



بررسی و مقایسه نظری و عددی تأثیر اینرسی در رفتار فروریزش جاذب مشبک تک سلولی و دو سلولی تحت بارگذاری ضربه‌ای

حسین حاتمی^{۱*}، امیربهزاد فتح‌اللهی^۲

^۱ گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۶ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۶ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۰ تیر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تیوب مشبک
ضربه
اینرسی
جاذب

چکیده: در این تحقیق به بررسی و مقایسه نظری و عددی رفتار دینامیکی یک مدل متشکل از چهار میله و چهار مفصل الاستیک-پلاستیک تحت اثرات اینرسی در دو حالت تک سلولی و دو سلولی پرداخته شده است. بررسی نظری پس از پیاده‌سازی فرضیات و به دست آوردن معادلات دینامیکی حرکت، به صورت حل دستگاه معادلات غیرخطی در نرم‌افزار متلب و بررسی عددی به وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس صورت گرفته است. در این تحقیق، هدف به دست آوردن رابطه جاذب انرژی برحسب پارامتر اینرسی روی سازه مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای و نیز بررسی رفتار دینامیکی پارامترهای موثر و سازوکار فروریزشی سازه در دو حالت تک سلولی و دو سلولی خواهد بود. در نهایت به تحلیل و بررسی تأثیر دو سلولی در نظر گرفتن جاذب، در مقادیر پارامترهای مؤثر در پاسخ رفتار دینامیکی پرداخته شد. از نتایج به دست آمده مشاهده شد که فروریزش جاذب به صورت متقارن دو سویه خواهد بود. همچنین مقایسه و بررسی نتایج درستی فرضیات و روش‌های به کار رفته را در هر دو حالت تک سلولی و دو سلولی به اثبات می‌رساند.

۱- مقدمه

ضربه‌گیرها و جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگر انرژی استفاده می‌شود. ضربه‌گیرهای مکانیکی انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب می‌کنند. این نوع ضربه‌گیرها برگشت‌ناپذیر هستند و بعد از تغییر شکل دیگر قابل استفاده نیستند؛ بنابراین در طراحی این نوع جاذب‌ها مطالعات عمدتاً بر روی خواص مواد، پارامترهای هندسی و وجود و یا عدم وجود نقص در رفتار سازه به منظور دستیابی به جذب انرژی بیشتر متمرکز شده است [۱-۴]. در بسیاری از موارد ساده‌سازی و پیاده‌سازی یک آنالیز دینامیکی به واسطه اهمیت تأثیرات اینرسی در این نوع از آنالیزها برای بررسی پاسخ رفتار سازه‌ها تحت ضربه مؤثر می‌باشد. بسیاری از نویسندگان از روش‌های عددی اجزا محدود برای مقایسه کردن مقدار جذب انرژی برای جاذب‌هایی با سطح مقطع‌های مختلف تحت فروریزش محوری استفاده کرده‌اند. متأسفانه بسیاری از این مطالعات به رفتار ناشی از بارگذاری استاتیکی پرداخته است و همچنین در مطالعات اخیر نیز به طرح چند سلولی پرداخته شده است. اثرات اینرسی به دلیل انتشار و انعکاس موج تنش الاستیک و پلاستیک باعث تغییرات قابل توجهی در تغییر شکل جاذب‌ها می‌شود [۲]. پیشرفت در قدرت محاسباتی در دو دهه اخیر موجب شده است که محققان از روش‌های

عددی برای تجزیه و تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها و رفتار آن‌ها در جذب انرژی استفاده کنند [۵]. در مطالعه [۶]، کماتش متقارن محوری جاذب‌های استوانه‌ای^۱ الاستیک-پلاستیک قرار گرفته در معرض ضربه محوری با استفاده از یک تجزیه و تحلیل اجزا محدود مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مطالعه نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی جاذب‌های قرار گرفته در معرض ضربه محوری، حساس به سرعت و جرم می‌باشند، همچنین نشان داده شده است که مشخصات اینرسی جاذب همراه با خواص ماده، تعیین‌کننده الگوهای خاصی از گسترش موج تنش محوری می‌باشند. ونگ و همکاران [۷] یک مدل تحلیلی برای فرآیند نفوذ پرتابه در سازه ساندویچی براساس مدل انتشار موج تنش ارائه کردند. الگوهای تغییر شکل و سازوکارهای جذب انرژی در این تحلیل شامل حرکت دینامیکی هدف، خمش، تغییر فرم سازه و غیره می‌باشد که معادله حرکت غیرخطی پرتابه در هر مرحله از مکانیک لاگرانژی استخراج گردیده و حل شده است.

در این مقاله اثر اینرسی، اثر سائز اجزا و غیره بر روی پارامتر نیروی ضربه برحسب زمان در سرعت‌های برخورد گوناگون و نیز اثر اینرسی در جرم‌های متفاوت بررسی شده است. از نتایج این مقاله ناشی از مطالعه پارامتریک بر روی جاذب با سلول‌های متفاوت به دست آمده می‌توان به

مشابه با مطالعه حاضر را تحت تأثیر بارگذاری ضربه مورد بررسی قرار دادند. مدل نظری آنها متشکل از یک مدل کاملاً پلاستیک و یک مدل صلب-پلاستیک می‌باشد. متأسفانه آنالیز آنها اثرات اینرسی را در بر نداشت که عمدتاً مسئول ایجاد رفتار دینامیکی چنین سازه‌هایی با تفاوت قابل ملاحظه از رفتار استاتیک آنها می‌باشند. در ابتدا با توجه به مطالعات اولیه با در نظر گرفتن یافته‌های بیان شده در [۱۶]، انگلیس و کالادین^۶ [۱۷] دو نوع کلی از سازه‌های تغییر شکل دهنده به صورت پلاستیکی را در موقعیت‌های جذب‌کننده انرژی شناسایی نمودند (شکل ۱). این دو نوع سازه توسط اشکالی از منحنی‌های "بارگذاری استاتیکی برحسب تغییر شکل خمشی"^۷ تشخیص داده شدند که در شکل ۲ نشان داده شده است. در سازه‌های نوع ۲، منحنی نیرو-تغییرشکل خمشی دارای یک مقدار قله اولیه است و بعد از آن مقدار بارگذاری اعمال شده به سرعت به صورت نزولی دنبال می‌شود. آنها نشان دادند که تغییرشکل‌های نمونه‌های نوع ۲ نسبت به تغییرات در سرعت ضربه در نمونه‌های نوع ۱ از حساسیت بیشتری برخوردار هستند. همچنین آنها پاسخ‌های دو مجموعه از نمونه‌ها را هنگام بارگذاری با استفاده از یک دستگاه سقوط وزنه^۸ مورد بررسی قرار دادند. به منظور بررسی حساسیت سرعت پاسخ نمونه‌های نوع ۲ مطالعه آنها رفتار دینامیکی نمونه‌ها را به ترتیب به حساسیت اثرات اینرسی^۹ و نرخ کرنش ماده^{۱۰} ارتباط می‌داد. از طرفی مدل نظری که در پژوهش [۱۷] استفاده شده است، اثر اینرسی عرضی را در نظر می‌گیرد که به نظر می‌رسد با مدل پلاستیک مفصل که برای ارزیابی اثر نرخ کرنش ماده اتخاذ شده است، در تعارض باشد. در نتیجه، اثرات اینرسی را که در مطالعه حاضر به آن پرداخته شده است نمی‌توان با آن ادغام نمود. با توجه به این موارد کار آنها دارای خلأهای زیادی است. گاریسیانو^{۱۱} و همکاران [۱۸] و [۱۹]، فروریزش محوری گونه‌ای از جاذب‌های انرژی ساخته‌شده از ورق‌های مشبک نشان داده شده در شکل ۳ را تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که سازوکار فروریزش بدین صورت است که در ابتدا سلول‌ها با افزایش بار بسته می‌شوند و یک گشتاور پلاستیک نسبت به تقاطع مقطع‌ها در گره‌ها اعمال می‌شود. این تغییرات پلاستیک به تدریج گسترش می‌یابد. همچنین سازوکار فروریزش به طور مشخص به صورت لولای پلاستیک در اتصال سلول‌ها می‌باشد. مطالعات انجام شده توسط آنها نشان می‌دهد که نیروی بیشینه اولیه با افزایش زاویه سلول‌ها در الگوها، افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج به دست آمده مشخص شده است که با افزایش تعداد ستون‌ها نیروی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد ولی افزایش تعداد سلول‌های طولی تأثیر چندانی در نیروی بیشینه اولیه ندارد [۲۰]. در ادامه مطالعه [۲۱] به مطالعه تجربی

این مورد اشاره کرد که اینرسی عامل اصلی در بار مخصوص می‌باشد. جونز و أبرامویچ^۱ [۸]، گذرمچالگی محوری لوله‌ها را در حالات استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. آنها دریافتند نقطه گذار به عواملی همچون طول لوله، هندسه سطح مقطع، جنس، کرنش - سختی و شرایط مرزی بستگی دارد. خلاء مطالعات نظری انجام گرفته توسط آنها این است که پژوهش آنها معمولاً از نقش اثرات اینرسی چشم‌پوشی می‌کند و مسائل را به صورت شبه استاتیکی در سرعت‌های پایین بررسی کرده‌اند. در آزمون‌های ضربه‌ای، بر روی سازوکار شکست و ظرفیت تحمل بار متمرکز می‌شوند. بارگذاری ضربه‌ای به طور متوسط به وسیله پرتاب چکش به صورت سقوط آزاد صورت می‌گیرد. با توجه به مشخصه بارگذاری ضربه‌ای، پاسخ دینامیکی سازه تحت بار ضربه‌ای به طور آشکار نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی متفاوت است [۹]. جونز و همکار [۱۰]، به مطالعه تجربی و عددی بر روی رفتار لوله‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری ضربه‌ای و به طور کلی بر روی پارامترهای هندسی، شرایط مرزی دینامیکی، نوع سازوکار فروریزشی جاذب به منظور جذب انرژی بهتر پرداخته‌اند. در بارگذاری‌های دینامیکی یکی از مهم‌ترین مسائلی که باید به آن توجه شود، پاسخ جاذب و نوع فروریزش آن در اثر اعمال نیروی ضربه می‌باشد. از طرفی نیروی ضربه که به‌عنوان پارامتر مؤثر در آنالیزهای ضربه حائز اهمیت است، به‌عنوان پارامتر سنجش میزان کارآمدی در طراحی جاذب‌های انرژی به شمار می‌رود. همچنین نیروی بیشینه اولیه مربوط به تغییرشکل الاستیک جاذب می‌باشد که هرچه مقدار این نیرو کمتر باشد، جذب انرژی مطلوب‌تر است. در این راستا مطالعه تایی، هنگ و هو^۲ [۱۱]، نشان می‌دهد که تغییر جرم ضربه‌زننده فقط بر روی نیروی ضربه‌ای و نوع تغییرشکل سازه اثر می‌گذارد و تأثیر قابل توجهی بر روی بهره‌وری جذب انرژی ندارد. همچنین تغییر سرعت جسم ضربه‌زننده به طور مستقیم موجب تغییر در نیروی ضربه و باعث تغییرات در نیروی بیشینه اولیه و نیروی میانگین می‌شود. در میان طراحی‌های مختلف فرآیند لهیدگی^۳ محوری به‌گونه‌ای است که ابتدا نیروی لهیدگی به بیشینه اولیه می‌رسد تا بر مقاومت اولیه نمونه‌ها غلبه کند، سپس نیرو کاهش و نوسان پیدا می‌کند سپس قسمت‌های له شده افزایش می‌یابد تا به پایان لهیدگی برسد [۱۲]. در پژوهش ژنگ^۴ و همکاران [۱۳]، با هدف بهینه‌سازی عوامل مؤثر در جذب انرژی، شکل ساختاری سازه به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته می‌شود. وظیفه مهم در توسعه سازه‌های جذب انرژی کاهش نیروی بیشینه اولیه در پاسخ نیرو-جابه‌جایی است و در هر دو حالت تجربی و عددی مشاهده شده است. در این راستا ایجاد یک نقص کماتشی می‌تواند الگوی مناسبی باشد. این الگوها می‌تواند شامل شیاردار کردن، کشیدن نوار، دنداندار کردن باشد. در پژوهش موری و گزبیتا^۵ [۱۴] و [۱۵] بعضی از سازه‌های جذب‌کننده انرژی

6 Calladine, English
7 Static load deflection
8 Drop hammer apparatus
9 Inertia
10 Strain-rate sensitivity
11 Garciano

1 Jones, Abramowicz
2 Tai, Huang, Hu
3 Crush Load
4 Zhang
5 Murray, Grzebieta

ایده‌ها و فرضیات جدید شامل پیاده‌سازی ایده اثرات اینرسی و نظریه دو سلولی در نظر گرفتن جاذب و نیز لحاظ کردن اثرات الاستیک برای تعیین اندازه نیروی حداکثر، برخلاف تحقیقات پیشین انجام شده، ضرورت انجام این مطالعه را نشان می‌دهد.

