



مطالعه عددی و تجربی برش گیوتینی یک پروفیل پیچیده تولید شده به روش شکل‌دهی غلتکی

رضا غفاری تراب ترکی^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*}، محمد مهدی کسائی^۳ و حسین طالبی قادیکلائی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین

^۴ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰

چکیده

یکی از بخش‌های مهم خطوط شکل‌دهی غلتکی سرد برش پروفیل‌ها است که معمولاً برای پروفیل‌های باز به صورت برش گیوتینی انجام می‌گیرد. با وجود اهمیت کیفیت برش در قابلیت مونتاژ پروفیل‌های باز، تحقیقات معدودی روی برش آن‌ها انجام شده است. در این مقاله، برش گیوتینی یک پروفیل باز پیچیده، چارچوب درب، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برش گیوتینی این پروفیل در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و اثر پارامترهای مهم فرآیندی بر کیفیت برش مشخص شد. در آزمایش‌های تجربی، ابتدا پروفیل‌ها به منظور حذف تنش‌های پسماند شکل‌دهی آنیل شدند و سپس تحت برش قرار گرفتند. مقطع برش پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی اجزای محدود با سطح برش بدست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شد و عیوب برش مورد بررسی قرار گرفتند. انطباق خوب نتایج صحت مدل اجزای محدود را تأیید کرد. نتایج نشان داد، با افزایش زاویه برش و لقی بین قالب‌ها و پروفیل کیفیت برش کاهش می‌یابد؛ همچنین افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل و لقی بین قالب‌ها، سبب کاهش نیروی برشی می‌شود. در نهایت بر مبنای نتایج بدست آمده بهترین شرایط برش پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی غلتکی سرد؛ برش گیوتینی؛ عیوب برش؛ پارامترهای برش؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ آزمایش تجربی.

Numerical and Experimental Study on Guillotine Shearing of a Complex Profile Produced by Roll Forming process

R. Ghaffari Torab Torki¹, H. Moslemi Naeini^{2*}, M.M. Kasaei³, H. Talebi-Ghadikolaei⁴

¹ M.S.c., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

³ Asst. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad Univ. of Qazvin, Qazvin, Iran.

⁴ Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

Abstract

One of the important sections of cold roll forming lines is the shearing of profiles, which is usually performed as the guillotine shearing for open profiles. Despite the importance of shearing quality on the assemblability of the open profiles, few researches have been done on their shearing operation. In this paper, the guillotine shearing of a complex open profile, door frame, was investigated. For this purpose, the guillotine shearing of this profile was simulated in Abaqus software and the effects of the important process parameters on the shearing quality were determined. In the experiments, the profiles were initially annealed to remove residual stresses produced during deformation and then were sheared. The experimental and finite element-predicted shearing cross-sections were compared and the shearing defects were analyzed. The comparison revealed a good agreement and confirmed the finite element model. The results showed the increase of the shearing angle and the clearance between dies and profile reduces the shearing quality. In addition, the increase of the clearance between dies and profile and the clearance between dies reduces the shearing force. Finally, the best shearing conditions were proposed based on the results.

Keywords: Roll Forming; Guillotine Shearing; Shearing Defects; Shearing Parameters; Finite Element Simulation; Experiment.

۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد^۱ به عنوان یکی از روش‌های مهم شکل‌دهی ورقی پیوسته در صنعت شناخته می‌شود که برای تولید پروفیل‌های باز و بسته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این فرایند نوار فلزی از میان چندین مجموعه غلتک دوار به صورت پیوسته و آرام تغییر شکل می‌یابد و مرحله به مرحله به شکل محصول مورد نظر نزدیک‌تر می‌شود و در نهایت تولید پیوسته‌ای از پروفیل مورد نظر را ایجاد می‌کند [۲]. در آخرین مرحله فرایند شکل‌دهی غلتکی، عمل برش صورت می‌گیرد که این عمل معمولاً به دو صورت برش گیوتینی و اره‌ای صورت می‌گیرد.

امروزه یکی از نیازهای صنایع تولید کننده پروفیل، برش سریع پروفیل‌های پیچیده با حداقل عیوب برشی است. مزیت برش گیوتینی^۲ نسبت به برش اره‌ای^۳، سرعت زیاد برش و همچنین اقتصادی بودن آن است و مشکل آن، نامناسب بودن کیفیت لبه‌های بریده شده است [۳]. این مشکل را می‌توان با کنترل کردن پارامترهای برش و استفاده از راهکارهای ویژه حل کرد. بدین منظور آتکینز [۴] روی مکانیزم برش گیوتینی فلزهای انعطاف‌پذیر^۴ تحقیق کرد. در این تحقیق روشی برای برش ورق‌های بسیار نازک پیشنهاد شد که در حین برش دچار تغییر شکل‌های مختلف می‌شوند. در این روش برای جلوگیری از بار ضربه‌ای، یک زاویه بسیار کمی برای لبه برنده گیوتین در نظر گرفته شد. گاستافسون و همکاران [۳]، عملیات برش ورق را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها، تاثیر پارامترهای مهم فرایند برش، از جمله لقی و نحوه‌ی گیره‌بندی^۵ را روی تغییر نیرو بررسی کردند و نتایج بدست آمده را از طریق برش یک فولاد درجه متوسط^۶ صحت‌سنجی کرده‌اند.

سافه و همکاران [۵] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار سه‌بعدی دفرم^۷ به بررسی اثر تنش پس‌ماند ناشی از فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد روی تغییر

شکل لبه‌های بریده شده کانال فولادی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، زمانی که کانال فولادی، به وسیله دستگاه گیوتین بریده می‌شود، گوشه بالایی کانال به سمت داخل بسته می‌شود و گوشه انتهایی کانال به سمت بیرون باز می‌شود؛ همچنین زمانی که کانال فولادی کلاهی شکل بریده می‌شود، هر دو سمت آن به سمت بیرون باز می‌شود؛ همچنین آن‌ها [۶] طی یک پژوهش مشابه دیگر روی کانال فولادی توانستند به وسیله آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، تغییر شکل انتهایی کانال را بررسی کنند. آن‌ها نشان دادند، تنش‌های پسماند در این کانال‌ها به دو صورت تنش پسماند خمشی و تنش پسماند پیچشی ظاهر می‌شوند که در اثر آزاد شدن تنش‌های پسماند خمشی، هر دو طرف کانال به سمت بیرون باز می‌شوند و در صورت آزاد شدن تنش‌های پسماند پیچشی یک طرف کانال به سمت بیرون باز می‌شود و طرف دیگر آن به سمت داخل بسته می‌شود.

مونکه و همکارش [۷]، روی تغییر شکل لبه^۸ پروفیل هنگام عملیات برش و آزاد شدن تنش‌های پسماند تحقیق کردند. آن‌ها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که عامل تغییر شکل لبه‌های پروفیل، ترکیبی از تنش‌های پسماند طولی و برشی است. برای این منظور یک تحلیل عددی و تجربی روی پروفیل‌های U شکل، C شکل و کلاهی شکل انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که خم بیش از حد و برگرداندن آن^۹، بیشترین تاثیر را در کاهش این تغییر شکل لبه‌ها دارد؛ همچنین آن‌ها با پایین و بالا آوردن پروفیل^{۱۰} توانستند این تنش‌های پسماند را کاهش دهند و تغییر شکل ابعادی پروفیل را به کمینه مقدار برسانند. بورسی و همکاران [۸]، اثرهای برش لیزری و مکانیکی را روی لبه‌های برش فولاد S355N بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که نمونه‌هایی که به وسیله برش مکانیکی بریده می‌شوند، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌هایی دارند که با برش لیزری بریده می‌شوند. هاتاناکا و همکاران [۹]، شبیه‌سازی اجزا محدود برش توخالی کردن^{۱۱} ورق فلزی را با استفاده از معیار

