

بررسی تجربی و عددی کمانش دینامیکی پوسته مخروط کامپوزیتی ناقص تحت بارگذاری خارجی

جمال زمانی^۱، محمدعلی صمیمی^۲ و سینا جلیلی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸)

چکیده

پوسته‌های کامپوزیتی مخروطی در صنعت کاربرد وسیعی دارند و تحلیل پایداری آن امری ضروری می‌باشد. در این مقاله، پایداری پوسته مخروطی کامپوزیتی تحت فشار بار دینامیکی خارجی به کمک روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش تجربی، کامپوزیت با الیاف شیشه و زوایای ۹۰ درجه برای ساخت نمونه انتخاب و روش لایه‌گذاری دستی برای ساخت پوسته کامپوزیتی به کار گرفته شده است. ست‌آپ تست که شامل ظرف مخزن فشار و سیستم ثبت دیتا می‌باشد، طراحی و برای پیدا کردن بار بحرانی کمانش، تاریخچه مخزن فشار در مدت زمان بارگذاری، استفاده شده است. کمانش قطعه به کمک تغییر محسوس در روند فشار ثبت شده مشخص می‌گردد که به دلیل تغییر حجمی است که با کمانش، درون مخزن فشار اتفاق می‌افتد. برای حل عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. برای این منظور در یک زمان مشخص بارگذاری، مخروط کامپوزیتی را تحت بار دینامیکی قرار می‌دهیم و جابجایی یک گره خاص از آن را نسبت به زمان رسم می‌کنیم. سپس با تغییر مداوم بار و رسم نمودار آن بر حسب زمان، باری که در آن تغییر جابجایی نسبت به حالت قبل قابل ملاحظه بشود به عنوان بار کمانش دینامیکی ثبت می‌شود. در هر دو روش مطالعات تجربی و عددی، آستانه پایداری پوسته در برابر بار دینامیکی قابل تشخیص می‌باشد. نهایتاً نتایج با هم مقایسه شده و یک نتیجه کاربردی مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: پوسته کامپوزیتی، پایداری، مخزن فشار، کمانش، روش عددی.

Experimental and Numerical Investigation of Dynamic Buckling of a Composite Truncated Conical Shell Under External Loading

S. Jalili, M.A. Samimi and J. Zamani

Mechanical Engineering Department

K. N. Tossi University of Technology

(Received: 13/April/2016; Accepted: 7/January/2017)

ABSTRACT

Composite conical shells have extensive industrial application and stability analysis is necessary for them. In this article, stability of composite conical shells subjected to dynamic external pressure is investigated by numerical and experimental methods. In experimental tests, cross-ply glass woven fabrics were selected for manufacturing of specimens. Hand-layup method was employed for fabricating the glass-epoxy composite shells. A test-setup that includes pressure vessel and data acquisition system was designed. For detecting the buckling load, pressure history of vessel during loading was used. Because of suddenly changing in volume of pressure vessel in instability moment, a disruption in pressure history can be observable. Also, numerical analyses are performed in Abaqus software. For doing this at a distinct loading time, we load composite cone with dynamic external loading and then draw displacement of a specific node versus time. And then with continuous changing of loads and drawing it versus time, the load on which variation of displacement become significant has been considered as dynamic buckling load.

In both of experiments and numerical studies, increasing of shell's stability threshold in dynamic loading is recognizable. Finally, results are compared together while a good correlation is observed.

Keywords: Composites shells, Stability, Pressure Vessel, Buckling, Numerical Method.

