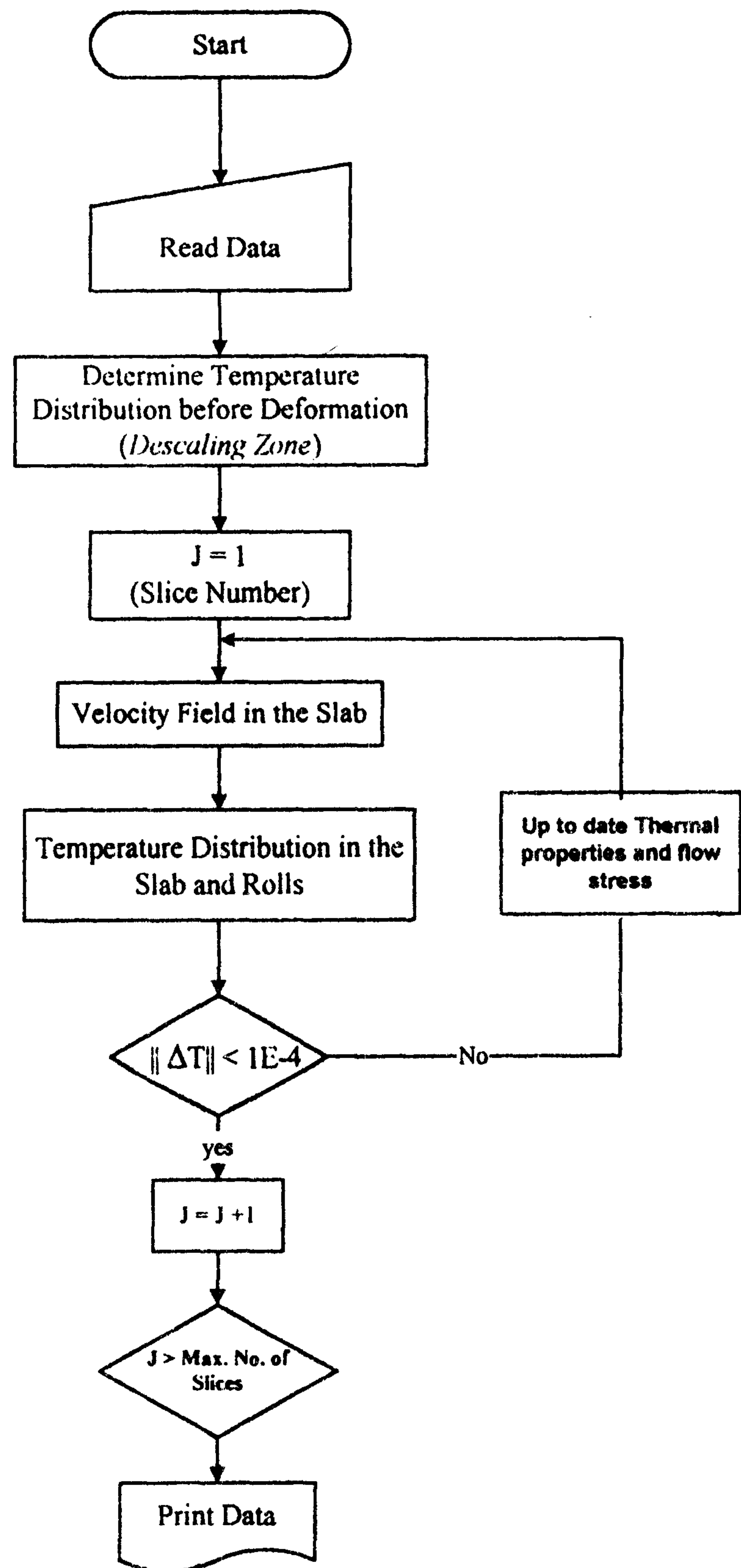
می باشد، چرا که علاوه بر مورد فوق الذکر مسئله انتقال حرارت نیز مطرح می گردد. به این ترتیب که بعلت انتقال حرارت از ورق داغ به غلطکهای سرد دمای ورق به شدت افت می کند [۱۶] در حالیکه دیگر نقاط ورق با تغییرات دمایی چندانی مواجه نمی باشند (شکل ۶). در نتیجه در حین تغییر شکل نواحی سطحی که با افت شدید دما روبرو شده اند از تنش سیلان بالاتر و قابلیت تغییر شکل کمتری برخوردار هستند و برای حفظ پیوستگی نقاط داخلی ورق تغییر شکل پلاستیک بیشتری را تحمل می کنند. به عبارت دیگر تمرکز کرنش پلاستیک در این نقاط بوجود می آید، و بسته به خصوصیات ذاتی فلز تختال و شرایط تغییر شکل حتی ممکن است باندهای برشی^۱ نیز در ورق ایجاد گردد [۱۷].

$$\text{Reduction} = 25\%, m_f = 0.6, h_c = 45 \text{ KW/m}^2 \cdot \text{K}, T_0 = 1250^\circ \text{C}, w = 30 \text{ rpm}$$



