

# ارزیابی عملکرد دستگاه سایزینگ پرس در کاهش عرض تختال به کمک شبیه سازی به روش المان محدود

محمد رضا فروزان<sup>\*</sup>، ایمان صالحی<sup>\*\*</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۴/۱۲/۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱/۲۰)

**چکیده** - در این مقاله مشخصات تغییر شکل تختال در فرایند سایزینگ پرس به عنوان یکی از روشهای کاهش عرض تختال در نورد گرم توسط روش المان محدود و با استفاده از فرمولاسیون صریح به کمک المانهای الاستوویسکوپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر متغیرهایی مانند عرض و ضخامت اولیه تختال، کاهش عرض، گام تغذیه و سرعت ابزار پرس بر فاکتورهای از جمله شکل پروفیل ضخامت (عیب استخوان سگی<sup>۱</sup>)، فرم دو انتهای تختال (عیب دم ماهی شدن<sup>۲</sup>)، کاهش عرض در ابتدای تختال (عیب گردن پیدا کردن<sup>۳</sup>) و کیفیت لبه تختال بررسی شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین دو روش کاهش عرض متداول یعنی نورد عمودی به کمک غلتکهای عمودی<sup>۴</sup> و دستگاه سایزینگ پرس<sup>۵</sup> به منظور تعیین تفاوتها و بازده هر کدام از دو روش ارائه شده است. میزان برگشت عرض که یکی از مهمترین فاکتورها در ارجحیت روش کاهش عرض است و همچنین شکل تختال پس از عبور از اولین ایستگاه نورد افقی در این تحقیق ارزیابی شده است. همچنین به منظور معتبرسازی روش تحلیل، نتایج حاصله با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج تحقیق حاکی از تغییر شکل یکنواخت تر و بازده بالاتر در فرایند سایزینگ پرس نسبت به نورد عمودی است.

واژگان کلیدی: سایزینگ پرس، نورد عمودی، روش المان محدود صریح، الاستوویسکوپلاستیک

## Evaluation of Sizing Press Mill Performance in Slab Width Reduction Using FE Simulation

M. R. Forouzan and I. Salehi

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

**Abstract:** In this paper, properties of slab deformation in sizing press mill as one of the slab reduction processes in hot rolling

\*\* - دانشجوی کارشناسی ارشد

\* - استادیار

mills have been evaluated using the elastoviscoplastic finite element method with explicit formulation. Effect of parameters such as initial slab width and thickness, reduction, feed pitch, and anvil speed on factors such as dogbone formation, head and tail fishtail profile, width necking at the leading end of slab, and slab edge quality have been studied. Furthermore, a comparison has been made between the two common width reduction methods, i.e. Vertical Rolling (Edging) and Sizing Press, in order to determine their differences and the efficiency of each process. The amount of width return (back spread), one of the most important factors related to width reduction efficiency and also slab formation after the first horizontal rolling pass, has been evaluated. Also, in order to validate the applied finite element method, the results obtained have been compared with experimental ones found in the literature. The results show that deformation in sizing press is more favourable and that its efficiency is better than that of the vertical rolling mill.

**Keywords:** Sizing press, Vertical rolling, Explicit finite element method, Elasto-viscoplastic

## فهرست علائم

افزایش عرض پس از نورد افقی	$\Delta w_2$	ضخامت اولیه تختال	$H_0$
افزایش عرض به دلیل حذف استخوان	$\Delta w_b$	طول بخش افقی ابزار	$L$
افزایش عرض به دلیل تعریض تختال	$\Delta w_s$	عرض اولیه تختال	$w_0$
کرنش پلاستیک	$\varepsilon$	عرض تختال پس از نورد افقی	$w_1$
نرخ کرنش پلاستیک	$\dot{\varepsilon}$	عرض تختال پس از فرایند کاهش عرض	$w_e$
بازده فرایند کاهش عرض	$\eta$	زاویه ورودی ابزار پرس	$\alpha$
تنش سیلان	$\sigma$	زاویه خروجی ابزار پرس	$\beta$

## ۱- مقدمه

دو واحد مذکور را ایستگاه اصلی کاهش عرض در ابتدای خط نورد گرم به عهده دارد. لازم به ذکر است که عمده کاهش عرض تختال نیز در این ایستگاه اعمال می‌شود.

در ایستگاههای نورد عمودی، میزان کاهش عرض قابل اعمال و در نتیجه شانس سازگار کردن عرض تختال با سه متغیر اصلی محدود می‌شود [۱]:

- زاویه گیرش بین تختال و غلتک

- برآمدگی در لبه های تختال

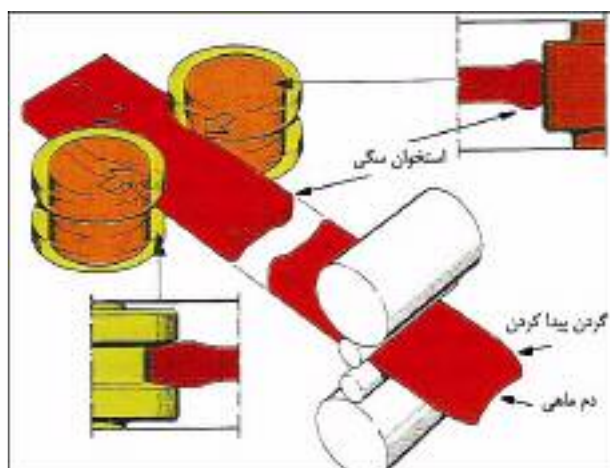
- فرم دو انتهای تختال

همانند فرایند نورد افقی، زاویه گیرش در نورد عمودی نیز محدود کننده است. زاویه گیرش بیش از حد باعث جلوگیری از داخل شدن تختال به فضای بین دو غلتک نورد شده و در نتیجه فرایند نورد اصولاً شروع نمی‌شود.

برآمدگی در لبه های تختال عامل مهم دیگری است که میزان کاهش عرض در فرایند نورد عمودی را محدود می‌کند. شکل (۱) نمایی از فرایند کاهش عرض نورد عمودی را

عرض تختال یا به بیانی عرض ورق از جمله پارامترهایی است که دائماً در فرایند نورد گرم کنترل می‌شود و دلیل این امر نیز مشخصاً نیاز به یک تolerانس معین در عرض ورق خروجی از واحد نورد گرم است. مهمترین عواملی که بر عرض ورق یا تختال در حین نورد گرم تاثیر می‌گذارند عبارت‌اند از تعریض یا افزایش عرض تختال در ایستگاههای نورد افقی و فرایندهای کاهش عرض که در طول خط خشن کار بر روی تختال اعمال می‌شوند.

فرایندهای کاهش عرض دو وظیفه اصلی را در خطوط نورد گرم به عهده دارند که عبارت‌اند از: اصلاح عرض ورق به واسطه پدیده تعریض در نورد افقی و همچنین ایجاد یک همزمانی و هماهنگی بین واحد ریخته گری مداوم و خط نورد گرم. وظیفه اصلاح تعریض عمدتاً توسط سیستمهای نورد عمودی به کار رفته در ایستگاههای خشن کار سنگین افقی (دو غلتکه و چهار غلتکه) انجام می‌گیرد و وظیفه ایجاد همزمانی و هماهنگی بین



شکل ۱- شماتیک فرایند نورد عمودی-افقی [۱]

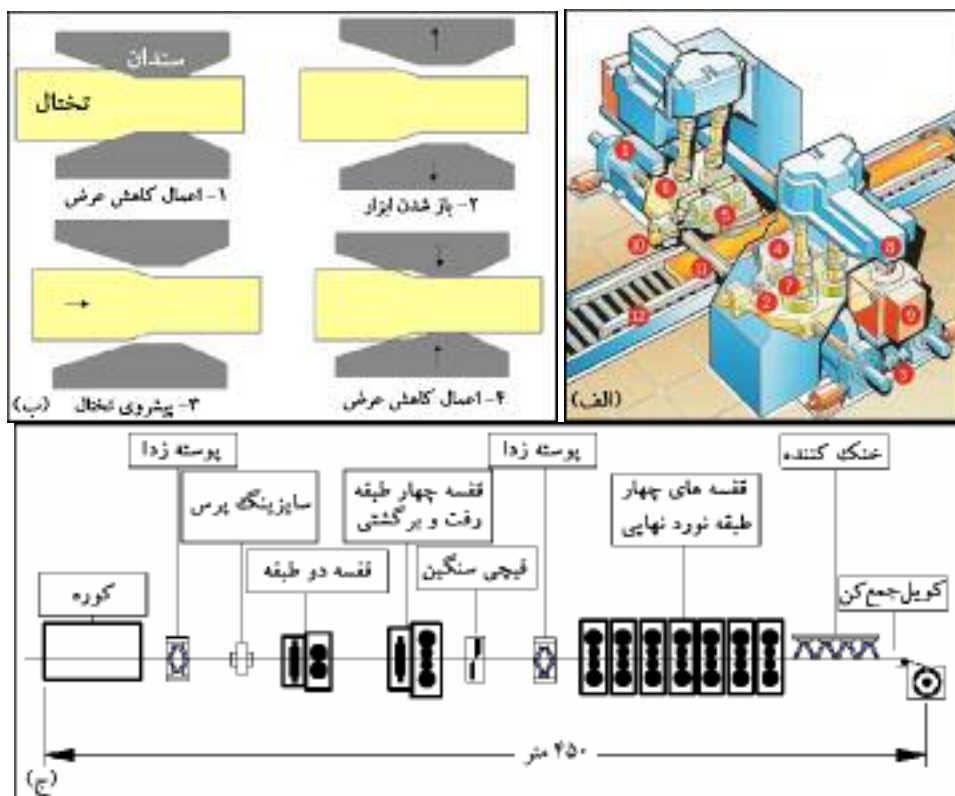
ورق در فرایند برش<sup>۶</sup> بیشتر شده، بازده اقتصادی نورد کاهش می‌یابد.

