

تحلیل تجربی و عددی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر نیروی لهیدگی جاذب‌های انرژی چهارگوش تحت بارگذاری محوری

سید وحید حسینی^۱، جمال زمانی^۲، ابوالفضل درویزه^۳ و مجید سلیمانی^۴
آزمایشگاه شکل‌دهی نوین، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در بسیاری از طراحی‌های مهندسی، برای جلوگیری از و یا کاهش خسارات ناشی از برخورد، از سیستم‌های جاذب انرژی استفاده می‌شود. در این مقاله، ابتدا گزارشی در مورد چگونگی آماده‌سازی تعداد قابل توجهی سلول اکسترود به عنوان سازه‌های جاذب انرژی و نحوه بازپخت آنها ارائه می‌شود. سپس، نتایج حاصل از بیش از ۹۰ آزمایش انجام شده در این تحقیق مرتبط با تأثیر پارامترهای هندسی، مانند ضخامت و ارتفاع سازه، پارامترهای مکانیکی، مثل تنش تسلیم سلول سازه و تغییر شرایط مرزی در میزان نیروی مچالگی در حالت بارگذاری محوری ثبت شده است. در بررسی این نتایج تجربی، شاخص‌های جذب انرژی مشخص و در ادامه تحلیل عددی سازه‌ها انجام شده است. در انتها، مقایسه‌ای بین میزان و نحوه جذب انرژی در نتایج تجربی و عددی صورت گرفته است. براساس این مقایسه، اختلاف نتایج حدود ۳ الی ۸ درصد است.

واژه‌های کلیدی: لهیدگی، سازه‌های جدارنازک، بارگذاری محوری، جاذب‌های انرژی، بارگذاری شبه استاتیکی

Experimental and Numerical Analysis of the Effects of Geometrical and Mechanical Parameters on the Folding Force of Extruded Square Energy Absorbers, Under Out of Plane Loading

S.V. Hossini, J. Zamani, A. Darvize and M. Soleimani
Manufacturing Eng. Group, Mech. Eng. Dep't.
K.N. Toosi Univ. of Tech.

ABSTRACT

In most engineering structures, specially moving ones and in general in the ones under dynamic and static loads, absorbing energy systems are used for preventing or reducing damages due to impacts. This paper examines the effective absorbing capability of the extruded single thin walled structures as absorbing energy systems. In this work, about 90 tests were carried out, wherein the effects of geometrical parameters, such as the thickness and the height of structures, mechanical parameters, such as yielding stresses, and the change in boundary conditions in the value of folding force in out of plane loading were investigated. Finally, a numerical study, which was based on finite element method, was conducted for comparison purposes. The accuracy of the numerical model was found to be about 95%.

Key Words: Thin Wall Structures, Out of Plane Loading, Energy Absorbers, Quasi-static Loading

۱- کارشناس ارشد

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): zamani_ashani@yahoo.com

۳- استاد

۴- کارشناس ارشد

۱- مقدمه

علاوه بر آن، ویرزیکتی [۸] یک مدل برای پیش‌بینی نیروی محوری متوسط سلول‌های لانه زنبوری (سازه شش ضلعی) بر اساس کار پلاستیک مستهلک شده در خمش و کشش بصورت زیر ارائه داد:

$$P_{av} = 8.61 \sigma_o t^{5/3} c^{1/3}, \quad (4)$$

که در آن، c عرض لوله مربعی، t ضخامت ستون و σ_o تنش جریان متوسط است.

۲- نحوه آماده‌سازی قطعات

سلول‌های ساخته شده به صورت قوطی چهارگوش هستند. در آزمایشات اولیه تست کشش بر روی قطعات، تنش‌های تسلیم مختلف مشاهده شد، برای تعیین تأثیر نرخ بارگذاری و پارامترهای هندسی در میزان نیروی لازم برای لهیدگی، یکسان نمودن تنش‌های تسلیم اجتناب ناپذیر است. به همین منظور، فرآیند کاهش تنش‌های تسلیم بالاتر به پایین‌ترین تنش تسلیم موجود در بین سازه‌ها انتخاب شد. برای پایین آوردن تنش‌های تسلیم روش بازیخت کردن در کوره الکتریکی به دلیل وجود امکانات فوق در آزمایشگاه مد نظر قرار گرفت. در این روش، ابتدا از تمامی نمونه‌ها و سازه‌های موجود به صورت قوطی، ورق‌هایی مستطیل شکل با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تهیه و سپس این ورق‌ها تحت بارگذاری کششی قرار داده شد. لازم به توضیح است که به علت شکل فک‌های موجود در دستگاه تست کشش، تست کشش سازه کامل و یا سلول‌ها به صورت چهارگوش ممکن نبوده و به همین دلیل ناگزیر به تست ورق‌هایی از همان سلول‌ها گشته و پس از مشخص شدن تنش‌های تسلیم ورق‌ها در حالت کششی، کمترین مقدار تنش حاصل به عنوان معیار، انتخاب شد. سپس ورق‌هایی از بقیه سلول‌ها تهیه و مراحل بازیخت درون کوره الکتریکی انجام شد. با استفاده از استاندارد ASM و جداول مربوط به بازیخت فلزات، درجه حرارت 300°C برای بازیخت آلومینیوم و درجه حرارت 538°C برای بازیخت برنج تعیین شد. سپس طی مراحل مختلف حرارت‌دهی و تغییر زمان، مابقی سازه‌ها به تنش مورد نظر رسانده شد.

در نیمه دوم قرن گذشته تعداد زیادی از مسائل ضربه، بویژه در زمینه پاسخ دینامیکی سازه‌ها در محدوده پلاستیک مطرح شده‌اند، که این موضوع به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه‌هایی در حین برخورد کمک می‌کند. این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه‌های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارت‌های انسانی و منابع مادی به شدت کاهش می‌یابد. این شاخه از علوم مهندسی در محدوده وسیعی از موقعیت‌ها که شامل مواردی مانند مبحث جذب انرژی در تصادف وسایل نقلیه [۱]، سازه‌های مقاوم [۲] و سازه‌های هوا فضا [۳] است، کاربرد دارد. در واقع یک جاذب انرژی سیستمی است که بتواند تمام یا قسمتی از انرژی جنبشی را به شکل دیگری از انرژی تبدیل کند. از رایج‌ترین انواع جاذب انرژی می‌توان به سازه‌های میان‌تهی (لوله‌ها) با مقاطع دایروی، مربعی و یا سازه‌های لانه زنبوری اشاره کرد [۴]. ویرزیکتی و آبرامویچ برخورد سازه‌های جدار نازک چندگوش مربوط به اجزای صفحات را با توجه به لولاهای پلاستیک ثابت و نواحی باریک کشش محیط‌های دایروی و خمش موجود در سازه تحلیل کردند [۵]. برای یک حالت خاص در ستون چندگوش لوله‌ای، نیروی لازم برای مچالگی کامل سازه (نیروی لهیدگی متوسط) P_{av} برای حالت تغییر شکل جاذب انرژی با مقطع مربعی با مواد ارتجاعی - کاملاً پلاستیک به صورت زیر محاسبه شد:

$$P_{av} = 9.56 Y t^{5/3} c^{1/3}, \quad (1)$$

که در آن، c عرض لوله مربعی، t ضخامت ستون و Y تنش تسلیم ماده است.

