

تحلیل تجربی رفتار مچالگی قوطی جاذب انرژی تحت بار مایل سه بعدی

ابوالفضل خلیلی^{۱*}، علیرضا سالور^۲

* نویسنده مسئول: ab_khalkhali@iust.ac.ir

چکیده

در واقعیت احتمال اینکه بار وارد بر یک عضو جاذب انرژی به صورت محوری خالص یا خمشی خالص اعمال شود بسیار کم است. در صورتی که بار اعمالی به صورت مایل به یک قوطی اعمال شود، مقطع آن به صورت همزمان تحت بار محوری و خمشی قرار می‌گیرد. تحقیقات معدودی تا کنون به بررسی رفتار جاذب‌های انرژی تحت بار مایل پرداخته‌اند. در تحقیقات مذکور بار مایل یک بار دو بعدی بوده که نسبت به مقطع نمونه آزمایش با یک زاویه مشخص می‌شود. در حالی که در واقعیت ممکن است بار مایل دارای سه مولفه فضایی باشد که نسبت به مقطع نمونه با دو زاویه در فضا مشخص می‌شود. در این مقاله رفتار مچالگی قوطی جاذب انرژی تحت بار مایل سه بعدی به صورت تجربی تحلیل و بررسی می‌شود. برای این منظور سامانه‌ای طراحی و بر روی دستگاه آزمایش کشش و فشار یونیورسال نصب می‌شود. تمام آزمایش‌ها به صورت شبه‌استاتیکی انجام شده و در نهایت نمودار نیرو-جابجایی و شکل مود فروریزش نمونه‌ها استخراج شده و تاثیر زوایای بار مایل بر ویژگی‌های جذب انرژی بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

تحلیل تجربی، قوطی جاذب انرژی، آزمایش شبه‌استاتیکی، بار مایل سه بعدی

۱- استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

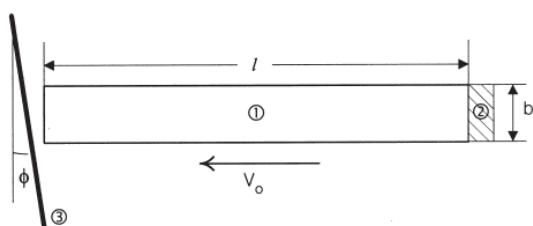
۱- مقدمه

افزایش تعداد وسایل نقلیه، همچنین تنوع و افزایش سرعت آنها امروزه باعث انجام تصادفاتی است که صدماتی جدی تر از گذشته به انسان وارد می‌کند. در هنگام برخورد وسایل نقلیه با یکدیگر و یا در هنگام برخورد آنها با اجسام ساکن در صورتی که سرعت آنها به صورت قابل توجهی کاهش پیدا کند، تمام انرژی جنبشی به شکل‌های دیگری از انرژی تبدیل خواهد شد. در بسیاری از صنایع دیگر نیز در هر لحظه احتمال آزاد شدن مقداری از انرژی به صورت ناخواسته وجود دارد؛ به عنوان مثال احتمال آزاد شدن انرژی یک دیگ بخار، یک نیروگاه هسته‌ای و ... از این رو طراحی سازه‌هایی که بتوانند انرژی‌های آزاد شده ناخواسته را به صورت برگشت‌ناپذیر و بدون تاثیر مخرب بر روی محیط زیست اتلاف کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چنین سازه‌هایی، سازه‌های جاذب انرژی نامیده می‌شوند [۱-۴].

اجزای جدار نازک یکی از انواع جاذب‌های انرژی هستند که کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. این عضوهای مکانیکی، تحت بار اعمالی تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگی تحمل کرده و در نتیجه انرژی بسیاری جذب می‌کنند. رفتار پلاستیک اجزای جدار نازک مختلفی مانند تیوب‌ها، پوسته‌های کروی، فروستا و ... موضوع بسیاری از تحقیقات در زمینه جاذب‌های انرژی بوده‌است [۵ تا ۱۱]. بسیاری از مطالعات گذشته به بررسی رفتار اجزای جدار نازک تحت بار محوری خالص و بار خمشی خالص به صورت جداگانه پرداخته‌اند. معدودی از این تحقیقات به بررسی رفتار مچالگی اجزای جدار نازک تحت بار مایل که بیانگر اعمال همزمان بار محوری و بار خمشی است پرداخته‌اند [۱۲ تا ۱۵].

در سال ۱۹۹۹ Han و Park برای اولین بار شبیه‌سازی عددی برخورد و مچالگی قوطی جدار نازک با سطح مایل شیب‌دار

صلب را با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام دادند [۱۲]. آنها در مطالعه خود از اثر اصطکاک بین نمونه و سطح صلب صرف‌نظر کردند. آنها دو مود فروریزش محوری و خمشی و یک حالت میانه را مشاهده کردند. همچنین رابطه‌ای برای زاویه بحرانی که در آن مود فروریزش از حالت محوری به خمشی تبدیل می‌شود بر اساس نتایج شبیه‌سازی ارائه کردند. در شکل ۱ نتایج مربوط به دو شبیه‌سازی از این مرجع نشان داده شده‌است.



(a) initial shape

(b) $\phi = 6$ degrees(c) $\phi = 7$ degrees

شکل (۱) تغییر شکل قوطی در برخورد با دو زاویه مختلف [۱۲]

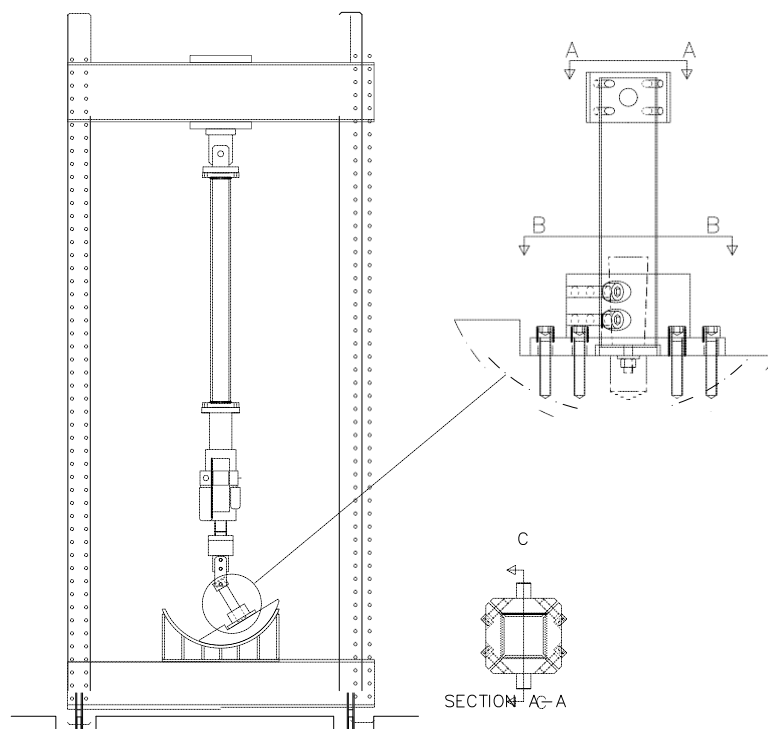
در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳، Reyes و همکارانش [۱۳ و ۱۴] به تحلیل عددی و تجربی قابلیت جذب انرژی قوطی‌های آلومینیومی تحت بار مایل با سه زاویه مختلف پرداختند. در کار آنها، نمونه‌ها از یک طرف گیردار و بار مایل بر انتهای دیگر نمونه وارد شده‌است. آنها از این آزمایش‌ها برای اعتبار سنجی حل عددی که در مطالعه پارامتری به کار رفته، استفاده کردند. سامانه مورد استفاده در آزمایش‌های مذکور در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