¹ Roll Forming

² Guillotine Cutting

³ Saw Cutting

⁴ Ductile Metal

⁵ Clamping

⁶ Medium Grade Steel

⁷ Deform

⁸ End Flare

⁹ Overbending and Bending Back

¹⁰ Lowering and Elevating

¹¹ Blanking

نواحی کور برشی، کیفیت برش بدتر می‌شود؛ همچنین با افزایش سرعت برشی، طول ناحیه برش خورده و کیفیت برش، بیشتر می‌شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که در پژوهش‌های پیشین در زمینه برش پروفیل، تمرکز روی بررسی اثر تنش پسماند ناشی از شکل‌دهی غلتکی بر تغییر شکل ناحیه برش بوده است. به همین دلیل برش پروفیل به صورت واقعی مدل نشده است، بلکه به صورت حذف شرایط مرزی بین دو بخش که قرار است از هم جدا شوند، در نظر گرفته شده است مانند تحقیقاتی که توسط سافه و همکارانش [۵] و [۶] و مونکه و همکارانش [۷] انجام شده است. در پژوهش‌هایی که روی برش ورق انجام شده است، اگرچه برش با مدل‌سازی قالب‌ها و در نظر گرفتن مدل آسیب شبیه‌سازی شده است، ولی به علت سادگی هندسه برش، نتایج آن‌ها برای تحلیل برش پروفیل‌ها قابل استفاده نیست؛ بنابراین در این پژوهش برش پروفیل پیچیده درب با استفاده از معیار آسیب واماندگی برشی شبیه‌سازی شده است و اثر پارامترهای برشی روی کیفیت برش و نیروی برش مشخص شده است.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- آزمایش‌های تجربی برش گیوتینی

آزمایش‌های برش روی پروفیل چارچوب درب از جنس فولاد st37 انجام گرفته است. برای انجام این آزمایش‌ها، از یک خط تولید صنعتی چارچوب درب در شرکت لوله و پروفیل صباح استفاده شده است. این خط قابلیت تولید سه شاخه پروفیل به طول ۶ متر را در دقیقه دارد. دستگاه گیوتین این خط با زاویه برش ۴۵ درجه، لقی بین قالب‌های صفر و لقی بین قالب‌های برش و پروفیل ۵ میلی‌متر عملیات برش را با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام می‌دهد. پروفیل چارچوب و دستگاه گیوتین در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. از آنجایی که این پژوهش روی عملیات برش متمرکز شده است، به منظور عدم اثرگذاری تنش‌های پسماند ناشی از شکل‌دهی غلتکی روی عیوب ناحیه برش، پروفیل در دمای ۷۵۰ درجه انیل شده است. پس از انجام آزمایش تجربی، برای بررسی سطح برش پروفیل، از قسمت مختلف سطح برش همراه با بزرگنمایی عکس گرفته شده است.

شکست انعطاف‌پذیر^۱ کاکرافت-لاتهام^۲ انجام داد. آن‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی روی یک ورق فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر، علاوه بر تأیید صحت مدل اجزای محدود، نحوه رشد ترک و همچنین شکل لبه برش را مورد بررسی قرار دادند. گاش و همکاران [۱۰]، مدل‌سازی سه‌بعدی عملیات برش را برای آلیاژهای آلومینیوم انجام دادند. از آنجایی که ناحیه پلیسه^۳ به وجود آمده در عملیات برش یک مسئله بسیار مهم در کیفیت محصول نهایی است، آن‌ها در این تحقیق تلاش کردند که با تغییر در پارامترها، ناحیه پلیسه را به کمینه مقدار برسانند. آن‌ها سه معیار آسیب مختلف را مورد استفاده قرار دادند و از طریق مقایسه با نتایج تجربی به این نتیجه رسیدند که معیار آسیب واماندگی برشی^۴، بیشترین دقت را دارد.

سنونی و همکاران [۱۱]، شبیه‌سازی اجزای محدود عملیات گیوتین کردن ورق فلزی را با استفاده از معادلات ساختاری آسیب کشسانی-مومسانی^۵ در نرم‌افزار آباکوس انجام دادند. آن‌ها با ترکیب مکانیک آسیب زنجیره‌ای^۶ با رفتار کشسانی-مومسانی توانستند، برش گیوتینی را شبیه‌سازی کنند. آن‌ها تاثیر پارامترهای مهم برشی، از جمله ضخامت ورق، سایش برنده‌ها^۷ و شکل برنده‌ها^۸ را بر کیفیت برش بررسی کردند. کیان و همکاران [۱۲]، تحلیل اجزای محدود برش ورق فولادی نورد گرم شده را انجام دادند. آن‌ها برای شبیه‌سازی از مدل آسیب واماندگی برشی استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی توانستند، میزان تغییر شکل مومسانی، شروع و تکامل آسیب و شکست ورق فلزی را به دست آورند.

خوان‌لی و همکاران [۱۰]، به بررسی تجربی و عددی اثر پارامترهای زاویه و سرعت برشی روی کیفیت ناحیه برش در کانال‌های فولادی C شکل پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی فرایند برش، از مدل آسیب کاکرافت-لاتهام استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در زاویه برش ۴۵ درجه، در

¹ Ductile Fracture Criterion

² Cockcroft_Latham

³ Burr Zone

⁴ Shear Failure

⁵ Elastoplastic_Damage Constitutive Equations

⁶ Continuum Damage Mechanics

⁷ Knife Wear

⁸ Knife Shape



شکل ۱- الف) پروفیل هدف و ب) برش گیوتینی پروفیل

۲-۲- آزمون کشش تک‌محوری

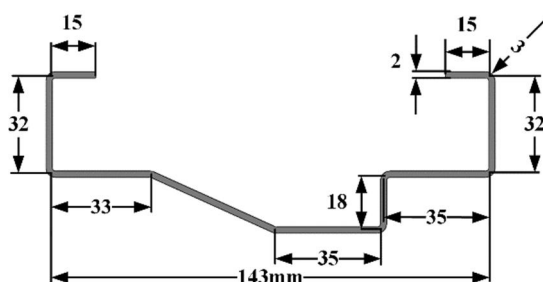
به منظور تعیین خواص مکانیکی پروفیل از آزمون کشش تک محوری استفاده شده است. سه نمونه آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM E8، از ورق مورد نظر وایرکات شده‌اند. این سه نمونه استاندارد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و میزان رطوبت ۴۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و نمودارهای تنش و کرنش مهندسی بدست آمده است. نتایج هر سه نمونه اختلاف خیلی کمی باهم دارند؛ بنابراین از میانگین نتایج استفاده شده است. در شکل ۲ نمودار تنش-کرنش مهندسی نشان داده شده است و در جدول ۱ خلاصه نتایج آزمون کشش آورده شده است.

۳- تحلیل اجزای محدود

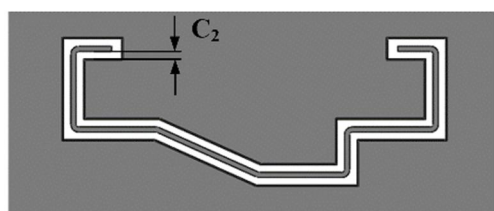
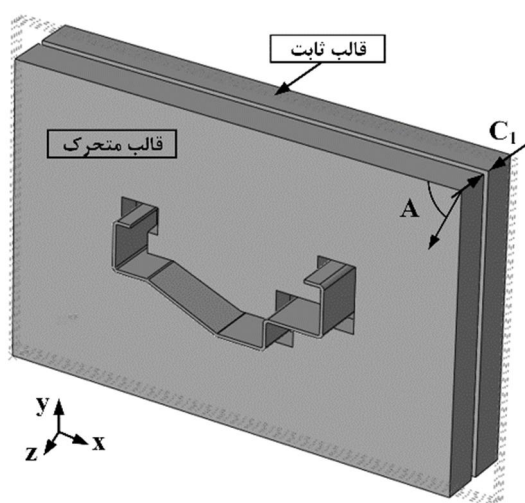
تحلیل اجزای محدود فرآیند برش گیوتینی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۶.۱۴ و با استفاده از حلگر صریح انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو بخش صورت گرفته است. در بخش اول شبیه‌سازی مطابق آزمایش‌های تجربی انجام و نتایج آن صحت‌سنجی شده است. در بخش دوم، با تغییر پارامترهای مهم برش، یعنی لقی بین دو قالب، لقی بین قالب‌های برش و پروفیل برش و زاویه برش، سطح برش مناسب بدست آمده است.