آبرامویچ و جونز [۶] نیروی برخورد استاتیکی را برای فروریزش محوری لوله مربعی به صورت زیر پیش‌بینی کردند:

$$P_{av} = Yt(9.69 c^{1/3} t^{2/3} + 0.84 c^{2/3} t^{1/3} + 0.58 t^2). \quad (2)$$

در ۱۹۸۹ ویرزیکتی و آبرامویچ [۷] مدل قبلی را با فرض یک زاویه دلخواه بین صفحات به صورت زیر توسعه دادند:

$$P_{av} = 13.06 Y t^{5/3} c^{1/3}. \quad (3)$$

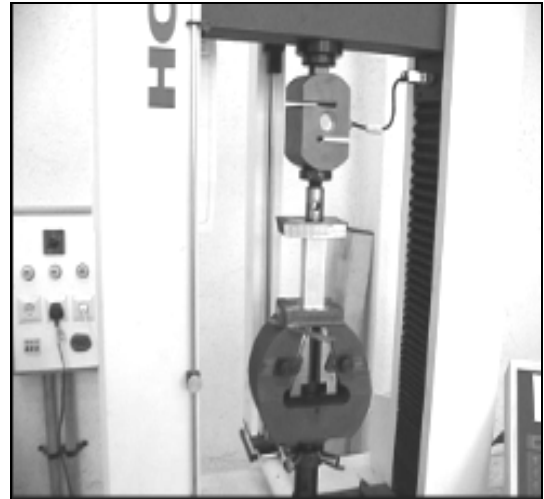
۳- چگونگی آزمایشات

در این مرحله و پس از آماده‌سازی قطعات، قطعه‌های ساخته شده توسط دستگاه تست کشش - فشار، آزمایش شد

شکل ۲۱.



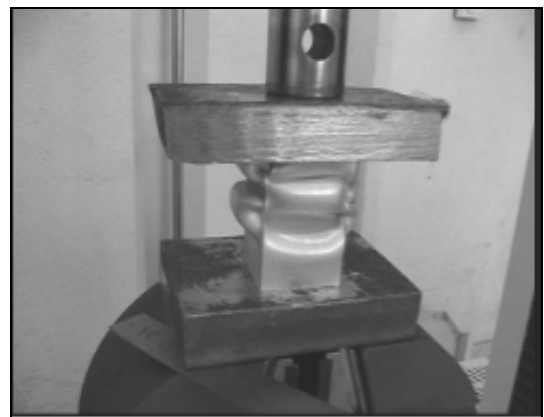
شکل ۳- نمونه‌های تست شده برنجی.



شکل ۱- دستگاه تست کشش - فشار.

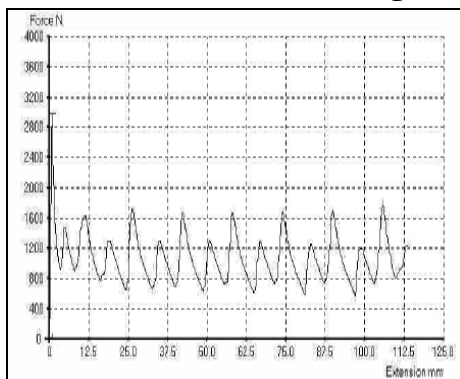


شکل ۴- نمونه‌های تست شده آلومینیومی.



شکل ۲- دستگاه تست کشش - فشار.

مقدار نیروی ماکزیمم برای شروع لهیدگی سلول‌ها از نمودار نیرو - جابجایی و نیروی میانگین در طول فرآیند تاخوردگی توسط نرم‌افزار فوق قابل محاسبه است و همچنین میزان جذب انرژی سلول (برحسب ژول) توسط نرم‌افزار Q-Mat تعیین می‌شود.



شکل ۵- نمودار تست سلول آلومینیومی با عرض خارجی ۲۰ mm، ضخامت ۰/۵ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm

حداکثر سرعت حرکت فک دستگاه تست کشش ۵۰۰ mm/min و حداقل سرعت این فک ۰/۵ mm/min است. فک بالایی دستگاه مجهز به یک نیروسنج است که میزان نیروی وارده بر روی فک را به دستگاه PC منتقل می‌کند. حداکثر بار فشاری قابل اعمال توسط دستگاه ۱۰۰ kN است.

شکل ۳ و ۴ نمونه‌هایی از سازه‌های چهارگوش تست‌شده، از جنس برنج و آلومینیوم را نشان می‌دهد. با انتقال اطلاعات موجود از قبیل جابجایی و نیرو به PC که مجهز به نرم‌افزار Q-Mat است، می‌توان نمودار نیرو - جابجایی که در آن نیرو برحسب N و جابجایی برحسب mm است، را مشخص نمود

۴- بحث و بررسی نتایج آزمایشات

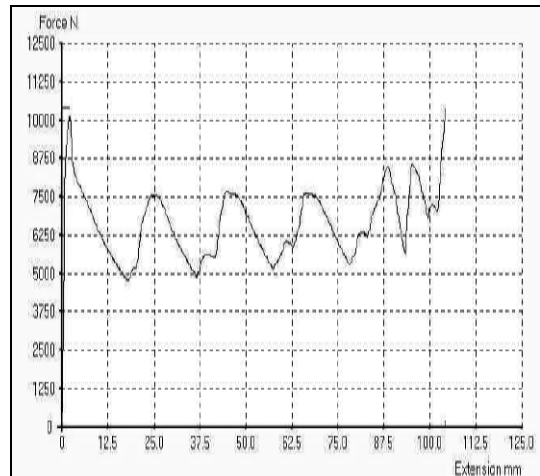
نتایج حاصل از بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سازه‌های سلولی در جداول ۱-۵ بیان شده است. بر این اساس، تأثیر پارامترهای متفاوت بر روی میزان نیروی میانگین لهیدگی لازم برای مچالگی و همچنین میزان جذب انرژی، قابل بررسی است.

جدول ۲- نتایج بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سلول‌های چهارگوش آلومینیومی با عرض خارجی ۳۰ mm.

شماره تست	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین تجربی (N)	جذب انرژی (N)
CV1	۰/۵	۵۰	۱۶۱۰/۱	۶۷/۸
CV2	۰/۵	۱۰۰	۱۶۰۰/۱	۱۲۸/۷
CV3	۰/۵	۱۵۰	۱۵۹۳/۴	۲۴۴/۸
CV4	۰/۵	۲۰۰	۱۵۸۸/۱	۲۵۰/۴
CV5	۱	۵۰	۵۱۶۰/۴	۲۱۰/۷
CV6	۱	۱۰۰	۵۱۲۳/۶	۴۱۹/۳
CV7	۱	۱۵۰	۵۱۱۰/۹	۶۲۷/۱
CV8	۱	۲۰۰	۵۱۰۱/۲	۸۳۵/۴
CV9	۱/۵	۵۰	۱۰۰۰۰/۳	۴۰۱/۶
CV10	۱/۵	۱۰۰	۹۹۹۱/۵	۸۰۰/۱
CV11	۱/۵	۱۵۰	۹۹۸۳/۴	۱۱۹۷/۴
CV12	۱/۵	۲۰۰	۹۹۷۸/۱	۱۵۹۶/۴
CV13	۲	۵۰	۱۶۵۲۰	۶۸۰/۶
CV14	۲	۱۰۰	۱۶۲۷۰	۱۲۸۸/۶
CV15	۲	۱۵۰	۱۶۳۳۶	۱۷۲۶
CV16	۲	۲۰۰	۱۶۳۱۰	۲۴۰۲/۴

۴-۱- تأثیر ضخامت سلول

اثر ضخامت سلول‌های چهارگوش در آزمایش‌های مختلف بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جداول ۱ الی ۵ مبین آن است که با افزایش ضخامت سلول به میزان ۲ برابر میزان نیروی لهیدگی در حدود ۲۲۰٪ افزایش پیدا کرده است. از طرفی با افزایش ضخامت به میزان ۳ برابر نیروی لهیدگی حدود ۵۳۰٪ افزایش می‌یابد نمودار ۱.



