

## بررسی نرخ سایش غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود

مهدی سلمانی تهرانی<sup>1\*</sup> رضا خداپنده شهرکی<sup>2</sup> حسام ولیدی<sup>3</sup>

\* نویسنده مسئول: tehrani-m@eng.sku.ac.ir

### چکیده

این مقاله به بررسی اثرات سایش غلتکها و شبیه‌سازی این پدیده در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی اختصاص دارد. برای شبیه‌سازی پدیده سایش و بررسی نرخ سایش غلتکها از نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. قطعه تولیدی مورد نظر در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد دارای پروفیل مربعی است. پس از انجام شبیه‌سازی با توجه به مدل سه‌بعدی ایجاد شده، ناحیه‌های مستعد سایش روی غلتک‌ها بررسی می‌شوند. همچنین اثر تغییر پارامترهای مهم مانند جنس، ضریب اصطکاک و ضخامت ورق بر روی سایش غلتک‌ها بررسی شده است. در انتها به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مطالعات تجربی موجود، مقایسه شده است.

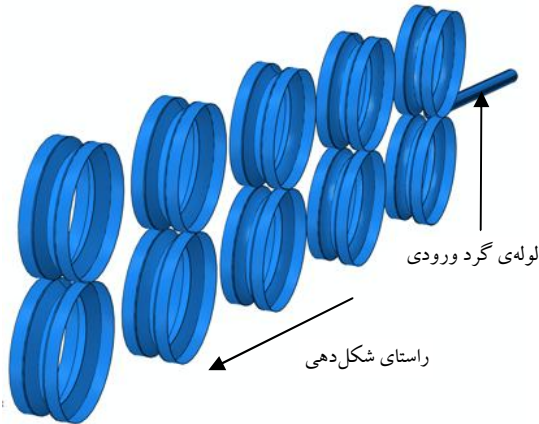
واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، مقاطع غیرگرد، سایش غلتک، شبیه‌سازی اجزای محدود.

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد خمینی شهر.

3- کارشناس ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس.

## 1- مقدمه



شکل (1) نمایش مدل اجزای محدود فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، با چیدمان غلتک‌های زاویه‌دار.

سایش خراشان نتیجه خراشیده شدن<sup>7</sup> و بریده شدن در مقیاس میکروسکوپی یک سطح، به دلیل وجود برآمدگی‌هایی بر روی سطح جسم دیگر یا وجود ذرات سخت است [4]. با توجه به اینکه عوامل متعددی بر پدیده سایش اثرگذارند، روابط زیادی برای بیان پدیده سایش ارائه شده است. یکی از روابط معمول که مورد استفاده طراحان قرار می‌گیرد رابطه آرچارد<sup>8</sup> است [5].

$$Q = K \frac{WV}{H} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $Q$  نرخ سایش خطی (حجم بر واحد زمان، بر واحد سطح)،  $W$  فشار تماسی (نیرو بر واحد سطح)،  $V$  سرعت لغزشی،  $H$  سختی ماده نرم‌تر (نیرو بر واحد سطح) و همچنین  $K$  ضریب سایش را نشان می‌دهد. سایش تابع خطی از فشار تماسی و سرعت لغزشی است. ضریب بی‌بعد سایش  $K$  با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی مواد مختلف، به‌طور تقریبی به‌دست می‌آید [5].

سایش در مراحل اولیه، تخریب سطحی است. ولی در مراحل بعدی می‌تواند موجب پیدایش اصطکاک، سر و صدا، گرمای ناخواسته و تغییرات ابعادی در قطعات شود. برای مثال در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی، سایش علاوه بر تغییر هندسه پروفیل غلتک باعث ایجاد عیوبی در محصول نهایی و همچنین مشکلاتی در حین تولید می‌شود.

فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد<sup>1</sup> روشی متداول برای تولید لوله با مقاطع غیرگرد است. در این فرایند که معمولاً در انتهای خط تولید لوله قرار می‌گیرد، لوله به‌واسطه اصطکاک موجود بین غلتک و لوله، به درون غلتک‌ها کشیده می‌شود. با عبور لوله از بین غلتک‌ها به تدریج شکل پروفیل مورد نظر را می‌گیرد. شکل (1) فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد با چیدمان غلتک‌های زاویه‌دار را برای تولید پروفیل مربعی نشان می‌دهد [1]. غلتک‌های مورد استفاده در این فرایند از نوع یک‌پارچه در نظر گرفته شده‌اند. در عمل بعد از گذشت مدت زمانی هندسه پروفیل سطح غلتک‌ها دست‌خوش تغییراتی می‌شود. دلیل اصلی تغییر هندسه پروفیل غلتک را می‌توان بروز پدیده سایش بر روی غلتک‌ها دانست [2].

