

مطالعه پارامتریک مقاطع جدار نازک مربعی در جذب انرژی ناشی از بارگذاری مایل

رضامحمدی پور^۱، خداداد واحدی^۲ و سیدمحمد رضا امام^۳
Rmohamadipoori@gmail.com

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۳/۲۵

دریافت مقاله: ۸۸/۱۱/۲۰

چکیده

در این مقاله به بررسی چگونگی جذب انرژی تحت بارگذاری محوری و خمشی پرداخته شد و پس از بررسی این دو نوع برخورد به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری توسط نرم افزار ABAQUS به بررسی و تحلیل جذب انرژی سازه‌های جدار نازک تحت بارگذاری مایل پرداخته شده است. در این بررسی حدود صد و هشتاد حالت مختلف شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری سازه‌های جدار نازک تحت بارگذاری مایل با نتایج تجربی دیگر مراجع مقایسه شد و دقت خوبی احراز شده است. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و تجربی نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی لوله‌های جدار نازک با زاویه برخورد کاهش می‌یابد و رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک را می‌توان با استفاده از پارامترهای هندسی کنترل کرد. ضخامت به ویژه می‌تواند یک پارامتر بسیار موثر برای کنترل مقدار جذب انرژی مورد توجه قرار بگیرد.

کلیدواژه:

لوله‌های جدار نازک مربعی - بارگذاری مایل - زاویه بحرانی - جذب انرژی

۱- کارشناس مرکز طراحی بالگرد، شرکت هسا، شاهین شهر، اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۳- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۱- مقدمه

بارگذاری نسبت به تغییر فرم محوری لوله کاهش می‌یابد زیرا افزایش زاویه بارگذاری موجب خمش لوله جدار نازک می‌شود [۳ و ۲]. بررسی لوله جدار نازک دایره‌ای و مربعی آلومینیومی توخالی-پر شده از فوم‌های پلاستیکی تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری و مایل توسط بورویک^۳ و ریز در سال ۲۰۰۳ انجام شد [۴]. شبیه‌سازی‌های عددی توسط هان و پارک^۴ در سال ۱۹۹۹ با نرم افزار PAM CRASH روی بارگذاری مایل لوله جدار نازک مربعی از فولاد نرم نیز انجام گرفته است. هان و پارک برای بوجود آوردن شرایط بارگذاری مایل یک لوله جدار نازک مربعی را به صورت محوری به یک صفحه صلب مایل برخورد دادند. نتایج نشان می‌دهد که در یک زاویه بحرانی ناحیه گذرای اتفاق می‌افتد که بین فروریزش محوری و خمشی می‌باشد. قابل توجه است که کاهش بار متوسط مطابق با ناحیه گذرا است [۵].

اولین مطالعات تجربی درباره فروریزش خمشی لوله‌های جدار نازک مربعی و مستطیلی توسط ککمن^۵ صورت گرفت که تطابق خوبی بین آزمایشات شبه استاتیکی خمشی و پیش بینی‌های تئوری گشتاور خمشی لولاها بر حسب زاویه چرخش بدست آمد [۶]. مطالعات انجام شده روی فروریزش خمشی به صورت ترکیب اثر بارگذاری‌های فشاری محوری و خمشی می‌باشند که در اکثر برخوردهای خودروبی روی جاذب‌های انرژی آن اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال رفتار فروریزش لوله‌های جدار نازک مربعی در معرض بارگذاری‌های ترکیبی فشاری محوری-خمشی به کمک روش‌های تئوری و شبیه‌سازی عددی توسط کیم در سال ۲۰۰۱ انجام گردید [۷]. مرور و بررسی گزارش‌های عملی در سازه‌های جدار نازک نشان می‌دهد که مطالعات بسیار محدودی روی رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک تحت برخورد مایل وجود دارد. هدف از این مقاله شبیه‌سازی عددی لوله‌های جدار نازک مربعی تحت بارگذاری می‌باشد. در این مقاله همچنین یک مطالعه پارامتریک صورت گرفته است که به بررسی میزان جذب انرژی لوله‌های جدار نازک نسبت به زاویه بارگذاری، سرعت و جرم ضربه‌زن و پارامترهای هندسه لوله مانند ضخامت، طول و عرض تحت برخورد مایل پرداخته است.

۲- تئوری فروریزش محوری و خمشی

فروریزش لوله‌های جدار نازک مربعی دو نوع مود اولیه دارد: فروریزش محوری و فروریزش خمشی. در برخوردهای واقعی خودروها، فروریزش لوله‌های جدار نازک معمولا به صورت ترکیبی از هر دو مود فروریزش محوری و خمشی صورت می‌گیرد.

سازه‌های جدار نازک به طور گسترده‌ای برای جذب انرژی‌های ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقالات منتشر شده در این زمینه بیشتر مربوط به بارگذاری محوری می‌باشند. اما در عمل سازه‌های بسیار کمی تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، به خصوص سازه‌های جاذب انرژی در خودروها که تحت بارگذاری فشاری غیر محوری و برخورد مایل می‌باشند. بنابراین بحث و بررسی چگونگی پاسخ جاذب انرژی تحت بارگذاری مایل بسیار مهم و ضروری است. متجاوز از چند دهه است که تمرکز روی مطالعه سازه‌هایی که تحت ضربه‌های شدید قرار می‌گیرند، صورت گرفته است. در برخورد ضربه‌ای، انرژی در طی وقوع ضربه باید در یک رفتار کاملا کنترل شده جذب شود. پیچیدگی این موضوع از یک طرف و کاربردی بودن آن از طرف دیگر موجب شده است که محققان و پژوهشگران زیادی به صورت ویژه روی سازه‌های جدار نازک تمرکز نمایند و ابزاری طراحی کنند تا انرژی هنگام ضربه جذب شود و سازه‌های مورد نظر خود را حمایت کنند. بیشترین مقدار جذب انرژی ضربه در این جاذب‌های ضربه در ناحیه تغییر فرم پلاستیکی آنها رخ می‌دهد [۱]. جاذب‌های انرژی در سازه‌های کاربردی مانند خودروها، نرده‌های بزرگراه‌ها، زیر آسانسورها، هواپیماها، کشتی‌ها و غیره استفاده می‌شوند. برای مدل سازی جاذب‌های انرژی می‌توان از بررسی لوله و تیرهای جدار نازک تحت بار عرضی و محوری با تکیه‌گاه‌های گیردار، ساده و غیره استفاده نمود. با توجه به مقالات منتشر شده در این زمینه که بیشتر مربوط به بارگذاری محوری می‌باشند جاذب‌های انرژی در حقیقت کمتر تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، به خصوص سازه‌های جاذب انرژی در خودروها که تحت بارگذاری فشاری یا غیر محوری و برخورد مایل می‌باشند.