شکل ۶- نمودار تست سلول چهارگوش برنجی با عرض خارجی ۲۰mm، ضخامت ۱ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm.

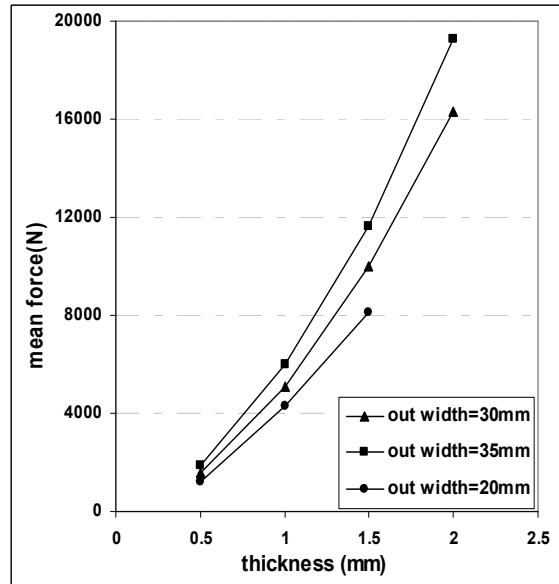
نمونه‌ها پس از آماده شدن، بین دو صفحه تخت موازی در دستگاه قرار می‌گیرند. سرعت بارگذاری در انجام تست‌های شبه استاتیکی در این تحقیق ۳۰ mm/min است. در زمان مچالگی کامل سلول‌ها، نمودار نیرو - جابجایی سیر صعودی به خود می‌گیرد و این زمان پایان آزمایش است.

جدول ۱- نتایج بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سلول‌های چهارگوش آلومینیومی با عرض خارجی ۲۰ mm.

شماره تست	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین تجربی (N)	نیروی تحلیلی از مدل آبرامویچ و جونز (N)	اختلاف تجربی با تحلیلی (%)
CS1	۰/۵	۵۰	۱۳۰۹	۱۲۳۸	۵/۴
CS2	۰/۵	۱۰۰	۱۲۲۱	۱۲۳۸	۱/۴
CS3	۰/۵	۱۵۰	۱۰۷۱	۱۲۳۸	۱۵/۷
CS4	۰/۵	۲۰۰	۱۰۴۱	۱۲۳۸	۱۸/۹
CS5	۱	۵۰	۴۳۴۱	۳۹۳۰	۹/۴
CS6	۱	۱۰۰	۴۲۹۹	۳۹۳۰	۸/۵
CS7	۱	۱۵۰	۴۲۱۲	۳۹۳۰	۶/۷
CS8	۱	۲۰۰	۴۱۷۶	۳۹۳۰	۵/۸
CS9	۱/۵	۵۰	۸۱۱۵/۹	۷۹۷۱	۱/۸
CS10	۱/۵	۱۰۰	۸۰۹۳/۲	۷۹۷۱	۱/۵
CS11	۱/۵	۱۵۰	۸۰۶۹/۳	۷۹۷۱	۱/۲
CS12	۱/۵	۲۰۰	۸۰۵۱/۲	۷۹۷۱	۱

جدول ۴- نتایج بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سلولهای چهارگوش برنجی با عرض خارجی ۲۰ و ۳۰mm.

شماره تست	عرض خارجی (mm)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین (N)	جذب انرژی (J)
CN1	۲۰	۰/۵	۱۰۰	۲۳۳۲/۹	۱۵۹/۲
CN2	۲۰	۰/۵	۱۵۰	۲۳۰۱/۷	۲۱۶/۳
CN3	۲۰	۱	۵۰	۸۰۴۴	۲۵۴/۸
CN4	۲۰	۱	۱۰۰	۷۳۷۲	۵۰/۱
CN5	۲۰	۱	۱۵۰	۷۶۶۸	۷۵۹
CN6	۲۰	۱/۵	۵۰	۱۵۵۷۶/۹	۴۹۶/۱
CN7	۲۰	۱/۵	۱۰۰	۱۴۳۲۴	۹۹۱/۱
CN8	۲۰	۱/۵	۱۵۰	۱۴۸۰۲/۷	۱۴۸۳/۳
CN9	۲۰	۰/۵	۵۰	۲۷۳۵/۳	۹۳/۶
CN10	۳۰	۰/۵	۱۰۰	۲۶۵۰	۱۸۷/۳
CN11	۳۰	۰/۵	۱۵۰	۲۶۳۱	۲۸۱
CN12	۳۰	۰/۵	۲۰۰	۲۵۰۲/۸	۳۷۴/۷



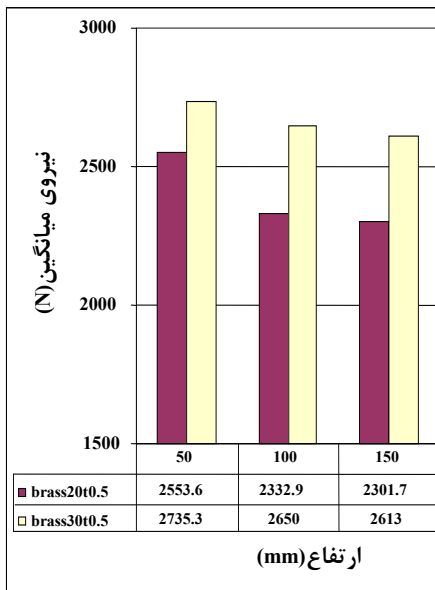
نمودار ۱- تأثیر ضخامت در میزان نیروی میانگین لهیدگی.

جدول ۳- نتایج بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سلولهای چهارگوش آلومینیومی با عرض خارجی ۳۵ mm.

جدول ۵- نتایج بارگذاری شبه استاتیکی بر روی سلولهای چهارگوش برنجی با عرض خارجی ۳۵ mm.

شماره تست	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین (N)	جذب انرژی (J)
CQ1	۰/۵	۱۰۰	۲۷۶۳/۲	۱۹۵/۲
CQ2	۰/۵	۱۵۰	۲۷۰۴/۲	۲۹۰/۳
CQ3	۰/۵	۲۰۰	۲۶۹۹/۳	۳۸۱/۲
CQ4	۱	۵۰	۹۱۹۰/۶	۳۱۴/۵
CQ5	۱	۱۰۰	۹۱۰۲/۴	۶۲۱/۷
CQ6	۱	۱۵۰	۸۹۹۱/۷	۹۳۸/۶
CQ7	۱	۲۰۰	۸۹۸۱/۶	۱۲۴۳/۲
CQ8	۱/۵	۵۰	۱۷۶۶۳/۴	۶۰۸/۲
CQ9	۱/۵	۱۰۰	۱۷۵۵۵/۲	۱۲۰/۱/۹
CQ10	۱/۵	۱۵۰	۱۷۵۲۷/۱	۱۷۹۷/۶
CQ11	۱/۵	۲۰۰	۱۷۵۰۳/۴	۲۴۲۳/۸
CQ12	۲	۵۰	۲۹۲۲۶/۱	۱۰۰۴/۳
CQ13	۲	۱۰۰	۲۹۱۹۶/۲	۲۰۰۲/۸
CQ14	۲	۱۵۰	۲۹۱۸۲/۹	۳۰۰۱/۳
CQ15	۲	۲۰۰	۲۹۱۴۶/۳	۴۰۱۱/۷