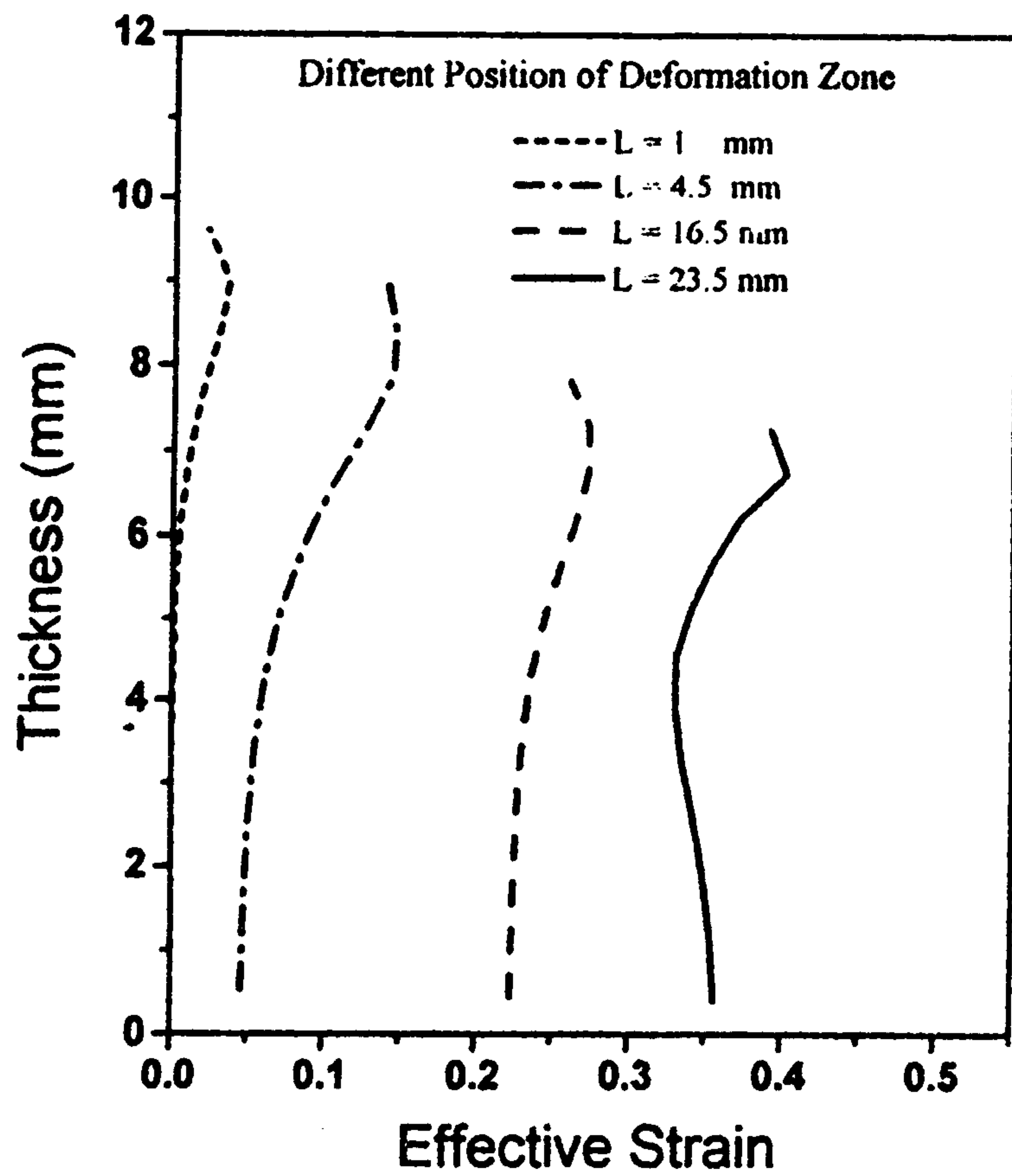
شکل ۵: نحوه تغییر شکل المانها در منطقه تغییر شکل نورد ورق (Reduction = 30%).

در شکل (۷) تغییرات کرنش موثر در جهت ضخامت در نقاط مختلف منطقه تغییر شکل نمایش داده



شکل ۳: فلوچارت برنامه کامپیوتری.

می گردد، با توجه به هندسه تغییر شکل، کرنشهای پلاستیک به خصوص در نواحی نزدیک به فصل مشترک ورق و غلطک شدیدتر هستند. این نکته از نحوه تغییر شکل المانها در شکل فوق قابل تشخیص است. در واقع در فرایند نورد با توجه به هندسه تغییر شکل و شرایط تغییر شکل از قبیل کرنش اعمالی، سرعت کرنش و شرایط اصطکاکی، گرادیان کرنش پلاستیک بین سطح و مرکز ورق ایجاد می شود به نحوی که در سطح کرنشهای برشی بزرگتر بوده و به تدریج به سمت مرکز از قدر مطلق آنها کاسته می شود. نکته دیگر آن است که گرادیان کرنش موثر در جهت ضخامت ورق در حالت نورد داغ شدیدتر