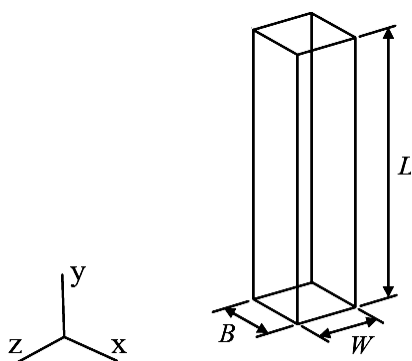
مقالات بسیار معدودی در مورد بارگذاری مایل جاذب‌های انرژی جدار نازک وجود دارند اما با این وجود مطالعات مفیدی در بررسی و تحلیل این سازه‌ها نیز انجام شده است. برای مثال رفتار بارگذاری مایل لوله‌های جدار نازک آلومینیومی اکستروژن شده مربعی بوسیله روش‌های آزمایشی و شبیه‌سازی عددی توسط ریز^۱ و هوپرستاد^۲ در سال ۲۰۰۲ انجام شده است. این آزمایشات با گیردار کردن لوله جدار نازک از یک طرف و اعمال بار از طرف دیگر لوله انجام شده است. شرایط بارگذاری مایل با اعمال بار شبه‌استاتیکی در زوایای مختلف نسبت به محور مرکزی لوله جدار نازک صورت گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که بار لهیدگی متوسط با افزایش زاویه

3- Borvik
4- Han & park
5- Kecman

1- Reyes
2- Hopperstad

جدول (۱): مشخصات هندسی نمونه مورد آزمایش

Geometry	Thin-walled Tube
L(mm)	199
B(mm)	48.31
W(mm)	79.88
t(mm)	1.93



شکل (۱): هندسه نمونه

همچنین طول مورد استفاده برای همه نمونه‌ها ثابت فرض می‌شود. دلیل استفاده نکردن از طول‌های کوچکتر، تشخیص بین فروریزش محوری و خمشی می‌باشد. همه نمونه‌ها تحت زوایای ۱۰ و ۳۰ درجه آزمایش شده‌اند تا به ترتیب مودهای فروریزش محوری و خمشی را ایجاد کنند. جمعاً ۶ آزمایش انجام شده که نتایج آن در زیر آورده شده است. هر نمونه از فولاد نرم با ضخامت $t=2\text{mm}$ ، مقاومت تسلیم 304.6MPa ، مدول یانگ 205GPa ، ضریب پواسان 0.3 و با چگالی 7700Kg/m^3 می‌باشد. در ضمن همه نمونه‌ها با سرعت 10mm/min آزمایش شده‌اند. در شکل (۲) به صورت شماتیک نحوه اعمال بارگذاری مایل ارائه شده است.

چین خوردگی لوله‌های جدار نازک مستقیم تحت زاویه ۱۰ درجه به صورت متقارن خواهد بود و به این صورت است که در دو لبه به سمت بیرون و دو لبه به سمت داخل چین می‌خورند و با لبه‌های چین خوردگی بعدی زاویه ۹۰ درجه می‌سازند. شکل (۳) نمونه تغییر فرم داده شده لوله جدار نازک تحت زاویه ۱۰ درجه را نشان می‌دهد این لوله 140mm تغییر فرم داده است. همه نمونه‌های آزمایش شده تحت زاویه ۳۰ درجه فروریزش خمشی را تحمل می‌کنند.

کارهای تحلیلی انجام شده در زمینه فروریزش محوری لوله‌های مربعی متنوع و متعدد هستند. در اغلب این تحلیل‌ها سینماتیک مشخصی برای فروریزش لوله در نظر گرفته می‌شود و متناسب با آن طول چین خوردگی و نیروی متوسط فروریزش را می‌توان تخمین زد. مطابق محاسبات ویرزبیکس^۶ نصف طول چین خوردگی و نیروی متوسط فروریزش از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{P_m}{M_0} = 38.12(c/t)^{1/3} \quad (1)$$

$$\frac{L}{t} = 0.99(c/t)^{2/3} \quad (2)$$

که در آن M_0 گشتاور خمشی پلاستیکی، C عرض مقطع مربعی و t ضخامت پوسته می‌باشد [۸].

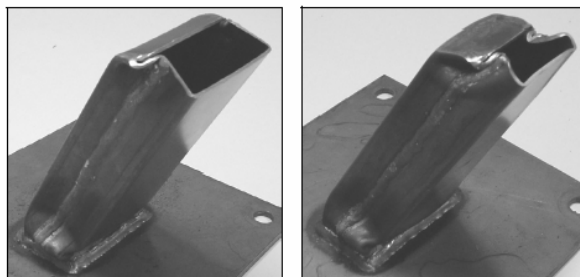
تلاش‌های بسیاری توسط پژوهشگران و محققین برای پیدا کردن رابطه‌ای بین گشتاور و زاویه چرخش صورت پذیرفته و معادلات ریاضی بسیاری را برای تشریح و پیشگویی این رابطه توسعه داده‌اند. این معادلات در فهم رفتار برخورد و خمش تیرهای جدار نازک بسیار مفید هستند و همچنین در تعیین مقاومت خمشی لوله‌های پلاستیکی ایجاد شده قابل استفاده می‌باشند. در سال ۲۰۰۶ لیو و دی^۷ به پیش بینی تئوری مقاومت خمشی تیر جدار نازک بر اساس مودهای فروریزش آن پرداختند و بار متوسط فروریزش و نصف طول چین خوردگی را برای مقطع مربعی به صورت زیر ارائه کردند [۹]:

$$L = 2.13 \times c^{2/3} \times t^{1/3}, p_m = 6.968 \times M_0 \times \left(\frac{C}{t}\right)^{1/3} + \frac{\pi}{8} M_0 \quad (3)$$

که در آن M_0 گشتاور خمشی پلاستیکی، C عرض مقطع مربعی و t ضخامت پوسته می‌باشد.

۳- آزمایش‌های شبه استاتیکی برخورد مایل

اکثر آزمایشات تجربی در زمینه سازه‌های جدار نازک به صورت شبه استاتیکی انجام شده است چرا که انجام تست‌های دقیق دینامیکی بسیار مشکل است [۱۰]. در سال ۲۰۰۵ آقای ناجل و سامریتنم با استفاده از تست‌های شبه استاتیکی به بررسی برخورد مایل سازه‌های جدار نازک پرداختند و نتایج حاصل از آن را با نرم افزار ABAQUS مقایسه کردند. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش شبه استاتیکی آقای ناجل و سامریتنم در جدول (۱) آورده شده است:

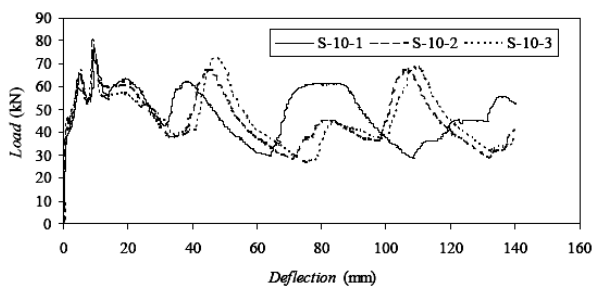


شکل (۴): نمونه تغییر فرم داده شده لوله جدار نازک تحت زاویه ۳۰ درجه [۱۰]

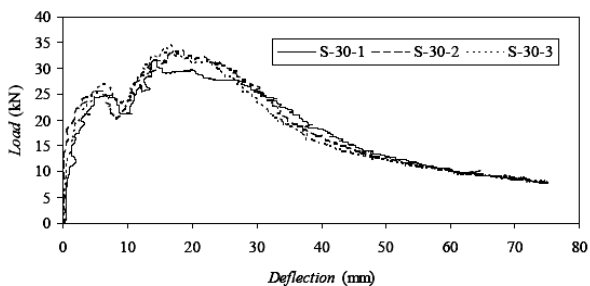


شکل (۵): مود تغییر فرم لوله جدار نازک تحت زاویه ۳۰ درجه [۱۰]