در سال ۲۰۰۴، Reyes و همکاران [۱۵] از همین سامانه برای بررسی رفتار مچالگی قوطی آلومینیومی پر شده از فوم پرداختند. در سال‌های اخیر مطالعات دیگری بر روی رفتار

تجربی تحلیل و بررسی می‌شود. در این راستا پنج آزمایش مختلف طراحی و انجام شده‌است. برای این منظور سامانه‌ای طراحی و بر روی دستگاه آزمایش کشش و فشار یونیورسال نصب می‌شود. آزمایش‌ها به صورت شبه‌استاتیکی انجام شده و در طول آزمایش نمونه‌ها از یک انتها کاملاً مقید بوده و از انتهای دیگر با یک صفحه مایل در تماس قرار می‌گیرند. تفاوت عمده این مقاله با کارهای انجام شده قبلی در نظر گرفتن صفحه مایل به صورت فضایی است. این صفحه با تعیین دو زاویه مختلف در فضا مشخص می‌شود. هدف از مقاله بررسی شکل مود فروریزش، استخراج نمودار نیرو جابجایی و تاثیر زوایای قرار گیری سطح مایل بر ویژگی‌های جذب انرژی است.

جذب انرژی مخروط و استوانه جدار نازک خالی و پر شده از فوم تحت بار مایل نیز انجام شده‌است [۱۶ و ۱۷]. باید توجه داشت که احتمال برخورد جاذب انرژی به صورت کاملاً قائم در اغلب کاربردها بسیار کم بوده و از این رو مطالعه رفتار عضو جاذب انرژی تحت بار مایل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی ذکر شده نشان می‌دهد که مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده‌است. البته در تحقیقات معدود انجام شده، جاذب انرژی با سطحی در تماس قرار می‌گیرد که نسبت به مختصات نمونه آزمایش با یک زاویه مشخص می‌شود. در حالی که در واقعیت ممکن است جاذب انرژی با سطحی برخورد کند که در فضای سه بعدی قرار دارد. چنین صفحه‌ای با دو زاویه در فضا مشخص می‌شود.

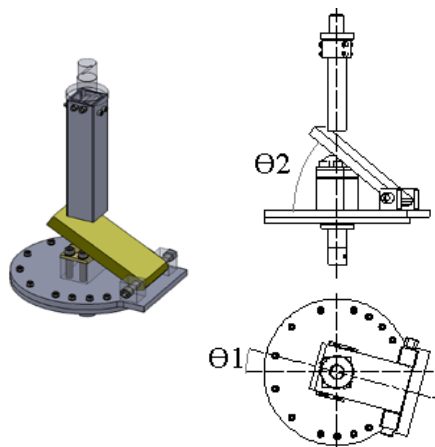
در این مقاله رفتار مجالگی و ویژگی‌های جذب انرژی قوطی جاذب انرژی فولادی تحت بار مایل سه بعدی به صورت



شکل (۲) تصویر شماتیک سامانه آزمایش‌های مرجع [۱۳ تا ۱۵]

۲- طراحی و ساخت فیکسچر

همان‌طور که گفته شد، هدف از انجام آزمایش‌ها در این مقاله بررسی رفتار جذب انرژی قوطی جدار نازک تحت باری است که نسبت به مقطع قوطی دارای زاویه فضایی (سه بعدی) باشد. برای این منظور برای مقید کردن نمونه از بالا و پائین، یک فک ویژه برای بالا و یک فیکسچر برای پائین طراحی، ساخته و بر روی دستگاه کشش و فشار یونیورسال نصب شده است. نمونه آزمایش از انتهای بالایی کاملاً گیردار شده و برای این منظور فک بالا به صورت مکعب توپری طراحی شده که وارد نمونه می‌شود و دو پیچ از دو طرف عبور کرده و نمونه را کاملاً به فک مقید می‌کنند. از انتهای پایینی، نمونه با فیکسچری که به صورت صفحه‌ای که دارای زاویه سه بعدی است در تماس قرار می‌گیرد. این صفحه با دو زاویه اصلی شناخته می‌شود؛ زاویه θ_1 که زاویه چرخش این صفحه حول محور گذرنده از مرکز سطح قوطی است و زاویه θ_2 که زاویه این صفحه نسبت به افق است. فیکسچر پایینی که مهم‌ترین نقش در انجام آزمایش‌ها را دارد از دو جزء عمده تشکیل شده است که عبارتند از دو صفحه دایره‌ای که به صورت فلنچ بر روی هم قرار گرفته‌اند و یک سطح شیبدار که بر روی این دو صفحه قرار دارد. با چرخش صفحه دایره‌ای فوقانی نسبت به صفحه پایینی، زاویه اول (θ_1) و با چرخش سطح شیبدار نسبت به صفحه دایره‌ای فوقانی، زاویه دوم (θ_2) به وجود می‌آید. در شکل ۳ تصویر شماتیک فک بالا و فیکسچر پایین دستگاه نشان داده شده است. تصویر فک بالا و فیکسچر پایین در حالتی که بر روی دستگاه آزمایش کشش نصب شده است در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل (۳) تصویر شماتیک فیکسچر مورد استفاده برای اعمال بار سه بعدی