سایش<sup>2</sup>، کاهش تصاعدی ماده از سطح یکی از دو جسم در تماس با یکدیگر است، که در اثر حرکت نسبی بین دو جسم در تماس با یکدیگر به‌وجود می‌آید. سایش موجب افزایش افت انرژی، مصرف روغن و نرخ تعویض قطعات می‌شود که این امر سبب کاهش شدید بازده می‌شود. در استاندارد DIN50320، چهار مکانیزم برای سایش دسته‌بندی شده، که عبارت‌اند از: سایش شیمیایی<sup>3</sup>، سایش خستگی سطح<sup>4</sup>، سایش چسبان<sup>5</sup>، سایش خراشان<sup>6</sup> [3]. معمولاً در بیشتر فرایندهای شکل‌دهی فلزات که حرکت نسبی بین ورق و ابزارهای شکل‌دهی وجود دارد، سایش چسبنده و خراشان، بیشترین سهم را در پدیده سایش ایفا می‌کنند. در سایش چسبان، جوش سرد بین دو سطح درگیر رخ می‌دهد. اگر مقاومت پیوند جوش سرد نسبت به پیوند اتمی سطوح بالاتر باشد، پدیده سایش چسبان در اثر جدا شدن ذرات سطوح درگیر رخ می‌دهد.

1- Reshaping

2- Wear

3- Tribochemical Wear

4- Surface Fatigue

5- Adhesive Wear

6- Abrasive Wear

7- Scratching

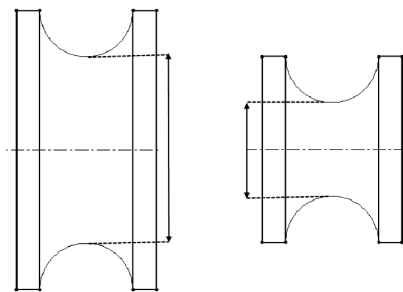
8- Archard

جدول (1) مشخصات هندسی لوله مورد نیاز و محصول.

ابعاد محصول (mm)	قطر لوله اولیه (mm)	ضخامت (mm)	شعاع گوشه محصول (mm)
20×20	25/4	2	3

جدول (2) مشخصات جنس لوله مورد نیاز فرایند.

جنس	E (GPa)	$\nu$	تسلیم اولیه $\sigma_{y0}$ (MPa)	رابطه تنش کرنش
St37	204	0/29	278	$\sigma=671/4(0/0394+\epsilon P)^{0/272}$



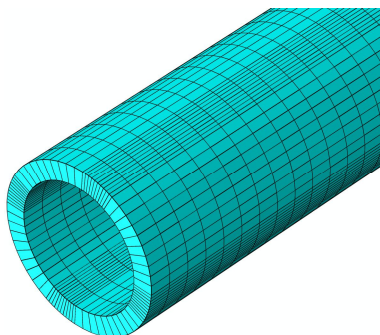
شکل (2) کاهش قطر گلوبی غلتک یکپارچه بر اثر اصلاح ساییدگی.

تجربه شبیه‌سازی‌ها در این مقاله نشان از موفقیت المان پوسته پیوسته SC8R در شبیه‌سازی تغییر شکل لوله در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد دارد. به‌منظور انتخاب الگوی صحیح شبکه‌بندی، از الگوی تغییر شکل لوله برای شبکه‌بندی عرضی لوله استفاده می‌شود. بیشترین تغییر شکل خمشی عرضی در ناحیه خم رخ می‌دهد. بر همین اساس بیشترین تمرکز المان‌ها در جهت عرضی در ناحیه خم و در سایر نواحی تمرکز المان‌ها کمتر است. همچنین در جهت طولی، مقاطع عرضی لوله شرایط تغییر شکل مشابه‌ای را تجربه می‌کنند. بنابراین شبکه‌بندی در جهت طولی باید یکنواخت باشد. شکل (3) شبکه‌بندی لوله را نشان می‌دهد.

در این تحلیل به‌منظور بررسی سایش غلتک‌ها، لایه‌ای از سطح غلتک که در تماس با لوله است، به‌صورت تغییر شکل‌پذیر تعریف می‌شود و از خواص مواد الاستیک پیروی می‌کند. جدول (3) جنس و مشخصات غلتک‌ها را نشان می‌دهد [7].

جدول (3) جنس و مشخصات قسمت بیرونی غلتک‌ها.

جنس	E (GPa)	$\nu$	ضخامت (mm)	چگالی ( $kg/m^3$ )
SBK	253	0/3	2	7800



شکل (3) نمایش شبکه‌بندی لوله در مدل اجزای محدود.