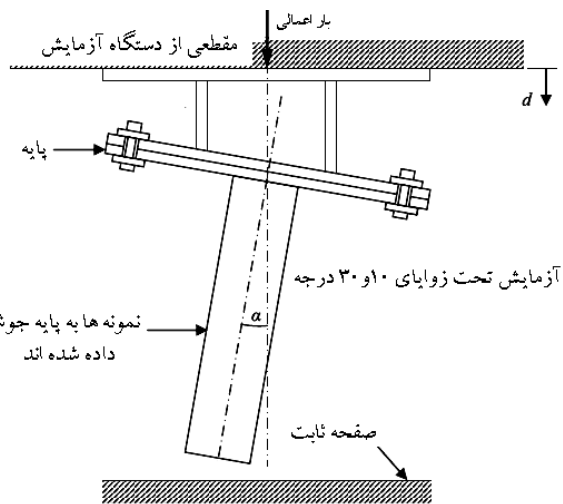
شکل (۶) منحنی بار-جابجایی برای هر لوله تحت زاویه ۱۰ درجه نشان می‌دهد. مقدار بار در ابتدا برای هر لوله به سرعت افزایش می‌یابد و مشابه بارگذاری محوری مقدار بار ابتدا به یک ماکزیمم اولیه خواهد رسید و قبل از آنکه مقدار بار کاهش یابد سپس به سرعت به ماکزیمم مطلق خود می‌رسد و این بواسطه کمانش دیواره تحت کشش خواهد بود. بعد از ماکزیمم مطلق، بار افت کرده و حول یک مقدار پایدار نوسان می‌کند.



شکل (۶): منحنی بار-جابجایی لوله‌های جدار نازک تحت زاویه ۱۰ درجه [۱۰]

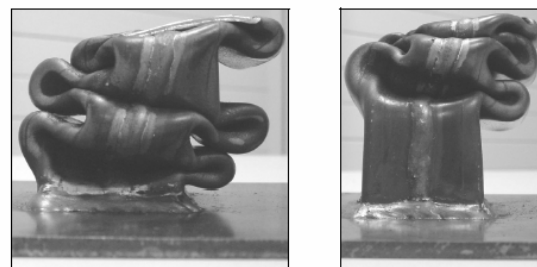


شکل (۷): منحنی بار-جابجایی لوله‌های جدار نازک تحت زاویه ۳۰ درجه [۱۰]



شکل (۲): نحوه اعمال بارگذاری مایل روی نمونه‌ها [۱۰]

همه نمونه‌ها در ابتدا کمانش می‌کنند سپس حول لولای پلاستیک تشکیل شده نزدیک انتهای گیردار لوله می‌چرخند. شکل (۴) تغییر فرم یک لوله تحت زاویه ۳۰ درجه را نشان می‌دهد که حدود 75mm می‌باشد. برای آزمایش‌های موجود یک مود خمشی منحصر به فرد برای همه نمونه‌های نشان داده شده است. در دیواره‌ای که تحت فشار قرار گرفته یک لبه به سمت داخل ایجاد می‌شود در حالی که دو طرف این دیواره که تحت فشار قرار گرفته به سمت بیرون تغییر فرم می‌دهد که در شکل (۵) آورده شد. این مود خمشی در مطالعات قبلی فروریزش خمشی لوله‌های مستطیلی توسط ککمن و بارگذاری مایل لوله‌های مربعی توسط ریز اشاره شده است.



شکل (۳): نمونه تغییر فرم داده شده لوله جدار نازک تحت زاویه ۱۰ درجه [۱۰]

می‌شود که نسبت ضخامت به بزرگترین بعد مدل کمتر از ۰/۱ باشد. همچنین المان پوسته را می‌توان به جای المان صلب^۹ زمانیکه رفتار ماده در طول ضخامت المان مهم نمی‌باشد، استفاده کرد. نمایش المان پوسته در نرم افزار ABAQUS به صورت کد SirJ می‌باشد که i نشان دهنده تعداد گره‌ها و j نشان دهنده تعداد درجه آزادی هستند. در این مقاله از S4R، که یک المان چهار گوش با چهار گره برای رفتارهای غیر خطی است، استفاده شده است.

جنس: نوع رفتار ماده برای لوله‌های مربعی در مقابل بارهای وارده به صورت ایزوتروپ و نمودار تنش- کرنش آن الاستیک- پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. برای لوله از ضرایب و آلیاژهای فولاد استفاده شده است که در جداول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند همچنین صفحات انتهایی، به صورت صلب انتخاب شده‌اند.

جدول (۲): مشخصات ناحیه الاستیک

$\sigma_y (N/mm^2)$	220
$E(N/mm^2)$	205000
ν	0.3
$\rho (kg/mm^3)$	7700

جدول (۳): داده‌های تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک

$\sigma_i (N/mm^2)$	ϵ_p
220	0
250	0.0059393
300	0.016738
332	0.02575
352.5	0.03
370	0.0515
374	0.10252

نوع تماس‌ها: تماس‌های صفحات صلب با سطح مقطع لوله از نوع سطح به سطح و همچنین سطح لوله با خودش از نوع تماس خودی می‌باشد.

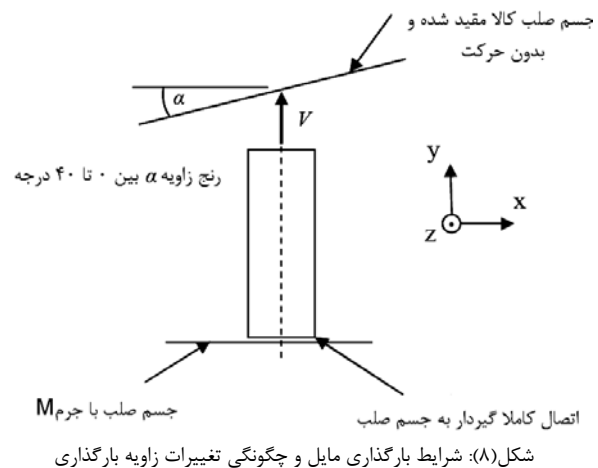
شرایط مرزی: برای شبیه‌سازی برخورد مایل کافی است لوله مربعی را به یک صفحه صلب، کاملاً گیردار کرده و با سرعت اولیه V_0 به صفحه صلب شیبدار دیگری که کاملاً مقید و ثابت می‌باشد برخورد

شکل (۷) منحنی بار- جابجایی برای هر لوله تحت زاویه ۳۰ درجه نشان می‌دهد. برای هر لوله بار ابتدا تا مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. قبل از آنکه بار کاملاً افت کند و بعد از کمانش کردن لوله بار افت موقتی می‌کند و قبل از تشکیل لولای پلاستیک بار دوباره افزایش می‌یابد و سپس بواسطه فروریزش خمشی بار افت می‌کند و میزان جذب انرژی کاهش می‌یابد.