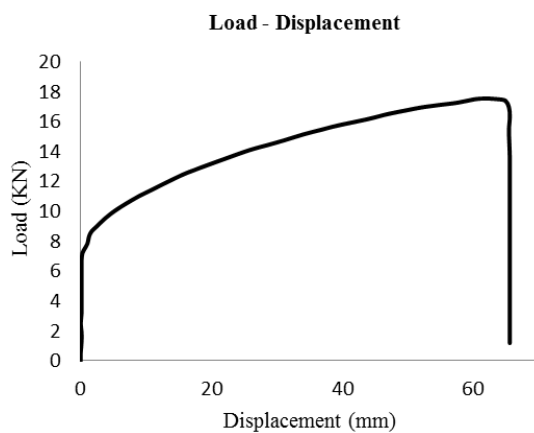


شکل (۴) تصویر فک بالا و فیکسچر پائین در حالتی که بر روی دستگاه آزمایش کشش نصب شده

۳- تحلیل تجربی

برای تحلیل تجربی رفتار جذب انرژی قوطی جدار نازک تحت بار مایل سه بعدی، پنج آزمایش طراحی و انجام شده است. ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش و همچنین زوایای بار مایل سه بعدی (θ_1 و θ_2) در جدول ۱ نشان داده شده است. عرض سطح مقطع و ضخامت تمام نمونه‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۷۰ و ۱٫۵ میلی‌متر بوده و ۵ زاویه مختلف در نظر گرفته شده است. طول سازه (L) در تمام نمونه‌ها ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.

نمودار تنش-جابجایی حاصل از آزمایش کشش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶) نمودار تنش-جابجایی فولاد به کار رفته در نمونه های مورد آزمایش

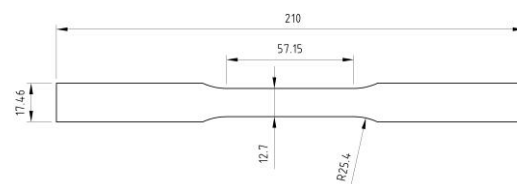
برای انجام آزمایش ها سرعت فک دستگاه بر روی 5 mm/min تنظیم می شود و آزمایش تا ۱۰۰ میلی متر جابجایی فک دستگاه ادامه پیدا کرده است. از این رو هر آزمایش حدود ۲۰ دقیقه به طول می انجامد. شکل های ۷ تا ۱۱ تغییر شکل نمونه های C1 تا C5 را در طول انجام آزمایش نشان می دهد.

جدول (۱) ابعاد نمونه ها و زوایای سطح شیب دار

Test No.	C (mm)	θ1 (deg)	θ2 (deg)
C1	70	15	15
C2	70	0	25
C3	70	15	25
C4	70	30	25
C5	70	15	35

پیش از انجام آزمایش ها، عملیات حرارتی تنش زدایی بر روی تمام نمونه ها به صورت همزمان انجام شده است. برای این کار از کوره الکتریکی با ابعاد 60 cm × 60 cm به عمق 120 cm، مجهز به ترموکوپل و تجهیزات کنترل دما استفاده شده است. برای انجام عملیات تنش زدایی، تمام نمونه ها به صورت همزمان در داخل کوره قرار می گیرند و در دمای ۱۰۲۰ درجه سانتیگراد طی مدت ۲ ساعت به قطعات حرارت داده می شود. سپس نمونه ها به مدت بیست دقیقه در کوره خاموش باقیمانده و پس از آن در هوای محیط به آرامی خنک می شوند.

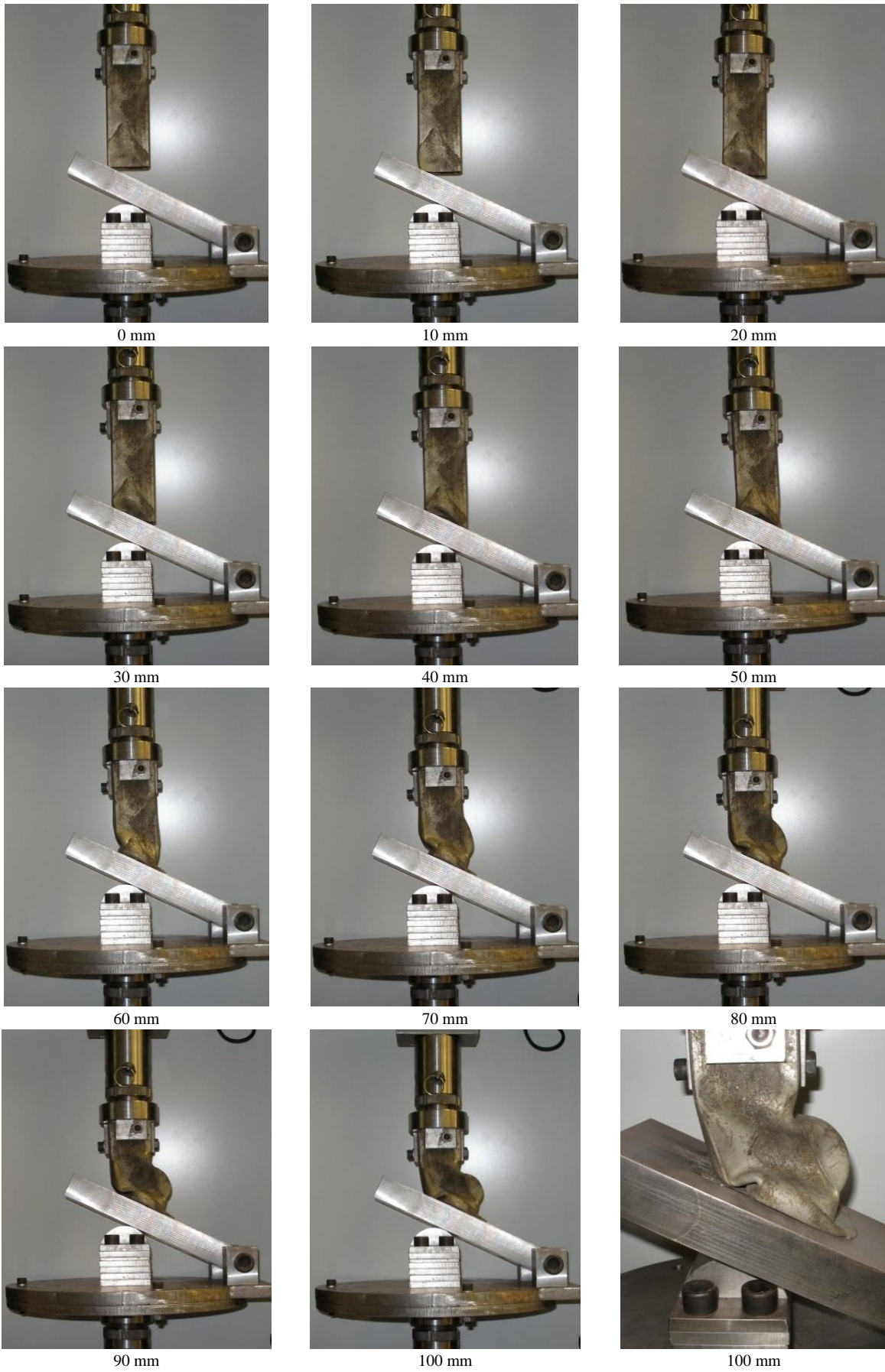
برای تعیین رفتار مکانیکی ماده مصرفی، نمونه های استاندارد آزمایش کشش مطابق شکل ۵ از نمونه ها ساخته شده است. نمونه آزمایش کشش به همراه تمام نمونه های آزمایش تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و پس از انجام عملیات حرارتی بر روی آن آزمایش کشش انجام شده است.