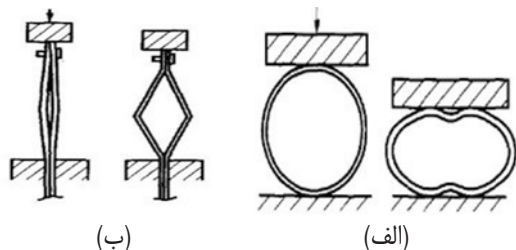


Fig. 1. Specimens a) type 1 b) type 2, with type of loading, before and during of deformation [17]

شکل ۱: نمونه‌های (الف) نوع ۱ و (ب) نوع ۲، همراه با نحوه بارگذاری، قبل و در طول فرآیند تغییرشکل [۱۷]

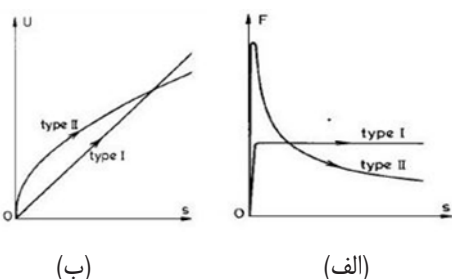


Fig. 2. Curves a) force b) energy with bending deformation of 1 & 2 structure types [17]

شکل ۲: نمودارهای (الف) نیرو و (ب) انرژی برحسب تغییرشکل خمشی سازه‌های نوع ۱ و ۲ [۱۷]

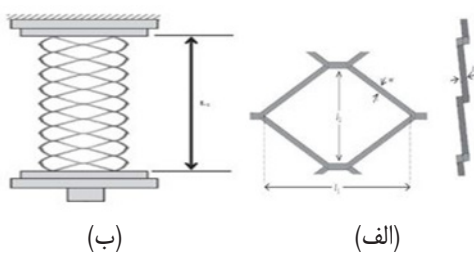


Fig. 3. a) Lateral and front of cell views b) schematic of expanded cylindrical absorber [18, 19]

شکل ۳: (الف) نمای مقابل و جانبی سلول و (ب) شماتیک جاذب استوانه‌ای بسط داده شده [۱۸ و ۱۹]

۲- روش نظری:

۲-۱- تعاریف، مبانی و فرضیات اولیه:

مطابق با شکل ۴ که شماتیکی از مدل جاذب تک سلولی مورد نظر است، طول، ضخامت و پهنای هر میله در جاذب به ترتیب برابر H ، L و B و نیز زاویه راستای هر میله با محور Y نشان داده می‌شود، از طرفی m^* نصف جرم هر میله (یعنی میله‌های AC ، AD ، CB و DB در شکل ۴)، همچنین

تأثیر زاویه سلول‌ها در نمونه‌های استوانه‌ای مشبک مسطح^۱ (مقطع مربعی) بر اثر بارگذاری محوری پرداخته است و آن را با حالت استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای مشبک با مقطع دایروی مقایسه نموده است. این نتیجه حاصل شد که نمونه‌های مشبک مسطح تأثیر به‌سزایی در افزایش جذب انرژی و نیروی میانگین خواهند داشت.

تام و کالادین^۲ [۲۲] یک مطالعه از مسأله مشابه با مقاله حاضر را به روش تجربی انجام دادند. آزمایش‌های آنها در یک دستگاه سقوط وزنه بر روی تعداد زیادی از نمونه‌ها با هندسه اولیه یکسان از دو ماده متفاوت گزیده انجام شد. آنالیز نظری اصلاح شده آنها نشان می‌دهد که تغییرشکل سازه‌های نوع ۲ شامل دو فاز یا دو مرحله است: فاز اول تنها شامل فشارش پلاستیکی^۳ نمونه‌ها ($M = 0, N = N_p$) و فاز دوم تنها شامل چرخش محض در مفصل‌های پلاستیک ($M = M_p, N = 0$) است. در نتیجه، اینرسی اثر غالب در فاز اول است و رفتار فاز دوم نسبت به نرخ کرنش حساس‌تر می‌باشد. با این حال نظریه دو فازی آنها، با نظریه به کار رفته در مطالعه حاضر بسیار متفاوت است؛ به این صورت که در آنالیز آنها تأثیرات الاستیک در مدل‌های سازه مدنظر قرار نگرفته است و یک درک واضحی را از نقش تنش تسلیم دینامیکی ارائه نمی‌دهد. در نتیجه نتایج پژوهش حاضر در تخمین تغییرات نیروی ضربه به‌خصوص مقدار نیروی بیشینه و دیگر پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی، در سطح کلی‌تری نسبت به نتایج آنها خواهد بود. توانایی فلزات نرم و شکل‌پذیر برای جذب مقدار زیادی انرژی در طول کرنش پلاستیکی، این مواد را ذاتاً برای استفاده در وسیله نقلیه، ماشین‌آلات، سازه‌های به کار رفته در صنایع مختلف و به طور کلی سازه‌هایی که در معرض تصادم و برخورد هستند، مناسب می‌نماید. تقاضا برای افزایش ایمنی به ویژه در ارتباط با صرفه‌جویی در وزن سازه‌ها، منجر به ترویج استفاده از فولادهای نرم و آلیاژهای آلومینیوم شده است. [۲۳ و ۲۴]

مدل چهار میله چهار مفصل الاستیک-پلاستیکی مورد تحلیل در این پژوهش، به سبب استحکام بالا و وزن کم به دلیل ماده نرم و شکل‌پذیر به کار رفته در آن، ظرفیت بالای جذب انرژی ضربه به علت نوع پیکربندی متقارن دوجبهته آن و چندین مورد دیگر، اخیراً به‌عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفته است. هدف در پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه نظری و عددی یک سازه یکپارچه است که به صورت یک مدل تک سلولی و دو سلولی تحلیل شده است، به گونه‌ای که تأثیرات الاستیک-پلاستیکی و اثرات اینرسی برای این جاذب جذب‌کننده انرژی به صورت یک آنالیز دینامیکی با یکدیگر ادغام می‌شود. در طی این فرآیند تغییرشکل و فروریزش دو جهته متقارن سازه صورت گرفته و تغییرات پارامترهای مؤثر پاسخ دینامیکی شامل سرعت، جابه‌جایی، کرنش و خصوصاً "نیروی ضربه" و "انرژی جذب شده" در فاز الاستیک و فشارش پلاستیکی نمونه تعیین می‌شود. مطالعه حاضر به دلیل بررسی رفتار دینامیکی هندسه خاصی از انواع جاذب‌های مشبک با

- 1 Flattened
- 2 Tam , Calladine
- 3 Plastic compression

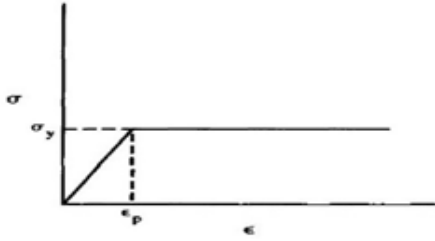


Fig. 5. Stress-strain curves of elastic-perfect plastic material [22]

شکل ۵: نمودار تنش کرنش ماده الاستیک - کاملاً پلاستیک [۲۲]

۲-۲- معادلات دینامیکی حرکت :

مختصات کارترین $X-Y$ نشان داده شده در شکل ۴، با مبدأ واقع در پایین مدل یعنی نقطه B استفاده می‌گردد. در این مختصات $(0, Y)$ مختصات نقطه A و $(X, Y/2)$ مختصات نقطه D می‌باشد. به واسطه فرض تقارن دو سویه، سرعت‌های عمودی نقاط C و D معادل با نصف سرعت نقطه A است. در نتیجه

$$V_c = V_D = \frac{V_A}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{dY}{dt} \right) \quad (1)$$

انرژی جنبشی کل سامانه با مشتق زمانی از مختصات x و Y به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{1}{2} (G + 3m^*) \left(\frac{dY}{dt} \right)^2 + 2m^* \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

روابط جابه‌جایی‌های Y و X به صورت زیر است:

$$Y = 2(L-u) \cos(\theta) \quad X = (L-u) \sin(\theta) \quad (3)$$

که u طول کوتاه شدگی هر میله در راستای طولی میله است. نیروهای تعمیم یافته مطابق با مختصات تعمیم یافته u و θ به ترتیب عبارت‌اند از: $Q_1 = -N$ و $Q_2 = -M$. در نتیجه از معادله (۲) و (۳) و نیز از معادله لاگرانژ نوع دوم، پس از جداسازی برحسب مشتقات شکل نهایی معادلات حرکت سامانه به صورت معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

$$(G + 3m^*) \left(\frac{d^2 Y}{dt^2} \right) = \frac{4M \sin(\theta)}{L-u} + 2N \cos(\theta) \quad (4)$$

$$m^* \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = N \sin(\theta) - \frac{2M \cos(\theta)}{L-u} \quad (5)$$

در ادامه به صورت زیر به بی‌بعدسازی کمیت‌ها می‌پردازیم:

$$x = \frac{x}{L}, y = \frac{Y}{L}, \gamma = \frac{G}{m^*}, n = \frac{N}{N_p}, m' = \frac{M}{N_p L}$$

$$m = \frac{M}{M'_p}, \varepsilon = \frac{u}{L}, T_0 = \left(\frac{m^* L}{N_p} \right)^{\frac{1}{2}}, \tau = \frac{t}{T_0} \quad (6)$$

که در روابط فوق N_p نیروی محوری کاملاً پلاستیک سطح مقطع، $M_p = \frac{\sigma_y B H^2}{4}$ گشتاور خمشی کاملاً پلاستیک سطح مقطع، ε کرنش محوری (فشارشی) میله‌ها و T_0 زمان مشخصه سامانه می‌باشند. همچنین با

G و V_0 به ترتیب جرم و سرعت ضربه‌زننده، M گشتاور خمشی و N نیروی محوری هر میله می‌باشد. فرضیات به کاررفته برای پیاده‌سازی و به دست آوردن معادلات دینامیکی حرکت سامانه به شرح زیر است:

۱. ماده این مدل، الاستیک-کاملاً پلاستیک است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، σ_y و ε_p به ترتیب نشاندهنده تنش تسلیم و کرنش الاستیک بیشینه می‌باشند و ε کرنش فشارشی میله‌ها، برابر با نسبت u/L که u طول کوتاه شدگی هر میله است.