به‌منظور انجام عملیات تصحیح پروفیل به‌علت استفاده از غلتک‌های یک‌تکه، تراشکاری سبب کاهش قطر گلوبی<sup>1</sup> غلتک و در نتیجه موجب مشکلاتی مانند تنظیم دوباره محل فرارگیری غلتک‌ها و تنظیم سرعت خطی غلتک‌ها در خط تولید می‌شود. بر طرف نمودن این مشکلات پرهزینه و زمان‌بر است. در شکل (2) نمونه‌ای از غلتک یکپارچه را پیش و پس از تصحیح پروفیل نشان داده شده است [6].

اهمیت کار انجام شده در این تحقیق، به‌لحاظ تکمیل تحقیقات قبلی در قسمت شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد به‌منظور بررسی پدیده سایش روی غلتک‌های این فرایند است که این موضوع سبب نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات قبلی شده است.

## 2- مدل‌سازی اجزای محدود

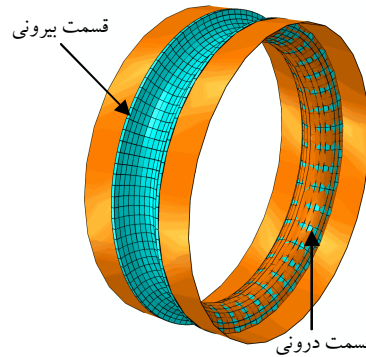
شناخت دقیق فرایند در شبیه‌سازی اجزای محدود از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. فرضیات استفاده شده در شبیه‌سازی به‌طور خلاصه در زیر بیان شده است.

- 1- رفتار ورق مورد استفاده در شبیه‌سازی فرایند الاستیک-پلاستیک است و کارسختی، همسانگرد فرض شده است.
  - 2- از اثرات حرارتی صرف‌نظر شده است.
  - 3- قطر و ضخامت لوله مورد استفاده در طول شبیه‌سازی فرایند ثابت است.
  - 4- ضریب اصطکاک در طول شبیه‌سازی فرایند ثابت است.
- مشخصات هندسی لوله مورد نیاز و محصول فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد در جدول (1) نشان داده شده است. جدول (2) مشخصات جنس لوله مورد نیاز این فرایند را نشان می‌دهد.

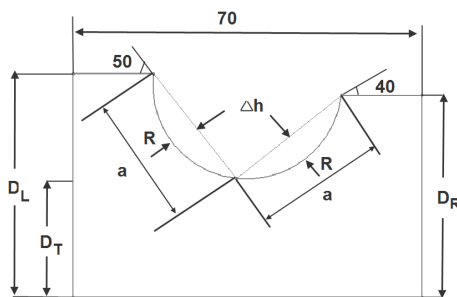
شکل داده شود. شکل (6) محصول فرایند تغییر شکل مجدد غلتکی بعد از تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول (4) مشخصات هندسی غلتک‌های زاویه‌دار در هر ایستگاه.

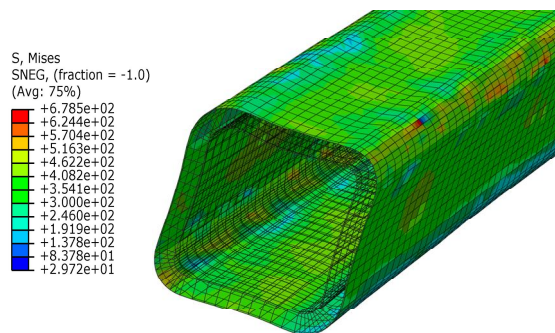
ایستگاه	$R$ (mm)	$a$ (mm)	$\Delta h$ (mm)	$D_T$ (mm)	$D_L$ (mm)	$D_R$ (mm)
1	16/14	18/75	3	164	192/7	188/1
2	21/71	19/25	2/25	164/5	193/98	189/24
3	33/09	19/6	1/5	165	195/1	190/18
4	65/7	19/8	0/75	165/5	195/82	190/94
5	-	20	0	166	196/64	191/72



شکل (4) چگونگی قرارگیری و اتصال دو قسمت صلب و تغییر شکل پذیر غلتک، در مدل اجزای محدود.



شکل (5) مشخصات هندسی غلتک‌های زاویه‌دار.



شکل (6) محصول فرایند تغییر شکل مجدد غلتکی بعد از تحلیل.