پروفیلی به طول ۱۰۰ میلی‌متر که در شکل ۱ الف آورده شده است و همچنین اندازه ابعاد پایه استاندارد آن در

قالب‌های برش (C₁) و لقی بین قالب‌های برش و پروفیل (C₂) (شکل ۴ الف و ب).

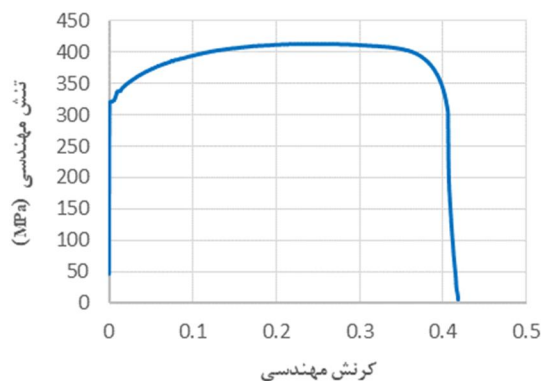


شکل ۳- ابعاد استاندارد پروفیل چارچوب درب



شکل ۴- الف) مونتاژ قالب‌های برش (لقی بین قالب‌های برش (C₁، جهت حرکت قالب متحرک (زاویه برش A) و ب) لقی بین قالب‌های برش و پروفیل C₂

برای شبکه‌بندی قالب‌ها، از المان R3D4 (المان چهار گره‌ای، سه‌بعدی جسم صلب) و برای شبکه‌بندی پروفیل از المان C3D8R (المان هشت گره‌ای، سه‌بعدی با فرمول‌بندی کاهش یافته) استفاده شده است؛ همچنین تعداد المان در راستای ضخامت ۴ یا ۵ عدد است تا تغییرات کیفیت برش در



شکل ۲- نمودار تنش- کرنش مهندسی فولاد st37

جدول ۱- خلاصه نتایج آزمون کشش برای فولاد st37

مدول یانگ	استحکام تسلیم	استحکام نهایی	ازدیاد طول نسبی
E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A (%)
۲۰۰/۸	۳۲۱	۴۱۳	۴۰

شکل ۳ مشخص شده است، در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. پروفیل در این شبیه‌سازی به صورت جسم تغییرشکل‌پذیر^۱ مدل شده است. رفتار کشسان و مومسان آن نیز با توجه به نتایج آزمون کشش در نرم‌افزار تعریف شده است. با توجه به این که در این کار سطح مقطع برش مورد بررسی قرار می‌گیرد، از المان حجمی برای پروفیل استفاده شده است. از آنجایی که تغییر شکل قالب‌ها در مقایسه با تغییرشکل پروفیل بسیار ناچیز است، هر یک از قالب‌های برش به صورت صلب^۲ در نرم‌افزار آباکوس نظر گرفته شدند [۱۳] و با توجه به پیچیدگی هندسه آن‌ها به صورت صلب گسسته^۳ مدل‌سازی شده‌اند.

مجموعه قالب‌ها از دو قالب ثابت و متحرک تشکیل شده است که ورق از بین این دو قالب حرکت می‌کند و با حرکت قالب متحرک، ورق برش خورده می‌شود. در شکل ۴ الف مونتاژ قالب‌ها و جهت حرکت قالب متحرک که تعیین کننده زاویه برش (A) است، نشان داده شده است. در طراحی قالب‌های برش دو نوع لقی تعریف می‌شود، لقی بین

¹ Deformable

² Rigid

³ Discrete rigid

اصطکاک در نظر گرفته شد. برای قالب ثابت تمامی حرکت-های خطی و دورانی محدود شده است، ولی برای قالب متحرک امکان حرکت خطی در جهت دو محور x و y در نظر گرفته شده است. حرکت در جهت x و y در سه زاویه متفاوت اتفاق می‌افتد. شرایط مرزی پروفیل به صورتی است که پروفیل از یک سمت به صورت کامل مقید شده است و از طرف دیگر به صورت کامل آزاد است که در عمل هم شرایط بدین صورت است.

۳-۱- مدل آسیب

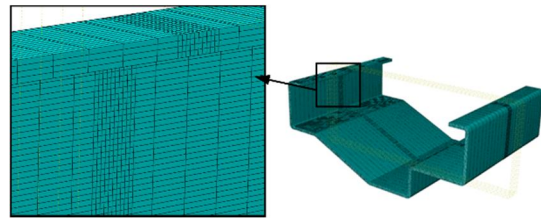
برای شبیه‌سازی فرایند برش از معیارهای آسیب^۲ مختلفی می‌توان استفاده کرد. با توجه به این که گاش و همکاران [۱۰] به این نتیجه رسیدند که معیار آسیب واماندگی برشی معیار بهتری در مقایسه با سایر معیارها است، از این معیار برای شبیه‌سازی فرایند برش استفاده شده است. مدل آسیب واماندگی برشی بر پایه کرنش مومسان معادل است و پارامتر آسیب معیار واماندگی برشی به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود. زمانی که پارامتر آسیب به عدد یک می‌رسد، شکست اتفاق می‌افتد و المان‌ها در نقاط شکست حذف می‌شوند و عمل برش صورت می‌گیرد.

$$\omega = (\varepsilon_0 + \sum \varepsilon \Delta) / \varepsilon_f \quad (1)$$

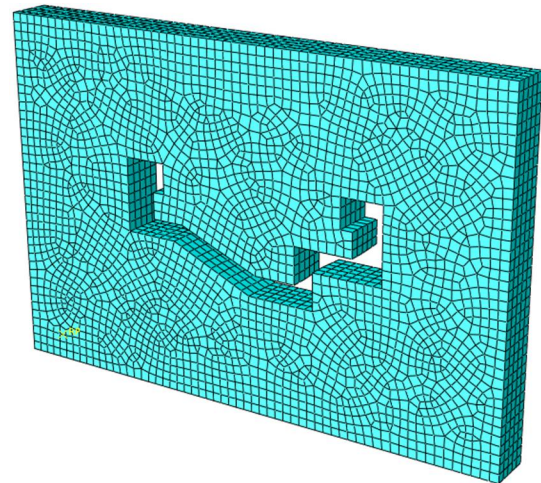
که در آن ω پارامتر آسیب، ε_0 کرنش مومسان معادل اولیه $\varepsilon \Delta$ نمو^۳ کرنش مومسان معادل و ε_f کرنش مومسان معادل در شکست است.

برای بدست آوردن کرنش مومسان معادل در لحظه شکست ε_f ، با استفاده از خواص مکانیکی به دست آمده، آزمون کشش تک‌محوری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی آزمون کشش تا میزان جابجایی در نقطه شکست تجربی انجام می‌شود که این مقدار برای جنس مورد مطالعه در این پژوهش برابر ۱۸ میلی‌متر است. سپس در میزان جابه‌جایی ذکر شده کرنش مومسان معادل بیشینه به عنوان کرنش مومسان معادل شکست موضعی خوانده می‌شود که این مقدار برای این جنس فولاد ۰/۷۲۸ به دست

راستای ضخامت قابل رویت باشد. پروفیل، در ناحیه برش، شبکه‌بندی ریزتری در راستای طولی نسبت به کل پروفیل دارد تا تغییرات ناحیه برش بهتر نشان داده شوند. شکل ۵ شبکه‌بندی پروفیل و شکل ۶ شبکه‌بندی قالب‌ها را نشان می‌دهد. پس از انجام مطالعات همگرایی که بر مبنای نتایج نیرو و پارامتر آسیب انجام گرفت، تعداد المان‌ها برای قالب ۶۸۱۹ و برای پروفیل ۹۰۸۴۶ است.