۲. به منظور در نظر گرفتن اثرات اینرسی، فرض می‌کنیم که هر میله دارای جرم $2m^*$ است، که در دو انتهای آن متمرکز شده است. در نتیجه، در هر یک از چهار گوشه این مدل (یعنی نقاط A, B, C, D در شکل ۴) یک جرم توده‌ای m^* وجود دارد. همچنین ضربه‌زننده با جرم G در یک سرعت اولیه V_0 قبل از ضربه حرکت می‌کند و از لحظه ضربه تا پایان پاسخ، متصل به بالای مدل سازه باقی می‌ماند. همچنین ضربه میان ضربه‌زننده و بالای مدل کاملاً غیرالاستیک فرض می‌شود. پارامتر اثر اینرسی γ نسبت جرم ضربه‌زننده به نصف جرم هر میله را نشان می‌دهد در نتیجه برابر نسبت G/m^* خواهد بود.

۳. تغییرشکل خمشی^۲ در نواحی کوچک در اطراف گوشه‌ها (نقاط A, B, C, D در شکل ۴) به وجود می‌آید که به صورت مفصل‌های الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته می‌شوند. این مفصل‌ها می‌توانند علاوه بر تغییرشکل خمشی، تغییرشکل محوری را نیز تحمل کنند.

۴. در طول پاسخ دینامیکی مدل، تفاوت‌ها در تغییرشکل و نیروی محوری در نیمه بالایی و نیمه پایینی هر میله ناچیز گرفته شده است؛ به طوری که مدل با توجه به تغییرشکل و نیروهای داخلی خود، از دو جهت متقارن (هم عمودی و هم افقی) باقی می‌ماند.

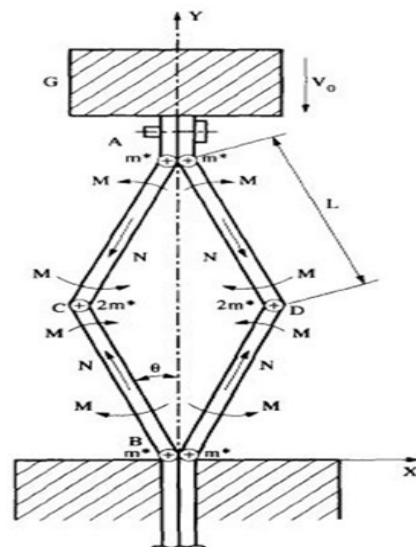


Fig. 4. Schema of single cell model in analysis of type of structure 2 [22]

شکل ۴: شماتیک مدل تک سلولی در آنالیز سازه‌های نوع ۲ [۲۲]

- 1 Lumped mass
- 2 Flexural deformation

رابطه (۱۲) با استفاده از روش الگوریتم تکرار با شرایط اولیه در نظر گرفته شده در رابطه (۱۳) حل می‌گردند.

۲-۳- معادلات و ضرایب ترکیبی به همراه شروط لازم :

برای یک تیر-ستون^۲ کاملاً پلاستیک که در معرض یک گشتاور خمشی M و یک نیروی محوری N به طور همزمان قرار گرفته است (شکل ۶)، یو و جانسون^۳ [۲۵] چهار نوع توزیع تنش را در طول ضخامت آن در حین بارگذاری، بسته به ترکیب M و N شناسایی نموده‌اند. این انواع توزیع تنش که با حروف E_s , PI , PII , N_s نشان داده می‌شوند، در فهرست زیر آورده شده‌اند. در آنالیز مدل حاضر، از آنجایی که مفصل‌های الاستیک-پلاستیک متحمل یک تاریخچه پیچیده از بارگذاری تا تسلیم کامل در پاسخ به ترکیب‌های مختلف M و N می‌گردند، توزیع تنش در اطراف یک برش مفصل مطابق با شکل ۷، به صورت موارد زیر خلاصه می‌شوند:

الف) حالت الاستیک (E_s) که در آن تمامی فیبرها در محدوده الاستیک هستند و شرط $c \geq \frac{H}{2} + d$ برآورده می‌شود.

ب) حالت پلاستیک اولیه^۴ (PI) که در آن بعضی از فیبرها در یک طرف برش تسلیم می‌شوند و شرط $\frac{H}{2} - d < c$ و $\frac{H}{2} + d > c$ را ارضا می‌کنند.

ج) حالت پلاستیک ثانویه^۵ (PII) که در آن بعضی از فیبرها در هر دو طرف برش تسلیم می‌شوند و شرط $\frac{H}{2} - d > c$ و $c > 0$ برآورده می‌شود

د) حالت غشای محض^۶ (N_s) که در آن تمامی فیبرها در برش تسلیم می‌شوند ($c=0$)، درحالی‌که تغییرشکل خمشی برش می‌تواند هنوز ایجاد شود.

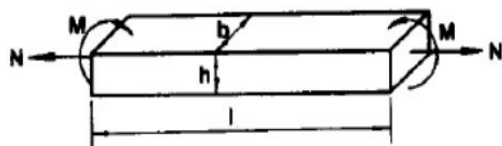


Fig. 6. A straight beam with rectangular area under pure bending and axial force loading [25]

شکل ۶: یک تیر مستقیم اولیه با سطح مقطع مستطیلی، تحت همزمان ممان خمشی محض و نیروی محوری [۲۵]

در شرایط چهارگانه فوق، c و d پارامترهای هندسی توزیع تنش می‌باشند که طبق تعاریف، c فاصله میان محور خنثی و فصل مشترک نواحی الاستیک و پلاستیک و d فاصله میان محور مرکزی و محور خنثی در یک برش از میان مفصل‌ها می‌باشد. در حقیقت این پارامترها به عنوان پارامترهای مشخص‌کننده گذار از یک ناحیه توزیع تنش به ناحیه دیگر می‌باشند که در شکل ۷ همراه با مرز و حدود مقادیر آنها در هر یک از این نواحی به صورت جداگانه نشان داده شده‌اند.

توجه به روابط فوق، گشتاور خمشی بدون بعد m و نیروی محوری بدون بعد n به صورت نسبت نیروها و گشتاورهای تعمیم یافته به مقادیر پلاستیک آنها تعریف می‌شوند. اکنون معادلات حرکت می‌توانند به فرم بدون بعد زیر تغییرشکل دهند:

$$\ddot{x} = n \sin(\theta) - \frac{2m' \cos(\theta)}{1 - \varepsilon} \quad (7)$$

$$\dot{\eta} = \frac{[4m' \sin(\theta)/(1 - \varepsilon) + 2n \cos(\theta)]}{\gamma + 3} \quad (8)$$

روابط هندسی بدون بعد زیر برای نرخ کرنش و نرخ زاویه بازشدگی جاذب به دست می‌آیند:

$$\dot{\varepsilon} = -\left(\dot{x} \sin(\theta) + \frac{\dot{y} \cos(\theta)}{2} \right) \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{x} \cos(\theta) - \frac{\dot{y} \sin(\theta)}{2}}{1 - \varepsilon} \quad (10)$$

طبق اصل پایستگی تکانه خطی، سرعت بی‌بعد ضربه‌زننده و بالای نمونه (سرعت عمودی) بلافاصله بعد از ضربه به شکل رابطه بی‌بعد (۱۱) می‌باشد.

$$v_0^* = \frac{v_0 \gamma}{\gamma + 2} \quad (11)$$

از طرفی برای حل معادلات (۷) و (۸) به روش رانگ کوتاه در نرم‌افزار متلب، باید این معادلات را به فضای حالت برده و با قرار دادن $\zeta = \dot{x}$ و $\eta = \dot{y}$ ، این معادلات را به معادلات با مشتق مرتبه اول تبدیل می‌کنیم که در نتیجه پارامترهای ζ و η به ترتیب بیانگر سرعت‌های افقی و عمودی می‌باشند. در نهایت یک دستگاه معادلات دیفرانسیلی معمولی^۱ به شکل معادلات (۱۲) را به دست می‌آوریم.

$$\dot{\zeta} = n \sin(\theta) - 2m' \cos(\theta)/(1 - \varepsilon)$$

$$\dot{\eta} = [4m' \sin(\theta)/(1 - \varepsilon) + 2n \cos(\theta)]/\gamma + 3$$

$$\dot{\varepsilon} = -\left(\zeta \sin(\theta) + \frac{\eta \cos(\theta)}{2} \right) \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = (\zeta \cos(\theta) - \eta \sin(\theta)/2)/(1 - \varepsilon)$$

که با توجه به فرضیات بخش ۲-۱، نقص اولیه در نظر گرفته θ_0 و نیز معادله (۱۱)، شرایط اولیه دستگاه معادلات فوق به صورت روابط (۱۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\zeta_{(0)} = 0$$

$$\eta_{(0)} = -v_0^* = -\frac{v_0 \gamma}{\gamma + 2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{(0)} = 0$$

$$\theta_{(0)} = \theta_0$$

که در نهایت به کمک نرم‌افزار متلب دستگاه معادلات به دست آمده

- 2 Beam-column
- 3 Yu , Johnson
- 4 Primary plastic state
- 5 Secondary plastic state
- 6 Pure membrane state

1 Ordinary differential equations

(ب) برای ناحیه PI :

$$n = 1 - \frac{(\theta - \theta_0)}{8\alpha\varepsilon_p} \left(1 - \frac{2\alpha(\varepsilon - \varepsilon_p)}{\theta - \theta_0} \right)^2$$

$$m' = \frac{H}{4L} \left(\frac{(\theta - \theta_0)}{8\alpha\varepsilon_p} \left(1 - \frac{2\alpha(\varepsilon - \varepsilon_p)}{\theta - \theta_0} \right)^2 \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \left[3 - \left| 1 - \frac{2\alpha(\varepsilon - \varepsilon_p)}{\theta - \theta_0} \right| \right]$$

(ج) برای ناحیه PII :

$$n = \frac{2\alpha\varepsilon}{(\theta - \theta_0)}$$

$$m' = \frac{H}{8L} \left[3 \left(1 - \left(\frac{2\alpha\varepsilon}{\theta - \theta_0} \right)^2 \right) - \left(\frac{2\alpha\varepsilon_p}{\theta - \theta_0} \right)^2 \right]$$

(د) برای ناحیه N_s :

$$n = 1$$

$$m' = 0$$

۲-۴- مثال نمونه به کار رفته:

برای نشان دادن یک مثال نمونه برای تحلیل رفتار دینامیکی جاذب، بات وجه به آزمون‌های انجام‌شده توسط تام و کالادین^۱ [۲۰] که بر روی یک نمونه فولاد نرم^۲ صورت گرفت، مقادیر پارامترهای هندسی، فیزیکی و همچنین خواص نمونه، به صورت مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند. همچنین تام و کالادین^۳ [۲۰] طول کلی مفصل پلاستیک میانی را در آزمایش‌های خود اندازه‌گیری نمودند و دریافتند که 2α بین ۳ تا ۴/۵ تغییر

جدول ۱: پارامترهای هندسی، فیزیکی و خواص نمونه [۲۰]

Table 2. Parameters of geometric, physical and properties of specimens [20]

مقادیر	کمیت‌ها
۵۰	پهنای میله‌ها B , mm
۱/۶	ضخامت میله‌ها H , mm
۲۵	طول میله‌ها L , mm
۷۸۰۰	چگالی میله‌ها ρ , kg/m ³
۲۳۵	تنش تسلیم ماده σ_y , N/mm ²
۲/۳۴	جرم ضربه‌زننده G , kg
۳۰۰	نسبت جرمی γ
۵/۴	سرعت ضربه‌زننده V_0 , m/s
۱/۶	زاویه کجی اولیه θ_0 (°)