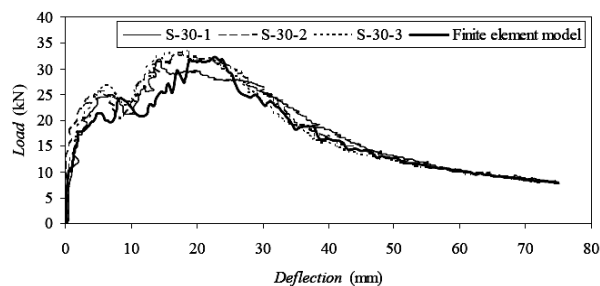
۴- شبیه‌سازی

اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه جذب انرژی سازه‌های جدار نازک به صورت تجربی صورت گرفته است. فروریزش لوله‌های مربعی عمدتاً تحت بارگذاری شبه‌استاتیک صورت گرفته می‌گیرد. پر هزینه بودن و مشکلات آزمایش ضربه‌ای از یک طرف، و پیچیده بودن کارهای تحلیلی در باب مسایل تغییر شکل پلاستیک و بالاختص فروریزش لوله‌های مربعی از طرف دیگر دلیل رویکرد بیشتر محققان به پژوهش تسط نرم افزارهای کامپیوتری می‌باشد. این مقاله به بررسی، تحلیل و شبیه‌سازی فروریزش لوله‌های مربعی با نرم افزار ABAQUS [۱۱]، در برخورد مایل پرداخته و سپس به کمک این نرم افزار به مطالعه پارامتریک برخورد مایل پرداخته است.

هندس سازه: برای شباهت هر چه بیشتر جریان فروریزش سازه‌های جدار نازک مربعی با حالت واقعی و تجربی، مساله به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. از این رو هندسه مدل سازی شامل لوله جدار نازک مربعی و دو صفحه صلب (شامل صفحه ثابت شیبدار و صفحه متحرک) در دو انتهای آن است و لوله بین آن دو قرار دارد، شکل (۸).



المان بندی: المان مورد استفاده در این مقاله برای شبکه بندی لوله‌های جدار نازک المان پوسته^۹ می‌باشد. المان شل زمانی استفاده



شکل (۱۰): مقایسه نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه محاسبه شده تحت زاویه ۳۰ درجه توسط شبیه‌سازی با نتایج تست تجربی [۱۰]

در این قسمت اثر پارامترهای مختلف روی رفتار لوله‌ها تحت بارگذاری مایل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی به عنوان یک راهنما برای طراحی جاذب‌های انرژی جدار نازک کاربردی تحت برخورد مایل مفید می‌باشد. تغییرات پارامترهای هندسی اصلی ضخامت t و طول L و عرض W برای این قسمت در نظر گرفته می‌شود و در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. مقدار پارامترهای انتخاب شده، اندازه لوله‌هایی است که در ساخت جاذب‌های انرژی در خودروها به کار برده می‌شود. سرعت ضربه اثر قابل توجهی روی رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک مربعی تحت بارگذاری مایل دارد. برای مطالعه پارامتریک محدوده تغییرات سرعت را بین ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه برای مطالعه پارامتریک در نظر گرفته شده است. این محدوده سرعت نمونه‌ای از محدوده سرعت‌های برخورد در خودروها می‌باشد که توسط هان و پارک [۵] در مطالعات قبلی استفاده شده است. محدوده جرم ضربه‌زن ۴۰۰ و ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم، برای بررسی لوله‌های جدار نازک مربعی تحت بارگذاری مایل در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): تغییرات پارامترهای هندسی

Geometry parameter	Range
Thickness(mm)	1.9,1.7,1.5,1.3
Width(mm)	90,80,70
Length(mm)	520,480,440,400

۵-۱- اثر زاویه بار روی رفتار لوله‌های جدار نازک با مقطع مربعی

در ابتدا اثر زاویه بار را روی رفتار جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد سپس زاویه بار بحرانی برای هر هندسه که ناحیه گذار بین

داد. برای بدست آوردن بهترین تعداد المان، شبیه‌سازی را برای هفت حالت متفاوت انجام شده است و مشخص شد که بعد از حالت هفتم نتایج همگرا هستند بنابراین حالت ششم را برای تعداد المان‌ها انتخاب گردید. جدول (۴) میزان انرژی جذب شده در تغییر فرم ۱۵۰ میلی‌متر برای حالت‌های مختلف المان‌بندی را نشان می‌دهد.

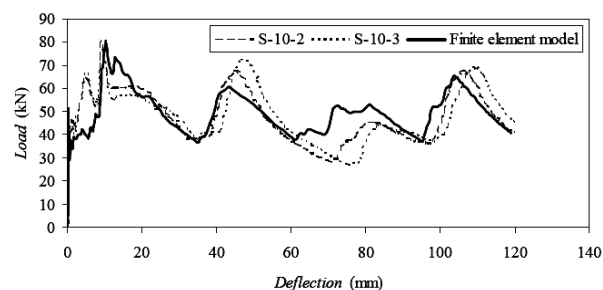
جدول (۴): میزان انرژی جذب شده در تغییر فرم ۱۵۰ میلی‌متر برای انواع شبکه‌بندی

Number Element	Energy Absobtion(Kj/Kg)
384	23.1877
1536	20.954
2400	16.0283
2816	15.8338
3060	15.7504
3552	15.3146
4160	15.3146

باتوجه به تست‌های شبه استاتیکی انجام گرفته در سال ۲۰۰۱ [۱۰]، در این قسمت به مقایسه نتایج تست‌ها و نتایج شبیه‌سازی تحت زوایای ۱۰ و ۳۰ درجه پرداخته شد. همانگونه که در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی مشاهده می‌شود.

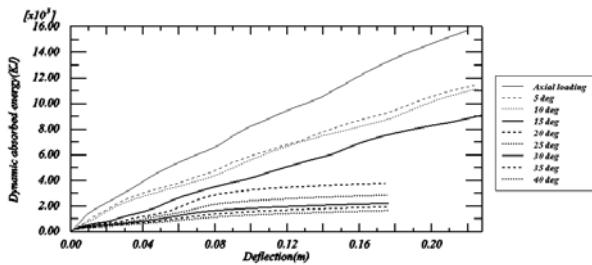
۵- مطالعه پارامتریک

با استفاده از مدل المان محدودی که در بخش قبل برای بارگذاری مایل انجام شد و نتایج آن با تست‌ها و تئوری‌های موجود مقایسه گردید به مطالعه پارامتریک جاذب‌های انرژی جدار نازک تحت برخورد مایل پرداخته می‌شود.

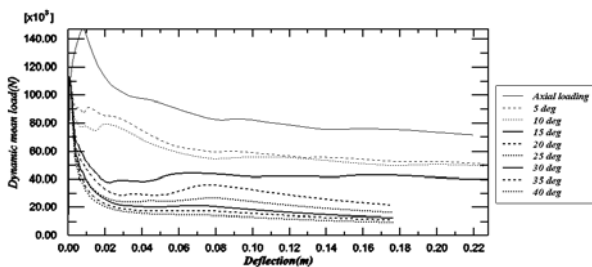


شکل (۹): مقایسه نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه محاسبه شده تحت زاویه ۱۰ درجه توسط شبیه‌سازی با نتایج تست تجربی [۱۰]

فروریزش محوری و فروریزش خمشی است ارائه شده است. برای بررسی موارد گفته شده بار لهیدگی لحظه‌ای، بار متوسط لهیدگی و جذب انرژی نسبت به تغییر فرم هر لوله را در نظر گرفته شده است. نتایج موجود در این قسمت را با پارامترهای اصلی مینا $t=1.5\text{mm}$ و $V_0=15\text{m/s}$ و $B=80\text{mm}$ و $L=480\text{mm}$ اثر زاویه بار را روی منحنی بار-لهیدگی در نشان می‌دهد. همان طور که از نمودار پیدا است لوله‌های جدار نازک تحت فروریزش محوری خالص در اولین ماکزیمم بار شروع به چین خوردگی می‌کند و بعد از تشکیل اولین چین بار بین یک ماکزیمم و مینیمم محلی نوسان می‌کند که نشان دهنده تشکیل چین خوردگی‌های بعدی لوله است. با توجه به شکل (۹) تا زاویه ۱۵ درجه منحنی بار-تغییر فرم به صورت فروریزش محوری خالص می‌باشد و از زاویه ۲۰ درجه به بالا نوسانات بار تا ۷۵ میلیمتر می‌باشد. بنابراین هر لوله تا مقدار ۷۵ میلیمتر به صورت محوری چین می‌خورد و بعد از آن بار کاهش می‌یابد. این تغییرات بوسیله تغییر فرم‌های مشاهده شده از روی شبیه سازی هر لوله بدست می‌آید. با افزایش زاویه بار تا ۲۵ درجه نوسان بار وجود ندارد.