شماره تست	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین تجربی (N)	جذب انرژی (J)
CM2	۰/۵	۱۵۰	۱۸۶۶/۹	۲۲۰/۲
CM3	۰/۵	۲۰۰	۱۸۶۰/۶	۲۹۰/۱
CM4	۱	۵۰	۶۰۱۸/۷	۲۳۶/۷
CM5	۱	۱۰۰	۶۰۰۳/۴	۴۶۹/۴
CM6	۱	۱۵۰	۵۹۹۱/۶	۷۰۱/۱
CM7	۱	۲۰۰	۵۹۸۶/۱	۹۴۷/۳
CM8	۱/۵	۵۰	۱۱۶۳۳	۴۵۹/۳
CM9	۱/۵	۱۰۰	۱۱۶۵۶/۳	۹۱۸/۱
CM10	۱/۵	۱۵۰	۱۱۶۵۱/۷	۱۳۶۵/۸
CM11	۱/۵	۲۰۰	۱۱۶۷۴/۴	۱۸۳۱/۴
CM12	۲	۵۰	۱۹۲۶۵/۱	۷۵۱/۳
CM13	۲	۱۰۰	۱۹۲۵۶/۲	۱۴۹۸/۱
CM14	۲	۱۵۰	۱۹۲۴۸/۳	۲۲۴۹/۷
CM15	۲	۲۰۰	۱۹۲۴۲/۷	۳۰۰۰/۳

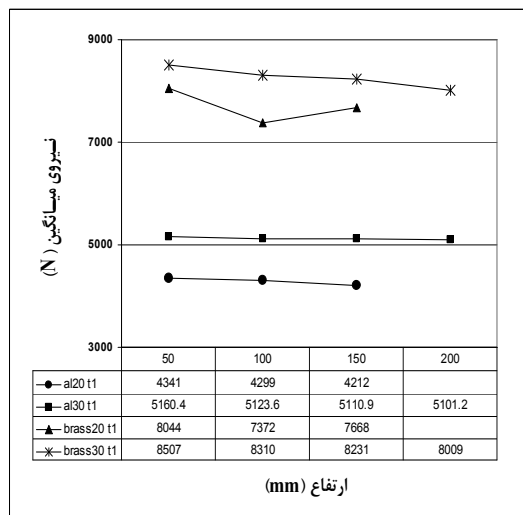


(ب)

نمودار ۲- تأثیر عرض سلول در میزان نیروی میانگین آلومینیوم (الف) - برنج (ب).

۳-۴- تأثیر ارتفاع و تنش تسلیم سلول

اثر ارتفاع سلولها و تنش تسلیم دو نمونه مختلف از جنس آلومینیوم و برنج مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایشها در جداول ۱-۵ آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش تنش تسلیم سلول از آلومینیوم به برنج نسبت به میزان $27/6\%$ افزایش نیروی تسلیم در حدود $75/3\%$ افزایش پیدا می‌کند نمودار ۳.

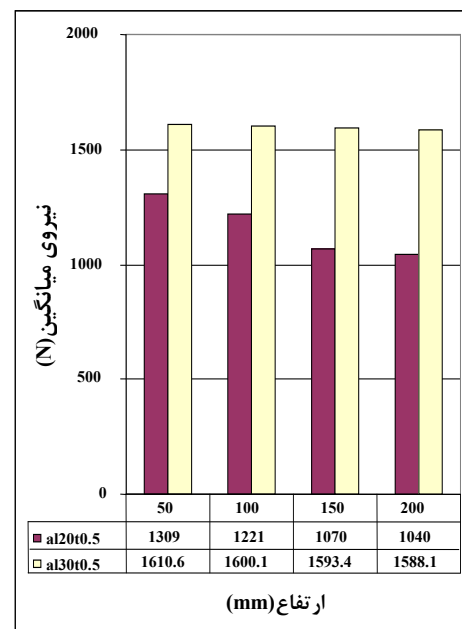


نمودار ۳- تأثیر ارتفاع و تنش تسلیم در نیروی میانگین لهیدگی.

از طرفی با توجه به نمودار ۳ می‌توان مشاهده نمود که افزایش ارتفاع سلول، باعث کاهش نیروی لازم برای لهیدگی

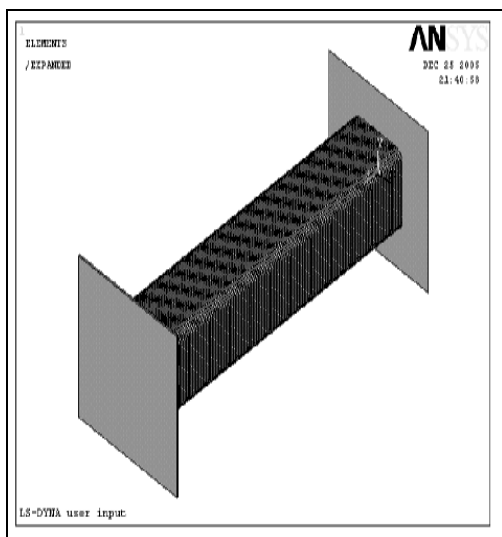
۲-۴- تأثیر عرض سلول

اثر عرض سلولها نیز بر روی نمونه‌های مختلف از جنس آلومینیوم و برنج با عرض‌های ۲۰، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایشها در جداول ۱-۵ آورده شده است. با توجه به نتایج حاصله، با افزایش عرض سلول به میزان 150% میزان نیروی لهیدگی در مورد آلومینیوم حدود 21% و در مورد برنج حدود $7/3\%$ افزایش می‌یابد نمودار (۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تأثیر عرض سلول در سازه آلومینیومی به مراتب بیشتر از سازه برنجی است. در واقع نیروی میانگین لهیدگی وابسته به کماتش دیواره‌ها، تاخوردگی، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته است و از طرفی عرض سلول باعث افزایش سطح مقطع و ممان اینرسی و در نتیجه افزایش نیروی لهیدگی می‌شود. چون آلومینیوم مدول الاستیسیته و تنش تسلیم کمتری نسبت به برنج دارد، نسبت به نیروی فشاری و کماتش دیواره‌ها حساس‌تر است و با نیروی کمتری نسبت به برنج تسلیم می‌شود نمودار ۲. بنابراین با تقویت عرض سلول، اثر این تقویت در آلومینیوم بیشتر از برنج است. این در حالی است که در رابطه ویرزبکی و آبرامویچ (معادله ۳)، با افزایش 150% عرض سلول، نیروی میانگین $14/8\%$ افزایش می‌یابد و وابستگی این افزایش به جنس ماده لحاظ نشده است.

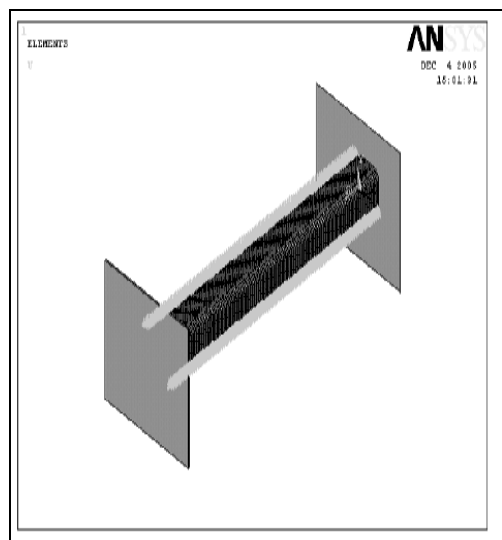


(الف)

است. این کار زمان حل را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. شرایط مرزی در صفحه تقارن، عدم تغییر مکان در راستای عمود بر این صفحه و همچنین عدم چرخش حول محور سازه است. در شکل ۷ نمونه‌ای از کل سازه و همچنین یک چهارم مدل شده آن مشاهده می‌شود. دو صفحه در دو طرف سازه، به عنوان فک‌های دستگاه قرار دارند که باعث فشردگی این سازه می‌شود. جنس این صفحات بسیار سخت‌تر از قطعه آلومینیومی است و می‌توان آنها را صلب در نظر گرفت. با انجام این عمل، محاسبات آنها از حل مسأله حذف شده، همگرایی در جواب‌های به دست آمده بهتر و همچنین زمان حل مسأله کوتاه‌تر می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۷- (الف) کل سازه و (ب) یک چهارم مدل شده با شرایط

مرزی تقارن.