- 1 Tam, Calladine
- 2 Mild steel specimen
- 3 Tam, Calladine

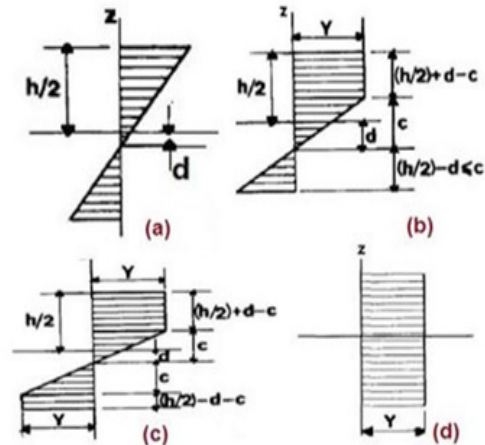


Fig. 7. Distribution of different stress around a section of elastic-plastic joint under loading [25]

شکل ۷: توزیع تنش‌های متفاوت در اطراف یک مقطع از طول ضخامت مفصل الاستیک - پلاستیک در حین بارگذاری [۲۵]

از سوی دیگر پارامترهای c و d با کرنش از خط مرکزی مفصل ε ، تغییر در انحنای مفصل Δk و طول مؤثر مفصل ارتباط داده می‌شوند. با توجه به رابطه کرنش الاستیک بیشینه، روابط نهایی (۱۴) و (۱۵) بین پارامترهای c و d برقرار است.

$$c = \frac{\alpha H \varepsilon_p}{\theta - \theta_0} \quad (14)$$

$$d = \frac{\varepsilon}{\Delta k} = \frac{\alpha H \varepsilon}{\theta - \theta_0} \quad (15)$$

در نتیجه مقادیر پارامترهای c و d در هر لحظه زمانی به مجهولات سوم و چهارم دستگاه معادله (۱۲) یعنی ε و θ مرتبط می‌باشند. از طرفی همانطور که بیان شد، برای حل نمودن دستگاه معادلات در هر چهار حالت توزیع تنش ذکر شده، نیازمند به ارضا شدن شرایطی میان پارامترهای c و d هستیم. با توجه به روابط بی‌بعدسازی (۶)، رابطه زیر بین پارامترهای m و m' برقرار است:

$$m' = \frac{mH}{4L} \quad (16)$$

با توجه به سطح زیر نمودارها و مرز نواحی مشخص شده در شکل ۷ و با توجه به روابط بین انحنای، تنش، نیروی تعمیم یافته N و گشتاور خمشی M و نیز با توجه به روابط بی‌بعدسازی تعریف شده برای پارامترهای n و m ، روابط حاکم میان ضرایب مجهول دستگاه معادلات (۱۲) یعنی n و m' برحسب دیگر پارامترها به شکل نهایی زیر خواهد بود:

(الف) برای ناحیه E_s :

$$n = \frac{d}{c} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}$$

$$m' = \frac{H(\theta - \theta_0)}{8\alpha L \varepsilon_p} \quad (17)$$

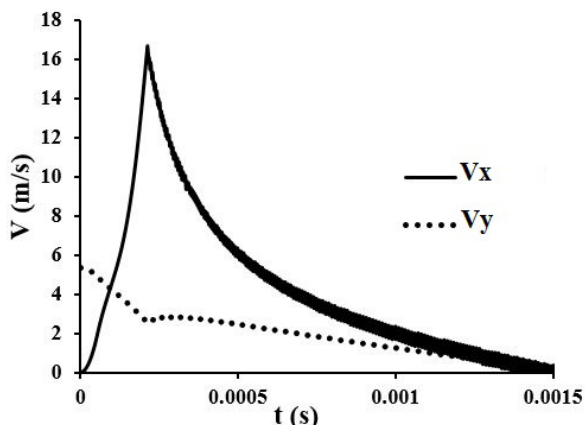


Fig. 9. Variation curve of horizontal and vertical velocities according to time for A & D points (Fig. 4) of single cell absorber

شکل ۹: نمودار تغییرات سرعت‌های افقی و عمودی برحسب زمان به ترتیب برای نقاط A و D (شکل ۴) جاذب تک سلولی

افقی و کاهش تند سرعت عمودی به یک ناپیوستگی می‌رسیم که شامل حالت‌های یا است و فاز بعدی پاسخ که پس از حالت بیشینه رخ می‌دهد، مطابق با حالت در تمامی مفصل‌های (و میله‌های) مدل می‌باشد و با توجه به زمان در نظر گرفته برای تحلیل، در انتهای پاسخ زمانی، V_x و V_y هر دو به مقدار صفر می‌رسند. در نتیجه عملاً تمامی انرژی جنبشی اولیه ناشی از برخورد به کار پلاستیک (انرژی جذب شده) در میله‌ها و مفصل‌ها تبدیل می‌شود.

اکنون با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب به تغییرات مجهولات سوم و چهارم دستگاه معادلات (۱۲)، یعنی کرنش فشاری ایجاد شده بر اثر طول کوتاه شدگی میله‌ها (u) و زاویه بازشدگی جاذب تک سلولی، برحسب زمان می‌پردازیم.

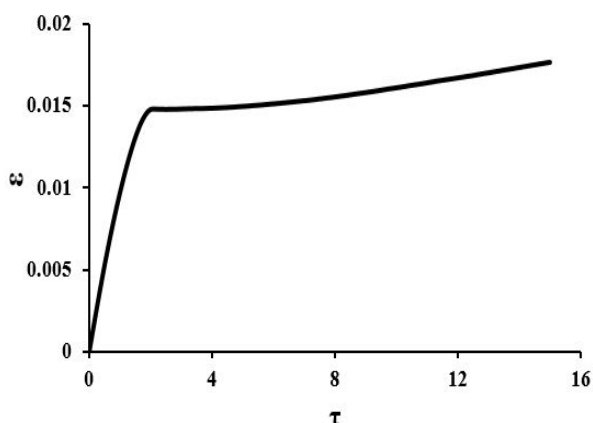


Fig. 10. Strain variation- time curve of single cell absorber

شکل ۱۰: نمودار تغییرات کرنش جاذب تک سلولی برحسب زمان بی‌بعد

۲-۶- نظریه حالت جاذب دو سلولی :

در ادامه برای حل دستگاه معادلات ریاضی غیرخطی در حالت دو سلولی و امکان‌پذیر شدن کدنویسی و پیاده‌سازی نظری رفتار دینامیکی سازه در نرم‌افزار متلب، فرضیات و ساده‌سازی‌های زیر در حالت تحلیل مدل به صورت جاذب دو سلولی صورت گرفت:

می‌کند. در این مطالعه مقدار این پارامتر $\alpha = 2$ در نظر گرفته شد. مدت زمان پاسخ دینامیکی در این تحلیل در حدود $t = 1/5$ میلی ثانیه خواهد بود.

۲-۵- نتایج نظری جاذب تک سلولی :

نیروی ضربه‌ای که بر روی سازه توسط ضربه‌زننده اعمال می‌شود، می‌تواند از رابطه (۲۱)، زمانی که تاریخچه تغییرشکل سازه با حل نمودن دستگاه معادلات حاکم (۱۲) به دست می‌آید، محاسبه شود.

$$p = -G \left(\frac{d^2 y}{dt^2} \right) \quad (21)$$

با توجه به شکل ۸، که سازوکار تغییرات نیروی ضربه سازه را در طول تاریخچه تغییرشکل آن نشان می‌دهد، پاسخ دینامیکی این سازه تحت ضربه در چهار فاز رخ می‌دهد. در فاز ۱ نیروی ناشی از ضربه به سرعت در میله‌ها افزایش می‌یابد، تا در نهایت نیرو به مقدار بیشینه خود رسیده و سپس در فاز ۲ نیرو تقریباً (در نیروی حداکثر) برای یک دوره کوتاه ثابت باقی می‌ماند. در فاز ۳ نیرو به سرعت از مقدار نیروی حداکثر نزول می‌کند و در فاز ۴ نیرو به مقدار ثابت و پایدار دیگری نزدیک می‌شود که کوچک‌تر از نیروی حداکثر است. از طرفی با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در حل معادلات و توجه به این نکته که نیروی بیشینه مربوط به تغییرشکل الاستیک سازه می‌باشد، تغییرشکل در فاز اول و دوم شامل حالت‌های $E_s - P - PII$ یا $E_s - P$ است، در نتیجه در دو فاز اول فشارش محوری نقش اصلی را در تغییرات نیروی ناشی از ضربه ایفا می‌کند. همچنین فاز ۳ مطابق با حالت N_s در تمامی مفصل‌های (و میله‌های) مدل می‌باشد و نیز در این فاز فشارش محوری میله‌ها و تغییرشکل خمشی مفصل‌ها با هم وجود دارند و بالاخره، چرخش در مفصل‌های پلاستیک در فاز ۴ غالب است.

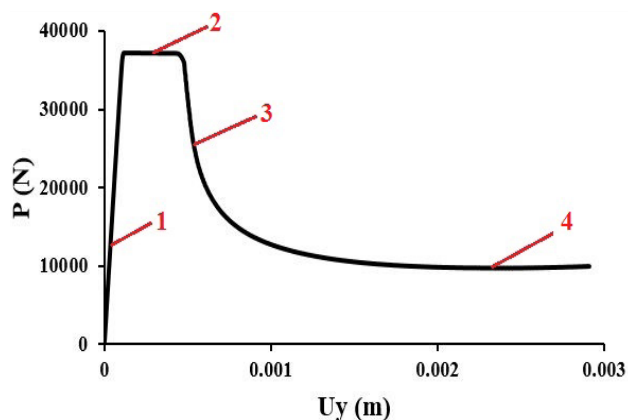


Fig. 8. Force- Displacement curve of single cell absorber, Uy Vertical Displacement of specimen's upper

شکل ۸: نمودار تغییرات نیرو - جابجایی جاذب تک سلولی U_y تغییرات جابه‌جایی عمودی بالای مدل

اگر سرعت‌های افقی و عمودی در واحد SI را به ترتیب با V_x و V_y نشان دهیم، تغییرات زمانی سرعت به صورت شکل ۹ خواهد بود. با توجه به شکل ۹، در هر دو منحنی، از ابتدای شروع تحلیل با افزایش تند سرعت

گرفته در تحلیل نرم‌افزار متلب، حالت غشای جاذب تک سلولی که حالت نهایی تغییرشکل از میان چهار حالت توزیع تنش ذکر شده می‌باشد، حدود ۱۰ درجه است؛ بنابراین زاویه توقف در حالت ایده‌آل باید کمتر از این مقدار در نظر گرفته شود تا قبل از رسیدن به این زاویه و قبل از جذب تمام انرژی و تغییرشکل توسط سلول اول، سلول اول متوقف و نیروی ضربه به سلول دوم منتقل و سلول دوم تحت فروریزش قرار گیرد. همچنین برای انتخاب صحیح زاویه توقف و نیز برای مقایسه روش‌های نظری و عددی، از نرم‌افزار آباکوس این مقدار در حدود ۶/۴ درجه به دست آمد. به همین دلیل این زاویه را در نظریه جاذب دو سلولی برابر ۶/۴ درجه در نظر گرفتیم و در ادامه با زاویه توقف‌های متفاوت نیز بررسی‌ها را بسط دادیم.