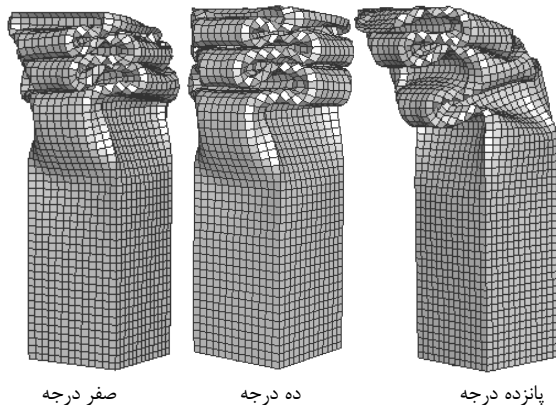


شکل (۱۲): اثر زاویه بار روی منحنی جذب انرژی بر حسب تغییر فرم

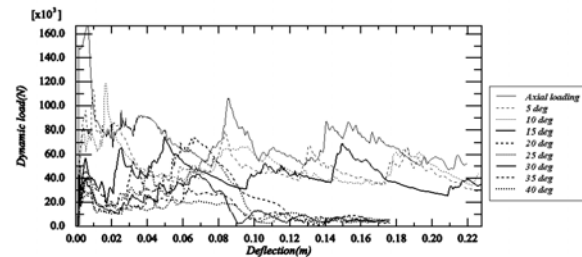


شکل (۱۳): اثر زاویه بار روی منحنی بار متوسط لهیدگی بر حسب تغییر فرم

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که از زاویه ۲۰ درجه به بالا لوله‌های جدار نازک مربعی از انتها خم می‌شوند که همان طور که قبلاً نیز ذکر شد با افزایش زاویه بار گذاری مؤلفه عمودی نیرو افزایش یافته در نتیجه از زاویه ۲۰ درجه به بالا اثر مؤلفه عمودی نیرو بر مؤلفه افقی نیرو غالب گشته و موجب خمش لوله‌ها می‌شود.



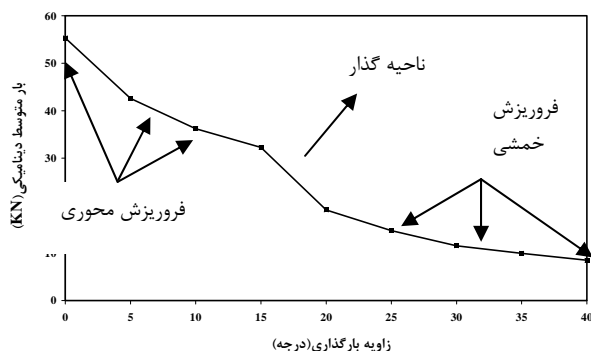
در شکل (۱۴) مشاهدات فوق را می‌توان به صورت لوله‌های تغییر فرم یافته، ملاحظه نمود. برای زاویه ۱۰ درجه هر لوله به صورت فروریزش محوری تغییر فرم می‌دهد و تا زاویه ۲۰ درجه که در شکل (۲) ارائه شده است ادامه می‌یابد. برای زاویه ۳۰ درجه فروریزش لوله‌ها بعد از چین خوردن لبه لوله‌ها به صورت خمشی می‌باشد زیرا با افزایش زاویه بارگذاری و بوجود آمدن مؤلفه عمودی نیرو موجب خمش لوله‌ها از انتها می‌شود، شکل (۵). لولای پلاستیک در ناحیه فروریزش خمشی برای هر لوله تشکیل شده و لوله‌های جدار نازک مربعی حول این لولای تشکیل شده می‌چرخد و خم می‌شود. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) اثر زاویه بار روی منحنی بار متوسط لهیدگی بر حسب تغییر فرم محوری هر لوله و همچنین منحنی جذب انرژی بر حسب تغییر فرم نشان می‌دهند. در این شکل‌ها بار متوسط لهیدگی و جذب انرژی با افزایش زاویه بار کاهش می‌یابد. با توجه به این شکل‌ها آشکار است که با افزایش زاویه بارگذاری



شکل (۱۱): اثر زاویه بار روی منحنی بار - لهیدگی

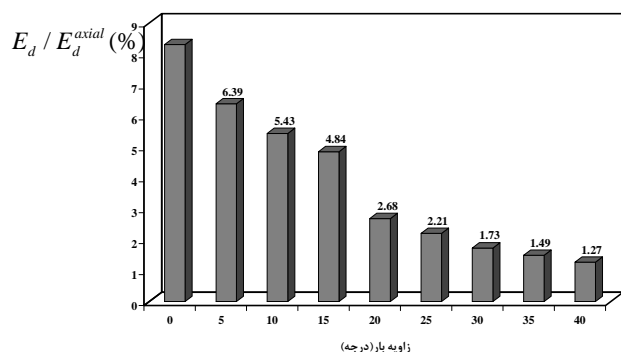
در شکل (۱۴) مشاهدات فوق را می‌توان به صورت لوله‌های تغییر فرم یافته، ملاحظه نمود. برای زاویه ۱۰ درجه هر لوله به صورت فروریزش محوری تغییر فرم می‌دهد و تا زاویه ۲۰ درجه که در شکل (۲) ارائه شده است ادامه می‌یابد. برای زاویه ۳۰ درجه فروریزش لوله‌ها بعد از چین خوردن لبه لوله‌ها به صورت خمشی می‌باشد زیرا با افزایش زاویه بارگذاری و بوجود آمدن مؤلفه عمودی نیرو موجب خمش لوله‌ها از انتها می‌شود، شکل (۵). لولای پلاستیک در ناحیه فروریزش خمشی برای هر لوله تشکیل شده و لوله‌های جدار نازک مربعی حول این لولای تشکیل شده می‌چرخد و خم می‌شود. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) اثر زاویه بار روی منحنی بار متوسط لهیدگی بر حسب تغییر فرم محوری هر لوله و همچنین منحنی جذب انرژی بر حسب تغییر فرم نشان می‌دهند. در این شکل‌ها بار متوسط لهیدگی و جذب انرژی با افزایش زاویه بار کاهش می‌یابد. با توجه به این شکل‌ها آشکار است که با افزایش زاویه بارگذاری

همان طور که از شکل (۱۵) پیدا است ناحیه فروریزش خمشی حساسیت کمی به زاویه بار دارد زیرا بار متوسط دینامیکی تقریباً ۴۰ کیلو نیوتن از ۰ تا ۲۰ درجه کاهش می‌یابد ولی از ۲۰ تا ۴۰ درجه در حدود ۲۰ کیلو نیوتن کاهش دارد.