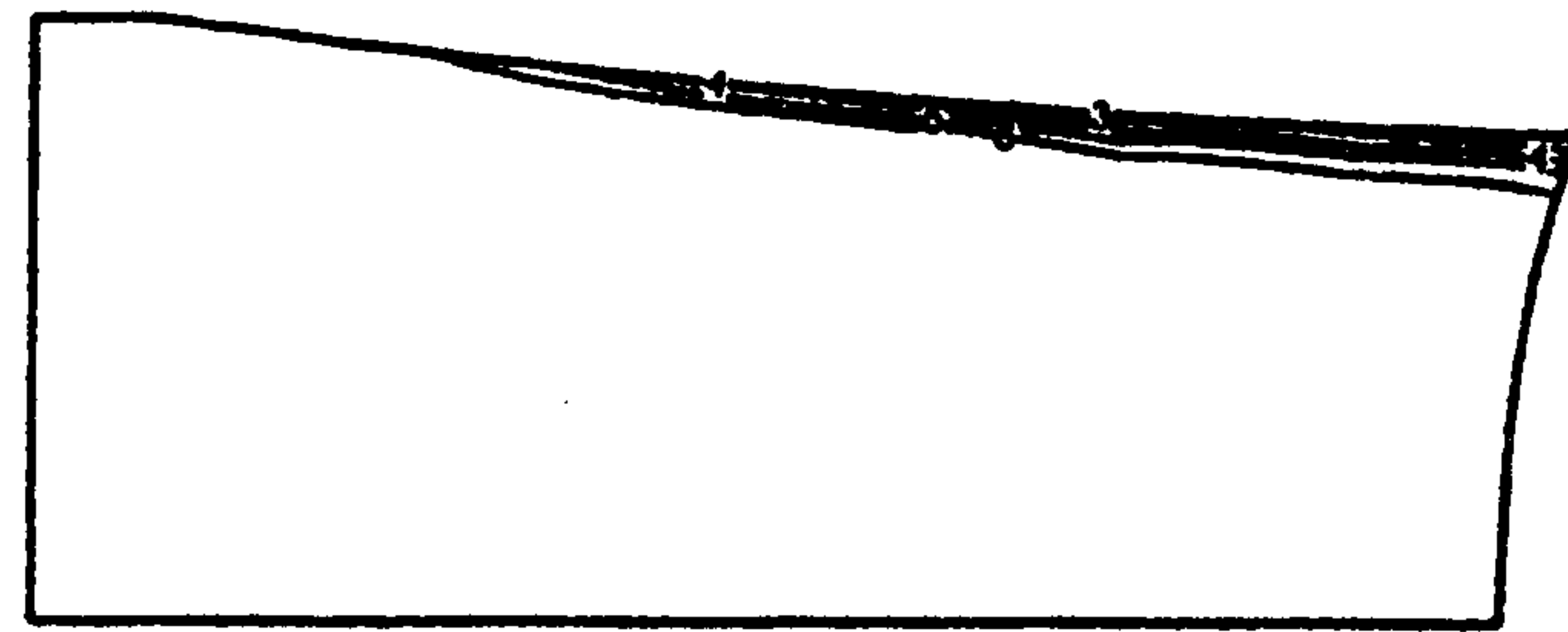


شکل ۷: توزیع کرنش موثر در جهت ضخامت در نقاط مختلف منطقه تغییر شکل.

میزان تغییر شکل از پارامترهای مهم در فرآیند نورد بشمار می رود. این پارامتر بخصوص بر توزیع کرنش و نیروی نورد موثر می باشد. در شکل (۱۰) اثر میزان تغییر شکل بر توزیع کرنش موثر در جهت ضخامت در منطقه تغییر شکل نشان داده شده است. با افزایش میزان کرنش، طول منطقه تماس ورق و غلطک و همچنین نیروی نورد بیشتر می شود، اما از جهت دیگر مسئله انتقال حرارت را نیز باید در نظر گرفت. به این ترتیب که با افزایش کرنش در یک پاس نورد زمان تماس غلطک و ورق و همچنین ضریب انتقال حرارت فصل مشترک افزایش می یابند [۱۸]. با افزایش این دو عامل اگرچه گرمای ناشی از تغییر شکل نیز افزایش می یابد اما در مجموع سرعت کاهش دما در ورق بیشتر شده و گرادیان کرنش اعمالی شدیدتر می شود. نکته قابل ذکر در این جا میزان تنشهای پس ماند بعد از نورد است که به علت تغییر شکل غیرهمگن در ورق، ایجاد می شوند. در صورتیکه قطعه دارای عیوب باشد، این تنشها می توانند منجر به عیوبی مانند عیب دندان سوسماری محصول نورد گردند [۱].

سرعت نورد یکی دیگر از فاکتورهای مهم و قابل کنترل در فرآیند نورد داغ ورق می باشد. با افزایش سرعت