شکل ۵- شبکه‌بندی پروفیل و نحوه بخش‌بندی آن



شکل ۶- شبکه‌بندی قالب‌ها

اصطکاک بین پروفیل و هر یک از قالب‌های برش نقش مهمی در نحوه برش و جریان فلز پروفیل دارد. برای مدل سازی شرایط تماسی از روش تماس سینماتیکی^۱ استفاده شد. ضریب اصطکاک بین پروفیل و قالب مطابق با مدل کولمب تعریف شد و مقدار ۰/۳ برای آن با استفاده از نتایج هاتاناکا [۹] اعمال شد. به دلیل این که تماس بین دو قالب تاثیری در کیفیت برش ندارد، تماس آن‌ها از نوع بدون

² Damage Models

³ Increment

¹ Kinematic Contact Method

قسمت‌های خم شده پروفیل نشان داده شده است که در بعضی از بخش‌ها تغییر شکل نامناسب دیده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، لبه‌ی بال سمت چپ پروفیل، به سمت داخل خم شده است. دلیل این امر آن است که به هنگام برش، مطابق شکل ۱۱، سطح داخلی پروفیل با قالب تماس پیدا نمی‌کند و این عدم حمایت از یک طرف و اعمال نیرو از طرف قالب متحرک روی سطح خارجی از طرف دیگر موجب خم شدن لبه بال به سمت داخل می‌شود.

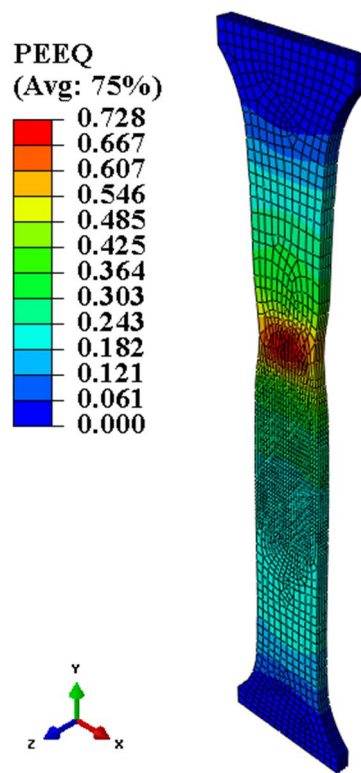
در شکل ۹ مشاهده می‌شود که دیواره میانی پروفیل در حین برش دچار تغییر شکل نامناسب شده است. علت این تغییر شکل نامناسب، لقی زیاد بین قالب‌های برش و پروفیل است که سبب شده به هنگام برش مطابق شکل ۱۲ قسمت تیز قالب متحرک در پروفیل فرو رود.

برخلاف دو بخش بررسی شده، در قسمت شیب‌دار پروفیل که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برش پروفیل به صورت مناسب و بدون هیچ‌گونه تغییر شکل اضافی صورت گرفته است؛ زیرا مطابق شکل ۱۳ به هنگام برش این ناحیه، پروفیل از یک طرف در تماس با قالب متحرک و از طرف دیگر در تماس با قالب ثابت است که سبب برش ایده‌آل این ناحیه شده است.

آمده است. در شکل ۷ کانتور کرنش مومسان معادل نشان داده شده است.

۳-۲- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش به این صورت انجام شده است که از سه پارامتر مورد مطالعه یعنی لقی بین قالب‌های برش (C_1)، لقی بین قالب‌های برش و پروفیل (C_2) و زاویه برش (A)، دو پارامتر در یک مقدار ایده‌آل ثابت نگه داشته می‌شود و پارامتر سوم در سه حالت که در جدول ۲ مشخص شده است، تغییر داده می‌شود.



شکل ۷- کانتور کرنش مومسان معادل

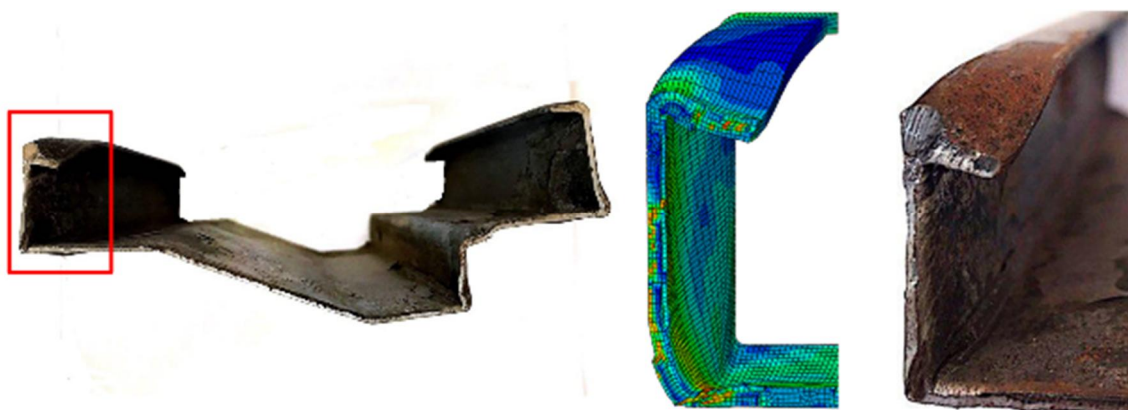
جدول ۲- مشخصات شبیه‌سازی‌های اجزای محدود

شماره آزمایش	لقی بین قالب‌ها C_1 (mm)	لقی بین قالب‌های برش و پروفیل C_2 (mm)	زاویه برش A (°)
۱	۰/۲	صفر	۴۵
۲	۰/۲	صفر	۶۰
۳	۰/۲	صفر	۹۰
۴	۰	صفر	۴۵
۵	۰/۲	صفر	۴۵
۶	۰/۴	صفر	۴۵
۷	۰/۲	صفر	۴۵
۸	۰/۲	۲	۴۵
۹	۰/۲	۴	۴۵

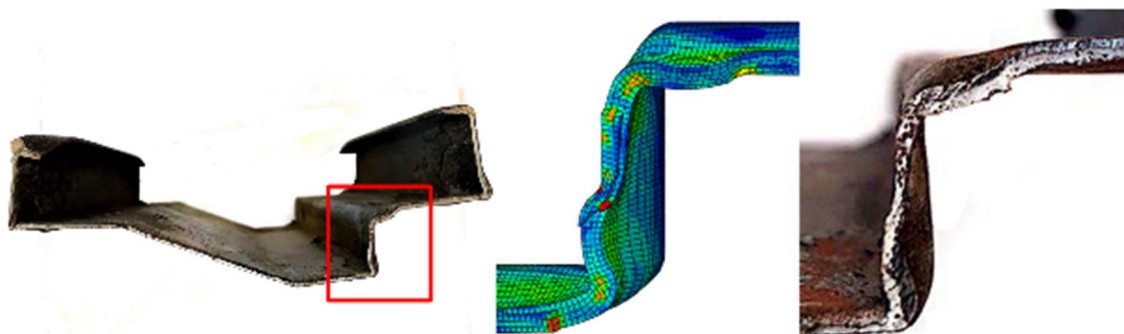
۴- بحث و نتایج

۴-۱- عیوب ناحیه برش

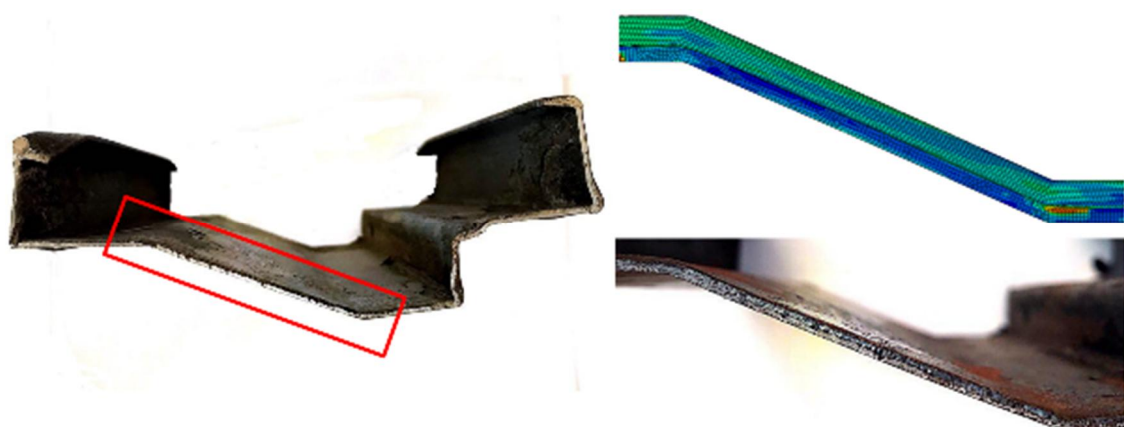
شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقایسه بخش‌های مختلف ناحیه برش در شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد. این مقایسه برای ناحیه برش در سمت قالب ثابت انجام شده است. در این تصاویر لبه، کف و همچنین