شکل (۱۵): بار متوسط دینامیکی بر حسب زوایای مختلف

با توجه به شکل (۱۵) بین ۱۵ تا ۲۰ درجه ناحیه زاویه بار بحرانی است. کماتش کلی لوله در زاویه بار ۱۸ درجه مشاهده شده است و این زاویه بار بحرانی برای لوله است زیرا با تغییر زاویه از ۱۷ تا ۱۸ درجه بار لهیدگی حدود ۳۰٪ افت می‌کند.

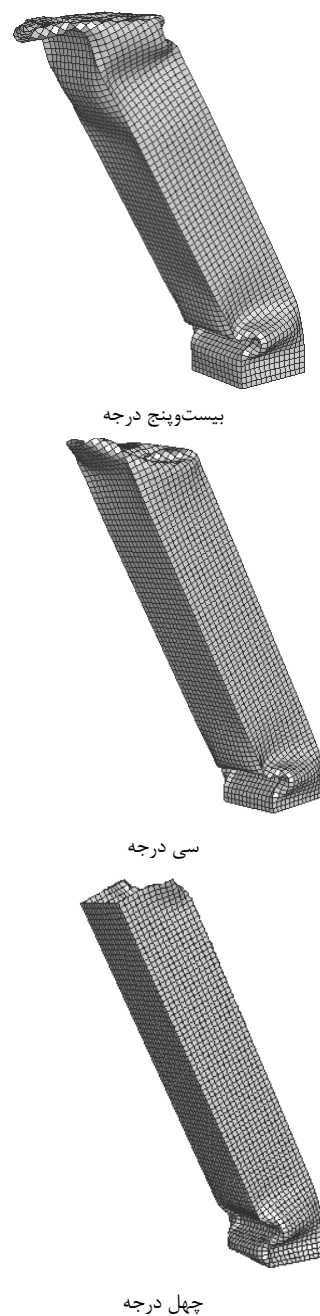


شکل (۱۷): اثر زاویه بارگذاری روی درصد میزان جذب انرژی تحت برخورد مایل نسبت به برخورد محوری

با در نظر گرفتن شکل (۱۷) انرژی جذب شده E_d برای هر لوله نسبت به انرژی جذب شده محوری E_d^{axial} را نشان می‌دهد که با افزایش زاویه بار این درصد کاهش می‌یابد.

۵-۲- اثر ضخامت روی رفتار لوله‌ها تحت بارگذاری مایل

همان طور که از مدل شبیه سازی شده مشاهده می‌شود ضخامت اثر قابل توجهی روی رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک مربعی تحت بارگذاری مایل دارد. شبیه سازی روی مدل اصلی که در بخشهای قبلی با تغییر ضخامت از ۱/۳ تا ۱/۹ میلی‌متر برای لوله‌های



شکل (۱۴): لوله‌های تغییر فرم یافته تحت زوایای مختلف

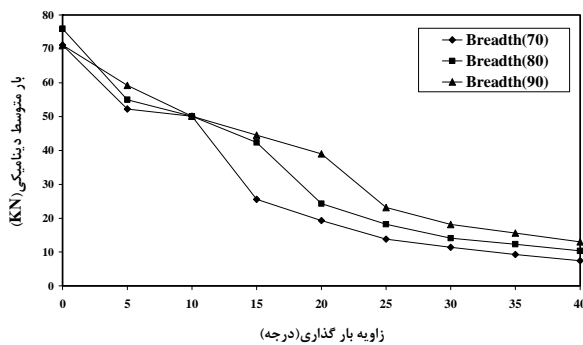
در شکل (۱۵) بار متوسط دینامیکی بر حسب زوایای مختلف ارائه شده است که با افزایش زاویه بار، بار متوسط دینامیکی کاهش می‌یابد و برای هر لوله سه ناحیه مختلف برای تغییر فرم مشاهده می‌شود:

- ناحیه اول، ناحیه فروریزش محوری است.
- ناحیه دوم، ناحیه گذار بین فروریزش محوری و خمشی است
- ناحیه سوم، ناحیه فروریزش خمشی است.

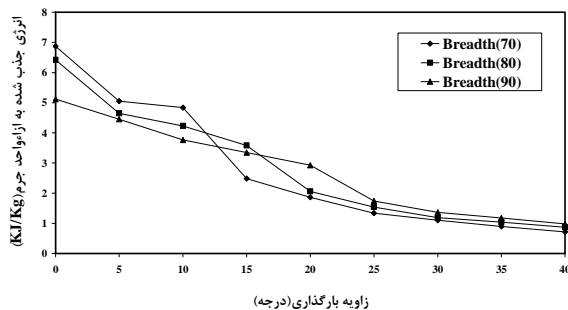
۵-۳- اثر عرض مقطع روی رفتار لوله تحت بارگذاری مایل

شکل (۲۰) رفتار بار متوسط دینامیکی هر لوله برای زوایای گوناگون با تغییر عرض مقطع را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بار متوسط دینامیکی نسبت به تغییرات عرض مقطع در ناحیه فروریزش خمشی نسبت به ناحیه فروریزش محوری حساس‌تر است که این حالت در تضاد با تغییرات ضخامت می‌باشد. جالب توجه است بدانیم که با افزایش زاویه بار، بار متوسط دینامیکی کاهش می‌یابد و افزایش عرض مقطع اثر قابل توجه و چندانی روی بار متوسط دینامیکی ندارد که این حالت در تضاد با تغییرات ضخامت می‌باشد. همچنین شکل (۲۰) نشان می‌دهد که زاویه بار بحرانی با افزایش عرض مقطع (۲۰) نشان می‌دهد که زاویه بار بحرانی بین ۱۰ تا ۱۵ درجه می‌باشد، در حالتی که عرض مقطع ۸۰ میلی‌متر است زاویه بار بحرانی بین ۱۵ تا ۲۰ درجه می‌باشد و در حالتی که عرض مقطع ۹۰ میلی‌متر است زاویه بار بحرانی بین ۲۰ تا ۲۵ درجه می‌باشد.

شکل (۲۱) اثر عرض مقطع را روی انرژی ویژه نشان می‌دهد که در ناحیه فروریزش خمشی همانند منحنی بار متوسط دینامیکی با افزایش عرض مقطع میزان انرژی ویژه نیز افزایش داشته است. بنابراین در برخوردهای مایل که با خمش لوله‌های جدار نازک مواجه هستیم افزایش عرض مقطع می‌تواند مفید باشد.



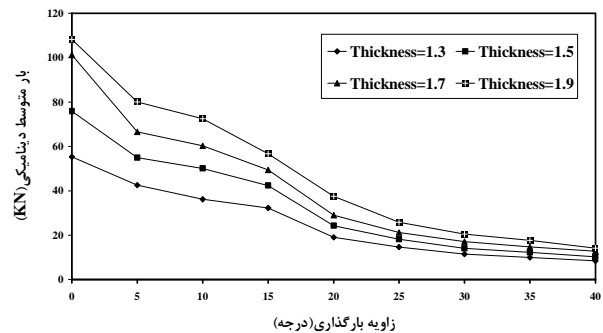
شکل (۲۰): اثر عرض روی بار متوسط دینامیکی با تغییرات زاویه بارگذاری



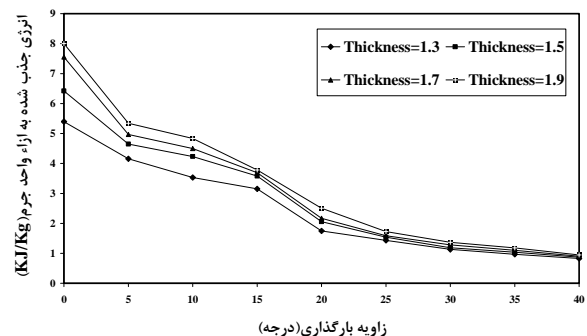
شکل (۲۱): اثر عرض روی انرژی جذب شده به ازاء واحد جرم با تغییرات زاویه بارگذاری

جدار نازک مربعی انجام گردید صورت گرفته و نتایج آن در شکل (۱۸) ارائه شده است.