برای بارگذاری سلول چهارگوش مورد نظر، فک پایینی

می‌شود. ملاحظه می‌شود که تأثیر ارتفاع هرچند ناچیز است، اما به میزان اندکی در افزایش و یا کاهش نیروی لهیدگی مؤثر است. آبروموویچ و ویرزبیکس و تقریباً کلیه محققین در مدل‌های ریاضی ارائه شده خود، به نوعی از تأثیر ارتفاع صرف نظر کرده‌اند.

۵- تحلیل عددی

برای تحلیل این سازه از بسته نرم‌افزاری Ansys استفاده شده است. تعدادی از نمونه‌های تجربی تست شده که انتخاب و مورد تحلیل عددی قرار گرفته‌اند را می‌توان در جدول ۶ مشاهده کرد.

با توجه به تغییر مکان‌های بسیار بزرگ، حل‌های پلاستیک غیرخطی و همچنین وجود تماس‌های پیچیده و بسیار زیاد، روش حل ضمنی^۱ به این علت که المان‌های تماس باید تعریف شوند و این کار، باعث بزرگ شدن بیش از حد ماتریس سختی کل سازه، طولانی شدن بسیار زیاد زمان حل و همچنین دشواری‌های همگرایی می‌شود، روش حل مناسبی نیست. بنابراین در این تحلیل از روش حل صریح^۲ که الگوریتم حل آن مربوط به بسته نرم‌افزاری LS-Dyna است و قابلیت‌های بسیار خوبی در تحلیل‌هایی با تغییر مکان‌های بزرگ و تماسی پیچیده دارد، استفاده شده است و با تعریف زمان مورد نظر می‌توان به حل‌های شبه‌استاتیکی رسید. از طرفی تعریف تماس در این بخش بسیار مناسب‌تر است.

جدول ۶- مشخصات هندسی سلول‌های جدار نازک تست شده.

شماره آزمایش	CS1	CS2
جنس	آلومینیوم	آلومینیوم
پهنا خارجی (mm)	۲۰	۲۰
ضخامت (mm)	۰/۵	۰/۵
ارتفاع (mm)	۵۰	۱۰۰

۵-۱- هندسه و شرایط مرزی مسأله

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده که حاکی از تغییر شکل کاملاً متقارن سازه‌ها است و همچنین وجود دو صفحه تقارن در این سازه سلولی، فقط یک چهارم مدل شده

1- implicit

2- Explicit

افزایش تعداد المان‌ها به زمان حل و امکانات رایانه‌ای بیشتری نیاز دارد. برای به دست آوردن تعداد المان مورد نیاز باید یک مسأله خاص را با تعداد مش‌های متفاوت حل کرده و تأثیر پارامتر حساس را بررسی نمود. این بخش در چهار حالت با تعداد المان‌بندی‌های ۲۸۰۰ و ۴۵۰۰ و ۳۴۲۰۰ و ۱۱۶۶۱۷ انجام گرفت که به ترتیب ۵ و ۱۳/۵ و ۱۲۰ و ۲۴۴ ساعت طول کشید. پارامتر بحرانی در حل مسأله، نیروی ماکزیمم (شروع لهیدگی) است که اثر تغییرات آن براساس تغییر تعداد المان‌ها به صورت نسبی و نسبت به حالت چهارم که بیشترین المان را داشت، بررسی شد جدول ۸. با توجه به زمان حل مسأله و دقت نسبی مورد نظر تعداد ۴۵۶۰ المان برای سازه سلولی ۱۰۰ میلیمتر و تعداد ۲۳۱۱ المان برای حل سازه سلولی ۵۰ میلیمتری در نظر گرفته شد.

جدول ۸- مقایسه نسبی حساسیت المان‌بندی سلول جدارنازک CS2

شماره تحلیل	تعداد المان‌ها	نیروی ماکزیمم لهیدگی (N)	مقدار خطا (%)	زمان (ساعت)
۱	۲۸۰۰	۲۵۰۰	۷/۷	۵
۲	۴۵۶۱	۲۶۳۲	۲/۹	۱۳
۳	۳۴۲۰۰	۲۶۷۰	۱/۵	۱۲۰
۴	۱۱۶۶۱۷	۲۷۱۰	۰/۰	۲۴۵

۵-۳- انتخاب پله زمانی

در بخش حل‌های صریح مسائل در هر بازه زمانی، نسبت به بازه زمانی قبل خود حل می‌شوند، بنابراین تعریف این تغییرات زمانی از اهمیت خاصی برخوردار است. در صورت تعریف گام زمانی کوچک (افزایش تعداد گام زمانی) دقت مسأله افزایش می‌یابد ولی زمان حل مسأله بسیار زیاد می‌شود. لذا تحقیق حساسیت نسبت به این پارامتر اهمیت خاصی دارد. شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی ماکزیمم برحسب تعداد این پله‌های زمانی کوچک با تعداد المان ۴۵۶۱ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، در پله‌های زمانی کم، مسأله اصلاً قابلیت پیش‌بینی نیروی ماکزیمم را ندارد و جواب آن قابل اعتماد نیست (تحلیل واگرا است) ولی از تعداد ۴۰۰۰۰۰ پله زمانی به بالا، این تغییرات روند مناسبی دارد و تحلیل قابل اعتماد است. انتخاب ۱۰۰۰۰۰۰ پله زمانی (Timestep) باعث دقت نسبی حل مسأله تا حدود ۲٪ خطا می‌شود.

کاملاً ثابت در نظر گرفته شده و فک بالایی با سرعت ۳۰ mm/min که برابر با سرعت بارگذاری فک در آزمایشات انجام شده است، در راستای محور سلول حرکت می‌کند و باعث لهیدگی سلول‌ها می‌شود.

برای به دست آوردن مشخصات مواد استفاده شده در روش‌های عددی، نمونه ورقه با ابعاد $(1 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3)$ از همان جنس آلومینیوم را تحت تست کشش قرار داده و با استفاده از استاندارد ASTM برای تست کشش ورق (sheet)، مشخصات مواد جدول ۷ با در نظر گرفتن مدل کرنش سختی سینماتیکی دوخطی اندازه‌گیری شد.

جدول ۷- مشخصات ماده استفاده شده در تحلیل عددی.

آلومینیوم	
۲۷۱۰	دانسیتته $(\frac{kg}{m^3})$
۷۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون
۱۳۰	استحکام تسلیم (MPa)
۱	مدول در ناحیه پلاستیک (GPa)

۵-۲- المان‌بندی

در این شبیه‌سازی می‌توان از هر دو نوع المان هشت گره‌ای Solid164 و یا المان Shell165 برای مدل‌سازی سازه‌های سلولی جدارنازک استفاده کرد [۹]، که البته این مسأله، جواب‌های یکسان برای هر دو المان داشته است. در این مقاله به علت تاخوردگی‌های پیچیده ترجیحاً از المان Solid164 استفاده شده است. فک‌های پرس در این تحلیل به صورت یک صفحه صلب در نظر گرفته شده است و فقط نقش مچاله کردن سازه سلولی را بدون تغییرشکلی در خود داشته است. بنابراین به دلیل عدم تغییر فرم در المانهای مرتبط با فکها، ترجیحاً از المانی که دارای گره‌های کمتر می‌باشد یعنی از المان‌های Shell165 که دارای ۴ گره هستند، استفاده شده است.