### 3- سایش غلتک‌ها

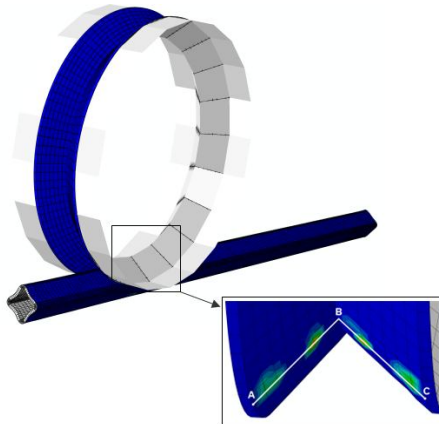
با توجه به شکل (7) به علت تفاوت فاصله نقاط روی سطح پروفیل غلتک از محور دوران، سرعت خطی محیطی نقاط روی پروفیل غلتک‌ها متفاوت است. از طرفی محصول با سرعت خطی ثابت پیش می‌رود. بنابراین اختلاف سرعت، سبب ایجاد لغزش در ناحیه تماس می‌شود [6]. بر اساس رابطه آرچارد، مقدار سختی  $H$ ، و ضریب سایش  $K$ ، برای تماس مشخص است. بر این اساس نرخ سایش اصلاح شده غلتک‌ها یا  $Q'$ ، به صورت حاصل ضرب فشار تماسی و سرعت لغزشی، تعریف و در ادامه به جای  $Q$  کمیت  $Q'$  بررسی می‌شود.

به منظور شبکه‌بندی قسمت بیرونی غلتک‌ها، از المان سه بعدی آجری 8 گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته، C3D8R، استفاده شده است. قابل توجه است که در قسمت بیرونی غلتک‌ها در همه مقاطع و در جهت محیطی و عرضی، تغییر شکل مشابهی رخ می‌دهد. بنابراین شبکه‌بندی در جهت محیطی و عرضی باید یکنواخت باشد. برای مدل کردن قسمت درونی غلتک‌ها، به علت تغییر شکل ناچیز این قسمت درونی غلتک‌ها، مدل جسم صلب تحلیلی استفاده شده است. برای اتصال این دو قسمت غلتک‌ها، از قید Tie استفاده شده است. شکل (4) چگونگی قرارگیری و اتصال این دو قسمت غلتک را نشان می‌دهد [8].

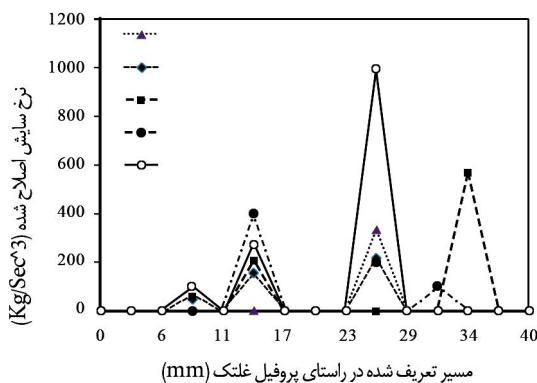
برای شکل دهی صحیح محصول با پروفیل مربعی، تعداد ایستگاه‌ها و هندسه پروفیل غلتک در هر ایستگاه دارای اهمیت است. در غلتک‌های زاویه‌دار، هندسه پروفیل غلتک از رابطه تئوری خاصی پیروی نمی‌کند. برای حل این مشکل در شبیه‌سازی، از هندسه پروفیل غلتک‌های زاویه‌داری که به طور تجربی در صنعت به دست می‌آیند، استفاده شده است. در جدول (4) مشخصات هندسی غلتک‌های زاویه‌دار ارائه شده است. این مشخصات با توجه به شکل (5) ارائه شده است.

در جدول (4) شعاع غلتک در هر ایستگاه،  $\Delta h$  مقدار کاهش در ارتفاع برای هر مرحله،  $D_T$  قطر گلوبی،  $D_L$  قطر سمت چپ،  $D_R$  قطر سمت راست و  $a$  طول ضلع مربع در هر ایستگاه است. در مدل‌سازی پس از اعمال شرایط اولیه و مرزی، مدل تحلیل می‌شود. در بررسی اثرات شکل دهی روی غلتک‌ها لازم است محصول مورد نظر به شکل صحیح

سایش اصلاح شده پرداخته می شود. تأثیر این پارامترها در طول مسیر تعریف شده در محل تماس لوله با غلتک در ایستگاه پنجم، بررسی شده است. شکل (9) این مسیر را نشان می دهد. مشخصات جنس لوله های مختلف در جدول (5) آمده است تا نرخ سایش در اثر تغییر جنس مطالعه شود. در این جدول،  $\epsilon$  کرنش کل و  $\epsilon^p$  کرنش پلاستیک است. شکل (10) اثر تغییرات جنس لوله بر نرخ سایش اصلاح شده غلتک ها را نشان می دهد. با توجه به شکل (10)، در تولید محصول با جنس های مختلف، با افزایش تنش تسلیم لوله، نرخ سایش غلتک ها در طول مسیر مشخص شده روی پروفیل غلتک در محل تماس لوله و غلتک، افزایش می یابد.