زاویه بار بحرانی در ناحیه گذار برای لوله‌های جدار نازک مربعی بین ۱۵ تا ۲۰ درجه برای همه ضخامت‌ها مشاهده شده است. بنابراین افزایش ضخامت اثر قابل توجهی روی محدوده زاویه بار بحرانی ندارد که با نتایج هان و پارک^{۱۱} توافق خوبی دارد [۵]. با تغییرات ضخامت بار متوسط دینامیکی نسبت به زاویه بار تغییرات قابل توجهی دارد بویژه در ناحیه فروریزش محوری این تغییرات شدیدتر می‌باشد و در ناحیه فروریزش خمشی تغییرات ضخامت اثر کمتری دارد. همان طور که از شکل (۱۸) پیدا است مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت میزان بار متوسط دینامیکی در هر دو ناحیه فروریزش محوری و خمشی افزایش می‌یابد. شکل (۱۹) انرژی ویژه نسبت به تغییرات ضخامت را نشان می‌دهد. همان طوری که از شکل پیدا است تغییرات قابل ملاحظه‌ای در این نمودار دیده می‌شود. تغییرات میزان انرژی ویژه در ناحیه فروریزش محوری بیشتر از ناحیه فروریزش خمشی است. هنگامی که کاهش وزن لوله‌های جدار نازک بسیار مهم است افزایش ضخامت روی انرژی جذب شده در ناحیه فروریزش خمشی که در هنگام برخورد مایل ممکن است بوجود آید، اثری ندارد.



شکل (۱۸): اثر ضخامت روی بار متوسط دینامیکی با تغییرات زاویه بارگذاری



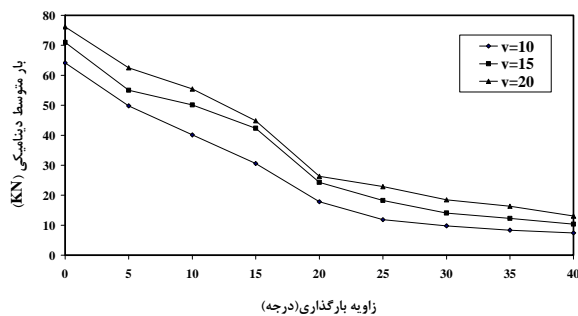
شکل (۱۹): اثر ضخامت روی انرژی جذب شده به ازاء واحد جرم با تغییرات زاویه بارگذاری

بنابراین افزایش طول در برخورد های محوری مناسب نمی باشد. کاهش انرژی جذب شده در ناحیه فروریزش خمشی کمتر از ناحیه فروریزش محوری است ولی افزایش طول در این ناحیه هم برای برخوردهای مایل مفید نمی باشد.

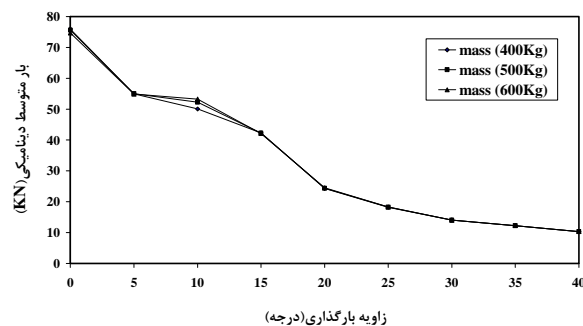
۵-۵- اثر سرعت روی رفتار لوله های جدار نازک تحت

برخورد مایل

در این بخش اثر سرعت ضربه زن را روی رفتار لوله ها تحت برخورد مایل بررسی می شود. سرعت ضربه زن یکی از پارامترهای مهم بارگذاری دینامیکی است. سرعت اثر قابل توجهی روی جذب انرژی لوله های جدار نازک دارد. محدوده تغییرات سرعت برای مطالعه پارامتریک ۱۰، ۱۵، ۲۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است. ابعاد هندسی لوله را همان ابعاد اصلی و مبنا در نظر می گیریم. این محدوده سرعت در مطالعات هان و پارک [۵]^{۱۲} و ریس [۳ و ۲]^{۱۳} نیز مشاهده شده است. با توجه به شکل (۲۴) با افزایش زاویه بار، بار متوسط دینامیکی کاهش می یابد، با کاهش سرعت از ۲۰ به ۱۰ متر بر ثانیه نیز بار متوسط دینامیکی کاهش یافته است، پس اثر نرخ کرنش و اینرسی در بارگذاری دینامیکی مایل با کاهش سرعت کمتر می شود.



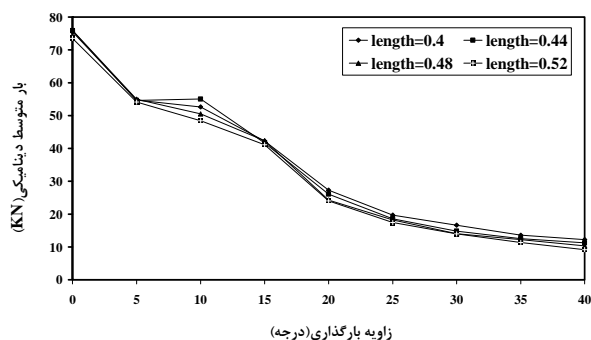
شکل (۲۴): اثر سرعت روی بار متوسط دینامیکی با تغییرات زاویه بارگذاری



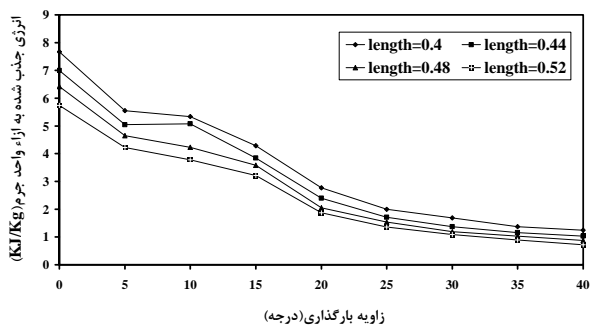
شکل (۲۵): اثر جرم روی بار متوسط دینامیکی با تغییرات زاویه بارگذاری

۵-۴- اثر طول روی رفتار لوله های جدار نازک مربعی تحت بارگذاری مایل

شکل (۲۲) اثر طول را روی بار متوسط دینامیکی را نشان می دهد. همان طور که از نمودار پیدا است تغییرات طول اثر قابل توجهی روی رفتار لوله ها تحت بارگذاری مایل ندارد و بر طبق تئوری فروریزش محوری لوله ها [۷]، نیز مشخص است که رفتار لهدگی لوله ها، با تغییرات طول رابطه ای ندارد و این با نتایج شبیه سازی در ناحیه فروریزش محوری توافقی خوبی دارد با این وجود در ناحیه فروریزش خمشی با افزایش طول لوله ها بار متوسط دینامیکی کاهش یافته است.