شکل ۸- مقایسه ناحیه برش بال چپ پروفیل در آزمایش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود



شکل ۹- مقایسه ناحیه برش دیواره میانی در آزمایش های تجربی و شبیه سازی اجزای محدود



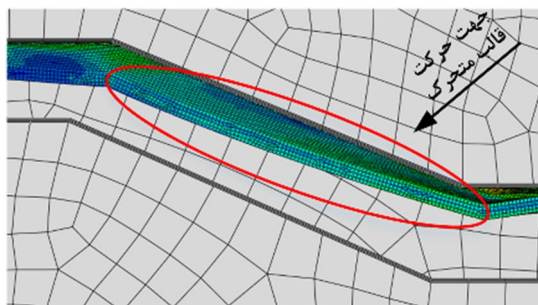
شکل ۱۰- مقایسه ناحیه برش قسمت شیب دار پروفیل در آزمایش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود

شکست^۲ اشاره کرد. در ناحیه برشی، جدایش در حالی ایجاد می شود که قالب در تماس با مقطع قرار دارد، ولی در ناحیه

در سطح مقطع برش معمولاً نواحی مختلفی ایجاد می شوند که از جمله آن ها می توان به ناحیه برشی^۱ و ناحیه

^۲ Fracture Zone

^۱ Shear Zone



شکل ۱۳- برش قسمت شیب دار پروفیل



شکل ۱۴- نواحی مختلف در سطح جدا شده

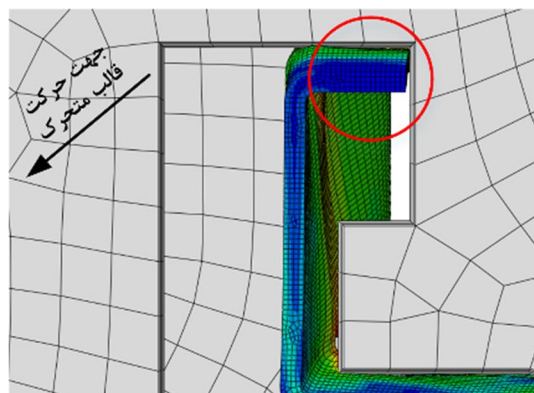
نواحی کور در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب برای زاویه‌های برش ۴۵ و ۹۰ درجه به صورت شماتیک مشخص شده است. می‌باید؛ همچنین در هر زاویه برش افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل طول نواحی که تحت برش کامل قرار می‌گیرند را کاهش می‌دهد و در نتیجه نواحی کور را تشدید می‌کند؛ بنابراین با توجه به کیفیت سطح پایین نواحی کور می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه برش و لقی بین قالب‌های برش و پروفیل کیفیت سطح برش کاهش می‌یابد. در زاویه برش ۹۰ درجه در صورتی که لقی بین قالب و پروفیل زیاد باشد، به علت اینکه دیواره‌های عمودی، نواحی کور، در تماس با قالب‌ها قرار نمی‌گیرد و نیرو در راستای محور آن‌ها اعمال می‌شود، احتمال کماتش در آن‌ها وجود دارد.

در شکل ۱۷ نواحی کور بدست آمده در آزمایش تجربی با زاویه برش ۴۵ درجه با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، قسمت‌هایی از پروفیل که کیفیت پایینی دارند، اکثراً در نواحی کور قرار دارند و این نواحی در شبیه‌سازی اجزای محدود نیز دیده می‌شوند.

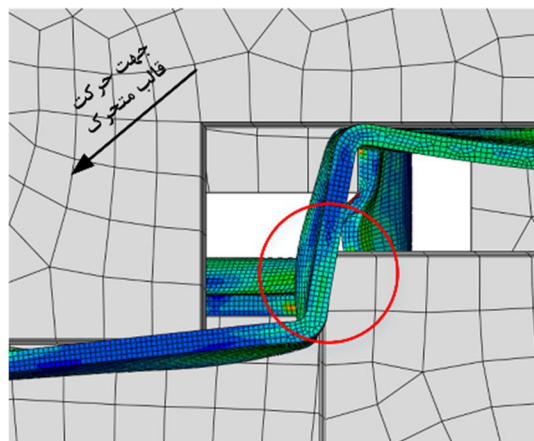
با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش، می‌توان نتیجه گرفت که مدل اجزای محدود ایجاد شده به خوبی می‌تواند هندسه ناحیه برش را پیش‌بینی کند؛ بنابراین

شکست در اثر ایجاد ترک‌ها و رسیدن آن‌ها به یکدیگر جدایش اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۴ ناحیه برشی و شکست نشان داده شده است. در ناحیه برشی، بافت سطح به صورت زاویه دار و همراستا با جهت حرکت قالب متحرک است، در حالی که در ناحیه شکست چنین بافتی دیده نمی‌شود.

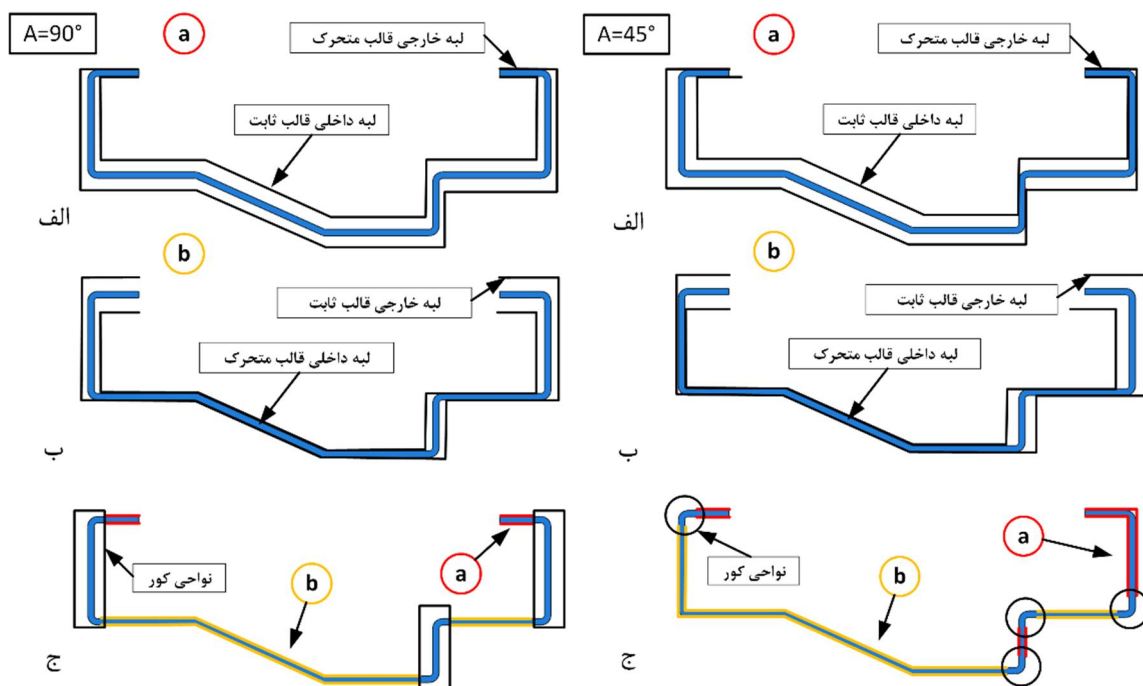
به هنگام حرکت قالب متحرک، بخش‌هایی از پروفیل بین لبه خارجی قالب متحرک و لبه داخلی قالب ثابت و بخش‌هایی بین لبه داخلی قالب متحرک و لبه خارجی قالب ثابت برش می‌خورد. با این حال، نواحی از پروفیل وجود دارد که تنها از یک طرف با لبه‌های قالب در تماس است یا به طور کلی در تماس نیست و به همین سبب در آن‌ها برش روی نمی‌دهد و کل ضخامت دچار شکست می‌شود یا به عبارت دیگر کنده می‌شود. این نواحی از کیفیت سطح پایینی برخوردار هستند و نواحی کور نامیده می‌شوند.