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری: m.a.samimi@kntu.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد: s.jalili@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

تعداد مقالات تجربی در ارتباط با کمانش پوسته‌های تحت بار دینامیکی کم می‌باشد. این تحقیق روی پوسته‌هایی که با مواد ایزوتروپیک ساخته شده‌اند، متمرکز شده‌است. در اینجا به برخی از این تحقیقات اشاره شده است. هامفر [۸] آزمایشاتی را روی پوسته‌های دایره‌ای نازک تحت بار برای پیدا کردن رفتار پایداریشان انجام داد. پاسخ الاستیک پوسته کروی نازک به بار متقارن محوری به صورت تجربی را هنگ اندازه‌گیری کرد [۹]. تاوادروس [۱۰] آزمایشهایی برای مشخص کردن پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته‌ها تحت موج انفجار انجام داد. کمانش پالس دینامیکی پوسته استوانه‌ای را آندرسون [۱۱] بررسی کرده است. به دلیل اهمیت وزن، استفاده از پوسته‌ها در صنعت افزایش پیدا کرده است. همچنین پاسخ دینامیکی این نوع ساختار به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. لشمیکاندم [۱۲] به بررسی کمانش پوسته استوانه‌ای سخت‌شده‌ی محوری تحت بار پله‌ای محوری پرداخته است. کمانش پلاستیکی محوری دینامیکی برای پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده، توسط جان و پاپاجرجیو [۱۳] بررسی شد. نهایتاً شادمهری [۱۴] به مطالعه کمانش پوسته‌های مخروطی کامپوزیتی لایه‌ای تحت بار خمشی سینوسی خالص با استفاده از نتایج تجربی و روش تئوری پرداخت. مطالعه عددی و تجربی پایداری پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی جدارنازک تحت بار دینامیکی محوری به وسیله اگلتیس انجام گرفت [۱۵].

در تحقیقات از بین اشکال هندسی، به پوسته‌های مخروطی کامپوزیتی کمتر پرداخته شده است. در این مقاله به مطالعه کمانش کامپوزیت مخروطی ناقص تحت بار ترکیبی محوری و جانبی دینامیکی با روش تجربی و عددی پرداخته شده است. در محاسبات عددی در یک زمان مشخص بارگذاری، با بارگذاری خطی نسبت به زمان، مخروط کامپوزیتی را تحت بار دینامیکی قرار می‌دهیم و جابجایی یک گره خاص از آن را نسبت به زمان رسم می‌کنیم. سپس با تغییر مداوم بار و رسم نمودار آن بر حسب زمان، باری که در آن تغییر جابجایی نسبت به حالت قبل قابل ملاحظه بشود به عنوان بار کمانش دینامیکی ثبت می‌شود. همچنین وسایل آزمایش‌های تجربی طراحی و ساخته شد. برای ایجاد تطابق بین نتیجه‌ها، تکنولوژی لایه‌گذاری دستی با چیدمان عمود برای ساخت نمونه‌ها انتخاب گردید.

پوسته‌های مخروطی، کاربرد بسیار وسیعی در صنعت دارند، خصوصاً در وسایل نقلیه فضایی و موشک‌ها. در سال‌های اخیر استفاده از مواد کامپوزیتی برای تولید پوسته‌ها با مقاومت بالا و وزن کم مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل پایداری پوسته‌های جدارنازک که تحت بار خارجی قرار گرفته‌اند، یکی از اولین ضروریات طراحی می‌باشد. در حالت کلی، وسایل نقلیه فضایی مانند موشک بالستیک که سرعت مافوق صوت دارند، تغییر پیوسته چگالی محیط می‌تواند باعث وارد شدن نیروهای دینامیکی ناگهانی شود. در این شرایط سخت، پوسته می‌تواند در خطر ناپایداری قرار گیرد. به دلیل اثر پیچیده نیروهای پتانسیل در حین پدیده‌های دینامیکی، استفاده محض از تحلیل تئوری می‌تواند باعث تخمین پایین یا بالاتر از حد واقعی شود. بنابراین، مطالعات تجربی جایگاه ارزشمندی در این شرایط دارد.