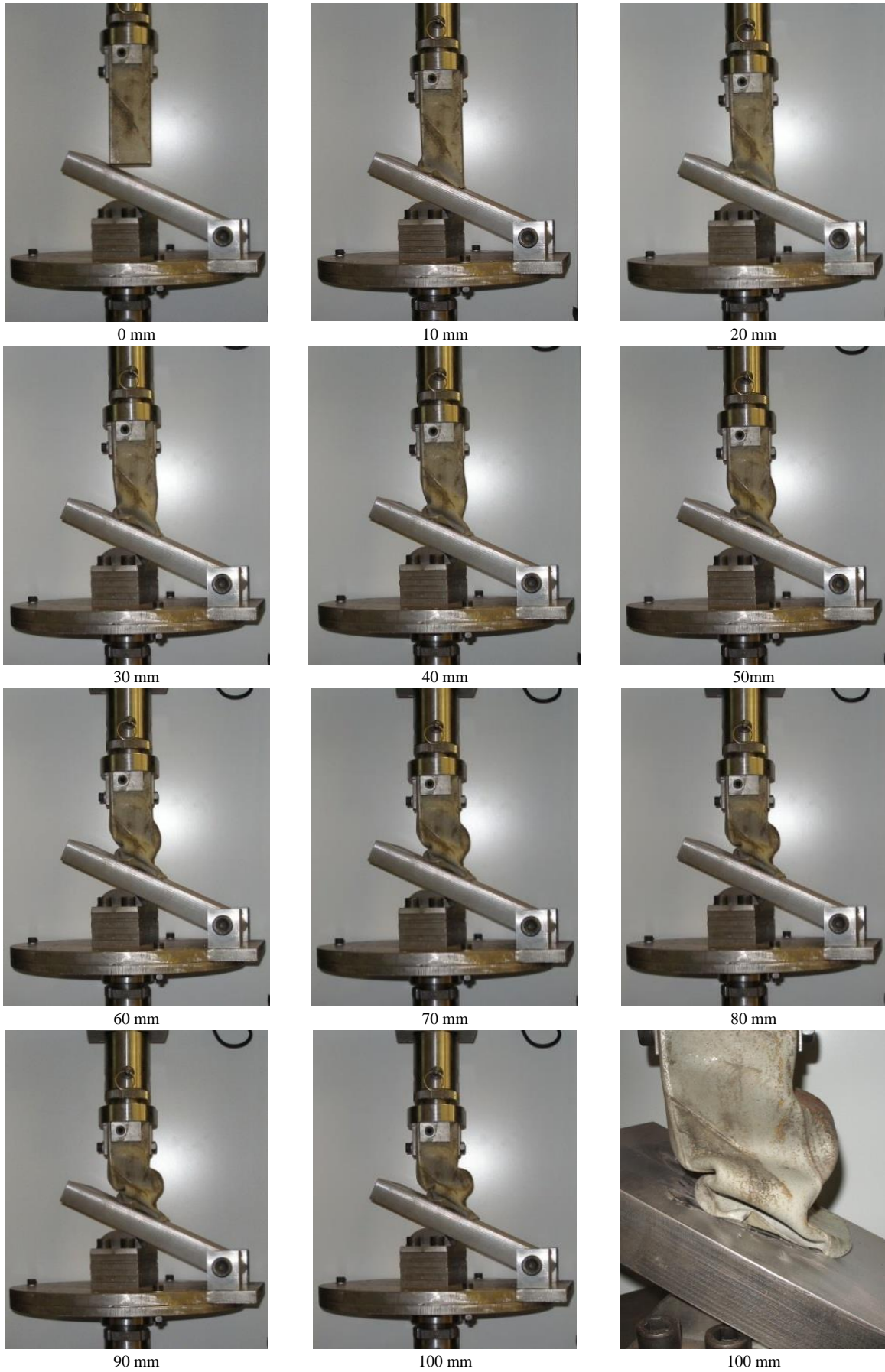
شکل (۵) نمونه آزمایش کشش



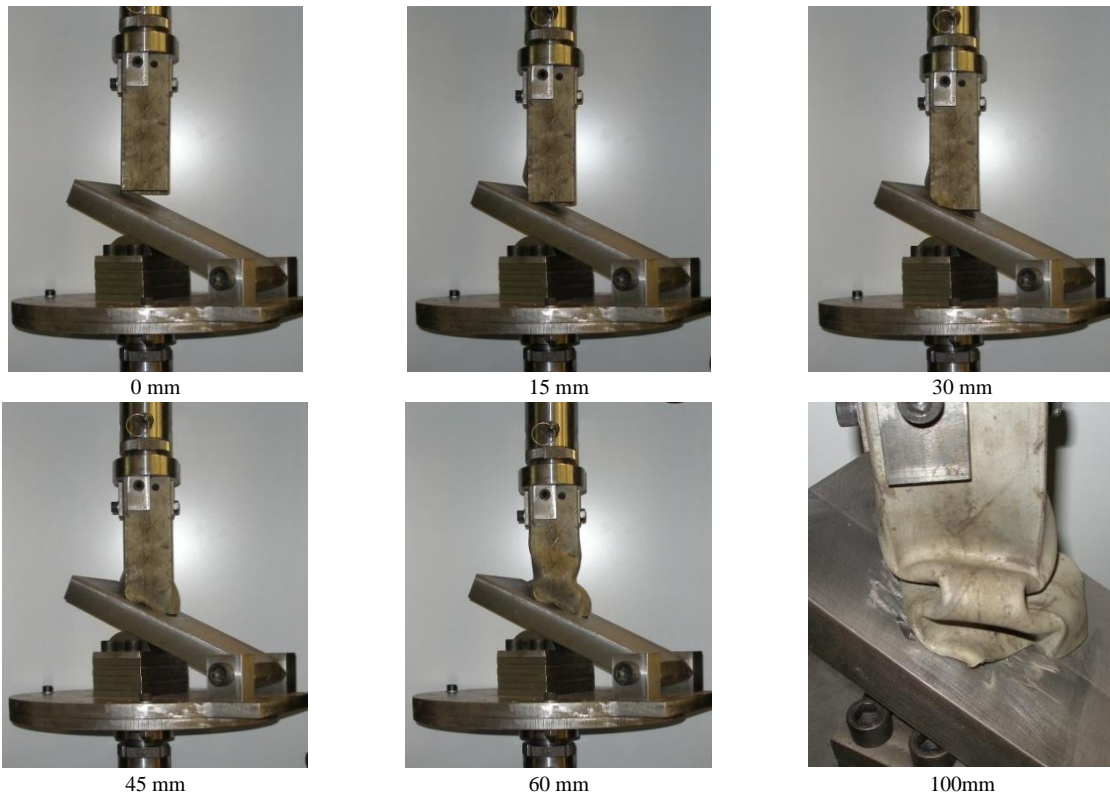
شکل (۷) تغییر شکل نمونه C1 در طول انجام آزمایش