۲-۸- نتایج نظریه جاذب دو سلولی:

با توجه به فرضیات و نکات ذکر شده و نیز رابطه (۲۱) موجود بین نیرو و مشتق زمانی، نمودار نیرو - جابجایی جاذب دو سلولی در حالتی که تغییرات هر دو سلول را به صورت همزمان و در ادامه یکدیگر در نظر بگیریم به صورت شکل ۱۲ خواهد بود به دلیل ایجاد دو قله بیشینه به صورت پشت سر هم، مدت زمانی (و یا جابه‌جایی) که جاذب دو سلولی در فاز بیشینه نیروی ضربه است، نسبت به حالت تک سلولی، افزایش پیدا کرده که این موضوع باعث افزایش سطح زیر نمودار نیروی ضربه‌ای می‌شود.

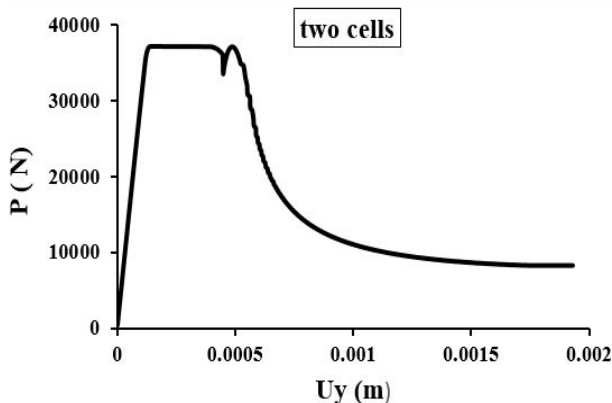


Fig. 12. Force- Displacement curve of double cells absorber with stopping angle=6.4° for variation of vertical displacement

شکل ۱۲: نمودار تغییرات نیرو - جابجایی جاذب دو سلولی، با زاویه توقف $\theta_s = 6.4^\circ$ تغییرات جابه‌جایی عمودی

تغییرات زمانی کرنش فشاری ایجاد شده ناشی از کوتاه شدگی میله‌ها و نیز تغییرات زمانی زاویه بازشدگی میله‌های جاذب دو سلولی نسبت به محور y برای هر دو سلول در امتداد یکدیگر به ترتیب مطابق با شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌باشد. با توجه به نتایج شکل‌های ۱۲ و ۱۵ مشخص است که جابه‌جایی و زاویه بازشدگی نهایی میله‌ها ناشی از فروریزش جاذب دو سلولی دارای مقادیری کمتر از حالت تک سلولی خواهد بود و این موضوع به این دلیل رخ داده است که تأثیر ضربه به نحوی که در نظریه جاذب دو سلولی بیان شده است، بر روی هر دو سلول توزیع می‌شود. لازم به ذکر است

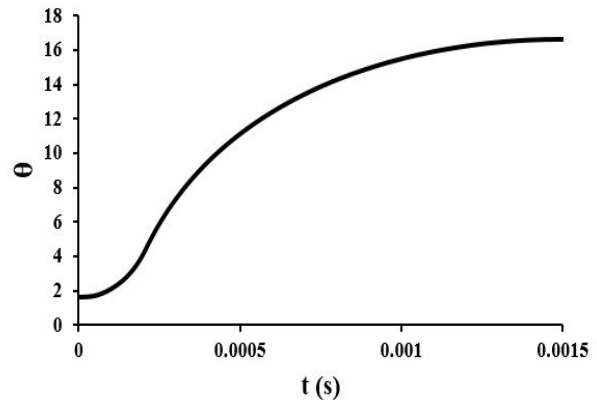


Fig. 11. Opening angle variation of single cell absorber per time curve

شکل ۱۱: نمودار تغییرات زاویه بازشدگی میله‌های جاذب تک سلولی بر حسب زمان

الف) سلول دوم از لحاظ تمامی مشخصات شامل ویژگی‌های هندسی، فیزیکی و ماده سازنده، کاملاً متقارن و مشابه مشخصات سلول اول می‌باشد. همچنین تعاریف و مبانی ذکر شده برای جاذب تک سلولی در بخش ۲-۱، برای سلول دوم نیز برقرار است.

ب) به دلیل فرض قبل، امکان‌پذیر بودن تحلیل فوق به علت حل شدن دستگاه معادلات غیرخطی پیچیده، حفظ فرضیات و ایده‌های روش نظری ذکر شده در حالت تک سلولی و مقایسه نتایج این حالت با حالت تک سلولی، معادلات دینامیکی حرکت برای سلول دوم همان معادلات حرکت به دست آمده در حالت تک سلولی در نظر گرفته شد. در نتیجه ایده اثرات اینرسی در نظر گرفته شده در این حالت نیز، اثر غالب و تعیین‌کننده در فرآیند تحلیل سازه خواهد بود.

ج) در نظریه جاذب دو سلولی ابتدا سلول اول تا زاویه توقف θ_s (که در ادامه به بررسی این پارامتر خواهیم پرداخت)، باز شده و برای نزدیک‌تر شدن هرچه بیشتر به فرآیند واقعی و کاهش خطای فرضیات، فروپاشی سلول دوم به جای این‌که از حالت الاستیک در نظر گرفته شود، از حالت پلاستیک شروع می‌شود. در نتیجه سلول دوم در مدت زمان در نظر گرفته شده تحت شرایط اولیه متفاوت تعریف شده (قسمت د) به تغییرشکل نهایی خود می‌رسد. د) با توجه به فرض قبل و این‌که سلول اول بر روی سلول دوم قرار گرفته است و پس از یک زمان مشخصی به زاویه توقف θ_s می‌رسد، شرایط اولیه دستگاه معادلات سلول دوم به این صورت در نظر گرفته شد که سرعت افقی و عمودی مربوط به شرایط اولیه سلول دوم را برابر با سرعت افقی و عمودی نهایی سلول اول تا رسیدن به زاویه توقف قرار دادیم. همچنین زاویه اولیه مربوط به شرایط اولیه دستگاه معادلات سلول دوم را به جای θ_0 ، از زاویه شروع حالت پلاستیک در نظر گرفتیم.

۲-۷- شناسایی پارامتر زاویه توقف در حالت جاذب دو سلولی:

با توجه به این‌که زاویه نهایی فروریزش سازه در حالت تک سلولی حدود ۱۶/۷ درجه به دست آمد و از سویی دیگر طبق بررسی‌های انجام

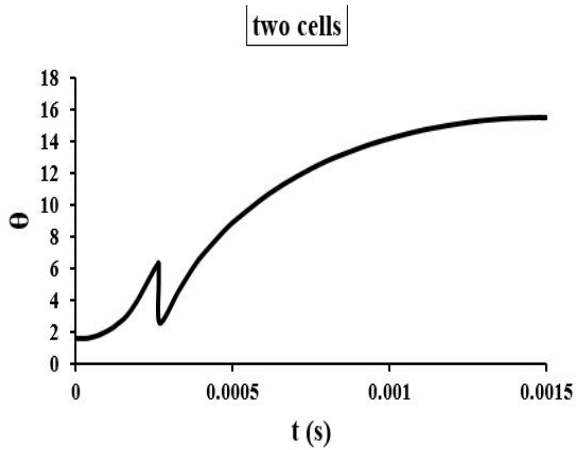


Fig. 15. Opening angle variation or rotating rod of double cells along of together per time with stopping angle=6.4°

شکل ۱۵: نمودار تغییرات زاویه بازشدگی یا چرخش میله‌های هر دو سلول در امتداد هم برحسب زمان، با زاویه توقف $\theta_s = 6/4^\circ$

جدول ۲: مشخصات هندسی و مکانیکی جاذب

Table 2. Geometric and physical properties of absorber

σ_y	E	ν	ρ	H	B	L	θ
MPa	GPa		kg/m ³	mm	mm	mm	deg
۲۳۵	۲۰۷	۰/۳	۷۸۰۰	۱/۶	۵۰	۲۵	۱/۶

منظم^۱ به صورت جزء شش وجهی^۲ در نظر گرفته شد و طول هر جزء را $0/8$ میلی‌متر در نظر گرفتیم. همچنین مش از نوع جزء "جامد تنش سه بعدی از مرتبه خطی با انتگرال گیری کاسته"^۳ در نظر گرفته شده است. در نهایت جاذب تک سلولی مش‌بندی شده به صورت شکل ۱۶ خواهد بود.

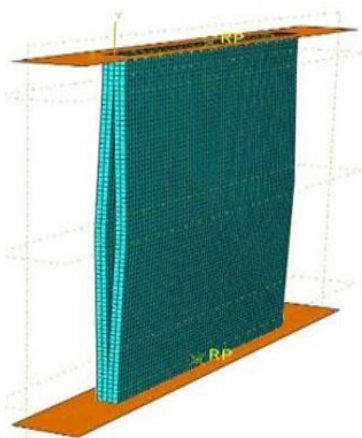


Fig. 16. Single cell meshed absorber in ABAQUS

شکل ۱۶: جاذب تک سلولی مش‌بندی شده در محیط آباکوس

- 1 Structured
- 2 Hex-dominated
- 3 C3D8R

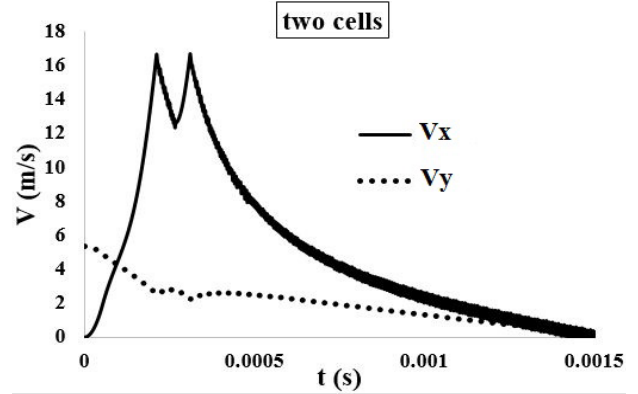


Fig. 13. Horizontal velocity- time and vertical velocity- time curves of double cells absorber with stopping angle=6.4°

شکل ۱۳: نمودارهای سرعت افقی- زمان و سرعت عمودی- زمان جاذب

دو سلولی با زاویه توقف $\theta_s = 6.4^\circ$

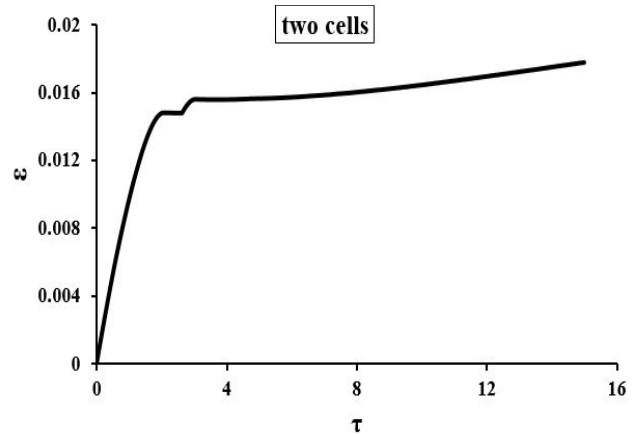


Fig. 14. Strain variation- time curve of double cells absorber

شکل ۱۴: نمودار تغییرات کرنش برحسب زمان بی‌بعد جاذب دو سلولی ($\tau = T/T_0$)

نایبوستگی ایجاد شده در نمودار شکل ۱۵ به این دلیل است که سلول اول تا زاویه توقف θ_s دچار فروریزش شده سپس سلول دوم به جای شروع از زاویه متناظر با نقص نخستین θ_0 از زاویه متناظر با حالت پلاستیک اولیه شروع به فروریزش می‌کند و برای نشان دادن این فرض نمودار به صورت نایبوسته در امتداد هم ترسیم شده است.