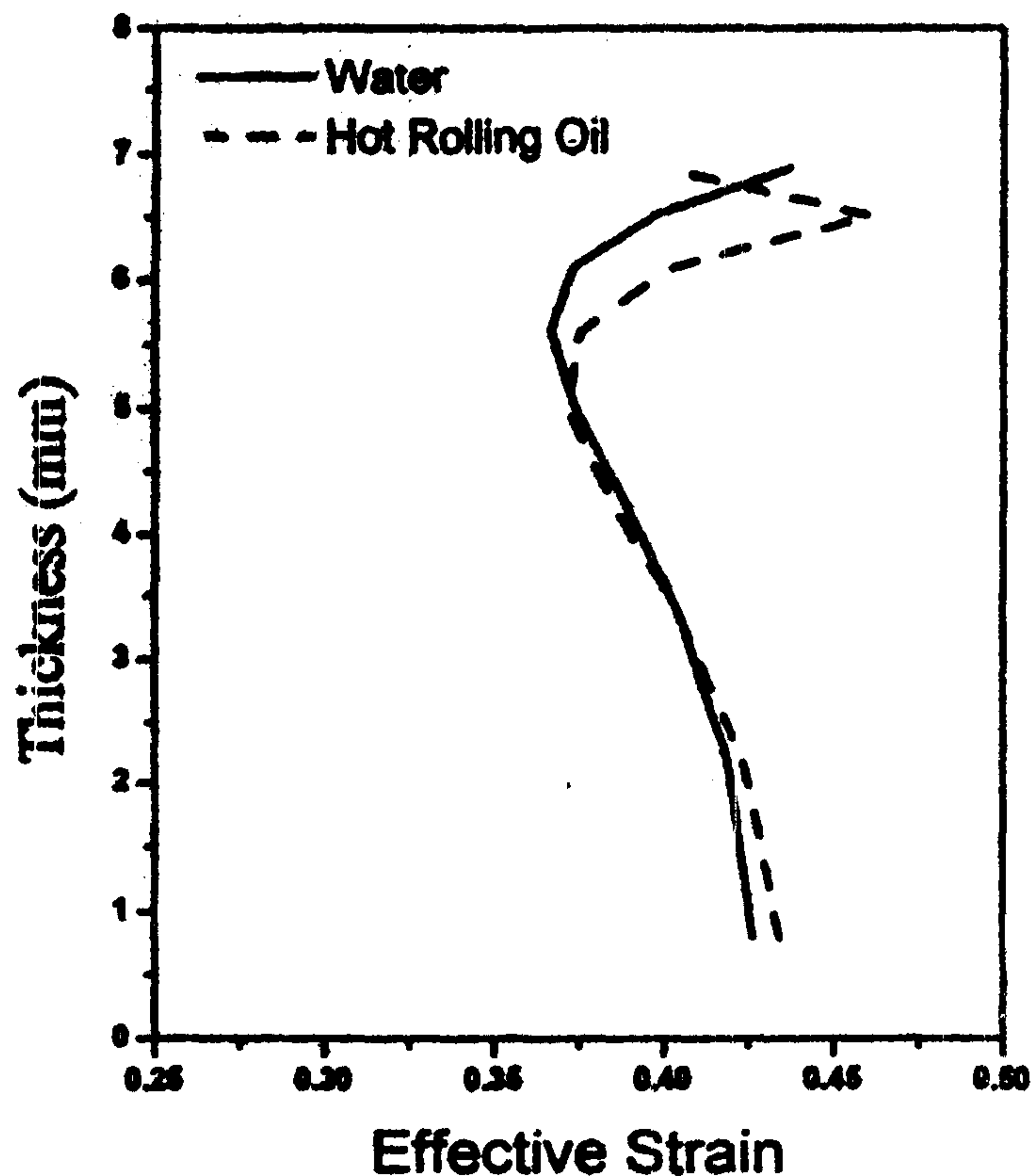
Level T	
6	1104.76
5	1010.6
4	916.432
3	822.268
2	728.1
1	633.934



شکل ۶: توزیع دما در منطقه تغییر شکل ورق.

شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در مناطق نزدیک به سطح بخصوص در ابتدای منطقه تغییر شکل، کرنش پلاستیک بیشتری متمرکز شده است، در شکل (۸) نیز تغییرات کرنش موثر در جهت ضخامت برای شرایط تکدما و غیرتکدما مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در اثر ایجاد شرایط تکدما گرادیان کرنش در جهت ضخامت کاهش می یابد. باتوجه به نکات فوق می توان چنین استنباط کرد که هر عاملی توزیع دما در منطقه تغییر شکل را تغییر دهد، می تواند توزیع کرنش را نیز تحت تاثیر قرار دهد. از مهمترین این عوامل ضریب انتقال حرارت فصل مشترک غلطک و ورق می باشد، این پارامتر مقدار انتقال حرارت جابجایی از ورق به غلطک را کنترل کرده و خود تابعی از نیروی نورد، شرایط سطحی و نوع روغنکار مصرفی می باشد [۱۸]. برای مثال در هنگامیکه از روغنکاری با ضریب انتقال حرارت پایین مانند روغنکارهای پایه معدنی استفاده می شود، در واقع علاوه بر کنترل اصطکاک، انتقال حرارت از ورق داغ به غلطک سرد نیز محدود می گردد. به عبارت دیگر با اینکار اجازه سرد شدن سریع به ورق در منطقه تغییر شکل داده نمی شود و در نتیجه باتوجه به مطالب فوق، گرادیان کرنش کمتری در منطقه تغییر شکل رخ می دهد (شکل ۹). نکته قابل ذکر دیگر سینتیک تغییر حالت‌های متالورژیکی و ارتباط آنها با کرنش پلاستیک می باشد. برای مثال شروع تبلور مجدد دینامیکی نیاز به یک مقدار کرنش بحرانی دارد [۱۹] و باتوجه به شرایط نورد و گرادیان کرنش بوجود آمده در منطقه تغییر شکل، این تغییر حالت در مناطق نزدیک به سطح سریعتر رخ می دهد، بنابراین در چنین شرایطی اندازه دانه ها در این نواحی تغییر می کنند.