شکل (۸) تغییر شکل نمونه C2 در طول انجام آزمایش



شکل (۹) تغییر شکل نمونه C3 در طول انجام آزمایش



شکل (۱۰) تغییر شکل نمونه C4 در طول انجام آزمایش

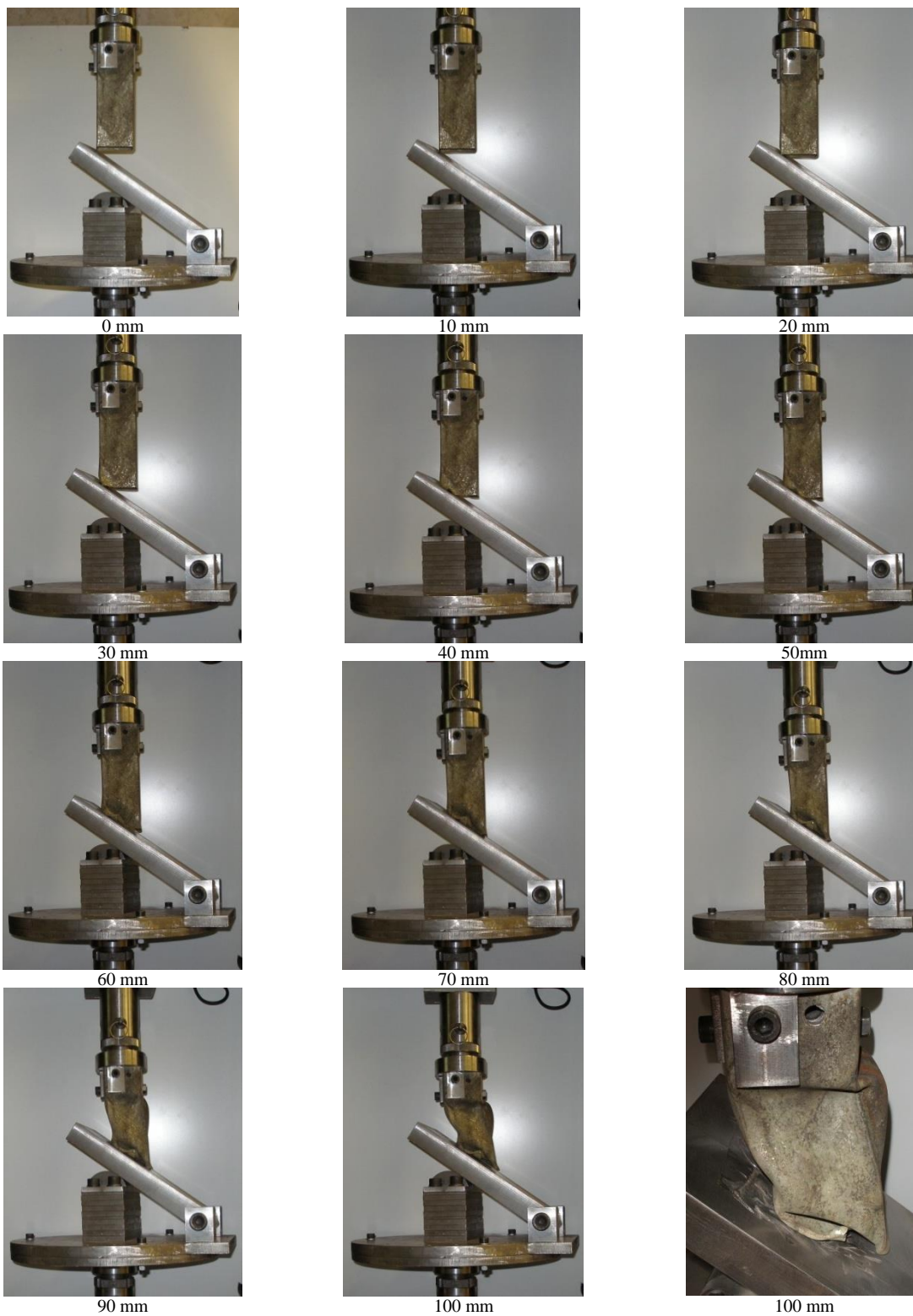
نمودار متداول مچالگی قوطی تحت بار محوری نزدیک می‌شود. این مسأله در نمودار نیرو - جابجایی نمونه C1 قابل مشاهده است.