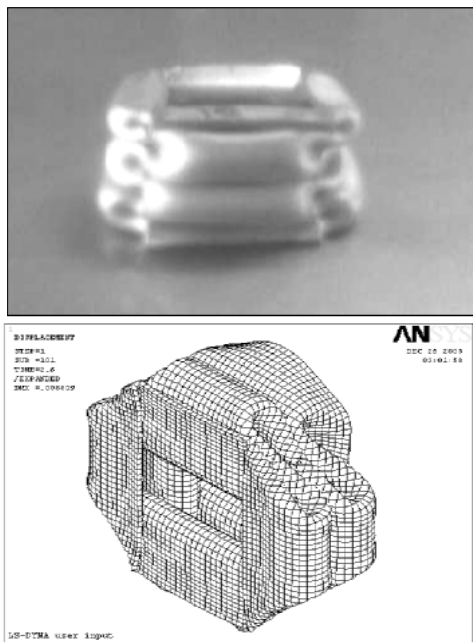
در روش اجزا محدود جسم به المان‌های کوچکتری تقسیم شده و معادلات حاکم در هر گام زمانی^۱، به طور همزمان حل می‌شوند. معمولاً تا حد معینی، هرچه تعداد المان بیشتر باشد جواب مسأله از دقت بیشتری برخوردار است. از طرف دیگر

1- Bilinear Kinematic Model-

2-Time step

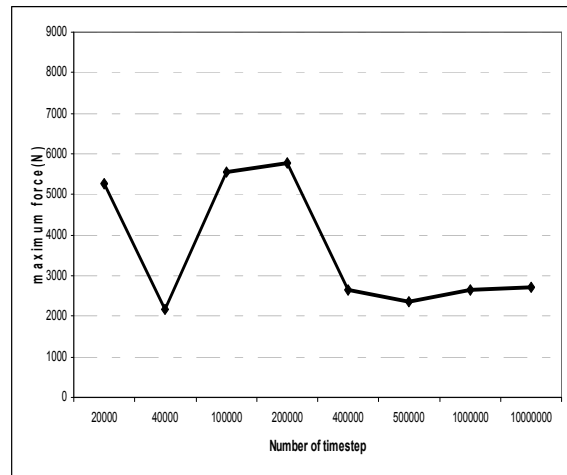
محدود لحاظ نشده است و در زیرساختاری جداگانه قابل محاسبه است. بنابراین وجود عیبی در سازه سلولی جدار نازک برای شبیه‌سازی عددی الزامی است. این عیب باید به گونه‌ای باشد که سازوکار صحیح تاخوردگی رعایت شود. این عیب به صورت یک تورفتگی در مرز تقارن یک چهارم سلول مدل شده و توسط سه مشخصه هندسی که موقعیت عیب از انتهای سلول جدار نازک، عمق و طول عیب است، تعریف شده است. مشخصه‌های این عیب تأثیرگذار بر نیروی لهیدگی می‌باشد و انتخاب صحیح این مشخصه‌ها توسط اصل مینیمم انرژی قابل تشخیص است [۱۰].

تغییر فرم قطعه برای سازه‌های سلولی جدار نازک CS1 و CS2 حاصل از نتایج تئوری و عملی را می‌توان در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده کرد. قابل ذکر است که تاخوردگی و تغییر فرم حاصل از شبیه‌سازی عددی در هر دو سلول جدار نازک با نتایج تجربی کاملاً تطابق دارد. تاخوردگی به گونه‌ای است که دیواره‌های مجاور سلول جدار نازک یکی به سمت داخل و دیگری به سمت بیرون تاخورده است.



شکل ۹- تغییر شکل تجربی و عددی سلول جدار نازک CS1.

شکل ۱۱ تغییر شکل سلول جدار نازک را برای حالتی که عیب برای سازه تعریف نشده باشد (الف) و همچنین برای حالتی که عیب صحیحی تعریف شده باشد (ب)، نشان می‌دهد. در شکل (الف) دیواره‌های سلول جدار نازک همه به سمت داخل و یا بیرون تاخورده‌اند که کاملاً با واقعیت تفاوت دارد. در شکل (ب) سازه از ابتدا به گونه‌ای شروع به تاخوردگی



شکل ۸- نمودار حساسیت نسبت به تعداد پله‌های زمانی حل برای سلول جدار نازک CS2.

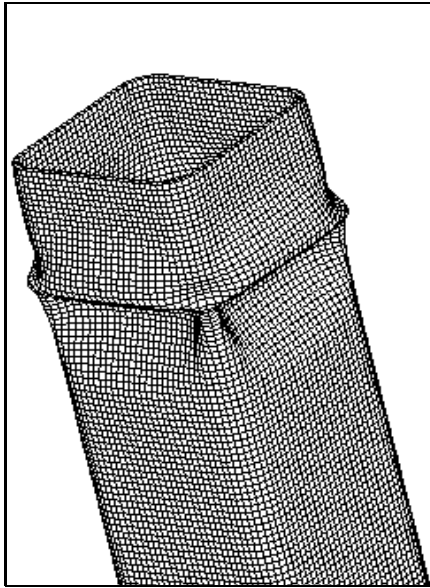
۶- بررسی نتایج تجربی و عددی

جدول ۹ نتایج حاصل از تست‌های تجربی انجام شده را نشان می‌دهد. در سازه‌های سلولی جدار نازک تحت بار فشاری، ماکزیمم نیرو (F_{max}) در شروع اولین تاخوردگی اتفاق می‌افتد. برای به دست آوردن معیاری از شروع تاخوردگی، نیروی فشاری معادل ایجاد تنش تسلیم در سلول جدار نازک (نیروی تسلیم تئوری)، با توجه به سطح مقطع مؤثر سازه جدار نازک (A) و تنش تسلیم (σ_y) محاسبه شده است. نسبت نیروی ماکزیمم تجربی به این نیروی تئوری برای این سازه‌ها با توجه به ارتفاع آنها برابر 0.168 و 0.156 است که نشانه تسلیم و تاخوردن سازه در ناحیه الاستیک می‌باشد. این قانون برای سازه‌های سلولی جدار نازک دیگر تست شده نیز صادق است.

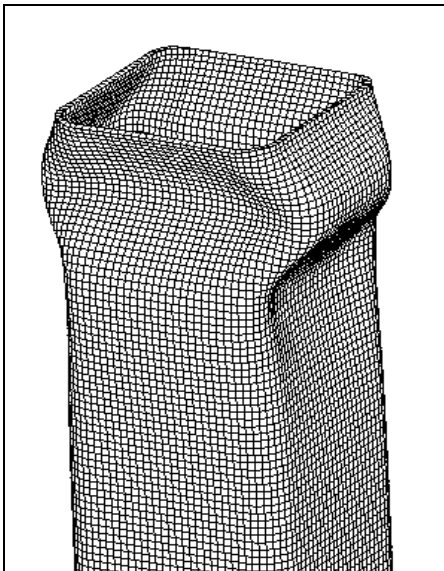
جدول ۹- مقایسه نیروی ماکزیمم تجربی با نیروی تسلیم تئوری.

شماره آزمایش	CS1	CS2
مساحت (mm^2)	۳۹	۳۹
تنش تسلیم (MPa)	۱۳۰	۱۳۰
نیروی تسلیم تئوری (N)	۵۰۷۰	۵۰۷۰
نیروی ماکزیمم لهیدگی تجربی (N)	۳۴۲۹	۲۸۴۹
نسبت نیروی تئوری به تجربی	0.168	0.156

با افزایش نسبت ضخامت به پهنا و جدار ضخیم شدن این سازه، نسبت فوق به یک می‌رسد. علت این سازوکار تسلیم شدن در سلول جدار نازک، کمانش داخلی در جداره این سلول‌ها است. معادلات مربوط به کمانش متفاوت از روابط تنشی می‌باشد و در زیرساختار تحلیل تنش نرم‌افزارهای اجزا



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- تغییر شکل سلول

الف: در صورت عدم تعریف عیب (متفاوت با واقعیت)
ب: در صورت تعریف صحیح عیب (همخوانی با واقعیت).