همچنین شرایط تنش در اعمال کاهش عرض به ابتدای تختال باعث حرکت لایه های ماده به گونه‌ای می‌شود که عرض تختال در ابتدای آن از فاصله بین دو غلتک کمتر می‌شود. این عیب به فشردگی عرض یا کمبود عرض معروف بوده و در شکل (۱) نیز قابل مشاهده است. با افزایش میزان کاهش عرض، طول ناحیه فشردگی بیشتر شده و در نتیجه طول بیشتری از ورق دچار کمبود عرض خواهد شد که لازم است به عنوان دور ریز از ورق جدا شود.

فرایند ساینینگ پرس دیگر فرایند کاهش عرض است. ایده این فرایند در سال ۱۹۸۷ برای اولین بار در ژاپن مطرح و صنایع فولاد کاواساکی ۲ سال بعد آن را در یکی از خطوط نورد گرم خود به کار گرفت [۲]. از آن زمان تا به حال تعداد زیادی از کارخانجات تولید ورقهای فولادی در سراسر جهان به این سیستم مجهز شده‌اند. هدف از ابداع و به کارگیری این سیستم حذف محدودیتهای موجود در میزان کاهش عرض توسط نورد عمودی و همچنین کاهش عیوب مخربی بود که باعث کاهش بازده خط نورد گرم می‌شد. مکانیزم عمل این سیستم کاملاً با فرایند نورد متفاوت است. ساینینگ پرس یک ابزار آهنگری است که بر روی یک سیستم مکانیکی نصب می‌شود و در واقع با فشردن تختال در جهت عرض، کاهش عرض به آن اعمال

به همراه فرایند نورد افقی بعد از آن نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقطع تختال پس از فرایند نورد عمودی نایکنواخت بوده و ضخامت لبه های تختال از مرکز آن بیشتر است. این پدیده به دلیل فرم استخوان مانند مقطع تختال به استخوان سگی معروف است. علت وقوع این پدیده به‌طور مختصر عدم گسترش نیروی نورد به مرکز تختال و همچنین مقاومت بخش میانی تختال در مقابل حرکت بخش لبه‌ای آن به سمت مرکز است. وجود این تغییر شکل نایکنواخت علاوه بر اینکه کیفیت هندسی ورق تولیدی را کاهش می‌دهد باعث بروز مشکلاتی از جمله محدودیت در کاهش ضخامت به دلیل ضخامت زیاد در لبه ها در فرایند نورد افقی بعدی (محدودیت زاویه گیرش در فرایند نورد افقی) و همچنین عدم قابلیت دستیابی به تلرانسهای دقیق ضخامت ورق تولیدی می‌شود.

عامل موثر دیگر در محدود کردن میزان کاهش عرض، فرم و نوع تغییر شکل در دو انتهای تختال است. در این بخش دو عیب مهم که ناشی از تغییر شکل گذرای ابتدا و انتهای تختال است توضیح داده می‌شود. اولین عیب، عیب دم ماهی نام دارد. همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود ابتدای تختال یک انحنا دم ماهی مانند پیدا می‌کند. شبیه همین حالت در انتهای تختال نیز به چشم می‌خورد. این نایکنواختی در ایستگاههای نورد افقی بعدی گسترش یافته و طول بیشتری از ورق را درگیر می‌کند در نتیجه میزان دور ریز ورق به دلیل حذف این نواحی از



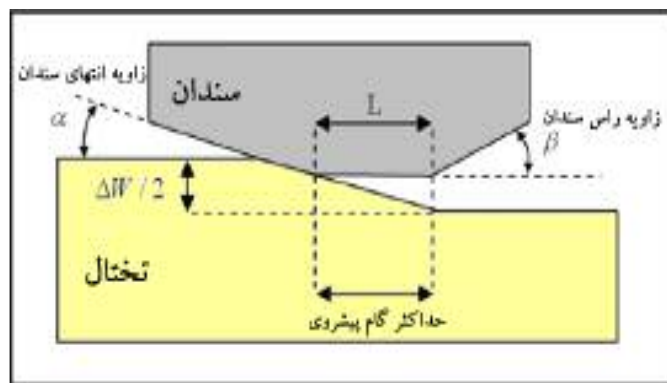
شکل ۲- مکانیزم فرایند سایزینگ پرس (الف) دستگاه سایزینگ پرس (ب) مراحل کاهش عرض (ج) موقعیت دستگاه در خط نورد

فولادسازی که تامین کننده تختالهای کارخانه نورد گرم است اجازه می دهد اغلب اوقات قالبهای ریخته گری خود را در حداکثر عرض تنظیم کرده و بدون نیاز به تغییر عرض قالب که تاخیر زیادی در خط ریخته گری مداوم ایجاد می کند، با حداکثر ظرفیت و بدون وقفه تختال تولید کند، مزیتی که باعث افزایش تولید واحد ریخته گری مداوم تا ۲۵٪ می شود [۱]. از سوی دیگر از آنجایی که این مقدار کاهش عرض تنها در یک بار عبور تختال از بین دستگاه سایزینگ پرس حاصل می شود کاهش زمان نورد را به دلیل کاهش تعداد عبور در نورد عمودی به همراه دارد که بر افزایش بازده زمانی خط نورد گرم نیز تاثیرگذار است. بجز دو مزیت فوق که بدیهی به نظر می رسند استفاده از دستگاه سایزینگ پرس اغلب موجب کاهش عیوب موضعی محصول می شود.

چندی پس از آنکه هیوا [۲] فناوری جدید سایزینگ پرس را معرفی کرد گراف [۱] با جمع آوری اطلاعات عملی تاثیرات

می کند. شکل (۲) نمایی از ابزار این فرایند و همچنین شماتیک مکانیزم عمل آن را نمایش می دهد. همچنین در این شکل موقعیت ابزار در یک خط نورد واقعی [۲] مشخص شده است. در این فرایند برخلاف فرایند نورد عمودی که بعضاً لازم است برای کاهشهای زیاد چندین بار تکرار شود، یک فرایند کاملاً یک طرفه است و تختالی که به طور مداوم از این فرایند خارج می شود از نظر عرض به طور مناسب کاهش یافته و نیازی به تکرار مجدد فرایند نیست. به همین دلیل طول خط نورد به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. لازم به ذکر است در این فرایند هر نقطه از تختال فقط یکبار تحت تاثیر فشردن فک سندان دستگاه به عرض نهایی خود می رسد.