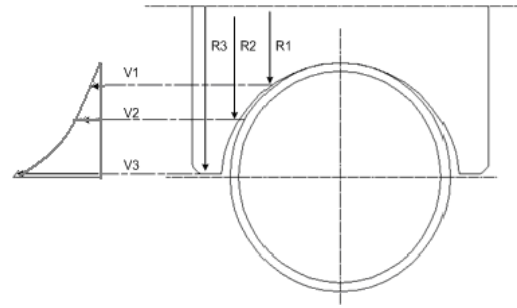


شکل (9) مسیر "ABC" روی غلتک بالایی ایستگاه پنجم در ناحیه تماس با لوله.

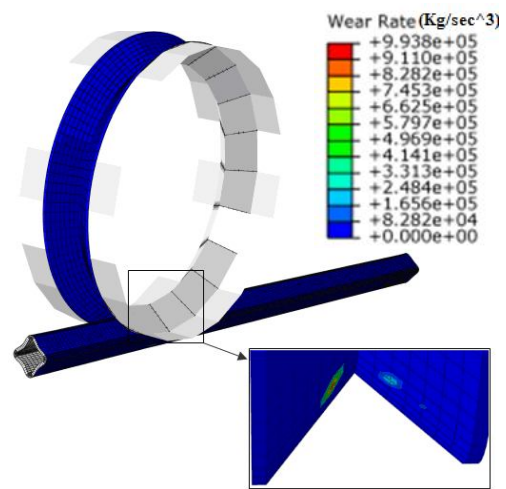


شکل (10) اثر تغییرات جنس لوله اولیه بر نرخ سایش اصلاح شده، روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک.

$$Q' = WV \quad (2)$$



شکل (7) اختلاف سرعت محیطی روی محصول.



شکل (8) نمودار نرخ سایش اصلاح شده، در ناحیه تماس با لوله.

به عبارت دیگر برای شبیه سازی نرخ سایش غلتک ها، در این مقاله از حاصل ضرب فشار تماسی در سرعت لغزشی به عنوان نرخ سایش اصلاح شده استفاده شده است. در این مقاله فشار تماسی بر حسب (MPa)، سرعت لغزش گره ای در ناحیه تماس بر حسب (m/s) و در نتیجه نرخ سایش اصلاح شده غلتک ها بر حسب  $(kg/s^3)$  در نمودارها نشان داده شده است. با توجه به تعریف  $Q'$  بزرگی اعداد روی محور عمودی نمودارها، به معنی بزرگی نرخ سایش حقیقی نیست و جنبه مقایسه ای دارد. نرخ سایش اصلاح شده روی سطح غلتک بالایی ایستگاه پنجم، بعد از عبور لوله از ایستگاه پنجم، بر اساس سرعت لغزشی و فشار تماسی در محل تماس لوله و غلتک، در شکل (8) نشان داده شده است. به منظور یافتن تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نرخ سایش به بررسی اثر تغییرات جنس، ضریب اصطکاک و ضخامت بر روی نرخ

بر روی نرخ سایش اصلاح شده در طول پروفیل غلتک بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در موقعیت‌های مشابه روی پروفیل غلتک به ازای  $t = 3$  بیشترین نرخ سایش و به ازای  $t = 1$  کمترین نرخ سایش مشاهده می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت لوله اولیه، نرخ سایش در طول پروفیل غلتک افزایش می‌یابد.

#### 4- بررسی نتایج شبیه‌سازی

یکی از اهداف مهم تولیدکنندگان لوله و پروفیل، کاهش هزینه‌های تولید و رسیدن به حداکثر سود است. برای تحقق این امر انتخاب صحیح ابزار قبل از تولید محصول از اهمیت بالایی برخوردار است. افزایش بازده ماشین و عمر غلتک‌ها و کاهش زمان تعمیر و نگهداری ماشین باعث افزایش سود می‌شود. پدیده سایش تأثیر قابل توجهی بر روی عمر غلتک‌ها، زمان تامین و نگهداری و همچنین بازده ماشین شکل‌دهی دارد. پیش‌بینی مناطق مستعد سایش در این فرایند، طراح غلتک را قادر به طراحی مناسب می‌کند و همچنین می‌توان تدابیری برای به تعویق انداختن این پدیده پیشنهاد کرد.