براساس مشاهدات مرجع [۱۳] انتظار می‌رود که مود غالب فروریزش در بارگذاری مایل، مود خمش باشد. اما براساس نتایج مقاله حاضر، مود فروریزش ترکیبی از مود خمشی، مود پیچشی و مود فروریزش محوری است. البته در مواردی که زاویه θ مقدار بزرگتری دارد، مانند نمونه C5 که در آن $\theta = 35^\circ$ است، مود خمش مود غالب است؛ ولی در نمونه‌های دیگر، مود فروریزش محوری غالب می‌باشد. این موضوع می‌تواند به نحوه مقید کردن انتهایی که تحت بار مایل قرار می‌گیرد مربوط باشد. در آزمایش‌های مرجع [۱۳] انتهایی که تحت بار مایل قرار می‌گیرد با استفاده از یک قاب فلزی مهار شده است. وجود این قاب فلزی باعث جلوگیری از فروریزش محلی قوطی شده و تمام بار اعمالی به صورت

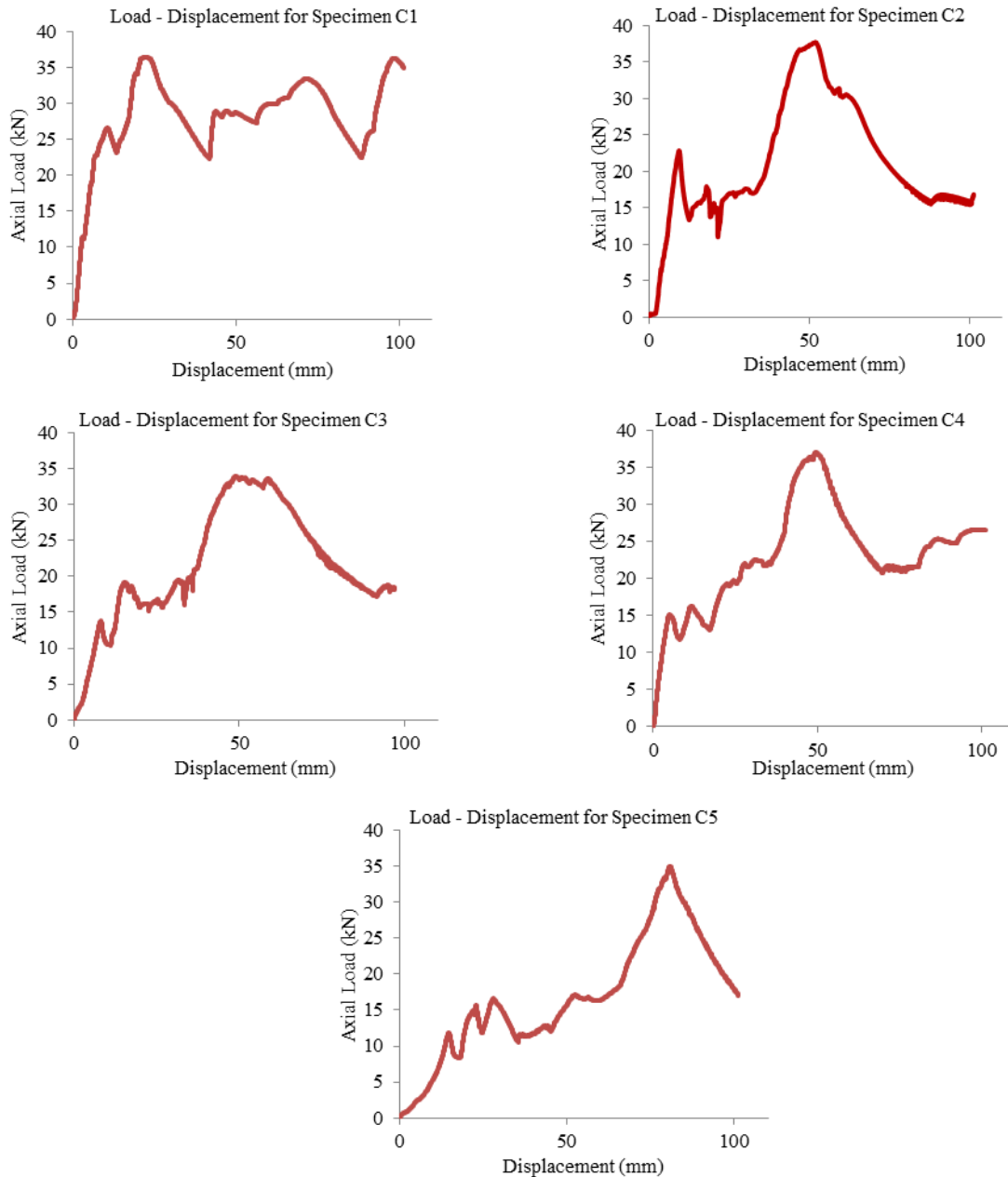
نمودار نیرو - جابجایی حاصل از آزمایش‌ها متناظر با نمونه‌های C1 تا C5 در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای نیرو - جابجایی شکل ۱۲ قابل مشاهده است، میزان نیروی مچالگی در تمام شکل‌ها روندی افزایشی دارد. این نمودارها با نمودار نیرو - جابجایی متداولی که برای مچالگی قوطی جدارنازک تحت بار محوری شناخته شده است کاملاً متفاوت هستند. در نمودارهای متداول مچالگی قوطی تحت بار محوری یک نیروی بیشینه مچالگی وجود دارد که متناظر با اولین چین‌خوردگی اتفاق می‌افتد. اما در نمودارهای شکل ۱۲ دو مقدار متفاوت را می‌توان برای نیروی بیشینه مشاهده کرد که عبارتند از اولین نیروی بیشینه که در این مقاله با $P_{max,1}$ و بیشترین نیروی بیشینه که با $P_{max,t}$ نشان داده شده است. البته نکته جالب توجه آن است که هر قدر زوایای صفحه مایل به صفر نزدیک می‌شوند نمودار نیرو - جابجایی نمونه به

تماس آغاز می‌شود. این شرایط به شرایطی که مرجع [۱۲] در نظر گرفته و مسأله را به صورت عددی تحلیل کرده است مطابقت بیشتری دارد.

خمش به انتهای گیردار وارد و مود خمشی تبدیل به مود غالب می‌شود. حال آنکه نمونه‌های آزمایش در مقاله حاضر بدون هیچ مهارى به صورت مستقیم با صفحه مایل در تماس قرار می‌گیرند و فروریزش قوطی به صورت محلی و از نقطه



شکل (۱۱) تغییر شکل نمونه C5 در طول انجام آزمایش



شکل ۱۲- نمودار نیرو - جابجایی حاصل از آزمایش‌ها متناظر با نمونه‌های C1 تا C5

غالب باشد. البته مواردی مانند زاویه θ_1 ، جنس و ابعاد قوطی که در این مقاله با مقاله مرجع [۱۲] متفاوت هستند بر این مسأله تاثیر گذارند. اما موضوع مهم‌تری که به نظر می‌رسد نقش اصطکاک است. مؤلفان مقاله مرجع [۱۲] از اصطکاک بین صفحه مایل و قوطی صرف‌نظر کرده‌اند؛ در حالی که نتایج نشان می‌دهند با توجه به نیروی فشاری بزرگی که بین نمونه‌ها و صفحه مایل وجود دارد، نیروی اصطکاک

البته اختلافی در نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۱۲] نیز وجود دارد. در نتایج این مرجع با افزایش زاویه صفحه شیب‌دار مود غالب از فروریزش محوری به خمش تبدیل می‌شود که البته این موضوع در نتایج مقاله حاضر نیز مشهود است. اما در نتایج مرجع [۱۲] این موضوع در زاویه نسبتاً کمی در حدود ۷ درجه اتفاق می‌افتد؛ درحالی‌که بر اساس نتایج کار حاضر انتظار می‌رود تا زاویه ۲۵ درجه نیز مود محوری،

قابل صرف نظر کردن نیست. بدیهی است در صورت عدم وجود نیروی مقاوم اصطکاک، نمونه در زوایای هر چند کوچک به راحتی بر روی صفحه مایل لغزیده و مود غالب تبدیل به مود خمشی می شود.