مهمترین مزیتی که این دستگاه ایجاد می کند افزایش حد کاهش عرض تا ۳۵۰ میلیمتر است، درحالی که حداکثر مقدار کاهش عرض قابل اعمال به ورق با استفاده از نورد عمودی تنها ۷۵ میلیمتر است. چنین امکان مهمی به بهره بردار کارخانه



شکل ۳- شماتیک ابزار پرس و تختال

جدول ۱- مشخصات ابزار و تختالهای مورد مطالعه در فرایند کاهش عرض

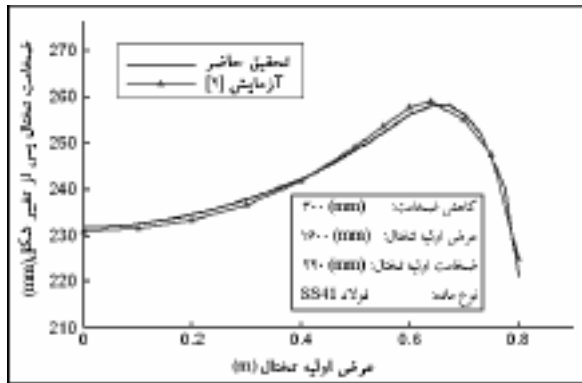
X70, C15, St14	ماده تختال	۲۶۰، ۲۲۰، ۱۸۰	ضخامت تختال (mm)
۱۱۶۰	دمای تختال (°C)	۲۰۰۰، ۱۵۰۰، ۱۰۰۰	عرض تختال (mm)
شیدا [۱۱]	مدل جریان	۴۰۰۰	طول تختال (mm)
۵۶۵	شعاع غلتکهای عمودی (mm)	۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰	کاهش عرض (mm)
۱/۷۵	سرعت خطی نورد عمودی (m/s)	۵۱۰	گام حرکت تختال (mm)
۵۸۵	شعاع غلتکهای افقی (mm)	۰/۵	بسامد حرکت سندان (Hz)
۱/۷۵	سرعت خطی نورد افقی (m/s)	$\alpha = 13^\circ$	زاویه انتهایی سندان (درجه)
۰/۳۵	ضریب اصطکاک	$\beta = 15^\circ$	زاویه راس سندان (درجه)

نیز مطالعه شده است.

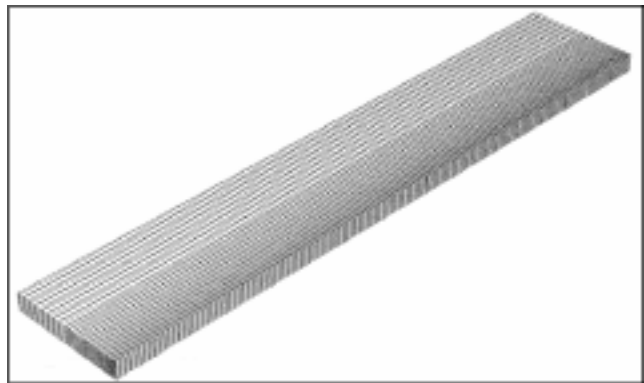
## ۲- مدل المان محدود

رفتار ماده تختال در این مدل‌سازی الاستو ویسکوپلاستیک فرض شده و بر مبنای نتایج مراجع [۶-۷] از اثرات کوپل گرمایی صرف نظر شده است، اعتبار فرض همدمای بودن فرایند در مراجع دیگر نیز به تایید رسیده است [۳-۵]. پارامترهای هندسی ابزار پرس مورد استفاده در مدل‌سازی فرایند در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱) مشخصات هندسی و فیزیکی و پارامترهای ورودی شبیه سازی آورده شده‌اند. به دلیل تقارن فقط یک چهارم مدل فیزیکی شبیه سازی شده است. در المان بندی جسم تغییر شکل پذیر (تختال) از ۲۵۴۸۰ المان سه بعدی ۸ گره‌ای پیوسته کاهش یافته C3D8R و در مورد ابزارهای پرس و غلتک از

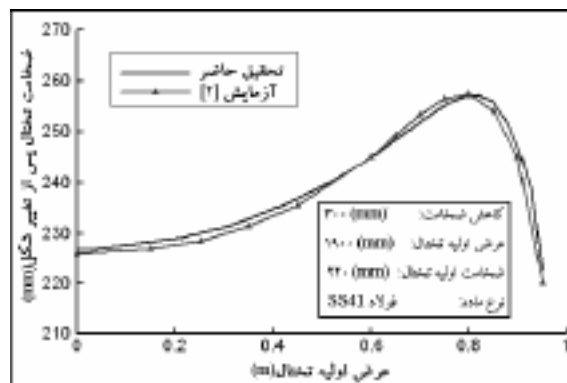
آن را بر روی یک خط نورد گرم مورد مطالعه قرار داد. اولین شبیه سازی اجزای محدود این فرایند توسط مولر [۳] و با فرض رفتار صلب پلاستیک برای ورق به انجام رسید. این فرض حتی در تحقیقی که اخیراً چون [۴] به انجام رسانده نیز استفاده شده است. شیها [۵] نیز خصوصیات فرایند را با صرف نظر کردن از اثرات ویسکوز مدل کرده است. در این مقاله با استفاده از بسته نرم افزاری ABAQUS و روش حل صریح، فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی با فرض رفتار الاستو ویسکوپلاستیک برای ماده تحلیل می‌شوند و میزان عیوب ایجاد شده در دو روش کاهش عرض مذکور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. از جنبه‌های نوی این مقاله می‌توان به استفاده از روش صریح در تحلیل فرایند، در نظر گرفتن اثرات ویسکوز و بررسی جامع پارامترهای دخیل در فرایند سایزینگ پرس اشاره کرد. همچنین اثر این پارامترها پس از اولین مرحله نورد خشن کار



شکل ۵- مقایسه پروفیل ضخامت حاصل از شبیه سازی و آزمایش [۹] برای تختال به عرض ۱۶۰۰ (mm)



شکل ۴- تراکم مش در المان بندی یک چهارم تختال



شکل ۶- مقایسه پروفیل ضخامت حاصل از شبیه سازی و آزمایش [۲] برای تختال به عرض ۱۹۰۰ (mm)

### ۳- بحث پیرامون نتایج

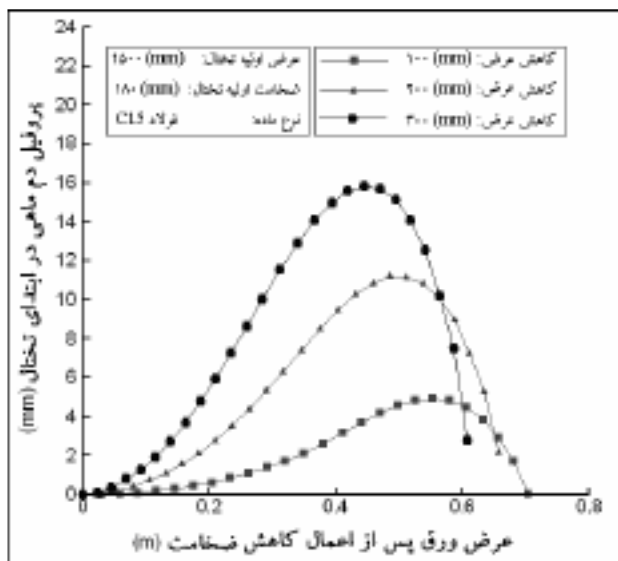
در این بخش پس از اثبات اعتبار تحلیل به منظور ارزیابی کامل روش سائیزینگ پرس اثر پارامترهایی از جمله میزان کاهش عرض، ضخامت اولیه، عرض اولیه تختال، گام پیشروی تختال و سرعت ابزار پرس بر فاکتورهایی از جمله میزان استخوانی شدن و عمق دم ماهی که از فاکتورهای اصلی کاهش عرض اند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- تحقیق اعتبار تحلیل

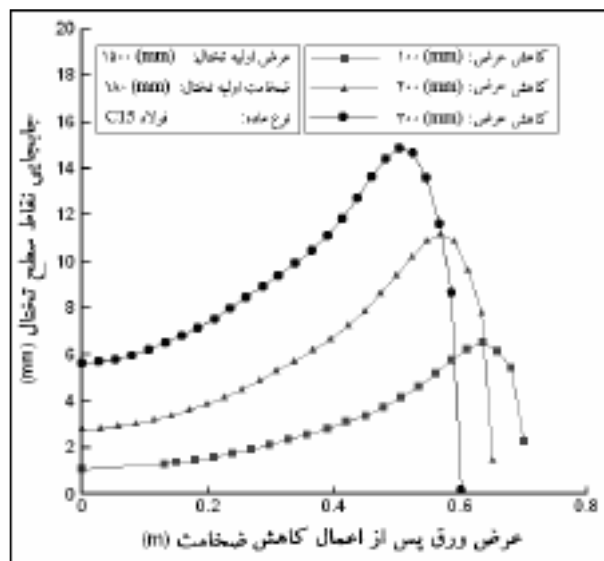
در ابتدا به منظور اثبات اعتبار مدل ارائه شده، نتایج به دست آمده از پروفیل ضخامت تختال در این تحقیق با برخی نتایج مدل تجربی مرجع [۲] مقایسه شده است. شکل‌های (۵) و (۶) پروفیل ضخامت را برای دو عرض ۱۶۰۰ mm و ۱۹۰۰ mm

جسم صلب عددی بدون المان<sup>۷</sup> استفاده شده است [۹]. در مورد نحوه مش بندی به دلیل اینکه قسمت عمده تغییر شکل در لبه‌های تختال ایجاد می‌شود و المانهای این ناحیه تغییر شکل و اعوجاج زیادی را متحمل می‌شوند، مش بندی نایک‌نواخت انتخاب شده که در لبه‌های تختال از تراکم بالاتری برخوردار است، شکل (۴).