در تحقیقات، به کمانش دینامیکی پوسته‌ها، در مقایسه با تحلیل پایداری استاتیکی، کمتر پرداخته شده است. برای مثال اکسوگان و سوفیو [۱] به بررسی تئوری کمانش دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای ایزوتروپیک با ضخامت متغیر تحت بار خارجی پرداخته‌اند. همچنین همان نویسندگان [۲] در تحقیقات دیگرش به مطالعه پایداری دینامیکی پوسته مخروطی با ضخامت متغیر تحت فشار جانبی پرداخته است. در کار دیگر سوفیو [۳]، کمانش پوسته مخروطی ارتوتروپیک با ضخامت متغیر تحت فشار خارجی وابسته به زمان بررسی شده است. اسلامی و شریعت [۴] فرآیند عددی مرتبه بالا را که بر پایه تفاضل محدود برای پیدا کردن کمانش دینامیکی و پس کمانش پوسته استوانه‌ای لایه‌ای فرمول‌بندی شده است را گسترش دادند. هوفت و پُتالا [۵] به بررسی پایداری پوسته‌های استوانه‌ای لایه‌ای تحت بار ضربه‌ای^۱ با استفاده از معیار پایداری متیو پرداخته و همچنین آنها نتایج آنالیز را با کدهای شبیه‌ساز نرم‌افزار آباکوس مقایسه کرده‌اند. دامیر [۶] در رابطه با بارهای استاتیکی متقارن محوری و کمانش پوسته مخروطی لایه‌ای نازک با به کارگیری روش المان محدود مرتبه بالا پرداخته است. قاجار [۷] به تحلیل دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی دوانحنایی تحت ضربه سرعت پایین به روش تحلیلی پرداخته است.

جدول (۱): ابعاد نامی نمونه‌ها.

نام نمونه	L(mm)	R1(mm)	R2(mm)
کوچک	۱۱۰	۵۵	۱۱۰
متوسط	۱۷۰	۵۵	۱۳۷/۵
بزرگ	۲۲۰	۵۵	۱۶۷/۵

الیاف تقویت کننده در این مقاله پارچه‌های بافته شده از جنس الیاف شیشه با طرح بافت صفحه‌ای هستند. چگالی این الیاف ۱۸۰ گرم بر مترمکعب است. رزین مصرفی نیز از نوع EEW-185 اپوکسی ساخت شرکت هانتسمن آلمان است. این رزین به کمک یک هاردنر آمیدی با نام تجاری جفامین پخته می‌شود. برای تولید زمینه ماده کامپوزیتی هاردنر و رزین فوق با نسبت ۱ به ۱۰ مخلوط می‌شوند. با توجه به دمای محیط مدت زمان لازم برای پخت در دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس) حدودا ۱۵-۱۲ ساعت است. در این تحقیق پارچه‌ها را به صورت‌های دولایه، سه لایه و چهار لایه مورد استفاده قرار دادیم. شکل ۲ پارچه‌های بریده شده بر اساس گسترش مخروط‌ها و همچنین قطعات نهایی ساخته شده را نمایش می‌دهد. از هر نوع نمونه با ضخامت مربوطه، ۳ عدد ساخته شده است. در مجموع ۲۷ نمونه ساخته شد.



شکل (۲): بالا: پارچه‌های بریده شده و پایین: نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده.

۲- بررسی تجربی

در ابتدا روش ساخت نمونه‌ها توضیح داده خواهد شد و سپس خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی بیان می‌گردد.

۲-۱- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

برای تولید قطعات کامپوزیتی روش‌های متعددی وجود دارد. هر کدام از این روش‌ها دارای ویژگی‌هایی هستند که بسته به کاربرد یکی از آنها انتخاب می‌شود. در این میان روش‌ها لایه‌گذاری دستی فراگیرترین روش برای ساخت پوسته‌های کامپوزیتی می‌باشد و دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که از آن جمله: هزینه تمام شده نسبتا پایین، امکان ساخت قطعات بسیار بزرگ و تیراژ بالای قطعات است. از عیوب این روش که دقت و کیفیت قطعه ساخته شده به مهارت کارگر سازنده آن مرتبط می‌باشد و قاعده کنترل دقیقی بر آن حاکم نیست [۱۶].

در این مقاله، روش لایه‌گذاری دستی به عنوان یک روش متداول برای ساخت کامپوزیت مخروط ناقص شیشه/ اپوکسی، برگزیده شد. در این روش سه مدل از جنس چوب برای شکل دادن به نمونه‌ها ساخته شده که این مدل‌ها در سه هندسه و ارتفاع مختلف به صورت مخروط ناقص و با زاویه راس ۳۰ درجه (شکل ۱) می‌باشند. در جدول ۱ ابعاد این نمونه‌ها آورده شده است. همانطور که از شکل ۱ مشخص است برای بالا بردن صافی سطح مدل‌ها از بتونه چوبی نیز بهره گرفته شده است.