کرنش بیشتری را تحمل می کنند، چرا که از یکسو انتقال حرارت به غلطک کم شده و از سوی دیگر بعلت غیرهمگن بودن توزیع کرنش مناطق مذکور کرنشهای بزرگی را تحمل می کنند، در این شرایط این نواحی از ورق با افزایش دما و کاهش تنش سیلان روبرو می شوند [۱۷]، یا به عبارتی تمرکز کرنش در نواحی سطحی مشاهده خواهد شد.

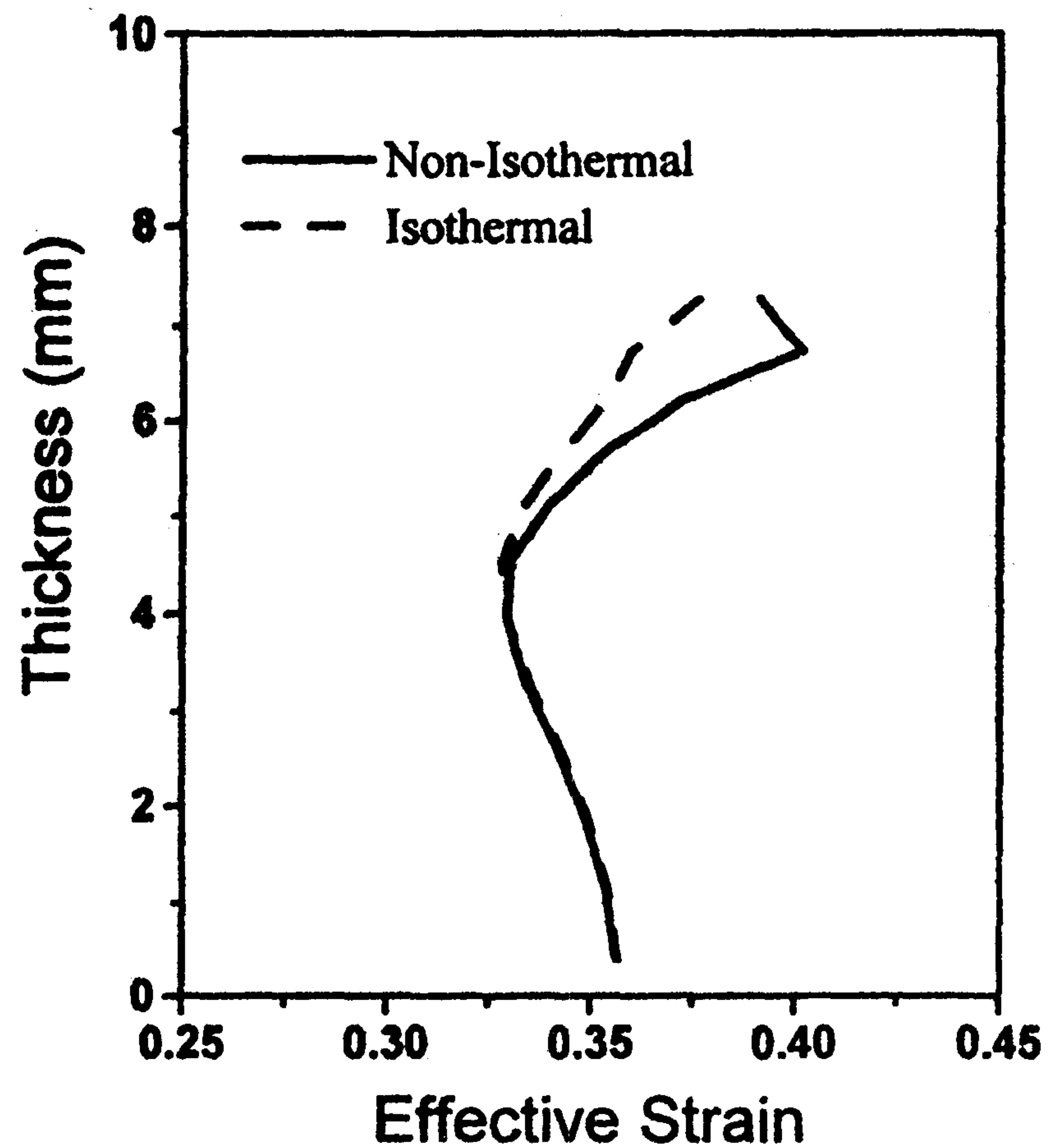


شکل ۹: اثر روغنکار بر توزیع کرنش در جهت ضخامت در هنگام خروج ورق از منطقه تغییر شکل (Reduction = 30%)

نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی بر مبنای روش المان محدود برای پیش بینی میدان سرعت در منطقه تغییر شکل نورد داغ ورق ارائه گردیده است. این مدل قادر است با در نظر گرفتن اثر عوامل مختلف از قبیل انتقال حرارت به غلطک نورد، میزان تغییر شکل، سرعت نورد، ضریب اصطکاک، میدان سرعت در ورق در حال نورد را پیش بینی کند. نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