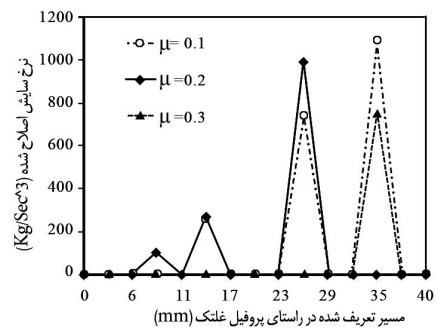
بر طبق قانون آرچارد، فشار تماسی و سرعت لغزشی دو پارامتر مؤثر بر نرخ سایش هستند. به منظور مقایسه نرخ سایش در ایستگاه‌های مختلف، فشار تماسی و سرعت لغزشی ایستگاه‌های مختلف در طول مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک در محل تماس غلتک و لوله مقایسه می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (13) مشاهده می‌شود، با عبور لوله از ایستگاه‌های متوالی برای شکل‌دهی صحیح محصول توسط غلتک‌های زاویه‌دار، فشار تماسی در ایستگاه‌های متوالی افزایش می‌یابد. این موضوع سبب می‌شود که در ایستگاه‌های انتهایی، ماکزیمم فشار تماسی روی غلتک به طرف قسمت گلویی غلتک افزایش یابد.

با توجه به شکل (7) سرعت محیطی روی سطح پروفیل غلتک متغیر است. بنابراین لغزش در تماس بین غلتک و محصول در نواحی دارای بیشترین اختلاف سرعت محیطی رخ می‌دهد. با توجه به شکل (14)، احتمال وقوع لغزش در ایستگاه ابتدایی ناچیز است. در صورتی که در ایستگاه‌های انتهایی نرخ لغزش روی پروفیل غلتک، به‌طور مشهودی افزایش می‌یابد.

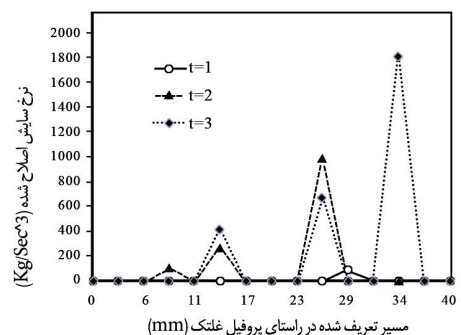
جدول (5) مشخصات جنس‌های مختلف لوله.

جنس	رابطه تنش کرنش	$E$ (GPa)	تسلیم اولیه $\sigma_y$ (MPa)
ماده (1)	$\sigma = 811/9(0/0010 + \epsilon^p)^{0/208}$	184	195/4
ماده (2)	$\sigma = 865(0/0007 + \epsilon^p)^{0/21}$	259	190
ماده (3)	$\sigma = 482(0/0394 + \epsilon^p)^{0/272}$	204	200
ماده (4)	$\sigma = 361/5(0/0394 + \epsilon^p)^{0/272}$	204	150
ماده اصلی	$\sigma = 671/4(0/0394 + \epsilon^p)^{0/272}$	204	278/6

در شکل (11) اثر تغییرات ضریب اصطکاک (?) بر نرخ سایش اصلاح‌شده در طول پروفیل غلتک نشان داده شده است. همان‌طور که شکل (11) نشان می‌دهد با کاهش ضریب اصطکاک نرخ سایش غلتک‌ها در طول مسیر مشخص شده در راستای پروفیل غلتک، افزایش می‌یابد. به طوری که در موقعیت‌های مشابه روی پروفیل غلتک به ازای  $0/1 = ?$  بیشترین نرخ سایش و به ازای  $0/3 = ?$  کمترین نرخ سایش مشاهده می‌شود. در شکل (12) اثر تغییرات ضخامت



شکل (11) تغییرات نرخ سایش اصلاح شده بر اساس تغییر ضریب اصطکاک (?)، روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک.



شکل (12) اثر تغییرات ضخامت لوله اولیه بر نرخ سایش اصلاح شده روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک.

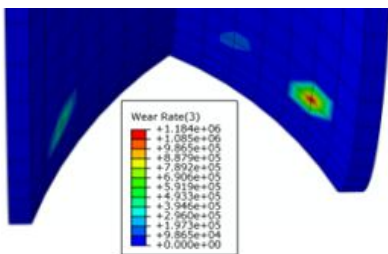
حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود، با توجه به اینکه امکان مقایسه کمی نرخ سایش وجود ندارد، در بررسی‌های انجام شده نواحی مستعد سایش به‌طور کیفی مقایسه می‌شوند. در شکل (16) نواحی مستعد سایش حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی موجود برای غلتک بالایی سه ایستگاه آخر که نرخ سایش بیشتری دارند، نشان داده شده است. همچنین لازم به توضیح است که در شبیه‌سازی، در محل تماس غلتک و لوله نواحی مستعد سایش پیش‌بینی شده است. واضح است که این ناحیه در تماس‌های بعدی غلتک و لوله تکرار می‌شود و به صورت نواری حول غلتک قرار می‌گیرد.