همچنین برای مدلسازی اصطکاک بین ابزار و تختال از مدل اصطکاک کولمب<sup>۸</sup> استفاده شده است. به طور متوسط ضریب اصطکاک در فرایندهای نورد گرم در حدود ۰/۲ تا ۰/۵ است [۱۰] که بر اساس پیشنهاد مرجع [۸] در مورد نورد عمودی و مرجع [۴] پیرامون سائیزینگ پرس، مقدار ۰/۳۵ به عنوان ضریب اصطکاک کولمب برای مدلسازی تماس ابزار غلتک نورد و پرس انتخاب شد.



شکل ۸- اثر کاهش عرض بر پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال برای سه کاهش عرض مختلف



شکل ۷- اثر کاهش عرض بر پروفیل ضخامت برای سه کاهش عرض مختلف

کاملاً مشخص است که با افزایش میزان کاهش عرض، عمق دم ماهی و همچنین میزان کمبود عرض در ابتدای تختال افزایش می‌یابد. در واقع افزایش میزان کاهش عرض، باعث افزایش پروفیل برش شده و دور ریز ورق نهایی را بالا می‌برد.

کیفیت لبه تختال نیز از مهمترین پارامترهای ارزیابی روش کاهش عرض است. مناسب نبودن کیفیت و یکنواختی لبه تختال، باعث نایکنواخت شدن عرض ورق تولیدی و احتمالاً دور ریز قسمتی از لبه ورق خواهد شد. متأسفانه در فرایند سایزینگ پرس به دلیل ماهیت پرسینگ مقطع، لبه تختال دنداندار شده و تغییر عرضی در حدود ۳ تا ۱۰ میلی‌متر در طول تختال به وجود می‌آید. نتایج آزمایشات [۴] نیز وجود چنین دندانهایی را تایید می‌کند. شکل (۹) پروفیل عرض به دست آمده برای سه کاهش عرض مختلف را نشان می‌دهد.

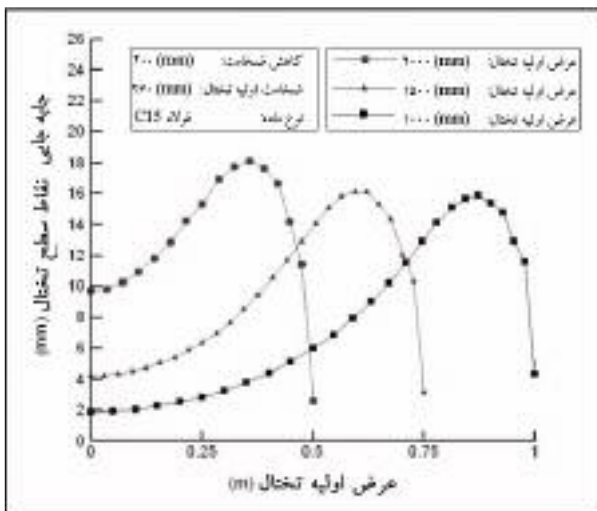
### ۳-۳- اثر عرض اولیه تختال

پروفیل تغییر ضخامت (استخوانی شدن) برای سه عرض ورودی مختلف و با کاهش عرض ۲۰۰ mm در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم تغییر ضخامت (قله استخوانی شدن)، با کم کردن

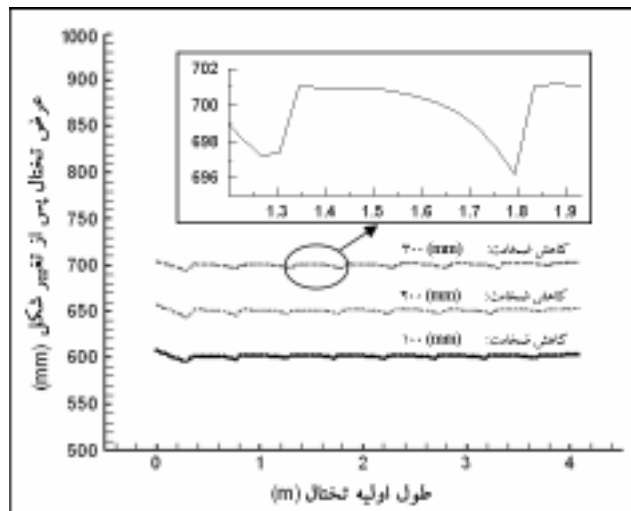
در دو حالت آزمایش تجربی و استفاده از روش المان محدود الاستوویسکوپلاستیک صریح با نرم افزار ABAQUS نشان می‌دهند. شایان ذکر است در این شبیه سازی نیز از معادله ساختاری شیدا [۱۱] برای تعریف رفتار تنش-کرنش ماده استفاده شده است. مقایسه پروفیل‌های ارائه شده حاکی از تطابق خوب نتایج روش المان محدود مورد استفاده با نتایج تجربی است.

### ۳-۲- اثر میزان کاهش عرض

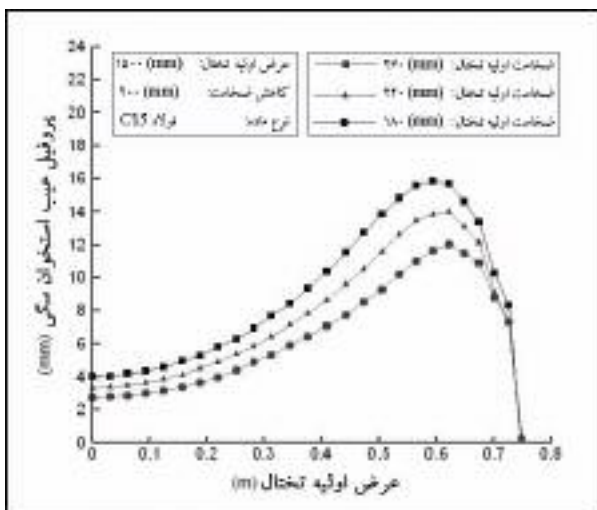
پروفیل تغییر ضخامت تختال برای سه کاهش عرض مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، افزایش میزان استخوانی شدن با میزان کاهش عرض رابطه مستقیم دارد و با بالا بردن میزان کاهش عرض، تغییر ضخامت در نقاط میانی و لبه های تختال نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر در این شکل، افزایش موضعی شدن تغییر شکل در لبه‌های تختال در کاهش عرضهای زیاد است. این مسئله از بررسی اختلاف ارتفاع بین قله و مرکز تختال در کاهشهای مختلف مشخص می‌شود. پارامتر مهم دیگر برای بررسی اثر کاهش عرض، عمق دم ماهی شدن یا فرم دو انتهای تختال است. شکل (۸) پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال را نشان می‌دهد.



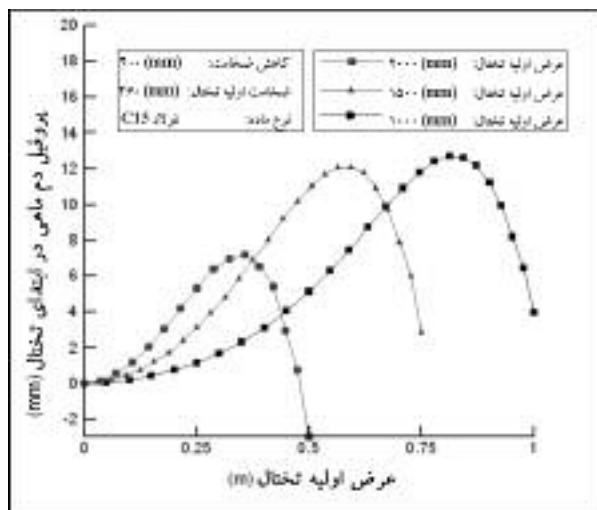
شکل ۱۰- اثر عرض اولیه تختال بر پروفیل تختال



شکل ۹- اثر کاهش عرض بر پروفیل عرض تختال برای سه کاهش عرض مختلف



شکل ۱۲- اثر ضخامت اولیه تختال بر پروفیل عیب استخوان سگ



شکل ۱۱- اثر عرض اولیه تختال بر پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال

عرض تختال ورودی کمتر شده و به فرم زبانه نزدیک می‌شود. لازم به ذکر است فرم زبانه<sup>۹</sup> و دم ماهی دو فرم تغییر شکل در دو سر تختال‌اند که برحسب شرایط تماس اولیه و عرض تختال قابل تغییر به یکدیگرند [۲].