آزمایش های دسته دوم مربوط به نمونه های C1، C3 و C5 هستند که نمودار مربوط به نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده متناظر با هریک از آنها در شکل ۱۴ به ترتیب نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۱۳ و شکل ۱۴ مشخص است که زوایای θ_1 و θ_2 تاثیر قابل توجهی در نیروی بیشینه اولیه دارند. از مقایسه شکل های مربوط به فروریزش نمونه ها (شکل های ۶ تا ۱۱) با نمودارهای نیرو - جابجایی (شکل ۱۲) معلوم می شود که در هنگام تماس اولیه، کل مقطع نمونه ها با صفحه شیب دار در تماس قرار نگرفته و تمام بار اعمالی توسط بخشی از مقطع تحمل و آن بخش از مقطع دچار فروریزش موضعی می شود. نیرویی که باعث این فروریزش موضعی می شود برابر با نیروی بیشینه مجالگی اولیه ($P_{max,1}$) است. مقدار این نیرو وابسته به این است که چه میزان از سطح مقطع با صفحه مایل در تماس قرار بگیرد که این موضوع نیز بستگی به زوایای صفحه مایل دارد. بیشترین مقدار $P_{max,1}$ در نمونه های C1 و C2 اتفاق افتاده است. در نمونه C1 زوایای صفحه مایل نسبتاً کوچک هستند و در هنگام تماس، بخش زیادی از سطح مقطع در تماس با صفحه مایل قرار می گیرد. در نمونه C2 کل یکی از اضلاع سطح مقطع در تماس اولیه با صفحه مایل در گیر می شود در حالی که در نمونه های C3، C4 و C5 این مقدار در حد یک نقطه کاهش پیدا می کند.

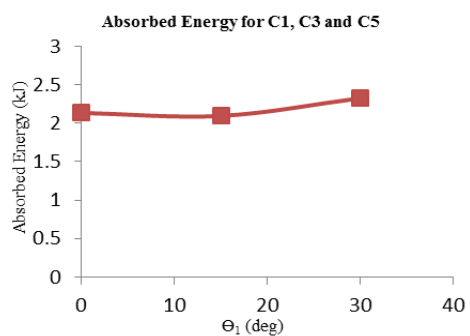
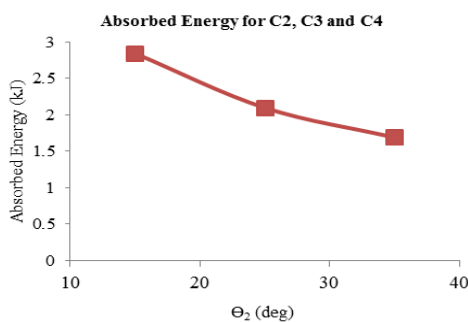
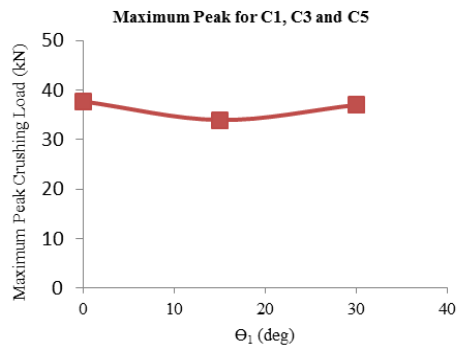
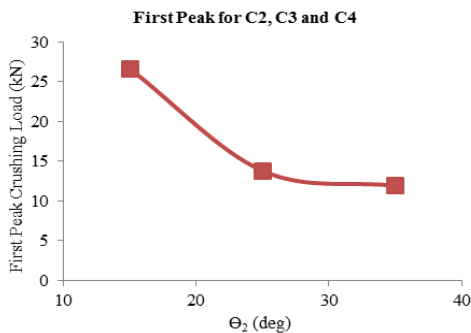
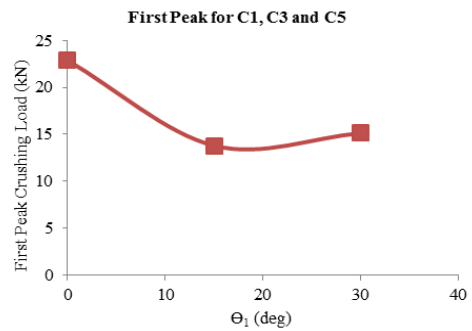
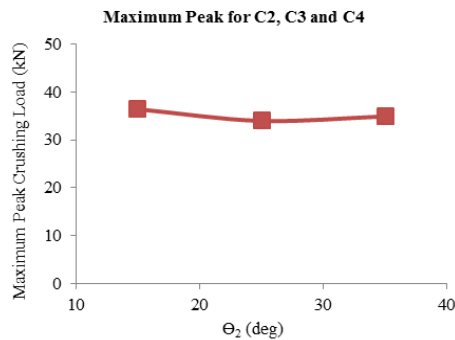
۴- مطالعه پارامتری و تحلیل نتایج

در این قسمت تاثیر زوایای θ_1 و θ_2 بر نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده بررسی شده است. جدول ۲ مشخصات نمونه ها به همراه مقادیر خروجی مورد نظر را نشان می دهد که در آن $P_{max,1}$ نیروی بیشینه اولیه، $P_{max,t}$ بیشترین نیروی بیشینه و E انرژی جذب شده است. در این آزمایش ها یک بار θ_2 برابر با ۲۵ درجه در نظر گرفته شده و θ_1 معادل با ۰، ۱۵ و ۳۰ تغییر داده شده است. در آزمایش های دسته دوم θ_1 برابر با ۱۵ درجه بوده و θ_2 معادل با ۱۵، ۲۵ و ۳۵ تغییر کرده است.