هدف از مقایسه ناحیه مستعد سایش پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی با ناحیه سایش یافته در عمل، بررسی انطباق موقعیت ناحیه سایش یافته با ناحیه پیش‌بینی شده است. از این رو همان‌گونه که در شکل (16) مشاهده می‌شود، در ایستگاه‌های 3 و 4 به ترتیب، نتایج شبیه‌سازی ناحیه‌هایی در نزدیکی کناره غلتک و نیز در نزدیکی گلویی را مستعد سایش پیش‌بینی کرده است. نتایج تجربی نیز بر همین نواحی منطبق است. ولی در ایستگاه پنجم علاوه بر ناحیه گلویی که در شبیه‌سازی پیش‌بینی شده، ناحیه کناری نیز دچار سایش شده است.

در بعضی مناطق به‌علت فرضیات استفاده شده در شبیه‌سازی، سطح سایش یافته در عمل بیشتر از سطح پیش‌بینی شده شبیه‌سازی است.

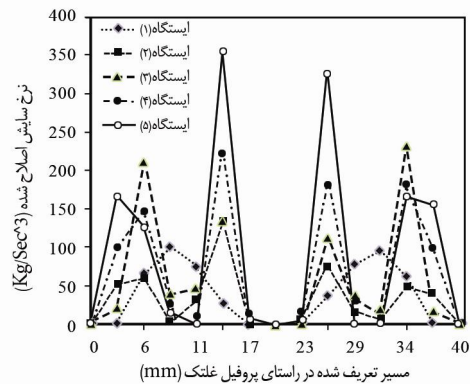


(الف) ناحیه سایش یافته مربوط به ایستگاه سوم.

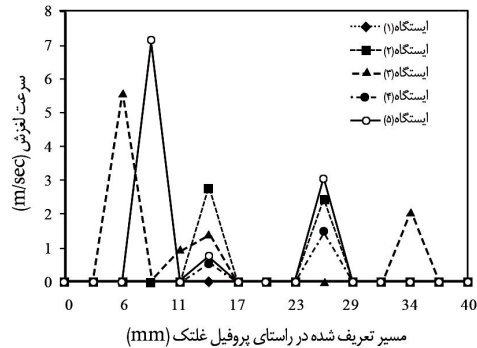


(ب) ناحیه مستعد سایش پیش‌بینی شده ایستگاه سوم.

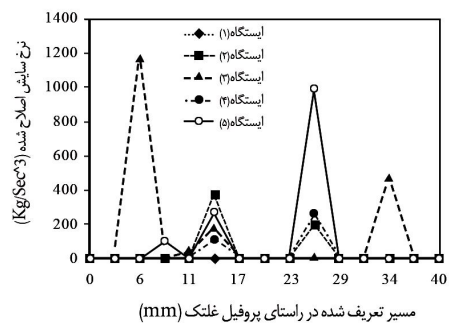
در ناحیه تماس غلتک و لوله، نرخ سایش اصلاح شده ایستگاه‌های مختلف در شکل (15) مقایسه می‌شود.



شکل (13) مقایسه فشار تماسی ایستگاه‌های مختلف روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک.



شکل (14) مقایسه سرعت لغزشی ایستگاه‌های مختلف روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک در محل تماس با لوله.



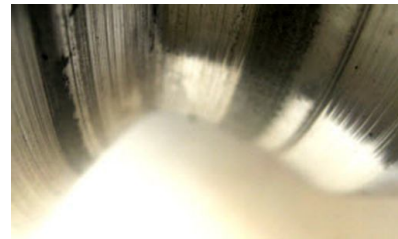
شکل (15) نرخ سایش اصلاح شده ایستگاه‌های مختلف روی مسیر تعریف شده در راستای پروفیل غلتک در محل تماس با لوله.