۱- توزیع کرنش در منطقه تغییر شکل غیر یکنواخت است. به این معنا که در ناحیه ورودی فضای بین دو غلطک مقدار کرنش در سطح قطعه بیشتر از مرکز آن است، ولی با افزایش مقدار تغییر شکل و نزدیک شدن به ناحیه خروجی فضای دو غلطک، مقدار کرنش در مرکز



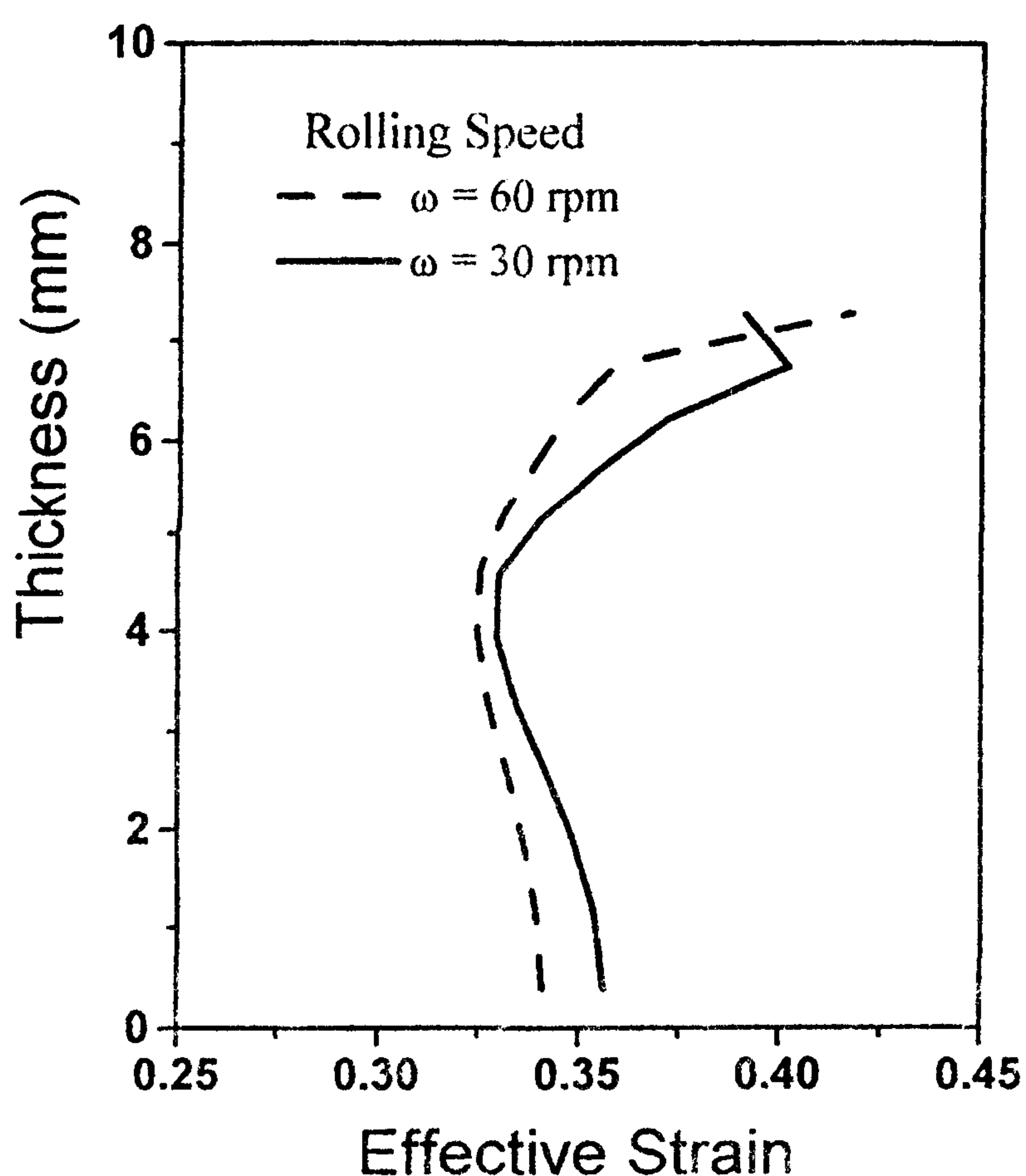
شکل ۸: توزیع کرنش موثر در جهت ضخامت در هنگام خروج ورق از منطقه تغییر شکل در دو حالت تکدما و غیر تکدما (Reduction = 25%)