شکل ۱۱- تغییر شکل لبه بال چپ پروفیل در هنگام برش



شکل ۱۲- تغییر شکل قسمت میانی پروفیل در هنگام برش



شکل ۱۶- الف) ناحیه برش خورده بین لبه خارجی قالب متحرک و لبه داخلی قالب ثابت، ب) ناحیه برش خورده بین لبه داخلی قالب متحرک و لبه خارجی قالب ثابت و ج) نواحی کور برای زاویه برش ۹۰ درجه

شکل ۱۵- الف) ناحیه برش خورده بین لبه خارجی قالب متحرک و لبه داخلی قالب ثابت، ب) ناحیه برش خورده بین لبه داخلی قالب متحرک و لبه خارجی قالب ثابت و ج) نواحی کور برای زاویه برش ۴۵ درجه

شکل ۱۷ تغییرات نیروی برشی بر حسب زمان را برای سه زاویه برش مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با شروع حرکت قالب متحرک، ابتدا قالب در ضخامت مقطع پروفیل نفوذ می‌کند و ناحیه برشی شکل می‌گیرد. به هنگام شکل‌گیری ناحیه برشی، نیروی برشی افزایش می‌یابد و خود را به یک مقدار بیشینه می‌رساند و با تکمیل شدن ناحیه برشی، نیرو مجدداً کاهش می‌یابد. برای برش با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، به ترتیب جدایش کامل در زمان ۱/۵، ۲/۱۵ و ۳/۷ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. دلیل افزایش زمان کامل جدایش با افزایش زاویه برش این است که با افزایش این زاویه، جدایش به صورت یکجا اتفاق نمی‌افتد، به طوری که در برش ۹۰ درجه ابتدا همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، بخش‌های افقی پروفیل جدا می‌شوند و در ادامه دیواره‌های عمودی پروفیل که نواحی کور نیز هستند جدا می‌شوند. در برش با زاویه ۹۰ درجه با توجه به این که برش در دو مرحله اتفاق می‌افتد، در ابتدا نیروی کمتری نسبت به برش با زاویه‌های

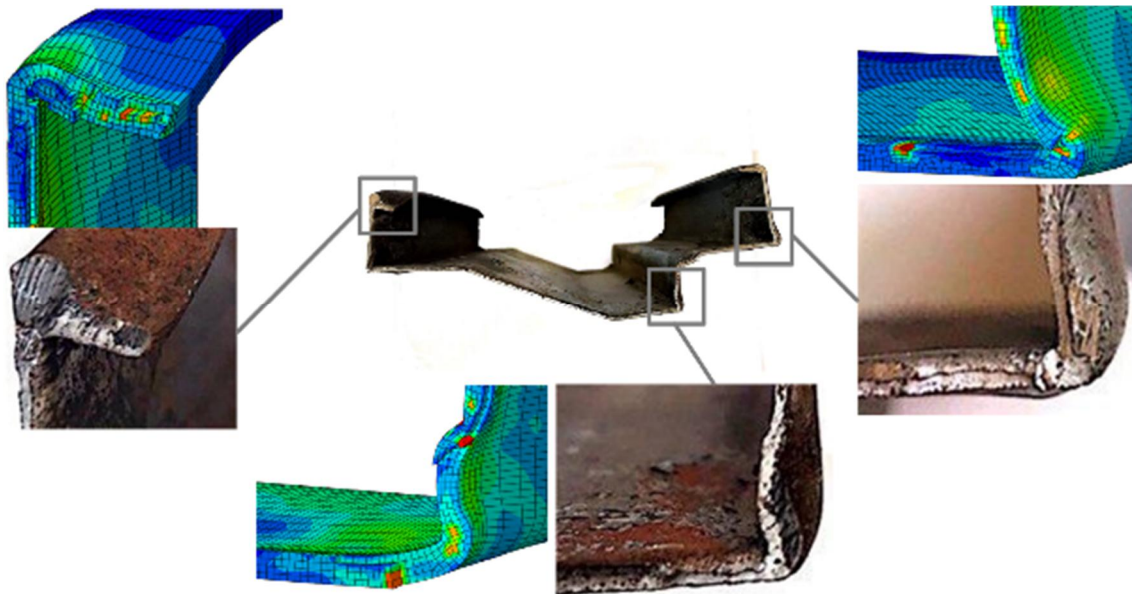
می‌توان به صحت مدل اجزای محدود اطمینان کرد و از آن برای بررسی‌های بعدی استفاده کرد.

۴-۲- بررسی اثر پارامترهای برش روی کیفیت برش

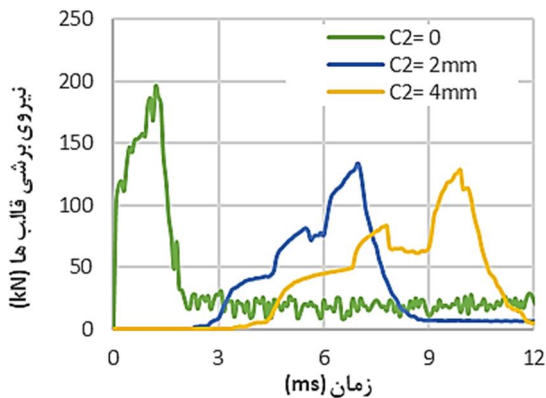
تغییر پارامترهای برش با توجه به طراحی آزمایشی انجام شده است که در جدول ۲ آورده شده است. این تغییر پارامترها روی پروفیل استاندارد که اندازه ابعاد پایه آن در شکل ۵ آورده شده است، اعمال شده است. نتایج حاصل از این تغییر پارامترها به ترتیب در ادامه آورده شده است.

۴-۲-۱- زاویه برش

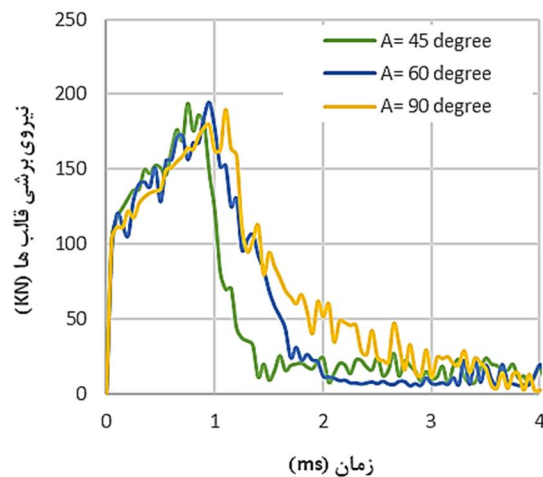
به منظور بررسی اثر زاویه برش از آزمایش‌های ۱، ۲ و ۳ جدول ۲ استفاده شده است که در آن‌ها لقی بین دو قالب ۰/۲ میلی‌متر و لقی بین قالب‌های برش و پروفیل صفر است و زاویه برش در سه حالت مختلف یعنی، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه تغییر می‌کند.



شکل ۱۷- نواحی کور برای زاویه برش ۴۵ درجه در آزمایش‌های تجربی و شبیه سازی اجزای محدود



شکل ۲۰- تغییرات نیروی برشی بر حسب زمان برای لقی‌های مختلف بین قالب‌ها و پروفیل

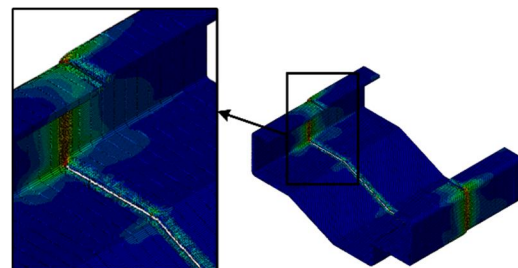


شکل ۱۸- تغییرات نیروی برشی بر حسب زمان برای زاویه برشی مختلف

۴۵ و ۶۰ درجه نیاز است، در حالی که در ادامه به دلیل برش دیواره‌های پروفیل و تکمیل شدن برش در دو زاویه دیگر، نیروی بیشتری نسبت به دو زاویه دیگر نیاز است.