جدول (۲) نتایج آزمایش ها برای نمونه های C1 تا C5

Test	C (mm)	θ_1 (deg)	θ_2 (deg)	$P_{max,1}$ (N)	$P_{max,t}$ (N)	E (J)
C1	70	15	15	26634	36397	2842
C2	70	0	25	22863	37718	2134.9
C3	70	15	25	13776	33969	2096.7
C4	70	30	25	15112	37004	2326.7
C5	70	15	35	11908	34907	1690.5

آزمایش های دسته اول مربوط به نمونه های C2، C3 و C4 هستند که نمودار مربوط به نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده متناظر با هریک از آنها در شکل ۱۳ به ترتیب نشان داده شده است.



شکل ۱۴- نمودار نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده بر حسب زاویه Θ_2

شکل (۱۳) نمودار تغییرات نیروی بیشینه اولیه، بیشترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده بر حسب زاویه Θ_1

از شکل ۱۴ مشخص است که با افزایش زاویه Θ_2 (زاویه سطح مایل نسبت به افق)، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. این موضوع را به این صورت می‌توان توضیح داد که با افزایش این زاویه مود غالب از حالت کمانش پی در پی به مود خمشی تبدیل می‌شود و در نتیجه میزان انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. نتایج ارائه شده در نمودارهای شکل ۱۳ و ۱۴ بیانگر آن هستند که زوایای Θ_1 و Θ_2 با تاثیر گذاری بر میزان مچالگی محلی همچنین تعیین مود فروریزش نمونه باعث تغییراتی در پارامترهای مهم جذب انرژی مانند نیروی بیشینه و انرژی جذب شده می‌شوند.

با افزایش جابجایی، هنگامی که تمام سطح مقطع قوطی با سطح شیب‌دار در تماس قرار می‌گیرد، باقیمانده قوطی همانند یک قوطی که تحت نیروی محوری و بر روی یک تکیه‌گاه تقریباً مسطح قرار گرفته دچار چین خوردگی می‌شود. در این شرایط مود فروریزش غالب، محوری و به صورت کمانش پی در پی است. نیرویی که اولین چین خوردگی را در این شرایط به وجود می‌آورد بیشترین نیروی بیشینه مچالگی ($P_{max,i}$) است. از اینرو در نمونه‌هایی که مود غالب، مود کمانش پی در پی است، با توجه به این که تمام نمونه‌ها از جنس یکسان و با ابعاد برابر تهیه شده‌اند، انتظار می‌رود که بیشترین نیروی بیشینه تقریباً برابر باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای بررسی تجربی رفتار جاذب انرژی با مقطع مربعی تحت بار مایل سه بعدی یک فیکسچر به گونه‌ای طراحی شد که در طول آزمایش تحت بارهای اعمالی استحکام خود را حفظ کند. نتایج آزمایش‌ها حاوی اطلاعات جالبی در مورد رفتار قوطی جاذب انرژی تحت بار مایل سه بعدی هستند. مود شکل‌های به‌دست آمده ترکیبی از مود شکل محوری کماتش بی در پی، مود شکل خمشی و مود شکل پیچشی هستند. هر قدر مود شکل فروریزش سازه به مود شکل کماتش بی در پی نزدیک می‌شود انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. رفتار نیرو-جابجایی به‌دست آمده بیانگر این است که اولین نیروی بیشینه محلی متناظر با فروریزش محلی نمونه اتفاق می‌افتد و سپس با افزایش جابجایی مقدار نیروهای ماکزیمم محلی افزایش می‌یابند. مقایسه نتایج این مقاله با تحقیقات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که نحوه مقید کردن انتهایی که تحت بار مایل قرار می‌گیرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شرایطی که نمونه‌ها بدون هیچ مهارتی به صورت مستقیم با صفحه مایل در تماس می‌گیرند فروریزش جاذب انرژی به صورت محلی و از نقطه تماس آغاز می‌شود. نیروی معادل با فروریزش محلی در نمودار نیرو-جابجایی اولین نیروی بیشینه است. در این مقاله اولین نیروی بیشینه و بیشترین نیروی بیشینه برای تمام نمونه‌ها استخراج و باهم مقایسه شدند. مطالعات این مقاله می‌تواند با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود، مطالعه پارامتری و بهینه‌سازی تکمیل شود.

مراجع:

- [1] Johnson W., Mamalis AG., Crashworthiness of vehicles. London: Mechanical. Engineering. Publications Ltd., 1978.
- [2] Johnson W., Reid SR., Metallic energy dissipating systems, *Applied Mechanics Review*, vol. 31(3), 1978, pp. 277-288.
- [3] Jones N., Wierzbicki T., editors. Structural crash worthiness, London: Butterworth and Co. Publishers, 1983.
- [4] Guoxing Lu., Tongxi Yu., Energy Absorption of Structures and Materials. England: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [5] Alexander J.M., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading Quart, *Journal of Mechanicals and Applied Mathematics*, vol. 13, 1960, pp.1-9.
- [6] Mamalis A.G., Johnson W., The quasi-static crumpling of thin walled circular cylinders and frusta under axial compression, *International Journal of Mechanical Science*, vol. 25, 1983, pp. 713-32.
- [7] Jones N., Abramowicz W., Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes. In: Reid SR, editor, Metal forming and Impact Mechanics. Oxford, Pergamon Press, 1985, pp. 225.
- [8] Johnson W., Impact Strength of Material. London: Edward Arnold, 1972.
- [9] Abramowicz W., The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns, *International Journal Impact Engineering*, vol. 13, 1983, pp. 309-317.
- [10] Abramowicz W., Jones N., Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal Impact Engineering*, vol. 23, 1984, pp. 263-281.
- [11] Gupta N.K., Velmurugan R., Consideration of internal folding and non-symmetric fold formation axisymmetric axial collapse round tubes, *International Journal of Solids Structures*, vol. 34, 1997, pp. 2611-30.
- [12] Han D.C., Park S.H., Collapse behavior of square thin-walled columns subjected to oblique loads, *Journal. Thin-Walled Structures*, vol. 35, 1999, pp.167-184.

- [13] Reyes A., Langseth M., Hopperstad O.S., Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, 2002, pp. 1965–1984.
- [14] Reyes A., Langseth M., Hopperstad O.S., Square aluminum tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, 2003, pp.1077–1106.
- [15] Reyes A., Longseth M., Hopperstad O.S., Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study, *Journal of Solids and Structures*, vol. 41, 2004, pp.1645-1675.
- [16] Ahmad Z., Thambiratnam D.P., Tan A.C.C., Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, 2010, 475–488.
- [17] Zhibin Li., Jilin Yu., Liuwei Guo., Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 54(1), 2012, pp. 48–56.