نورد تغییرات مهمی در منطقه تغییر شکل رخ می دهد به این ترتیب که اولاً زمان تماس غلطک و ورق کمتر شده و در نتیجه زمان انتقال حرارت کاهش می یابد، ثانیاً سرعت کرنش اعمالی و به تبع آن تنش سیلان فلز افزایش یافته و در اثر آن گرمای تغییر شکل بیشتر می شود، ثالثاً نیروی نورد و در نتیجه آن ضریب انتقال حرارت فصل مشترک افزایش می یابند که این افزایش باعث سریعتر شدن نرخ انتقال حرارت از ورق به غلطک می گردد. مطالعات قبلی نشان می دهند که اثرات کاهش زمان تماس و گرمای تغییر شکل موثرتر از افزایش ضریب انتقال حرارت فصل مشترک می باشد، بنابراین با افزایش سرعت نورد افت دمای کمتری در ورق مشاهده می شود [۱۴]. این تغییرات باعث می شود که از غیرهمگنی کرنش در جهت ضخامت کاسته شود. شکل (۱۱) اثر سرعت نورد بر توزیع کرنش موثر در انتهای منطقه تغییر شکل را نمایش می دهد، همانطور که ملاحظه می شود با افزایش سرعت نورد گرادیان کرنش بین سطح و مغز ورق کاهش می یابد. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که با افزایش قابل توجه سرعت نورد، مسئله گرم شدن آدیباتیک مطرح می شود. در اثر وقوع این پدیده مناطق سطحی ورق

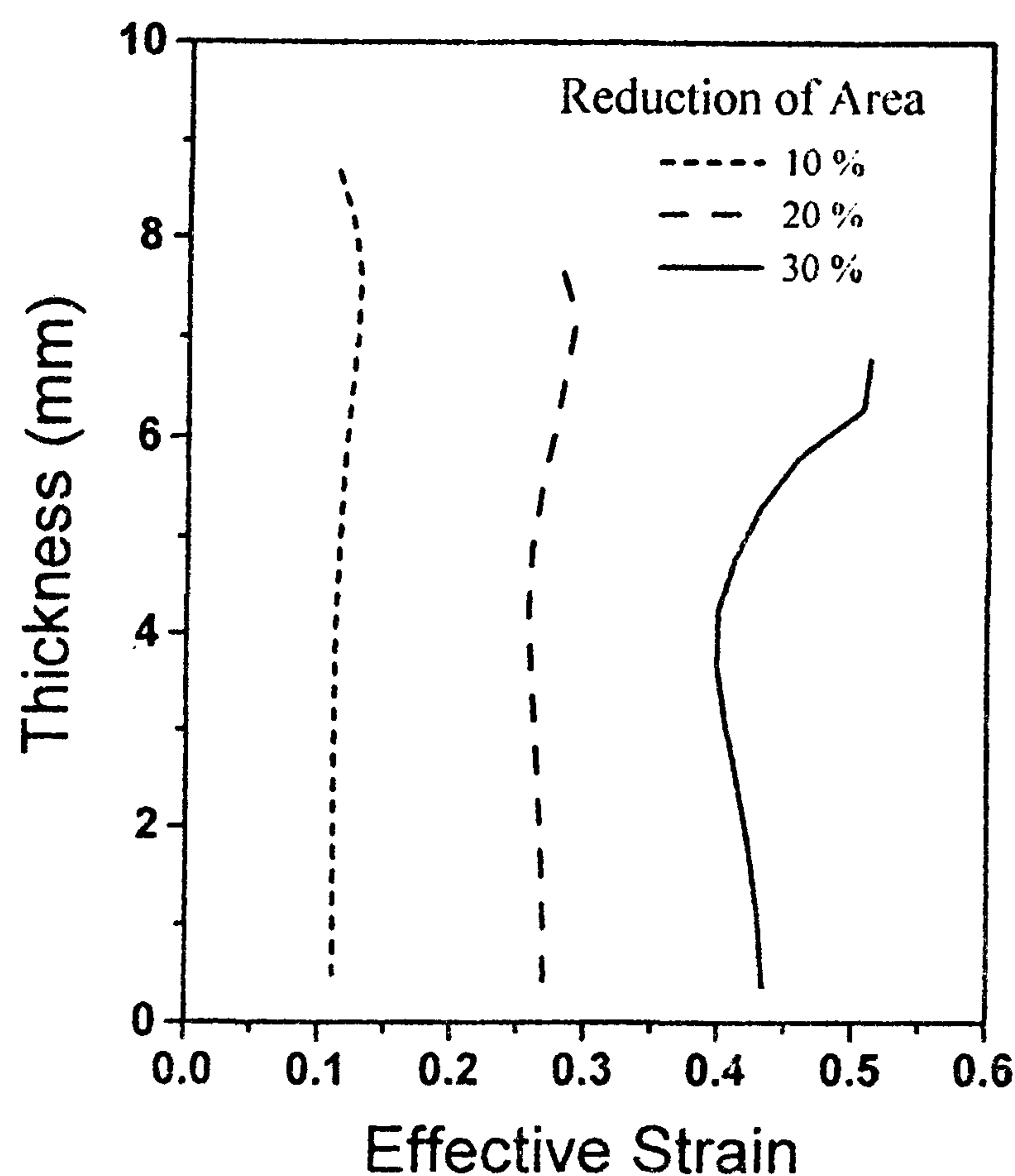
منطقی بودن فرضیات مذکور است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیریت محترم تکنولوژی شرکت فولاد مبارکه بخاطر فراهم آوردن امکانات تحقیق و هزینه های پروژه و از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، مدیریت محترم دفتر ارتباط با صنعت آن دانشگاه و مدیریت محترم مجتمع تحقیقات و توسعه صنعتی شریف بخاطر انجام هماهنگی های لازم در انجام و پیشرفت پروژه، تشکر و قدردانی می نمایند.