### ۳-۴- اثر ضخامت اولیه تختال

در این بخش از سه ضخامت مختلف ۱۸۰ و ۲۲۰ و ۲۶۰ میلی‌متر برای بررسی اثر ضخامت اولیه استفاده شده است. شکل (۱۲) پروفیل تغییر ضخامت برای سه ضخامت مختلف را

عرض اولیه تختال تا حدی افزایش می‌یابد. نکته مهمی که از نتایج شبیه‌سازی مذکور به‌دست می‌آید آن است که افزایش ضخامت نقاط مرکزی تختال با کم کردن عرض اولیه آن بیشتر شده و همچنین قله استخوانی شدن به‌طور نسبی به مرکز تختال نزدیک می‌شود که در مجموع نمایانگر تغییر ضخامت یکنواخت‌تر در عرضهای کوچکتر است و تا حد زیادی از تغییر شکل موضعی لبه کاسته می‌شود.

در شکل (۱۱) فرم دم ماهی ابتدای تختال نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق دم ماهی با کم کردن



$$\sigma_{C15} = 87.3 \left[ 1.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right)^{0.3995} - 0.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right) \right] \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{0.1379} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{st14} = 84.9 \left[ 1.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right)^{0.4044} - 0.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right) \right] \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{0.1345} \right] \quad (2)$$

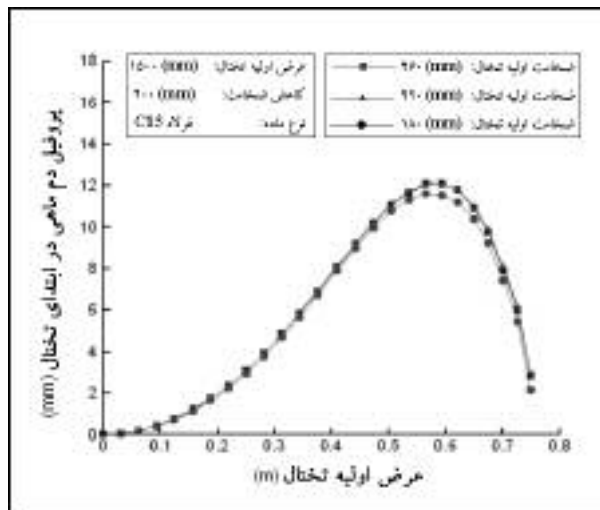
$$\sigma_{X70} = 90.4 \left[ 1.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right)^{0.3645} - 0.3 \left( \frac{\varepsilon}{0.2} \right) \right] \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{0.1623} \right] \quad (3)$$

در معادلات فوق  $\sigma$  تنش سیلان فولاد بر حسب مگاپاسکال،  $\varepsilon$  کرنش و  $\dot{\varepsilon}$  نرخ کرنش بر حسب  $\text{Sec}^{-1}$  است.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب پروفیل استخوانی شدن و دم ماهی ابتدای تختال را نشان می‌دهند. پروفیل‌های مذکور نشان می‌دهند که نوع ماده یا به‌طور خاص میزان کربن فولاد تختال ورودی تاثیر بسیار اندکی در شکل پروفیل ضخامت و همچنین نحوه دم ماهی شدن خواهد داشت ولی به‌طور کلی می‌توان گفت که افزایش کربن در فولاد تختال ورودی باعث افزایش جزیی ارتفاع استخوانی شدن و عمق دم ماهی در دو انتهای تختال می‌شود. نتیجه مشابهی نیز در تحقیقات مولر [۳] به‌دست آمده است.

### ۳-۶- اثر گام پیشروی تختال

میزان پیشروی تختال در هر مرحله پرسینگ را گام پیشروی می‌نامند، این میزان می‌تواند برابر طول افقی ابزار یا کسری از آن باشد. گام پیشروی از جمله پارامترهای بسیار موثر در تغییر شکل تختال حین فرایند سایزینگ پرس است. این پارامتر همچنین از نظر سرعت فرایند و میزان نیروی وارده به پرس تعیین کننده است. برای بررسی این پارامتر مهم از چهار گام مختلف که هر کدام نسبتی از طول بخش افقی ابزار پرس است استفاده شده است. گام‌های مورد استفاده عبارت‌اند از  $L$ ،  $\frac{3L}{4}$ ،  $\frac{L}{4}$  و  $\frac{L}{2}$  که  $L$  طول بخش افقی ابزار است. تختال مورد استفاده دارای عرض  $1500 \text{ mm}$  و ضخامت  $220 \text{ mm}$  بوده و میزان کاهش عرض معادل  $200 \text{ mm}$  است. نتایج حاصل از این شبیه سازی برای فرم تغییر ضخامت تختال در شکل (۱۶) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کوچک



شکل ۱۳- اثر ضخامت اولیه تختال بر پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال

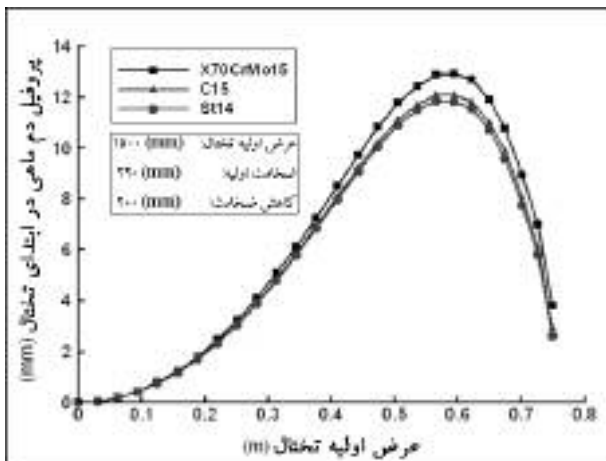
نشان می‌دهد. آنچه که مشخص است افزایش ضخامت اولیه تختال باعث افزایش ارتفاع استخوانی شدن و رشد نسبی تغییر شکل موضعی در لبه می‌شود. افزایش اختلاف ضخامت تختال در لبه و مرکز آن در تختال‌های با ضخامت اولیه بیشتر، بیانگر این مطلب است.

با مراجعه به شکل (۱۳) که پروفیل دم ماهی را در ابتدای تختال نشان می‌دهد مشخص می‌شود که ضخامت تختال ورودی تاثیر چندانی بر شکل پروفیل ابتدا و انتهای تختال ندارد (کمتر از ۱٪).

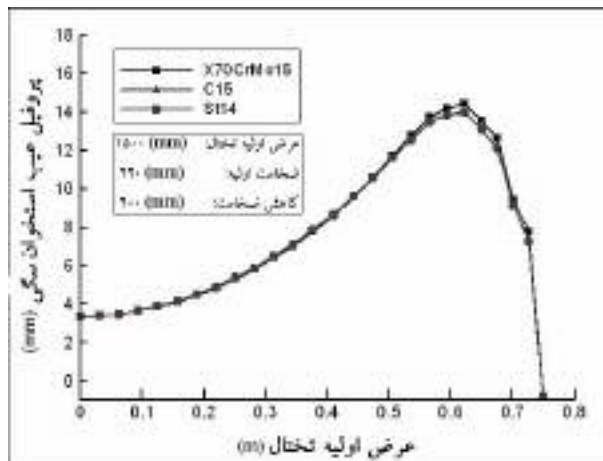
### ۳-۵- اثر ماده تختال (درصد کربن)

در این بخش برای بررسی اثر ماده تختال و در نتیجه معادله ساختاری آن بر پارامترهای تغییر شکل از سه فولاد کم کربن ( $\text{St14-0.08\%C}$ )، کربن متوسط ( $\text{C15-0.15\%C}$ ) و پر کربن ( $\text{X70CrMo15-0.65\%C}$ ) استفاده شد.

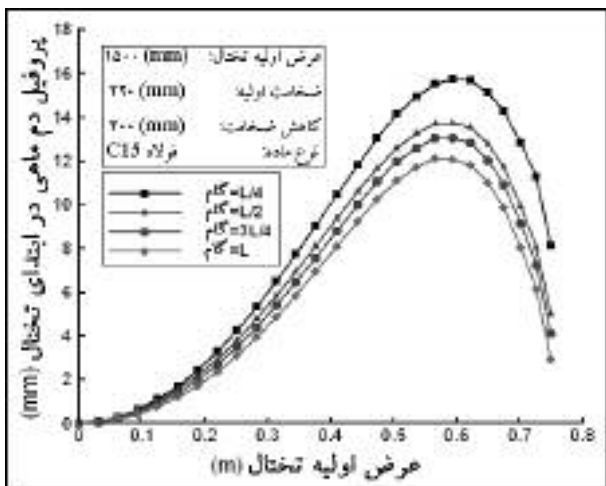
با توجه به دامنه تغییرات کرنش و نرخ کرنش در فرایند مورد بررسی، از معادلات شیدا در بیان معادلات ساختاری مواد استفاده شد [۴]. این معادلات از مشهورترین معادلات ساختاری مورد استفاده در رایانه‌های کنترل فرایند در خطوط نورد گرم هستند [۱۱].