۳- روش عددی

۳-۱- مشخصات نمونه‌ها:

با توجه به مثال نمونه بخش ۲-۴ مشخصات هندسی و مکانیکی جاذب به صورت جدول ۲ خواهد بود. همچنین مشخصات فیزیکی نمونه ضربه‌زننده در جدول ۱ ذکر شده است.

۳-۲- مدل اجزا محدود:

برای افزایش دقت و کاهش خطا پس از بررسی‌های صورت گرفته، روش مش‌بندی استفاده شده در مدل اجزا محدود جاذب از نوع روش مش‌بندی

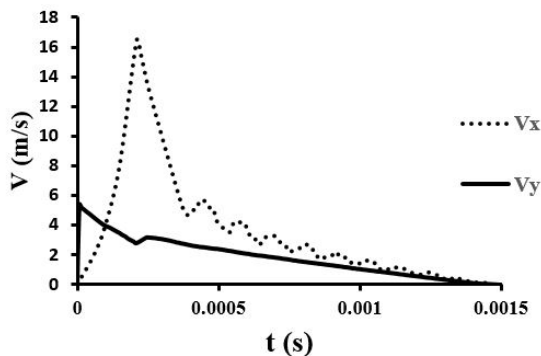


Fig. 19. Horizontal and vertical velocity curves per time of single cell absorber for A & D points (Fig. 4)

شکل ۱۹: نمودار سرعت‌های افقی و عمودی بر حسب زمان جاذب تک سلولی به ترتیب مربوط به نقاط A, D در شکل ۴

۳-۴- مدل سازی جاذب دو سلولی:

برای مدل سازی جاذب دو سلولی در محیط مونتاژ، دو سلول را به عنوان یک جسم متحد و یکپارچه که به عنوان یک جسم (یا یک جاذب) تحت ضربه قرار می‌گیرد، به نرم افزار می‌شناسانیم. اکنون با این عمل برای نرم افزار نیز دو سلول به عنوان دو سلول منفرد و یا مجزا نخواهند بود، به گونه‌ای که حتی در ماژول تعیین خواص ماده، تمامی خواص تعریف شده برای سلول اول در حالت جاذب تک سلولی (جدول ۲)، به عنوان خواص هر دو سلول به عنوان یک جاذب یکپارچه در نظر گرفته خواهد شد. مش بندی و پارتیشن بندی جاذب دو سلولی با شرایط ذکر شده در حالت تک سلولی، به صورت شکل ۲۰ خواهد بود.

۳-۵- نتایج عددی جاذب دو سلولی:

شماتیک فروریزش جاذب در انتهای زمان تحلیل (۱/۵ میلی ثانیه) در دو نمای روبرو و ایزومتریک به صورت شکل ۲۱ خواهد بود. سازوکار فروریزش جاذب دو سلولی به صورت مراحل زیر خواهد بود: الف) پس از برخورد ضربه زننده به بالای مدل، هر شکل ۲۱: فروریزش جاذب دو سلولی در انتهای بازه زمانی حل در دو نمای روبرو و ایزومتریک دو سلول به عنوان یک مدل یکپارچه، به طور همزمان تحت اثر ضربه قرار گرفته و دچار فروریزش می‌شوند.

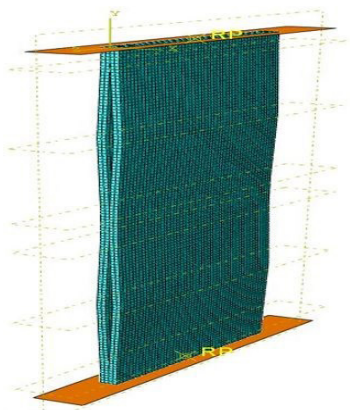


Fig. 20. Double cells meshed absorber in ABAQUS

شکل ۲۰: جاذب دو سلولی مش بندی شده در محیط آباکوس

۳-۳- نتایج عددی جاذب تک سلولی:

شماتیک فروریزش جاذب تک سلولی در دو نمای روبرو و ایزومتریک در انتهای زمان تحلیل (t=۱/۵ میلی ثانیه) به صورت شکل ۱۷ خواهد بود.

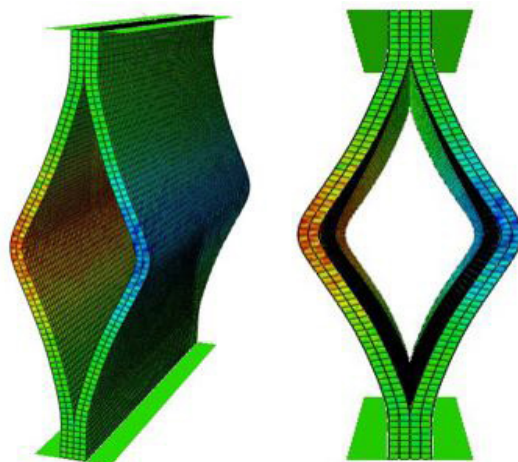


Fig. 17. Schematic diagram of single cell absorber collapse in both front and isometric views at the end of time intervals

شکل ۱۷: شماتیک فروریزش جاذب تک سلولی در انتهای بازه زمانی در دو نمای روبرو و ایزومتریک

شکل ۱۸ نمودار نیرو-جابجایی جاذب تک سلولی را نشان می‌دهد که U_y تغییرات جابه‌جایی عمودی بالای مدل می‌باشد. همان‌طور که از شماتیک فروریزش سازه (شکل ۱۷) قابل مشاهده است، فروریزش جاذب به صورت متقارن می‌باشد، که همین ویژگی سبب پایدار بودن نمودار نیرو ضربه سازه شده است.

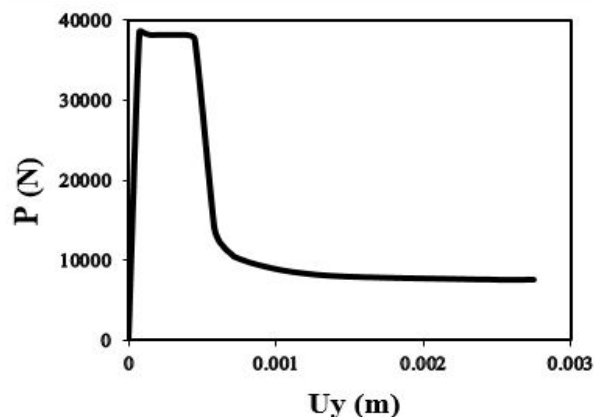


Fig. 18. Force- displacement curve of single cell absorber

شکل ۱۸: نمودار نیرو-جابجایی جاذب تک سلولی

با توجه به شکل ۱۹ که تغییرات سرعت‌های افقی و عمودی به ترتیب مربوط به نقاط A و D نشان داده شده در شکل ۴ را نشان می‌دهد، تمام انرژی جنبشی ورودی به طور کامل به کار پلاستیک تبدیل شده و توسط جاذب جذب شده است.

همچنین نمودار تغییرات سرعت‌های افقی و عمودی به ترتیب مربوط به نقاط D و A سازه (نشان داده شده در شکل ۴) برحسب زمان به صورت شکل ۲۳ خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود به علت این که در روش عددی جاذب دو سلولی، هر دو سلول به صورت همزمان تحت فروریزش قرار می‌گیرند، بیشینه سرعت افقی در این حالت نسبت به حالات دیگر کاهش یافته است؛ اما رفتار منحنی‌ها کاملاً یکسان حفظ شده است.

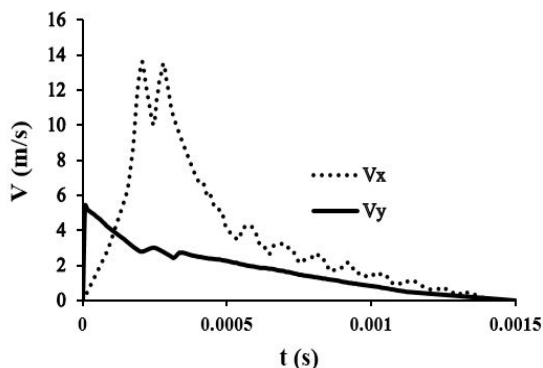


Fig. 23. Horizontal and vertical velocities variation curves per time of double cells absorber

شکل ۲۳: تغییرات سرعت‌های افقی (V_x) و عمودی (V_y) برحسب زمان جاذب دو سلولی

۴- مقایسه نتایج نظری با نتایج عددی

با توجه به شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که با چند سلولی در نظر گرفتن جاذب، تأثیر به‌سزایی در مقادیر نیروی بیشینه و نیز نیروی میانگین ایجاد نمی‌شود؛ اما سطح زیر نمودار نیرو ضربه‌ای افزایش پیدا کرده است. ادامه به بررسی و مقایسه مقدار نیروی بیشینه (P_{max})، نیروی میانگین (P_a)، کل انرژی جذب شده (E_T) و مقادیر بیشینه جابه‌جایی‌های افقی (U_x) و عمودی (U_y) که از دو روش در هر دو حالت تک سلولی و دو سلولی به دست آمده‌اند، پرداخته شده است و نتایج در جدول ۳ ذکر می‌گردد.

جدول ۳: مقایسه نتایج نظری و عددی نیروی بیشینه، نیروی میانگین، کل انرژی جذب شده و جابه‌جایی‌های افقی و عمودی

Table 3. Theoretical and numerical Results comparison of peak force, mean force, total energy absorption and horizontal and vertical displacement

U_y , mm	U_x , mm	E_T , J	P_a , N	P_{max} , N	تک سلولی
۲/۹۱	۶/۳۴	۳۴/۱۲	۹۵۸۸	۳۷۴۱۲	نظری
۲/۷۶	۶/۲۴	۳۵/۳۱	۷۸۹۶	۳۸۳۵۲	عددی
۵/۲	۱/۶	۳/۳۸	۱۷/۶	۲/۴۵	درصد خطا دو سلولی
۱/۹۳	۵/۵۲	۴۸/۱	۸۴۶۰	۳۷۰۳۶	نظری
۲/۱۴	۵/۴۵	۴۲/۳	۸۱۷۸	۳۷۹۷۶	عددی
۹/۸۲	۱/۳	۱۲	۳/۳	۲/۴۸	درصد خطا دو سلولی



Fig. 21. Schematic diagram of double cells absorber collapse in both front and isometric views at the end of time intervals

شکل ۲۱: فروریزش جاذب دو سلولی در انتهای بازه زمانی حل در دو نمای روبرو و ایزومتریک

ب) در زمان 0.26 میلی‌ثانیه سلول اول که دچار تغییرشکل پلاستیک شده است، متوقف می‌شود که این زاویه با توجه به جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در این زمان و نیز رابطه مثلثاتی زیر برابر 6.4° به دست آمد:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{25 \sin(1.6^\circ) + 1.828}{25 \cos(1.6^\circ) - 2.522} = 6.4^\circ$$

ج) سپس سلول اول که به تغییرشکل پلاستیک نهایی خود رسیده و متوقف شده است، تنها در حد مقدار زاویه بسیار کوچک برگشت‌پذیر الاستیک خود بسته شده و سلول دوم به تغییرشکل ادامه می‌دهد.

د) تا در نهایت در مدت زمان $1/5$ میلی‌ثانیه سلول دوم نیز به حالت تغییرشکل پلاستیک نهایی خود رسیده و متوقف شده و در آن لولای پلاستیک ایجاد شده است.