جدول ۱۱- مقایسه نیروی ماکزیمم لهیدگی.

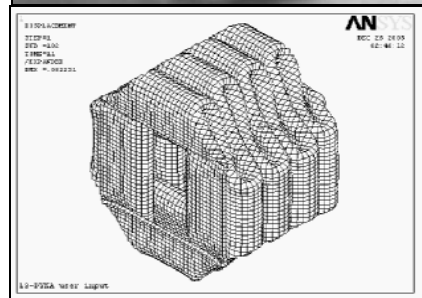
خطا (%)	نیروی ماکزیمم لهیدگی		کد تحقیق
	المان محدود	تجربی	
۹/۴	۳۱۰۸/۱	۳۴۲۹/۰	CS1
۷/۶	۲۶۳۲/۱	۲۸۴۹/۰	CS2

شکل ۱۲ نمودار جذب انرژی نتایج تجربی و عددی برای سلول جدارنازک CS1 برحسب میزان لهیدگی است.

می‌کند که هر دو دیواره مجاور سلول، یکی به سمت داخل تاخورد و دیگری به سمت بیرون که با واقعیت تطابق دارد. در صورت عدم تعریف عیب، نیروی شروع تاخوردگی که همان نیروی ماکزیمم لهیدگی (F_{max}) است، تقریباً برابر با نیروی تسلیم تئوری می‌باشد جدول ۱۰.

درواقع در صورت عدم تعریف عیب، ساز و کار تسلیم شدن سلول جدار نازک که به صورت کمانش در دیواره است، برای بسته نرم‌افزاری قابل تشخیص نیست و در نیرویی که معادل تسلیم شدن ماده است، تسلیم می‌شود.

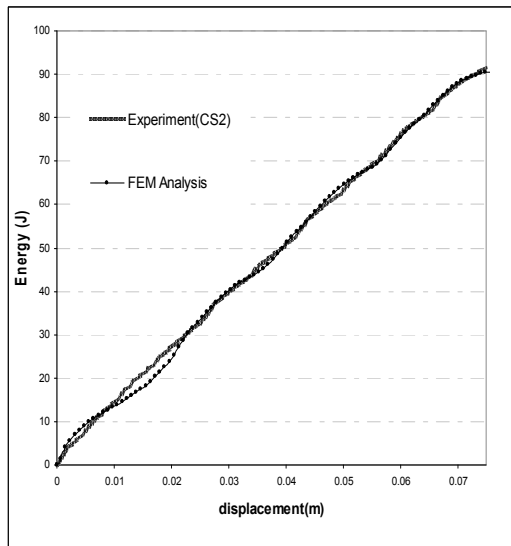
جدول ۱۱ نیروی ماکزیمم (تجربی) در سلول‌های جدار نازک CS1 و CS2 را به همراه نتایج عددی نشان می‌دهد. نیروی ماکزیمم لهیدگی وابستگی زیادی به انتخاب عیب دارد و با افزایش ارتفاع سلول جدارنازک کاهش می‌یابد. علت آن می‌تواند به دلیل همان کمانش داخلی دیواره سلول جدارنازک باشد. با توجه به نتایج این جدول، تحلیل عددی اجزای محدود با درصد خطا ۷/۶٪ و ۹/۴٪ به نتایج تجربی نزدیک شده است و می‌تواند با کمتر از ۱۰٪ خطا این نیروی ماکزیمم را پیش‌بینی کند.



شکل ۱۰- تغییر شکل تجربی و عددی سلول جدارنازک CS2.

جدول ۱۰- مقایسه نیروی ماکزیمم لهیدگی سلول جدارنازک در صورت عدم تعریف عیب.

CS2	نیروی تسلیم تئوری (N)	تحلیل المان محدود (N)	خطا (%)
نیروی ماکزیمم لهیدگی	۵۰۷۰	۴۹۸۹	۱/۵



شکل ۱۳- نمودار جذب انرژی برحسب طول لهیدگی سلول جدارنازک CS2.

جدول ۱۲- مقایسه نیروی میانگین لهیدگی.

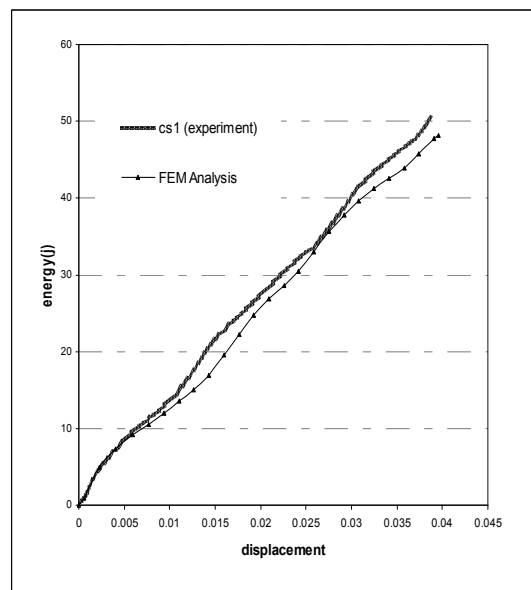
خطا %	نیروی میانگین لهیدگی		کد تحقیق
	المان محدود	تجربی	
۷/۲	۱۲۱۴/۷	۱۳۰۹	CS1
۳/۲	۱۱۸۲/۵	۱۲۲۱	CS2

خطا بین نتایج عددی و تجربی کم و برای دو سازه CS1 و CS2 به ترتیب ۷/۲٪ و ۳/۲٪ است. با توجه به روش محاسبه نیروی میانگین لهیدگی، خطای جذب انرژی نیز در این دو سازه همین مقدار می‌باشد.

شکل ۱۴ کرنش کل سلول جدارنازک CS2 را به همراه سازوکار تاخوردگی این سازه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل این سازه از ابتدا به گونه‌ای شروع به تاخوردگی می‌کند که هر دو دیواره مجاور سلول، یکی به سمت داخل تاخورده و دیگری به سمت بیرون تا می‌شود.

با اتمام یک تاخوردگی (لهیدگی)، تاخوردگی بعدی شروع می‌شود. نیروی تاخوردگی دوم به بعد در این سازه، به علت به وجود آمدن موج در دیواره سلول، بسیار کمتر از نیروی شروع لهیدگی اول (F_{max}) است. در این شکل مشخص است که گوشه‌های این سلول جدارنازک (که دارای رنگ روشن است)، بیشترین کرنش را داشته‌اند و سهم آنها در جذب انرژی سلول بسیار زیادتر از بقیه قسمت‌های سلول است.