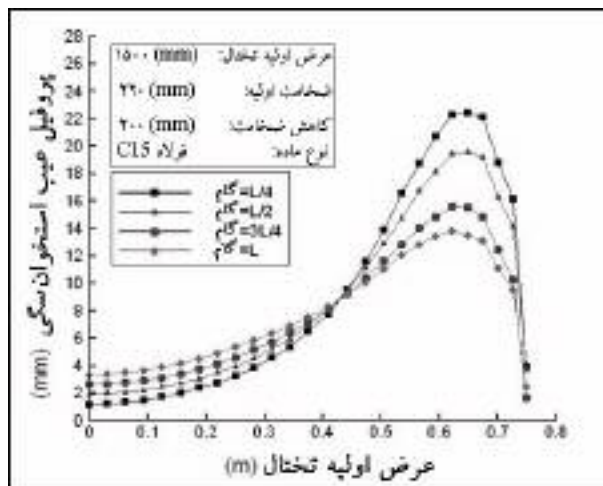
شکل ۱۵- اثر ماده تختال بر پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال



شکل ۱۴- اثر ماده تختال بر پروفیل ضخامت



شکل ۱۷- اثر گام پیشروی تختال بر پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال



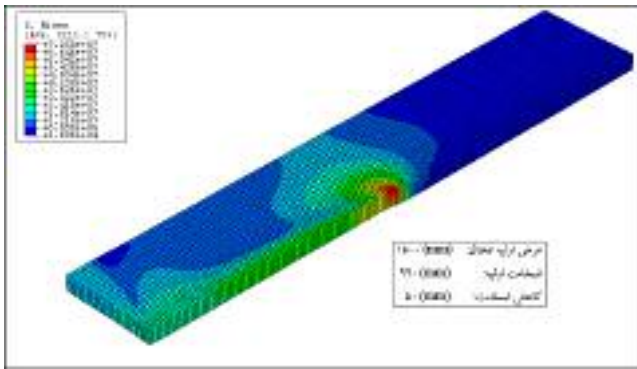
شکل ۱۶- اثر گام پیشروی تختال بر پروفیل ضخامت به ازای چهار گام پیشروی متفاوت

### ۷-۳- مقایسه فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی

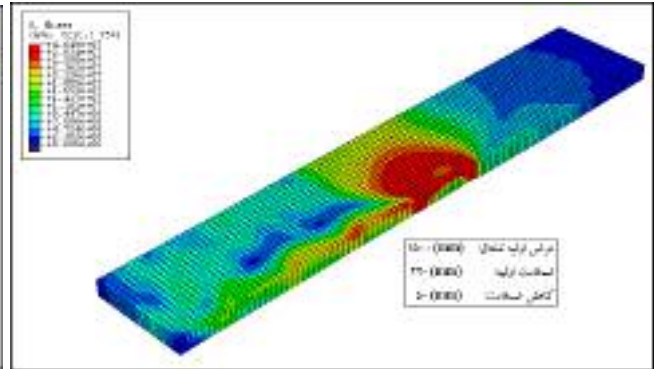
شکل‌های (۱۸) و (۱۹) کانتور تنش میزحین دو فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فرایند سایزینگ پرس تنش میز ایجاد شده در تختال به‌طور نسبی در عرض تختال گسترده شده و از تمرکز چندانی برخوردار نیست و همچنین تغییر تنش از نقاط لبه‌ای که ماکزیمم تنش به چشم می‌خورد تا نقاط مرکزی از حدود  $46 \text{ MPa}$  تا  $21 \text{ MPa}$  تغییر می‌کند. در مقابل، در فرایند نورد عمودی، تنش اعمالی به تختال کاملاً در لبه متمرکز است و به شدت از مقدار آن تا نقاط مرکزی تختال کاسته می‌شود یعنی از  $72 \text{ MPa}$

کردن گام پیشروی، تغییر شکل تختال نایکخواخت و موضعیت‌تر می‌شود. نزدیکتر شدن قله استخوانی شدن به لبه تختال نیز خود دلیل دیگری بر این مدعا است.

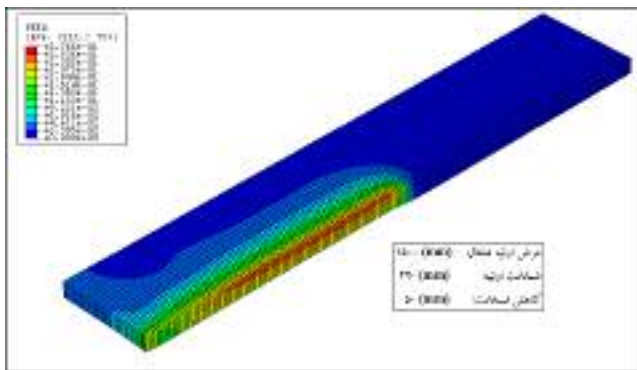
تأثیر گام پیشروی بر پروفیل برش یا دم ماهی در ابتدای تختال در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عمق دم ماهی در ابتدای تختال با کوچک شدن گام پیشروی بیشتر می‌شود. به‌طور کلی به نظر می‌رسد کوچک کردن گام پیشروی جز در کاهش نیروی وارد بر پرس، اثر مطلوبی بر فرایند و به خصوص هندسه تختال پس از کاهش عرض نخواهد داشت.



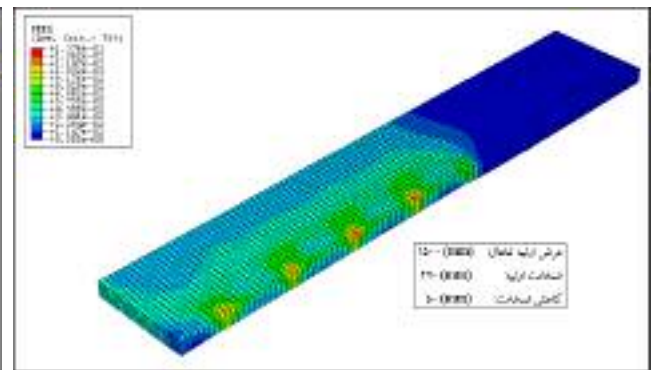
شکل ۱۹- کانتور تنش میزز در فرایند نورد عمودی



شکل ۱۸- کانتور تنش میزز در فرایند سایزینگ پرس



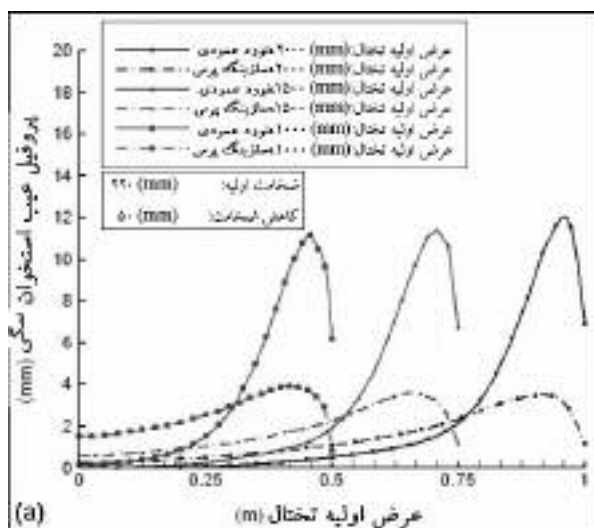
شکل ۲۱- کانتور کرنش پلاستیک در فرایند نورد عمودی



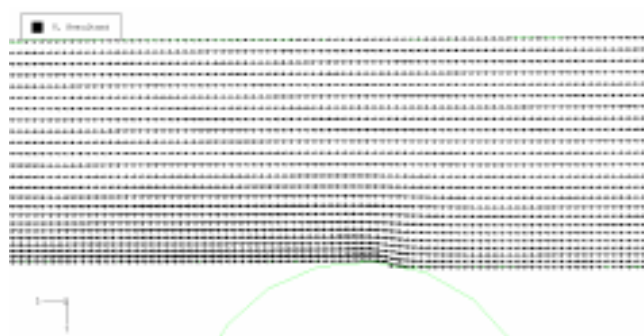
شکل ۲۰- کانتور کرنش پلاستیک در فرایند سایزینگ پرس