نمودار نیرو - جابجایی جاذب دو سلولی به صورت شکل ۲۲ خواهد بود، همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود به علت ایجاد دو قله بیشینه، سطح زیر نمودار نیرو ضربه‌ای افزایش پیدا کرده است. همچنین مشابه با حالت تک سلولی فروریزش متقارن سازه سبب پایدار بودن نمودار نیرو - جابجایی سازه شده است.

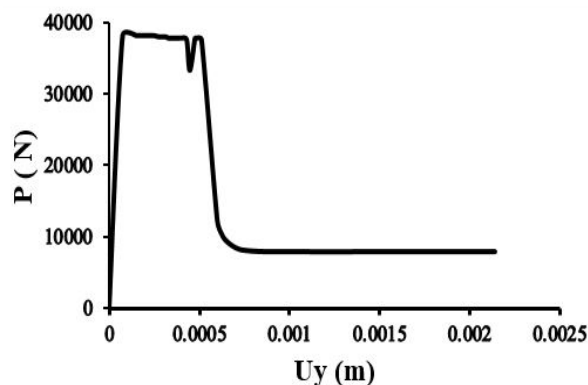


Fig. 22. Force-displacement curve of double cells absorber

شکل ۲۲: نمودار نیرو - جابه‌جایی جاذب دو سلولی

با توجه به شکل ۲۵ مشهود است که نمودارهای سرعت افقی-زمان و سرعت عمودی-زمان جاذب تک سلولی و دو سلولی با یکدیگر در تناسب بسیار خوبی چه از لحاظ مقدار بیشینه و نیز چه از لحاظ رفتار می‌باشند. همانطور که قبلاً اشاره شده است در روش عددی برخلاف روش نظریه جاذب دو سلولی، به این دلیل که اولاً سلول اول تنها تا زاویه توقف انرژی برخورد را جذب می‌کند و ثانیاً این که در این حالت تحت تأثیر ضربه هر دو سلول با هم و به طور همزمان تا توقف سلول اول، انرژی ورودی اولیه را مستهلک می‌کنند، در نتیجه تأثیر ضربه از ابتدا بر روی هر دو سلول توزیع می‌شود. با توجه به توضیحات ذکر شده در نظریه جاذب دو سلولی، مطابق با جدول ۴ بیشینه سرعت افقی در روش عددی در حدود ۱۶/۸ درصد کوچکتر از بیشینه سرعت افقی در روش نظری گردیده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج بیشینه سرعت‌های افقی نظری و عددی جاذب تک سلولی و دو سلولی (برحسب متر بر ثانیه)

Table 4. Theoretical and numerical comparison of the horizontal and vertical peak velocities diagrams per time of single and double cell absorbers

نام روش	بیشینه V_x , m/s	نام روش
جاذب دو سلولی	۱۶/۶۵	تئوری
جاذب تک سلولی	۱۶/۷۸	عددی
	۱۳/۸۵	درصد خطا
	۱۶/۸	
	۲/۲۶	

به سبب تفاوت ذکر شده در سازوکارهای فروریزی دو روش، با توجه به جدول ۵، کرنش فشاری در اثر طول کوتاه‌شدگی میله‌ها در روش عددی جاذب دو سلولی در حدود ۹ درصد کمتر از روش نظری آن به دست آمده است.

جدول ۵: مقایسه بیشینه کرنش فشاری نظری و عددی جاذب تک سلولی و دو سلولی

Table 5. Theoretical and numerical comparison of the horizontal and vertical peak pressure strain diagrams per time of single and double cell absorbers

نام روش	بیشینه کرنش فشاری میله‌ها ϵ_{max}	نام روش
جاذب دو سلولی	۰/۰۱۷۷	تئوری
جاذب تک سلولی	۰/۰۱۷۶	عددی
	۰/۰۱۵۹	درصد خطا
	۸/۹۸	
	۰/۸۵	

۴-۱- تأثیر دو سلولی در نظر گرفتن جاذب در مقادیر پارامترهای مؤثر: اکنون با توجه به جدول ۶ با محاسبه درصد تغییرات نسبت به حالت تک سلولی، به تأثیر و مقایسه افزایش تعداد سلول‌های طولی جاذب در مقادیر بیشینه کمیت‌های مؤثر در هر دو روش نظری و عددی پرداخته می‌شود.

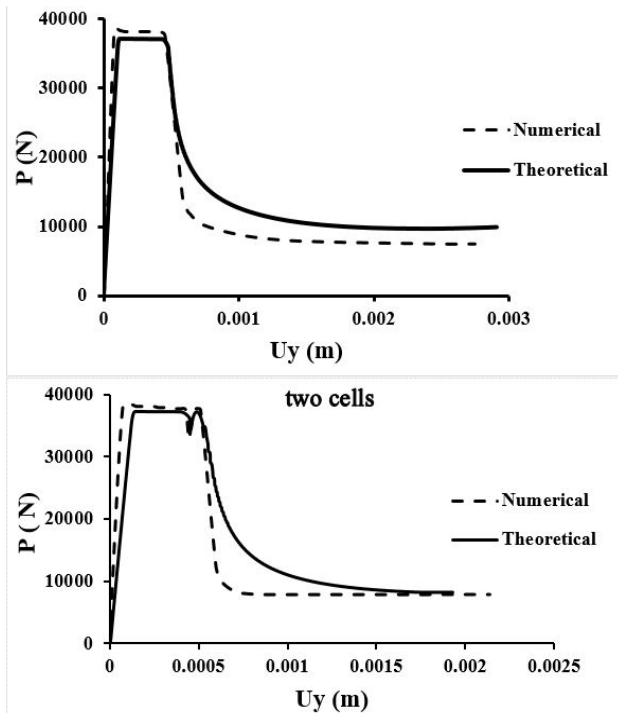


Fig. 24. Theoretical and numerical comparison of the force-displacement diagrams of single and double cell absorbers

شکل ۲۴: مقایسه نظری و عددی نمودارهای نیرو - جابجایی جاذب تک سلولی و دو سلولی

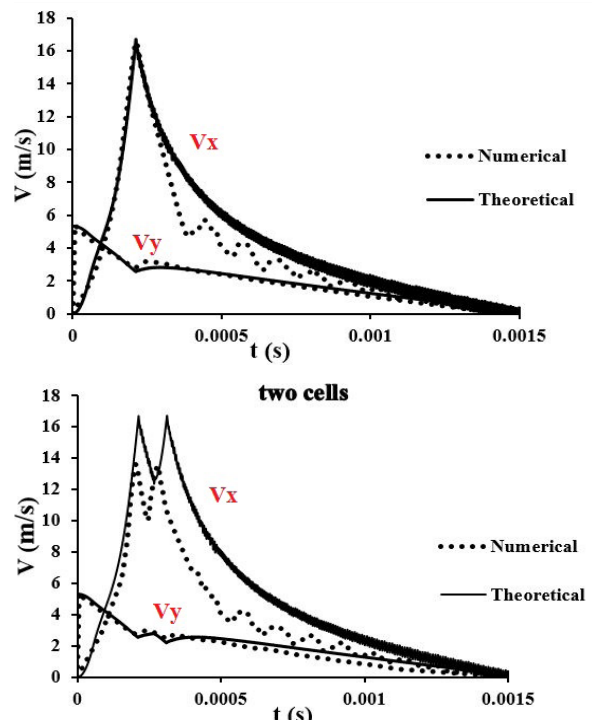
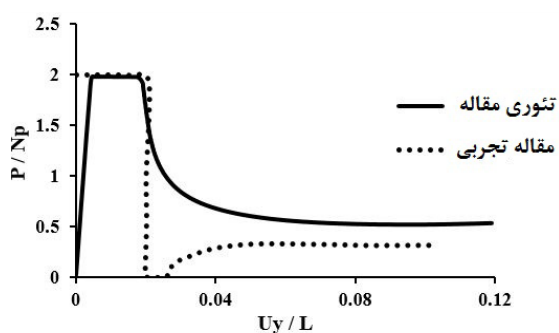


Fig. 25. Theoretical and numerical comparison of the horizontal and vertical velocities-time diagrams of single and double cell absorbers

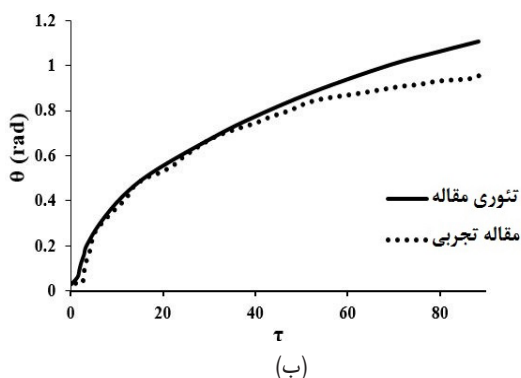
شکل ۲۵: مقایسه نظری و عددی نمودار سرعت‌های افقی و عمودی برحسب زمان جاذب تک سلولی و دو سلولی

۵- صحت‌سنجی نتایج

در شکل‌های ۲۶ (الف) و (ب) به صحت‌سنجی نتایج حالت تک سلولی مقاله حاضر پرداخته شده است. منحنی نیرو-جابه‌جایی و تغییرشکل زاویه‌ای میله‌های جاذب پیش‌بینی شده توسط مدل صلب-پلاستیک مقاله تجربی [۲۲] که با نقطه‌چین در شکل ۲۶ به تصویر کشیده شده است، با توجه به اینکه رفتار پاسخ مدل در این مطالعه تنها تحت دو فاز فشارش محض میله‌ها و چرخش مفصل‌های پلاستیک صورت می‌گیرد، مشخصه نیروی منفی غیرواقعی در شکل به تغییر ناگهانی از یک حالت فشارش محض به یک حالت چرخش محض در این مدل دو فازی ساده شده نسبت داده می‌شود. همانطور که از شکل ۲۶ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده در تناسب خوبی چه از لحاظ مقدار و چه از لحاظ رفتار فروریزی می‌باشند.



(الف)



(ب)

Fig. 26. Comparison results of a) force- displacement b) angle variation of absorber rods with experimental investigation [22] for single cell absorber

شکل ۲۶: مقایسه نتایج نمودارهای الف) نیرو- جابه‌جایی و ب) تغییرات زاویه‌ای میله‌های جاذب با مقاله تجربی [۲۲] مربوط به حالت تک‌سلولی

۶- مقایسه میان روش‌های تغییرشکل دینامیکی و شبه استاتیکی:

رفتار دینامیکی سازه مورد نظر در این مطالعه به طور واضح کاملاً متفاوت از رفتار استاتیکی آن است که از شکل ۲۷ مشهود می‌باشد. نمودارهای نیرو-زمان بی‌بعد جاذب تک سلولی نشان داده شده در شکل ۲۷ به طور واضح نشان می‌دهند که زمانی که پارامترهای سازه یکسان باشند، بار حداکثر دینامیکی به طور قابل توجه بالاتر از بار استاتیکی است. در مثال حاضر،

جدول ۶: بررسی تأثیر و مقایسه افزایش تعداد سلول‌های طولی در مقادیر بیشینه کمیت‌ها در روش نظری و عددی

Table 6. Influence and comparison analysis of increasing number of longitudinal cells theoretically and numerically

نظری	P_a kN	E_T J	V_x m/s	U_x mm	U_y mm	θ_{max} deg	P_{max} kN
تک سلول	۹/۶	۳۵/۳	۱۶/۷۸	۶/۳۴	۲/۹۱	۱۶/۷	۳۷/۴
دو سلول	۸/۵	۴۸/۱	۱۶/۶۵	۵/۵۲	۱/۹۳	۱۵/۶	۳۷
درصد تغییر	۱	۲۶/۶	۰/۷۸	۱۲/۹	۳۳	۶/۶	
عددی							
تک سلول	۷/۹	۳۴/۱	۱۶/۴	۶/۲۴	۲/۷۶	۱۷/۳	۳۸
دو سلول	۸/۲	۴۲/۳	۱۳/۸۵	۵/۴۵	۲/۱۴	۱۳/۵	۳۷/۹
درصد تغییر	۱	۳/۶۵	۱۹/۳	۱۵/۵	۲۲/۵	۲۱/۸	