شکل ۱۱: اثر سرعت نورد بر توزیع کرنش در جهت ضخامت در هنگام خروج ورق از منطقه تغییر شکل (Reduction = 25%).



شکل ۱۰: اثر میزان تغییر شکل بر توزیع کرنش در جهت ضخامت در هنگام خروج ورق از منطقه تغییر شکل.

قطعه بیشتر از سطح آن می شود.

۲- مقدار تغییر شکل از عوامل مهم کنترل کننده توزیع کرنش در منطقه تغییر شکل نورد ورق می باشد، با افزایش این عامل میزان غیرهمگنی در توزیع کرنش افزایش می یابد.

۳- سرعت نورد تاثیر قابل ملاحظه ایی بر توزیع کرنش و دما دارد، با افزایش این پارامتر انتظار می رود که از غیریکنواختی توزیع کرنش و دما در منطقه تغییر شکل نورد داغ ورق کاسته شود.

۴- باتوجه به فرضیات مورد استفاده، تطابق قابل قبولی بین نتایج تئوری و آزمایش وجود دارد که نشان دهنده

مراجع

- 1 - Dieter, G. E. (1978). *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill.
- 2 - Montmitonnet, P. and Bucssla. (1991). "A review on theoretical analysis of rolling in europe." *ISIJ International*, Vo. 31, No. 6, PP. 525-538.
- 3 - Johnson, W. and Kudo, H. (1960). "The use of upper-bound solutions for the deformation of temperature distribution in fast hot rolling and axi-symmetric extrusion processes." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 1, PP. 175-191.
- 4 - Tarokh, M. and Seradyski, F. (1970). "Roll force estimation in plate rolling." *J. of the Iron and Steel*, Vol. 211, PP. 695-697.

- 5 - Liu, C., Hartley, P., Sturgess, N. and Rowe, G. W. (1987). "Finite-element modeling deformation and spread in slab rolling." *Int. J Mech. Sci.*, Vol. 29, No. 4, PP. 271-283.
- 6 - Mori, K., Osakada, K. and Oda, T. (1982). "Simulation of plane-strain rolling by the rigid-plastic finite element method." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 24, No. 9, PP. 519-527.
- 7 - Mori, K. and Osakada, K. (1984). "Simulation of three-dimensional deformation in rolling by the finite-element method." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, No. 9/10, PP.515-525.
- 8 - Yamada, K., Ogawa, S. and Hamausu, S. (1991). "Two-dimensional thermo-mechanical analysis of flat rolling using rigid-plastic finite element method." *ISIJ International*, Vol. 31, No. 6, PP. 566-570.
- 9 - Iguchi, T. and Yarita, I. (1991). "3D analysis of flat rolling by rigid-plastic FEM considering sticking and slipping frictional boundary." *ISIJ International*, Vol. 31, No. 6, PP. 559-565.
- 10 - Chen, W. C., Samarasekara, I. V., Kumar, A. and Hawbolt, E. B. (1993). "Mathematical modelling of heat flow and deformation during rough rolling." *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 20, No. 2, PP. 113-125.
- 11 - Dvorkin, E. N., Goldschmit, M. B., Cavaliere, M. A., Amenta, P. M., Marini, O. and Stroppiana, W. (1997). "2-D finite element parametric studies of the flat-rolling process." *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 68, PP. 99-107.
- 12 - Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T. (1989). *Finite element method and metal forming*. Oxford, Oxford University Press.
- 13 - Kim, N., Kobayashi, S. and Altan, T. (1991). "Three-dimensional analysis and computer simulation of shape rolling by the finite and slab element method." *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, Vol. 31, No. 4, PP. 553-563.
- ۱۴ - سراج زاده، س. و کریمی طاهری، ع. "تعیین توزیع دما در فرآیند نورد داغ ورق با استفاده از روش اجزاء محدود." دودین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، مهر ماه (۱۳۷۷).
- 15 - Stasa, F. L. (1985). *Applied finite element method*. CBS Publishing Japan Ltd.
- 16 - Teseng, A., Gunderia, S. and Sun, P. (1991). "Cooling of roll and strip in steel rolling." *Steel Research*, Vol. 62, No. 5, PP. 207-215.
- 17 - Hwang, S. M., Joun, M. S. and Kang, Y. H. (1993). "Finite element analysis of temperatures, metal flow, and roll pressure in hot strip rolling." *Trans. of ASME for Ind.*, Vol. 115, PP. 290-298.
- 18 - Murata, K., Morise, H., Mitsutsuka, M., Haito, H., Komatsu, T. and Shida, S. (1984). "Heat transfer between metals and its application to protection of rolls." *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol. 24, No. 9, PP. B309.
- 19 - Sellars, C. M. (1990). "Modelling microstructure development during hot rolling." *Materials Science and Technology*, Vol. 6, PP. 1072-1081.

واژه نامه :

1 - Plastic-Rigid	صلب پلاستیک
2 - Rough-Rolling	نورد کاری خشن
3 - Viscoplastic-Rigid	صلب - ویسکوپلاستیک
4 - Penalty Function	تابع پنالتی
5 - Shape Function	تابع شکل
6 - Steady State	مداوم
7 - Shear Band	باندهای برشی