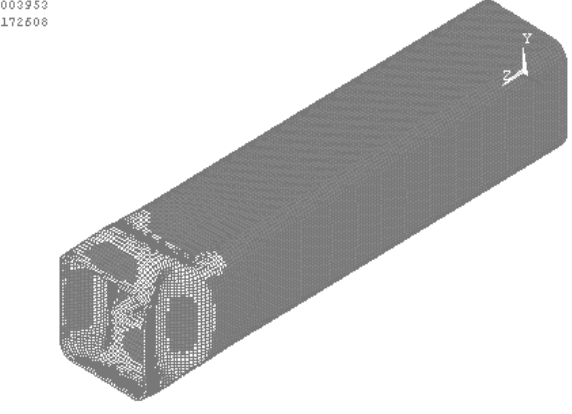
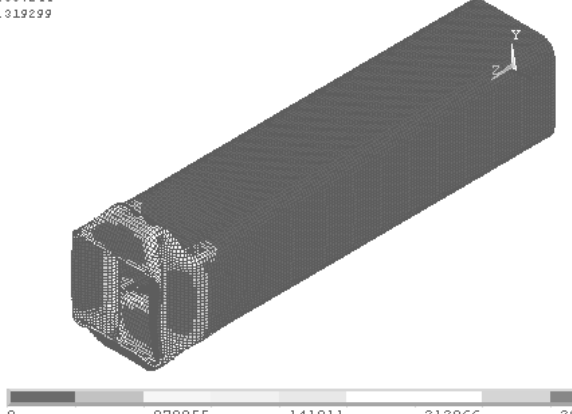
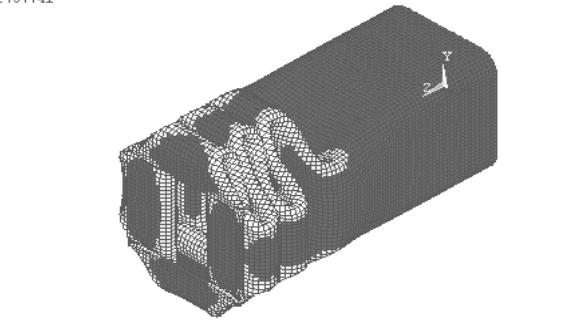
همان گونه که از این نمودار مشخص است، این سازه ۳۸ میلی‌متر لهیده شده است. جذب انرژی از انتگرال منحنی نیرو - تغییرمکان به دست آمده، برای نتایج تجربی و عددی محاسبه شده است. با توجه به این نمودار مشخص است که این منحنی‌ها در ابتدای لهیدگی برهم منطبق هستند و کمی از هم فاصله گرفته و سپس به یکدیگر نزدیک می‌شوند. علت این امر تفاوت اندکی در شروع تاخوردگی دوم است و شاید بتوان با انتخاب عیبی که به واقعیت نزدیک‌تر باشد، این دو منحنی را به هم نزدیک‌تر کرد.



شکل ۱۴- نمودار جذب انرژی برحسب طول لهیدگی سلول جدارنازک CS1.

شکل ۱۳ نمودار جذب انرژی سلول جدارنازک CS2 برحسب میزان لهیدگی را نشان می‌دهد. انتخاب دقیق‌تر عیب در سازه مدل شده باعث انطباق بسیار خوب دو منحنی شده است. برای انتخاب دقیق‌تر عیب باید پارامترهای مهم هندسی عیب به طور نسبی مقایسه شوند. بر این اساس با در نظر گرفتن اصل مینیمم انرژی عیبی که به واقعیت نزدیک‌تر است، قابل شناسایی است.

نیروی میانگین لهیدگی از تقسیم جذب انرژی به دست آمده بر طول کل لهیدگی برای سلول‌های جدارنازک به دست می‌آید. جدول ۱۲ مقایسه‌ی صورت گرفته بین نیروی میانگین لهیدگی به دست آمده از نتایج عددی و تجربی را نشان می‌دهد.

<p>طول لهیدگی (mm)</p>	<div data-bbox="523 188 1278 779"> <p>ELEMENT SOLUTION AN</p> <p>TIME=.5 DEC 25 2005</p> <p>/EXPANDED 12:29:09</p> <p>EPPLEQU (NOAVG)</p> <p>DMX =.003953</p> <p>SMX =.172608</p>  <p>LS-DYNA user input</p> </div>
<p>۳/۵</p>	<div data-bbox="523 813 1278 1377"> <p>ELEMENT SOLUTION AN</p> <p>TIME=1 DEC 25 2005</p> <p>/EXPANDED 12:29:23</p> <p>EPPLEQU (NOAVG)</p> <p>DMX =.007244</p> <p>SMX =.319299</p>  <p>LS-DYNA user input</p> </div>
<p>۷</p>	<div data-bbox="523 1411 1278 1921"> <p>ELEMENT SOLUTION AN</p> <p>TIME=7 DEC 25 2005</p> <p>/EXPANDED 12:30:06</p> <p>EPPLEQU (NOAVG)</p> <p>DMX =.052254</p> <p>SMX =.757741</p>  <p>LS-DYNA user input</p> </div>
<p>۵۰</p>	

<p>۶۴</p>	
<p>۷۸</p>	

شکل ۱۴- نمودار کرنش کل و فرآیند تاخوردگی سلول CS2

باعث جذب هرچه بهتر انرژی می شود و این گوشه ها سهم عمده ای از جذب انرژی سلول جدارنازک را برعهده دارند.

۷- نتیجه گیری

باتوجه به نتایج تست های تجربی، سلول های جدارنازک تست شده در تنشی حدود ۰/۷ تنش تسلیم شروع به تاخوردگی (لهیدگی) می کنند که علت آن می تواند کمناش موضعی دیواره داخلی سازه باشد. با توجه به این موضوع، باید در شبیه سازی عددی، عیبی در سلول مدل شده لحاظ شود. این عیب باعث تاخوردگی سلول در نیرویی کمتر از نیروی تنش تسلیم سازه و همچنین باعث تاخوردگی صحیح سلول می شود. در صورت عدم تعریف این عیب، سازه در تنش تسلیم شروع به تغییر فرم می کند که با واقعیت تطابق ندارد. نتایج حاصل از حل عددی اجزای محدود با دقت خوبی در حدود ۷ الی ۱۰ درصد قابلیت پیش بینی نیروی ماکزیمم شروع لهیدگی و همچنین با دقتی در حدود ۳ الی ۸ درصد قابلیت پیش بینی جذب انرژی و نیروی میانگین لهیدگی را دارد. کرنش پلاستیک زیاد در گوشه های سلول های جدارنازک،

۸- مراجع

- ۱- لیاقت، غ. و زمانی، ج.، "تأثیر عوامل مهم هانی کمب در مقاومت به بارهای ضربه ای"، دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۱.
- ۲- لیاقت، غ.، زمانی، ج. و قاسمی، ج.، بررسی شکل پذیری و استحکام سازه های متخلخل تحت بارهای ناشی از موج انفجار با استفاده از نرم افزار المان محدود (Ls Dyna)، ششمین کنفرانس ساخت و تولید ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۲.
- ۳- زمانی، ج. و لیاقت، غ.، ارائه مدل تحلیلی مجالگی سازه های متخلخل تحت بارهای انفجاری فشاری"، پنجمین کنفرانس سراسری و دومین کنفرانس بین المللی انجمن هوا فضای ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، ۱۳۸۲.
- ۴- لیاقت، غ.، زمانی، ج.، داغیانی، ج. و صدیقی، م.، "معرفی مدل تحلیلی جدید رفتار هانی کمب با ماده صلب - کرنش سختی تحت

بارهای فشاری شبه استاتیکی"، مجله علمی پژوهشی مدرس، شماره

۱۷، ۱۳۸۳.

5. Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. "On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structures", Int. J. Appl. Mech., Vol. 50, No. 40, pp. 727-34, 1984.

6. Abramowicz, W. and Jones, N. "Dynamic Axial Crushing of Square Tubes", Int. J. Impact Eng., Vol. 2., No. 2, pp. 179-208, 1984.

7. Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. "Axial Crushing of Multi Corner Sheet Metal Columns", Int. J. Appl. Mech., Vol. 56, No. 1, pp.113-20, 1989.

8. Wierzbicki, T. "Crushing Analysis of Metal Honeycombs", Int. J. Impact Eng., Vol.1, NO. 2, pp. 157-74, 1983.

9. ANSYS User Manual

۱۰- حسینی، و. و زمانی، ج.، "آنالیز عددی و تجربی میزان تأثیر

trigger بر رفتار سازه‌های سلولی جدار نازک با سطح مقطع مربعی

تحت بار شبه‌استاتیکی"، چهاردهمین کنفرانس مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.