شکل (۱): مدل‌های چوبی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها.

۲-۲- خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی

با توجه به فناوری مورد استفاده، ماهیت ناکاملی‌های نمونه‌ها اتفاقی می‌باشد. بدین منظور از انحراف از معیار مقادیر فوق از مقدار میانگین استفاده شده است. تعریف کلی انحراف از معیار به صورت رابطه (۱) است:

$$\zeta = \frac{\sqrt{(\bar{x} - x_i)^2}}{n} \quad (1)$$

در رابطه فوق \bar{x} ، مقدار میانگین متغیرها، x_i مقدار هر متغیر، n تعداد کل متغیرها است. در رابطه فوق می‌توان متغیرها را از دو نوع ضخامت سازه در نقاط مختلف که به صورت رندم انتخاب می‌شوند و یا قطرهای مختلفی که از سازه در جهات مختلف اندازه‌گیری می‌شوند، اختیار نمود. جدول ۳ حاوی اطلاعات نمونه‌های ساخته شده است. در این جدول درصد حجمی الیاف با توجه به رابطه (۲) که بر اساس ضخامت لایه‌ها می‌باشد، محاسبه شده است:

$$\%V_f = \frac{t_f}{t_i} * 100. \quad (2)$$

که در رابطه فوق، ضخامت الیاف بر ضخامت کل لایه تقسیم شده است. ضخامت کل الیاف ۰/۱ میلی‌متر است و برای سهولت در شناسایی نمونه‌ها از کدگذاری ساده‌ای استفاده شده است: کاراکتر سمت چپ اشاره به ابعاد و راست تعداد لایه‌های به‌کاررفته در ساخت نمونه مزبور است. به عنوان مثال S4 اشاره به قطعه کوچک با چهار لایه دارد.

جدول (۳): ابعاد هندسی واقعی نمونه‌ها.

کد قطعه	میانگین 2R1(mm)	میانگین 2R2(mm)	میانگین 2h (ضخامت) (mm)	L(mm)	ضخامت ζ (mm)	شعاع ζ (mm)	$V_f\%$
S4	۱۱۰/۴	۲۲۰	۱/۴۳۲	۱۱۰/۰۰	۰/۲۹۴	۰/۶	۲۹/۴
S3	۱۱۰/۴	۲۲۰	۰/۹۸	۱۱۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۸۵	۳۰
S2	۱۱۰/۴	۲۲۰	۰/۶۸	۱۱۰/۰۰	۰/۱۳۳	۰/۷۳	۲۹
M4	۱۱۰/۵	۲۷۵/۵	۱/۴۳۲	۱۶۷/۰۲	۰/۲۲۶	۰/۶۴	۲۹/۴
M3	۱۱۰/۵	۲۷۵/۷۵	۰/۹۸	۱۶۷/۰۲	۰/۲۲۷	۰/۵۴	۳۰
M2	۱۱۰/۵	۲۷۵/۷۵	۰/۶۸	۱۶۷/۰۲	۰/۱۷۳	۰/۸۷	۲۹
B4	۱۱۰/۳	۳۳۵/۵	۱/۴۳۲	۲۱۸/۰۰	۰/۲۶۵	۰/۶۲	۲۹/۴
B3	۱۱۰/۳	۳۳۵/۵	۰/۹۸	۲۱۸/۰۰	۰/۱۳۷	۰/۳۳	۳۰
B2	۱۱۰/۳	۳۳۵/۵	۰/۶۸	۲۱۸/۰۰	۰/۱۳۸	۰/۵۶	۲۹