۴-۲-۲- لقی بین قالب‌های برش و پروفیل

از آزمایش‌های ۷، ۸ و ۹ جدول ۲ برای تحلیل اثر لقی بین قالب‌های برش و پروفیل بر برش استفاده شد. در این آزمایش‌ها لقی بین دو قالب ۰/۲ میلی‌متر و زاویه برش ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در حالی لقی بین قالب‌های برش و پروفیل، در سه حالت صفر، دو و چهار میلی‌متر تغییر می‌کند.



شکل ۱۹- مرحله اول برش (برش بخش‌های افقی) در برش با زاویه برش ۹۰ درجه

لبه‌های برشی بدتر می‌شود که دلیل آن در شکل ۱۱ نشان داده شد.

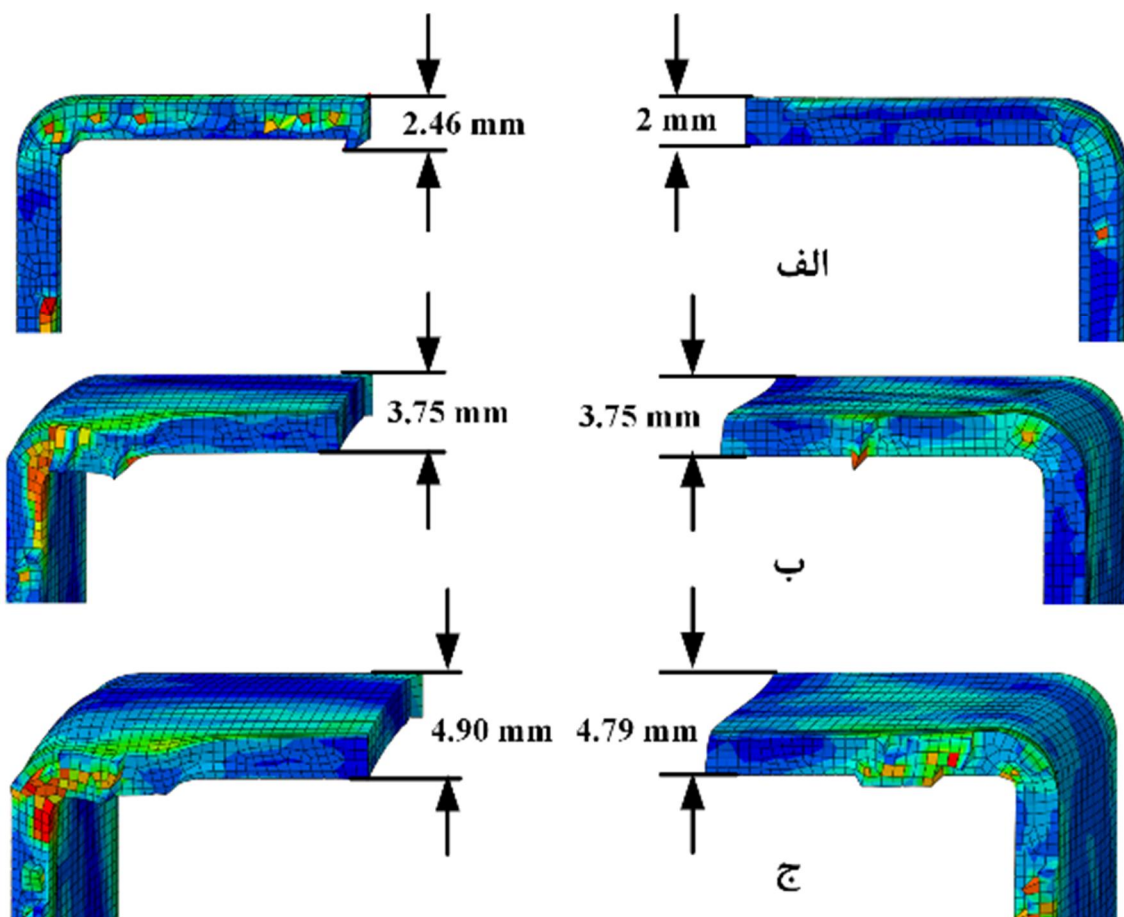
۳-۲-۴- لقی بین قالب‌ها

در این قسمت مطابق آزمایش‌های ۴، ۵ و ۶ جدول ۲ لقی بین قالب‌های برش و پروفیل صفر در نظر گرفته می‌شود و همچنین زاویه برش ۴۵ درجه است، ولی لقی بین دو قالب ثابت و متحرک، متغیر است و مقادیر آن به صورت صفر، ۰/۲ و ۰/۴ میلی‌متر تغییر می‌کند.

در شکل ۲۲ نیروی برش برای حالت‌های مختلف لقی بین دو قالب آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش لقی بین دو قالب، نیروی برشی بیشینه، کاهش می‌یابد، هر چند که شیب کاهش نیرو از لقی صفر به ۰/۲ میلی‌متر بیشتر

اثر لقی بین قالب‌های برش و پروفیل بر نیروی برش در شکل ۲۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل، نیروی بیشینه برشی کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا با افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل، برش به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد و به همین سبب زمان فرایند برش نیز افزایش می‌یابد. با توجه به روند کاهش نیروها با افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل پیش‌بینی می‌شود، از یک مقدار لقی بیشتر، این پارامتر دیگر روی نیروی برشی اثر گذار نباشد.

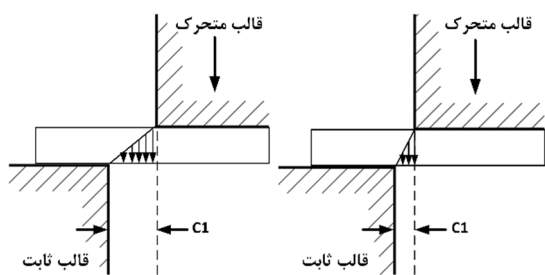
شکل ۲۱ تاثیر لقی بین قالب‌های برش و پروفیل را بر روی کیفیت لبه‌های یال‌های پروفیل نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش لقی بین قالب‌های برش و پروفیل میزان انحراف لبه پروفیل افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر، کیفیت



شکل ۲۱- تغییر شکل لبه‌های پروفیل برای لقی‌های مختلف بین قالب‌های برش و پروفیل
 (الف) صفر میلی‌متر، (ب) ۲ میلی‌متر و (ج) ۴ میلی‌متر

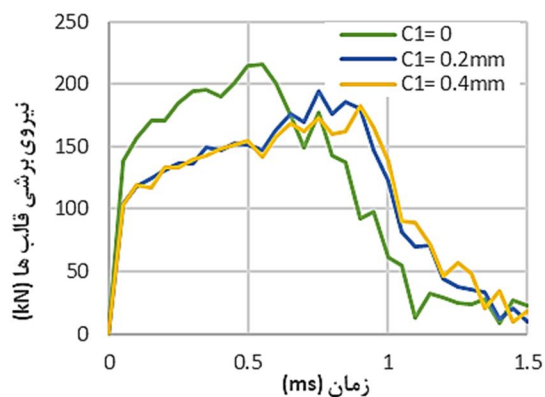
داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش لقی، طول بازو افزایش یافته و بنابراین به نیروی برشی کمتری برای جدایش نیاز است.

شکل ۲۴ اثر لقی بین قالب‌ها بر انحراف لبه یال‌ها را در طول پروفیل نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزایش لقی بین قالب‌های برش برخلاف لقی بین قالب‌ها و پروفیل اثری بر انحراف لبه پروفیل در راستای طولی ندارد.