افزایش تنشهای تماسی بین قطعه کار و ابزار موثر بوده و باعث کاهش عمر ابزار به دلیل افزایش نرخ سایش می‌شود. برای بررسی بهتر دو فرایند می‌توان از پروفیل‌های استخوانی شدن، دم ماهی و کببورد عرض کمک گرفت. شکل (۲۲) پروفیل استخوانی شدن را برای سه عرض مختلف تختال و در دو فرایند کاهش عرض مذکور نشان می‌دهد. با مقایسه پروفیلها در دو فرایند مشخص می‌شود که قله استخوانی شدن در فرایند سایزینگ پرس بسیار کوتاهتر و در عین حال تغییر ضخامت در مرکز تختال بیشتر از فرایند نورد عمودی است. همچنین در فرایند سایزینگ پرس قله استخوانی شدن در مقایسه با فرایند نورد عمودی به مرکز تختال نزدیکتر است که مجموع این مشاهدات بیانگر تغییر شکل یکنواخت تر در فرایند سایزینگ پرس است. توجه به شکلهای (۲۳) و (۲۴) که جهت جریان فلز در دو فرایند را نشان می‌دهد این نکته را روشنتر می‌سازد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود جهت جریان فلز در فرایند

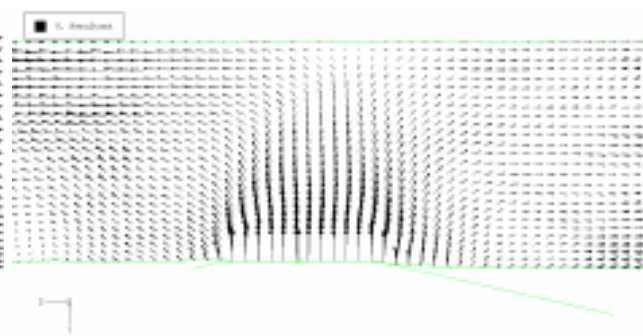
در لبه تا حدود  $14 \text{ MPa}$  در نقاط مرکزی تختال. در این حالت علاوه بر اینکه تنش در لبه متمرکز است، در عین حال ماکزیمم مقدار آن از ماکزیمم مقدار تنش ایجاد شده در سایزینگ پرس بسیار بزرگتر است. دلیل این موضوع را می‌توان با مطالعه کانتورهای کرنش پلاستیک در دو فرایند دریافت. شکلهای (۲۰) و (۲۱) این کانتور را در فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی نشان می‌دهد. کانتور کرنش پلاستیک طبق شکل در فرایند نورد عمودی کاملاً در لبه متمرکز بوده و مقدار آن از حدود  $0.28\%$  در لبه به  $0.15\%$  در مرکز تختال کاهش می‌یابد. در فرایند سایزینگ پرس، تمرکز جز در نقاط بین پرسها مشهود نبوده و در عین حال مقدار آن از حدود  $0.13\%$  در لبه به  $0.28\%$  در مرکز کاهش می‌یابد که بدین ترتیب توزیع گسترده تر کرنش پلاستیک در فرایند سایزینگ پرس نسبت به نورد عمودی اثبات می‌شود. چنین کارسختیهای موضعی هرچند به دلیل داغ بودن فرایند در کیفیت محصول اثر چندانی ندارد اما به شدت در



شکل ۲۲- پروفیل ضخامت در دو فرایند کاهش عرض با عرضهای مختلف تختال



شکل ۲۴- جریان ماده تختال حین فرایند نورد عمودی حرکت ماده جز در اطراف غلتک حرکت صلب انتقالی تختال است



شکل ۲۳- جریان ماده تختال حین فرایند سایزینگ پرس

بدیهی است که با هر بار اعمال نورد افقی به واسطه کاهش ضخامت اعمالی عیب استخوانی شدن تا اندازه‌ای برطرف شود. در این حین عرض تختال در اثر دو پارامتر، یکی تعریض و دیگری برگشت عرض ناشی از حذف عیب استخوان، طبق معادله (۴) افزایش می‌یابد

$$\Delta w_2 = \Delta w_s + \Delta w_b \quad (4)$$

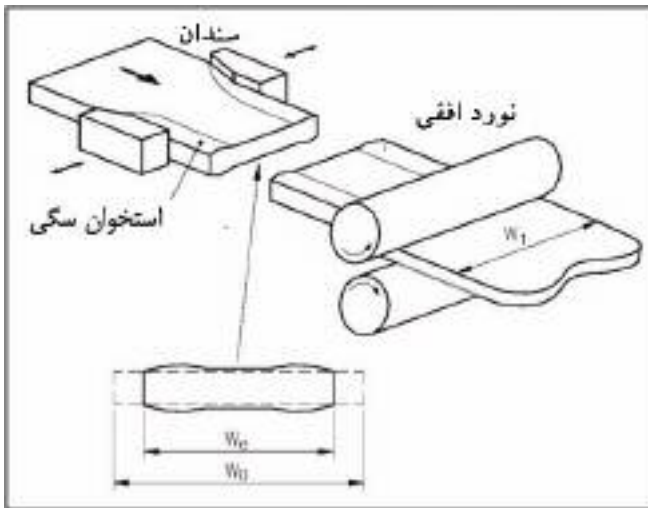
که  $\Delta w_2$  افزایش عرض پس از نورد افقی،  $\Delta w_s$  افزایش عرض در اثر تعریض تختال و  $\Delta w_b$  افزایش عرض در اثر حذف عیب استخوان است. براین اساس، در این قسمت برای اندازه گیری مقدار خالص  $\Delta w_b$  یا برگشت عرض عیب استخوان، از فرایند نورد افقی به گونه‌ای استفاده می‌شود که

پرس سایزینگ نسبت به فرایند نورد عمودی به مرکز متمایل تر است.

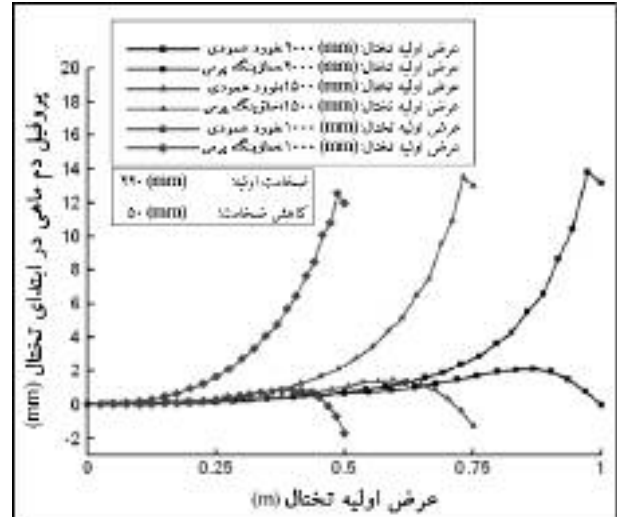
شکل (۲۵) که پروفیل دم ماهی در ابتدای تختال است نشان می‌دهد که این پروفیل نیز در فرایند سایزینگ پرس ملایمتر و عمق آن نیز کمتر از فرایند نورد عمودی است که این موضوع در کاهش دور ریز ورق تولیدی بسیار موثر است.

### ۳-۸- سایزینگ پرس و نورد افقی

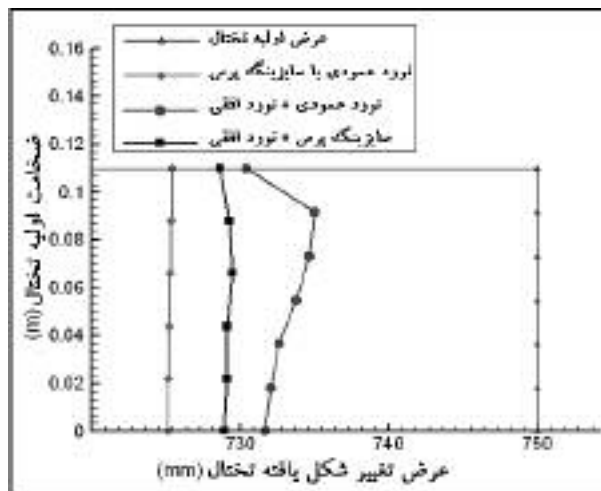
دو پارامتر دیگری که در فرایند کاهش عرض از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند مقدار برگشت عرض و همچنین باقی مانده میزان عیب استخوانی شدن پس از اعمال نورد افقی است.