۴-۲- تأثیر و مقایسه اثر اینرسی (نسبت جرمی γ) بر روی مشخصه‌های اصلی نمودار نیرو- جابه‌جایی:

برای بررسی اثر اینرسی، نتایج نظری و عددی نیروی بیشینه و نیروی میانگین در نمودار نیرو-جابه‌جایی به ازای نسبت جرمی‌های مشخص شده، در جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷: تأثیر اینرسی بر روی مقادیر نیروی بیشینه و میانگین

Table 7. Influence of inertia on the peak and mean forces

P_a N	P_{max} N	$\gamma=200$
۱۱۳۹۳	۳۷۲۲۴	نظری
۹۹۶۴	۳۷۹۷۶	عددی
۵۴/۱۲	۲	درصد خطا
		$\gamma=300$
۹۵۸۸	۳۷۴۱۲	نظری
۷۸۹۶	۳۸۳۵۲	عددی
۶/۱۷	۴۵/۲	درصد خطا
		$\gamma=600$
۷۷۰۸	۳۷۶۰۰	نظری
۶۳۱۷	۳۸۶۳۴	عددی
۱۸	۶۸/۲	درصد خطا

ساده‌سازی‌های ریاضی و فیزیکی پیچیده در نظر گرفته شده در روش نظری، می‌تواند جایگزین خوبی در تحلیل فروریزش این نوع از جاذب‌های خاص باشد.

۸- نتایج

از بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام‌گرفته نتایج زیر حاصل شد:

- جاذب انرژی مشبک مورد مطالعه به دلیل شکل سازه‌ای آن، دارای سازوکار فروریزش متقارن می‌باشد. همین امر سبب منظم بودن و پایداری مناسب نمودارهای خروجی شده است.
- روش نظریه مطالعه حاضر شامل فرضیات و ساده‌سازی‌های ریاضی و فیزیکی که بر مبنای رفتار ماده الاستیک-پلاستیک و در نظر گرفتن اثرات اینرسی ارائه شده است و پایه پیاده‌سازی معادلات دینامیکی حرکت سازه در این مطالعه است، نشان می‌دهد که با توجه به مطالعات شبه استاتیکی پیشین، رفتار دینامیکی سازه در نظر گرفته شده تفاوت قابل ملاحظه‌ای از رفتار شبه استاتیک همان سازه حتی زمانی که تأثیر نرخ کرنش بر روی خواص ماده کنار گذاشته می‌شود، دارد؛ بنابراین اینرسی به‌عنوان اثر غالب در این نوع از مسائل ضربه ظاهر خواهد شد.
- مطابق با جدول‌های ۳ تا ۵، نتایج روش نظری با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با حداکثر خطای حدود ۱۶ درصد در پارامترهای بحث شده شامل نیروضربه‌ای، انرژی جذب شده، سرعت‌های پیشینه، جابه‌جایی‌های پیشینه، کرنش پیشینه و نیز زاویه نهایی میله‌های جاذب در هر دو حالت تک سلولی و دوسلولی، بایکدیگر انطباق خوبی دارد.
- با توجه به فرضیات حالت نظری و نیز شبیه‌سازی عددی در حالت جاذب دو سلولی، مطابق با نتایج جدول ۶ به این نتیجه رسیدیم که در این حالت بدون اینکه تأثیر چشم‌گیری در نیروی حداکثر ایجاد شود، به علت افزایش سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی، میزان جذب انرژی نسبت به حالت تک سلولی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] A. Ghamarian, H.R. Zarei, M.T. Abadi, Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End-capped Conical Tubes, *Thin-walled Structural*, 49(10) (2011) 1312–1319.
- [2] N. Jones, Energy-absorbing effectiveness factor, *International journal of impact engineering*, 37(2010)754-765.
- [3] A. Meidell, Computer aided materials election for circular tubes designed to resist axial crushing, *ThinWalled Structures*, (47)8 (2009) 962–979.
- [4] SC.Yuen, GN. Nurick, energy absorbing characteristics

نیروی حداکثر دینامیکی در حدود $37/4$ کیلونیوتن است که حدود دو برابر نیروی حداکثر استاتیکی است و تنها کمی از نیروی لهیدگی^۱ پلاستیک کامل یعنی $2 N_p$ کمتر می‌باشد. همچنین جابه‌جایی عمودی نهایی در بالای مدل حدود $2/9$ میلی‌متر و بیشینه زاویه چرخش به حدود $16/7$ درجه می‌رسد. این مقادیر در مقایسه با مقادیر شبه استاتیک $0/9$ میلی‌متر و 35 درجه برای انرژی جذب شده یکسان تأثیر قابل ملاحظه اینرسی را در کاهش سطح تغییر شکل نشان می‌دهند. با این که حالت تنش غشای محض، بار حداکثر را در مورد روش دینامیکی تعیین می‌کند، بزرگ‌ترین نیروی محوری ایجاد شده در مورد روش شبه استاتیکی تنها حدود $0/5 N_p$ است. از این سو اینرسی نقش حیاتی را در رفتار پاسخ دینامیکی سازه ایفا می‌کند و نیاز به نیروهای محوری بالاتر و تأخیر در شروع پاسخ اصلی فروریزش سازه خواهد داشت.

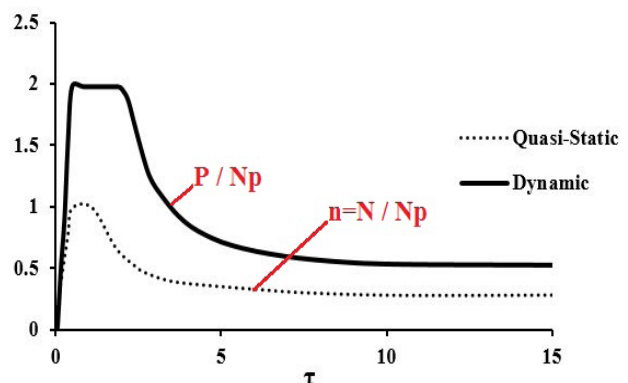


Fig. 27. Comparison of dynamic and static methods of force-time diagrams on single cell absorber

شکل ۲۷: مقایسه میان روش دینامیکی و شبه استاتیک مربوط به نتایج نمودارهای نیرو - زمان بی‌بعد جاذب تک سلولی

۷- بحث و نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن رفتار الاستیسیته-پلاستیسیته، تاریخچه تغییر شکل پیچیده و نیز با در نظر گرفتن اثرات اینرسی، آنالیز حاضر پیش‌بینی‌هایی از ظرفیت تفکیک انرژی، مشخصات نمودار نیرو - جابه‌جایی و دیگر مشخصات فروریزش سازه را در فازهای پاسخ دینامیکی آن فراهم می‌سازد. با توجه به بررسی تأثیر حالت دو سلولی مشاهده شد که در هر دو روش در این حالت، با وجود افزایش انرژی جذب شده، مقادیر نیروی پیشینه، جابه‌جایی‌ها، سرعت‌ها، کرنش و نیز زاویه بازشدگی میله‌های جاذب که به‌عنوان عوامل فروریزش سازه به شمار می‌آیند، کاهش می‌یابد و این موضوع برتری حالت چند سلولی نسبت به حالت تک سلولی خواهد بود. همچنین ایده مدل نظریه ارائه شده در حالت تک سلولی و دو سلولی به علت تازگی و نیز جامعیتی که دارد می‌تواند برای این نوع از هندسه‌های خاص و نیز هندسه‌های مشابه با تعداد سلول‌های بیشتر به کار رود. از طرفی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و روش نظری، با وجود تفاوت در تغییر شکل (فروریزش) موجود بین دو روش، در تناسب بسیار خوبی با یکدیگر می‌باشند؛ بنابراین فرضیات و

- [14] R.H. Grzebieta, N.W. Murray, The static behaviour of struts with initial kinks at their centre point, *International journal of impact engineering*, 3 (1985)155-165.
- [15] R.H. Grzebieta, N.W. Murray, Energy absorption of an initially imperfect strut subjected to an impact load, *International journal of impact engineering*, 4(1986) 145-159.
- [16] E. Booth, D. Collier, J. Miles, Impact scalability of plated steel structures In structural crashworthiness, *Butterworths, London*, 15 (1983) 136-175.
- [17] R.W. English, C.R. Calladine, Strain –rate and inertia effects in the collapse of two type of energy – absorbing structure, *International journal of Mechanics Sciences*, 26 (1984)689-701.
- [18] C. Garciano, G. Martinez, D. Smith, Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 47 (2009) 953-961.
- [19] C. Garciano, G. Martinez, A. Gutierrez, Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing, *Thin-Walled Structures*, 51 (2012)20-24.
- [20] C. Garciano, G. Martínez, A. Gutierrez, Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 71(2013) 134-146.
- [21] D. Smith, C. Graciano, G. Martínez, Quasistatic axial compression of concentric expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 84 (2014)170–176.
- [22] L.L. Tam, C.R. Calladine, Inertia and strainrate effects in a simple plate-structure under impact loading, *International journal of impact engineering*, 13 (1991)349-377.
- [23] W. Johnson, S.R. Reid, Update to Metallic energy dissipating system, *International journal of Mechanics Sciences*, 39(1986) 315-319.
- [24] N. Jones, Recent studies on the dynamic plastic behaviour of structures, *International journal of Mechanics Sciences*, 42(1989)95-115.
- [25] T.X. Yu, W. Johnson, Influence of axial force on the elastic bending and springback of a beam, *International journal of Mechanics Working Technology*, 6 (1982)521-32.
- of tubular structures with geometric and material modifications, *Apply Mechanics Review*, (61) 2 (2008)802-815.
- [5] Z. Li, L. Guo, J. Yu, Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(2012)48–56.
- [6] D. Karagiozova, M.N.AlvesJones, Inertia effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact, *International journal of impact engineering*, 24 (2000)1083-1115.
- [7] Z. Wang, H. Tian, Z. Lu, W. Zhou, High-speed axial impact of aluminum honeycomb - *Experiment and simulation, composite part B*, 12 (2013)203-215.
- [8] W. Abramowicz, N. Jones, Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically, *International journal of impact engineering*, 19 (1997)415-437.
- [9] H. Qu, J. Huo Ch. Xu, F. Fu, Numerical studies on dynamic behavior of tubular T-joint subjected to impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 67 (2014) 12-26.
- [10] N. Jones, R.S. Birch, Low-velocity impact of pressurized pipelines, *International journal of impact engineering*, 37(2)(2010) 207-219.
- [11] Y.S. Tai, M.Y. Huang, H.T. Hu, Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 53(2010)1–8.
- [12] J. Song, Y. Chen, G. Lu, Light-Weight thinwalled structures whit patterned windows under axial crushing, *International journal of Mechanical Sciences*, 66 (2013) 239-248.
- [13] X. Zhang, G. Cheng, Z. You, H. Zhang, Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns, *Thin-Walled Structures*, 45(9) (2007)737–746.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. Hatami, A.B. Fathollahi, Theoretical and Numerical Study and Comparison of the Inertia Effects on the Collapse Behavior of Expanded metal tube Absorber with Single and Double Cell under Impact Loading, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 999-1014.

DOI: 10.22060/mej.2017.12016.5242