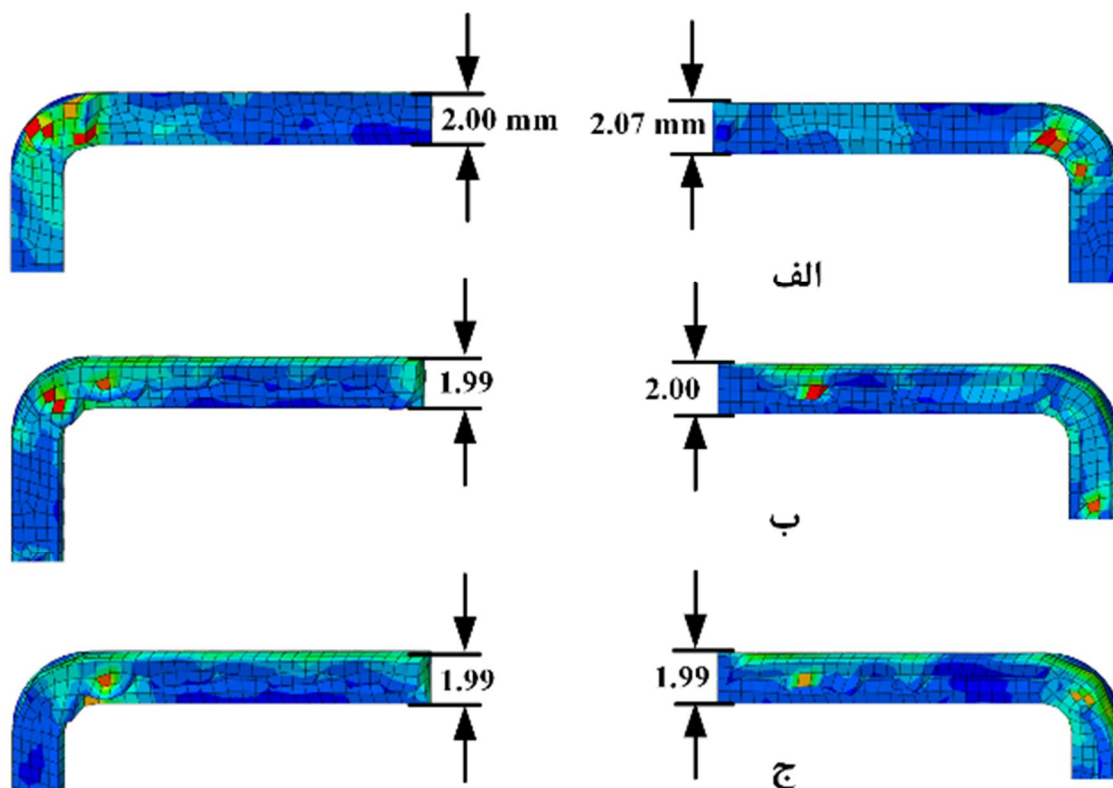


شکل ۲۳- اثر لقی بین دو قالب روی نیروی برشی

از لقی ۰/۲ به ۰/۴ میلی‌متر است؛ بنابراین برای افزایش عمر قالب، بیشینه لقی بین قالب‌ها مناسب است. در شکل ۲۳ دلیل کم شدن نیروی برشی با افزایش لقی بین قالب‌ها نشان



شکل ۲۲- تغییرات نیروی برشی بر حسب زمان برای لقی‌های مختلف بین قالب‌ها



شکل ۲۴- تغییر شکل لبه‌های پروفیل برای لقی‌های مختلف بین قالب‌های برش (الف) صفر میلی‌متر، (ب) ۰/۲ میلی‌متر و (ج) ۰/۴ میلی‌متر

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی برش گیوتینی یک پروفیل پیچیده باز پرداخته شد که نتایج آن به صورت خلاصه در ادامه بیان می‌شود:

- (۱) با افزایش زاویه برشی و لقی بین قالب‌های برش و پروفیل، نواحی کور بیشتر شده و در نتیجه کیفیت برش کاهش می‌یابد.
- (۲) در برش با زاویه ۹۰ درجه با توجه به این که برش در دو مرحله (ابتدا کف پروفیل، سپس دیواره‌ها) اتفاق می‌افتد، ابتدا فقط کف پروفیل بریده می‌شود، بنابراین نیروی کمتری نسبت به برش با زاویه‌های ۴۵ و ۶۰ درجه نیاز است، درحالی که در ادامه به دلیل برش دیواره‌های پروفیل در زاویه برش ۹۰ درجه و تکمیل شدن برش در دو زاویه دیگر، نیروی بیشتری نسبت به دو زاویه دیگر نیاز است.
- (۳) با افزایش لقی بین قالب‌ها و پروفیل و همچنین لقی بین قالب‌ها نیروی بیشینه برشی کاهش پیدا می‌کند، ولی شیب کاهش با افزایش لقی کمتر می‌شود.
- (۴) با افزایش لقی بین قالب‌های برش و پروفیل میزان انحراف لبه پروفیل افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر کیفیت لبه‌های برشی بدتر می‌شود، در حالی که افزایش لقی بین قالب‌های برشی اثری بر انحراف لبه پروفیل ندارد.
- (۵) انتخاب بهترین شرایط برش معمولاً موازنه‌ای بین بهترین کیفیت برش و کمترین نیروی مورد نیاز برای برش است. از بین سه پارامتر مورد بررسی تنها لقی بین قالب‌ها و پروفیل است که هم روی کیفیت برش و هم روی نیروی بیشینه اثرگذار است. با توجه به اینکه کیفیت برش روی عملکرد پروفیل اثر گذار است، در این پژوهش کمترین میزان لقی ممکن بین قالب‌ها و پروفیل پیشنهاد می‌شود؛ همچنین زاویه برش ۴۵ درجه برای کیفیت برش بهتر و لقی بین

قالب‌ها ۰/۴ میلی‌متر برای نیروی کمتر پیشنهاد می‌شوند.

۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت لوله و پروفیل صباح برای فراهم کردن شرایط انجام آزمایش‌های تجربی کمال تشکر را دارند؛ همچنین از مشاوره‌های آقای مهندس مردعلی کاکائی در خصوص آزمایش‌های تجربی قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Kasaei MM, Naeini HM, Tehrani MS, Tafti RA (2011) Numerical and experimental investigation of strip deformation in cage roll forming process for pipes with low ratio of thickness/diameter. AIP Conf Proc 1315: 593-598.
- [2] Kasaei MM, Naeini HM, Abbaszadeh B, Silva M, Martins P (2015) Flexible roll forming. In: Materials Forming and Machining, Elsevier 51-71.
- [3] Gustafsson E, Oldenburg M, Jansson A (2014) Design and validation of a sheet metal shearing experimental procedure. J Mater Process Tech 214: 2468-2477.
- [4] Atkins AG (1990) On the mechanics of guillotining ductile metals. J Mater Process Tech 24: 245-257.
- [5] Saffè SNbM, Nagamachi T, Ona H (2014) Residual stress around cut end of hat steel channel by roll forming. Procedia Engineer 81: 239-244.
- [6] Saffè SNbM, Nagamachi T, Ona H (2015) Mechanism of end deformation after cutting of light gauge channel steel formed by roll forming. Mater Trans 56: 187-192.
- [7] Moneke M, Groche P (2017) Counter measures to effectively reduce end flare. AIP Conf Proc
- [8] Bursi OS, D'Incau M, Zanon G, Raso S, Scardi P (2017) Laser and mechanical cutting effects on the cut-edge properties of steel S355N. J Constr Steel Res 133: 181-191.
- [9] Hatanaka N, Yamaguchi K, Takakura N (2003) Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal. J Mater Process Tech 139: 64-70.
- [10] Ghosh S, Li M, Khadke A (2005) 3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys. J Mater Process Tech 167: 91-102.
- [11] Saanouni K, Belamri N, Autesserre P (2010) Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled

- [13] Rezaei R, Moslemi Naeini H, Tafti RA, Kasaei MM, Mohammadi M, Abbaszadeh B (2017) Effect of bend curve on web warping in flexible roll formed profiles. *Int J Adv Manuf Tech* 93: 3625-3636.
- [12] Qian LY, Fang G, Zeng P (2014) Three-dimensional finite element analysis for flying shearing of X100 hot-rolled steel plate. *Procedia Engineer* 81: 2488-2493.
- elastoplastic-damage constitutive equations. *Finite Elem Anal Des* 46: 535-550.