شکل (۲۲): اثر طول روی بار متوسط دینامیکی با تغییرات زاویه بارگذاری



شکل (۲۳): اثر طول روی انرژی جذب شده به ازاء واحد جرم با تغییرات زاویه بارگذاری

با افزایش طول لوله ها، طول بازوی گشتاورگیری افزایش یافته در نتیجه نیروی لازم برای خم شدن لوله ها کاهش می یابد. بر خلاف اثر عرض مقطع، تغییرات طول اثر قابل ملاحظه ای روی زاویه بار بحرانی ندارد.

شکل (۲۳) اثر طول را روی انرژی ویژه، را نشان می دهد. شکل (۲۳) همچنین نشان می دهد که در هر دو ناحیه فروریزش محوری و خمشی با افزایش طول انرژی ویژه کاهش می یابد چون با افزایش طول لوله های جدار نازک، جرم آنها نیز افزایش می یابد. افزایش طول سبب کاهش انرژی جذب شده در ناحیه فروریزش محوری می شود.

۵- رفتار لهدیگی لوله‌ها با تغییرات طول رابط‌های ندارد. با افزایش طول لوله‌ها، طول بازوی گشتاورگیری افزایش یافته در نتیجه نیروی لازم برای خم شدن لوله‌ها کاهش می‌یابد. بر خلاف اثر عرض مقطع، تغییرات طول اثر قابل ملاحظه‌ای روی زاویه بار بحرانی ندارد. افزایش طول سبب کاهش انرژی جذب شده در ناحیه فروریزش محوری می‌شود. بنابراین افزایش طول در برخورد‌های محوری مناسب نمی‌باشد.

۶- با کاهش سرعت از ۲۰ به ۱۰ متر بر ثانیه نیز بار متوسط دینامیکی کاهش دارد پس اثر نرخ کرنش و اینرسی در بارگذاری دینامیکی مایل با کاهش سرعت کمتر می‌شود. در نهایت سرعت اثر قابل توجهی روی محدوده زاویه بار بحرانی نخواهد داشت.

۹- مراجع

- [۱] شاکری، م.، درویره، ا.، "مقدمه‌ای بر مکانیک ضربه"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۷۹.
- [2] Reyes, A., Langseth, M., Hopperstad, O. S., "Crashworthiness of Aluminum Extrusion Subjected to Oblique Loading: Experiments and Numerical Analysis", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 44, 2002, pp.1965-1984
- [3] Reyes, A., Langseth, M., Hopperstad, O. S., "Aluminum foam-filled Extrusions Subjected to Oblique Loading", *Experimental and Numerical Study*, *International Journal solid structures*, Vol. 41, 2004, pp. 1645-75.
- [4] Borvik, T., Hopperstad, O. S., Reyes, A., Langseth, M., Solomos, G., and Dyngeland, T., "empty and foam-filled circular aluminums tubes subjected to axial and oblique quasi-static loading", *International Journal of crashworthiness*, Vol. 8, No. 5, 2003, pp. 481-94.
- [5] Han, D. C., Park, S. H., "Collapse Behavior of Square Thin-Walled Columns Subjected to Oblique Loads", *International Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 85, 1999, pp. 167-184.
- [6] Kecman, D., "Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 25, No.9-10, 1983, pp. 623-636.
- [7] Kim, H-S., Wierzbicki, T., "Crush Behavior of Thin-Walled Prismatic Columns under Combined Bending and compression", *Computers and Structures*, Vol. 79, 1994, pp. 1417-32.
- [8] Wierzbicki, T., Abramowitz, W., "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", *Applied Mechanics*, Vol. 50, 1983, pp. 727-37.
- [9] Liu, Y.C., Day, M. L., "Bending Collapse of Thin-Walled Beams in Channel Cross-Section", *International Journal of Crash*, Vol. 11, No. 3, 2006, pp. 251-261.

۵-۶- اثر جرم روی رفتار لوله‌های جدار نازک تحت برخورد مایل

دومین متغیر موثر بارگذاری جرم ضربه‌زن می‌باشد. اثر جرم ضربه زن روی رفتار بار متوسط دینامیکی لوله‌های جدار نازک در شکل (۲۵) ارائه شده است. مشخصات هندسی لوله همان مشخصات مبنا می‌باشد. محدوده تغییرات جرم ضربه‌زن ۴۰۰،۵۰۰،۶۰۰ کیلوگرم انتخاب شده است تا انرژی جنبشی کافی برای فروریزش لوله‌ها فراهم شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ تغییر قابل توجهی روی رفتار منحنی بار دینامیکی - تغییر فرم با افزایش جرم ضربه‌زن رخ نمی‌دهد. تنها تفاوت مشاهده شده در افزایش تغییر فرم لوله‌ها می‌باشد که متناسب با افزایش انرژی جنبشی ضربه‌زن است. با توجه به این نتایج، آشکار است که سختی دینامیکی لوله‌های جدار نازک مستقل از جرم ضربه‌زن می‌باشد و جرم ضربه‌زن اثر قابل ملاحظه‌ای روی نیروی مقاوم داخلی لوله‌های جدار نازک هنگامی که سرعت ضربه‌زن ثابت است، ندارد.

۶- نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نتایج بررسی میزان جذب انرژی مقاطع جدار نازک مشخص شده می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را عنوان کرد:

۱- با توجه به نمودار بار متوسط دینامیکی بر حسب زوایای مختلف تا زاویه ۱۵ درجه منحنی بار- تغییر فرم به صورت فروریزش محوری خالص می‌باشد و از زاویه ۲۰ درجه به بعد فروریزش خمشی مشاهده می‌شود.

۲- برای زاویه ۳۰ درجه فروریزش لوله‌ها بعد از چین خوردن لبه لوله‌ها به صورت خمشی می‌باشد. مود B برای زوایای ۳۰ و ۳۵ درجه رخ می‌دهد اما با افزایش زاویه از ۳۵ تا ۴۰ درجه مود تغییر فرم به مود A تبدیل می‌شود.

۳- با توجه به مطالعه پارامتریک افزایش ضخامت اثر قابل توجهی روی محدوده زاویه بار بحرانی ندارد و در ناحیه فروریزش خمشی تغییرات ضخامت اثر کمتری روی بار متوسط دینامیکی دارد. هنگامی که کاهش وزن لوله‌های جدار نازک بسیار مهم است افزایش ضخامت روی انرژی جذب شده در ناحیه فروریزش خمشی که در هنگام برخورد مایل ممکن است بوجود آید، اثری ندارد.

۴- بار متوسط دینامیکی نسبت به تغییرات عرض مقطع در ناحیه فروریزش خمشی نسبت به ناحیه فروریزش محوری حساس‌تر است که این حالت در تضاد با تغییرات ضخامت می‌باشد. در ناحیه فروریزش خمشی با افزایش عرض مقطع میزان انرژی ویژه نیز افزایش داشته است. بنابراین در برخورد‌های مایل که با خمش لوله‌های جدار نازک مواجه هستیم افزایش عرض مقطع می‌تواند تا حدودی مفید باشد.

[11] Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc. Getting Started With ABAQUS/Explicit Version 6.5. Pawtucket, USA: HKS; 2004.

[10] Nagel, G.M., Thambiratnam, D. P., "Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes under Oblique Impact Loading", International Journal of Impact, Vol. 32, 2006, pp. 1595-1620.