شکل ۲۶- شماتیک فرایند سایزینگ پرس و نورد افقی [۴]



شکل ۲۵- پروفیل دم ماهی در دو فرایند کاهش عرض با عرضهای مختلف تخرال



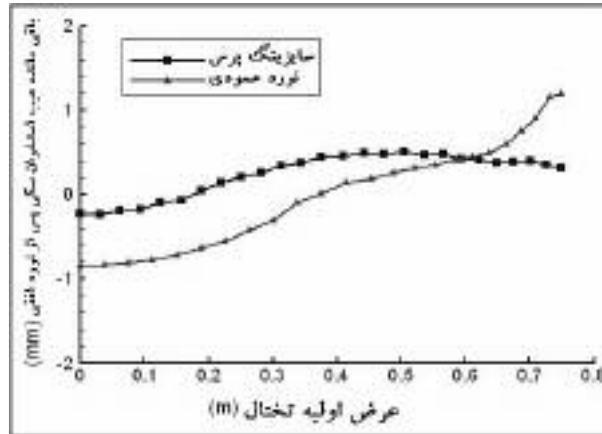
شکل ۲۷- مقایسه مقدار برگشت عرض پس از اولین نورد افقی در دو فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی

ضخامت تخرال را به ضخامت اولیه آن قبل از فرایند کاهش عرض برساند و در واقع کاهش ضخامت بیشتری که باعث به وجود آمدن  $\Delta w_s$  شود به تخرال اعمال نمی شود. مقدار  $\Delta w_b$  یا برگشت عرض تخرال پارامتری است که میزان بازده فرایند کاهش عرض را مشخص می سازد. معادله (۵) میزان بازده فرایند کاهش عرض را برحسب عرض تخرال در مراحل مختلف نشان می دهد [۴].

ضخامت تخرال را به ضخامت اولیه آن قبل از فرایند کاهش عرض برساند و در واقع کاهش ضخامت بیشتری که باعث به وجود آمدن  $\Delta w_s$  شود به تخرال اعمال نمی شود. مقدار  $\Delta w_b$  یا برگشت عرض تخرال پارامتری است که میزان بازده فرایند کاهش عرض را مشخص می سازد. معادله (۵) میزان بازده فرایند کاهش عرض را برحسب عرض تخرال در مراحل مختلف نشان می دهد [۴].

ضخامت تخرال را به ضخامت اولیه آن قبل از فرایند کاهش عرض برساند و در واقع کاهش ضخامت بیشتری که باعث به وجود آمدن  $\Delta w_s$  شود به تخرال اعمال نمی شود. مقدار  $\Delta w_b$  یا برگشت عرض تخرال پارامتری است که میزان بازده فرایند کاهش عرض را مشخص می سازد. معادله (۵) میزان بازده فرایند کاهش عرض را برحسب عرض تخرال در مراحل مختلف نشان می دهد [۴].

$$\eta = \frac{w_0 - w_1}{w_0 - w_e} \quad (5)$$



شکل ۲۸- مقایسه پروفیل ضخامت تختال پس از اولین نورد افقی در دو فرایند سایزینگ پرس و نورد عمودی

میزان عیوب ایجاد شده در تختال در اثر کاهش عرض با میزان کاهش عرض رابطه مستقیم دارد. تغییر شکل تختال برای تختالهای با عرض کمتر نتایج مطلوب تری داشته و تغییر شکل یکنواخت تر است. افزایش ضخامت اولیه تختال جز در تشدید تغییر شکل موضعی در لبه تختال تغییر محسوسی در پروفیل‌های دم ماهی در ابتدا و انتهای تختال ایجاد نمی‌کند. در نمونه‌های مورد بررسی اثر میزان کربن فولاد استفاده شده در میزان عیوب ایجاد شده ناچیز است. کوچک کردن گام پیشروی تختال جز کاهش نیروی پرس، تاثیر مطلوبی بر میزان عیوب ایجاد شده در تختال نخواهد داشت. از مقایسه نورد عمودی با کاهش عرض به روش سایزینگ پرس نتایج زیر حاصل می‌شود.

به طور کلی نوع تغییر شکل در فرایند سایزینگ پرس نسبت به نورد عمودی یکنواخت تر و عیوب ایجاد شده در تختال از شدت کمتری برخوردار است. مهمترین عیب استفاده از سایزینگ پرس ظهور هندسه دندان‌های شکل در لبه تختال به میزان ۳ تا ۱۰ mm در اثر ماهیت فرایند است. عملاً با اضافه کردن نوردهای عمودی با نسبت کاهش عرض بسیار اندک (که عموماً در ایستگاههای خشن کار نیز استفاده می‌شود)، این عیب به راحتی برطرف می‌شود ضمن آنکه حتی

افزایش ضخامت در لبه تختال در فرایند نورد عمودی است. همچنین فرم لبه تختال در فرایند پرسینگ/نورد افقی بسیار یکنواخت تر از فرایند نورد عمودی/افقی است که این به دلیل ارتفاع کمتر قله استخوان و در نتیجه برگشت عرض کمتر و یکنواخت تر در فرایند سایزینگ پرس است.

با به دست آمدن میزان برگشت عرض تختال در نورد افقی، می‌توان بازده دو فرایند کاهش عرض را از طریق معادله (۵) محاسبه کرد. با توجه به مقدار برگشت عرض ۹ mm در فرایند پرس سایزینگ، بازده برابر ۸۲٪ خواهد بود در حالی که در نورد عمودی با برگشت عرض ۲۰ mm، بازده به ۶۰٪ نزول خواهد کرد. شایان ذکر است کاهش بازده از مهمترین آثار منفی تغییر شکل نایکنواخت در فرایند کاهش عرض است.

شکل (۲۸) نمایانگر باقی مانده عیب استخوانی شدن پس از نورد افقی است. کاملاً واضح است که تغییرات ضخامت در فرایند سایزینگ پرس در عرض تختال بسیار ناچیز و در حدود ۰/۸ mm است در صورتی که این مقدار در فرایند نورد عمودی در حدود ۲ mm است که این اختلاف در کیفیت ورق تولیدی و همچنین وزن مخصوص کویل نقش مهمی دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

از شبیه سازی المان محدود دو روش کاهش عرض نتایج زیر در رابطه با فرایند سایزینگ پرس حاصل می‌شود:

عرض کمتر در فرایند نورد افقی، بیشتر از فرایند نورد عمودی است.

اگر چنین ابزاری نیز استفاده نشود انجام نورد های افقی متعدد تا حصول ضخامت نهایی ورق عیب مذکور را کاهش می دهد. بازده کاهش عرض فرایند سایزینگ پرس در اثر بازگشت

## واژه نامه

- |                     |                 |                     |
|---------------------|-----------------|---------------------|
| 1. dog bone profile | 4. edger        | 7. analytical rigid |
| 2. fishtails        | 5. sizing press | 8. coulomb friction |
| 3. width necking    | 6. crop shear   | 9. tongue           |

## مراجع

- Grafe, H., and Rohde, W., "Flexible Hot Strip Production by Use of a Slab Sizing Press," *SMS Technical Rolling Mills*, W4/2233, 1993.
- Hira, T., Isobe, K., and Abe, H., "Deformation of Slab Under Heavy Reduction of Width by Sizing Press," *Kawasaki Steel Technical Report*, No. 21, pp. 188-194, 1989.
- Muller, H., and Rohde, W., "Behaviour of Slabs Under Deformation in a Sizing Press With Large Width Reductions," *SMS Technical Report Rolling Mills*, Vol. 15, No. 5, pp. 139-148, 1992.
- Chun, M., and Cheong, J., "A Study on Deformation of Slab Under Heavy Width Reduction by Using Finite Element Analysis in Hot Strip Mill," *J. of Materials Engineering and Performance*, Vol. 14, No. 3, pp. 408-412, 2005.
- Sihai, J., and Liu, Z., "FEM Simulation of Slab Deformation Characteristics in Sizing Press Process," *J. of Iron&Steel*, Vol. 35, No. 12, 2000.
- Shangwu, X., and Xianghua, L., Wang Guodong, "A Three-Dimensional Finite Element Simulation of the Vertical-Horizontal Rolling Process in the Width Reduction of Slab," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 146-151, 2000.
- Shangwu, X., and Xianghua, L., "Three-Dimensional Thermo-Mechanical Finite Element Simulation of the Vertical-Horizontal Rolling Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 89-97, 2001.
- Shangwu, X., Rodrigues, J.M.C, and Martins P.A.F, "Three-Dimensional Modelling of the Vertical-Horizontal Rolling Process," *J. of Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 39, pp. 1023-1037, 2003.
- ABAQUS (V6.4), Help, Getting Started with ABAQUS /Explicit, Finite Elements.
۱۰. مشکسار، م.، "اصول مهندسی نورد"، ویرایش اول، ص ۲۲۲-۲۲۵، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۸۱
- Shida, S., "Empirical Formula of Flow Stress of Carbon Steels - Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature," *2<sup>nd</sup> Report, J. of JSTP*, Vol. 10, pp. 610-617, 1969.