همچنین با توجه به نرخ سایش ایستگاه‌های مختلف می‌توان مناطق مستعد سایش را پیش‌بینی نمود تا در هنگام طراحی به آن مناطق توجه ویژه‌ای شود. در مقایسه نتایج

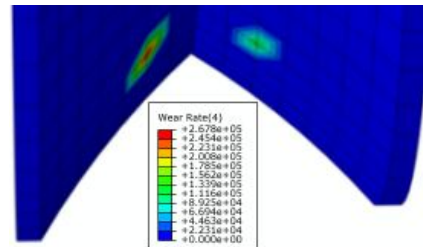
با توجه به قانون آرچارد، فشار تماسی و سرعت لغزشی دو پارامتر موثر بر نرخ سایش غلتک هستند. در شکل‌دهی مجدد در ایستگاه‌های مختلف اختلاف فشار تماسی موجب تفاوت در نرخ سایش غلتک ایستگاه‌های مختلف می‌شود. از طرفی تغییرات لوله اولیه سبب تاثیر بر نرخ سایش غلتک می‌شود. به طوری که با افزایش ضخامت لوله اولیه، به علت افزایش فشار تماسی نرخ سایش غلتک افزایش می‌یابد. کاهش ضریب اصطکاک، موجب افزایش سرعت لغزشی و در نتیجه موجب افزایش نرخ سایش غلتک می‌شود. همچنین تغییر جنس لوله اولیه بر نرخ سایش موثر است به طوری که با افزایش تنش تسلیم لوله، نرخ سایش افزایش می‌یابد.

#### فهرست علائم

$Q$	نرخ سایش خطی
$K$	ضریب سایش
$W$	فشار تماسی، (MPa)
$V$	سرعت لغزش، (m/s)
$H$	سختی ماده نرم‌تر، (MPa)
$Q'$	نرخ سایش خطی اصلاح‌شده، ( $kg/s^2$ )
$E$	مدول یانگ، (MPa)
$\nu$	ضریب پواسون
$\sigma$	تنش حقیقی، (MPa)
$\sigma_y$	تنش تسلیم اولیه، (MPa)
$\epsilon$	کرنش حقیقی
$\epsilon^p$	کرنش پلاستیک حقیقی
$R$	شعاع پروفیل غلتک، (mm)
$\Delta h$	مقدار کاهش در ارتفاع برای هر مرحله، (mm)
$D_T$	قطر گلوبی، (mm)
$D_L$	قطر سمت چپ، (mm)
$D_R$	قطر سمت راست، (mm)
$a$	طول ضلع مربع مقطع پروفیل، (mm)
$t$	ضخامت لوله، (mm)
$\mu$	ضریب اصطکاک



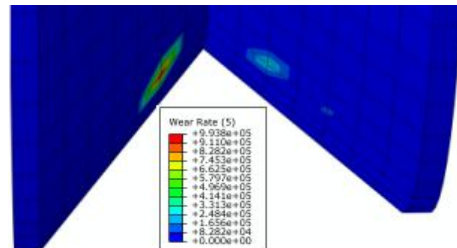
(پ) ناحیه سایش یافته مربوط به ایستگاه چهارم.



(ت) ناحیه مستعد سایش پیش‌بینی شده ایستگاه چهارم.



(ج) ناحیه سایش یافته مربوط به ایستگاه پنجم



(د) ناحیه مستعد سایش پیش‌بینی شده ایستگاه پنجم.

شکل (16) مقایسه مناطق سایش یافته تجربی و مناطق مستعد سایش پیش‌بینی شده شبیه‌سازی به ترتیب برای ایستگاه‌های 3 و 4 و 5.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه و بررسی نرخ سایش غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشابه، اعتبار نتایج شبیه‌سازی بررسی شده است. پس از به دست آوردن اطمینان از قابل قبول بودن نتایج شبیه‌سازی شده، مناطق مستعد سایش غلتک‌ها به دست آمده است. سپس اثر پارامترهای مختلف بر نرخ سایش غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد مورد بررسی قرار گرفته است.



## 6- مراجع

- [1] Kiuchi M., Feizhou W., *Reshaping of Round Pipes into Square and Rectangular Pipes*, Tube & Pipe Technology, November / December ۱۹۹۹.
- [2] Hutchings I.M., *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*, ۱۹۹۲.
- [3] Masen M., *Abrasive Tool Wear in Metal Forming Processes*, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, September ۲۰۰۴.
- [4] ASM International Handbook Committee, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Volume ۱۸, ۱۹۹۲.
- [5] Haffmann H., Hwang C., Ersoy A., *Advanced Wear Simulation in Sheet Metal Forming*, Institute of Metal Forming and Casting, ۲۰۰۲.
- [6] Mentor, *Spilit Rolls, Solutions for the tube, Pipe&Roll Form Industries*, Ohio, USA, ۲۰۰۶.
- [7] Hegadekatte v., Huber N., Kraft O., *Finite element based simulation of dry sliding wear*, Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. ۱۳, ۲۰۰۴, pp. ۵۷-۷۵.
- [8] ABAQUS User Guid, ABAQUS Analysis User's Manual.