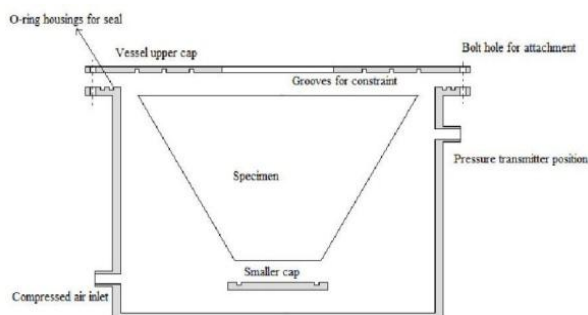
مواد کامپوزیتی به خاطر ماهیت ناهمسانگرد بودن در جهات مختلف دارای خواص مکانیکی متفاوتی هستند. بدلیل نوع چیدمان لایه‌ها در پارچه‌های مورد استفاده [۹۰/۰] (لایه‌ها عمود بر هم قرار گرفته اند) ماده در دو جهت عمود بر هم (در جهت لایه‌ها) خواصی یکسان خواهد داشت. جدول ۲ خواص مکانیکی که از آزمون‌های کشش بدست آمده‌اند را در یکی از جهات اصلی ماده ارائه می‌دهد. اطلاعات این جدول بر اساس روش استاندارد ASTM3039,3518 و D638 به‌دست آمده است.

جدول (۲): خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی و رزین.

چگالی (kg/m3)	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نوع ماده
۲۰۱۰	۲۲۹	۱۵	کامپوزیت
۱۲۰۰	۱۳۰	۴	رزین پخته شده(خالص)

نکته حائز اهمیت در مسائل تجربی، عدم تطابق کامل هندسه نمونه‌های ساخته شده با ابعاد نامی آنها است. در این موارد همیشه مقداری انحراف و ناکاملی از مقادیر دقیق وجود خواهد داشت. در این پژوهش دو عامل تطابق هندسی مورد بررسی قرار گرفته است: ۱- انحراف از ضخامت و ۲- دایروی بودن.

قطعات چوبی که به طور منظم درون مخزن چیده شده‌اند بهره برده شده است. نکته دیگر نزدیک بودن حتی المقدور سنجه به محل قرارگیری نمونه‌ها است. شکل ۳ نمایشگر طرح کلی مخزن است.



شکل (۳): طرح واژه مخزن تحت فشار به همراه اجزا آن

مجموعه کپ بالایی و مخزن اصلی به کمک ۱۴ عدد پیچ M8 به هم متصل شده‌اند. شکل ۴ نیز مجموعه یک نمونه به همراه کپ مسدودکننده پلی‌اتیلنی و کپ بالایی مخزن را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمونه مهار شده بر روی کپ بالایی مخزن (شیارها مشخص هستند).

شاید بتوان گفت که وجه تمایز اصلی این مخزن نسبت به سایر مخازن مجهز بودن آن به ابزار اندازه‌گیری فشار است که امکان ثبت فشار داخل آن را به صورت تاریخچه تغییرات در اختیار قرار می‌دهد. بدین منظور باید یک سنجه مناسب انتخاب شود. سنجه مورد استفاده، یک ترانسسمیتر فشار PT-2000 (ساخت شرکت DELTA کشور کره جنوبی) است. محدوده کاری این ترانسسمیتر صفر تا چهار بار است. خروجی سنجه فوق به صورت جریان ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر است که برای تبدیل به ولتاژ، از یک مقاومت ۹۹۰ اهمی استفاده شده است.

۳- ساخت بخش‌های مورد نیاز برای آزمایش‌ها

در بخش حاضر به ویژگی‌های مخزن تحت فشار ساخته شده برای انجام تست‌های دینامیکی پرداخته شده است. نکته حائز اهمیت در این پژوهش جنس نمونه‌های مورد بررسی است. نمونه‌های کامپوزیتی را به راحتی نمی‌توان بر روی هر سازه‌ای متصل نموده و یا به اصطلاح مهار کرد. سازه مخزن ساخته شده در این تحقیق از جنس فولاد است و برای اتصال نمونه‌ها به آن از چسب آب بندی استفاده شده است. با توجه به ماهیت فشاری بارگذاری بر روی نمونه‌ها احتمال گسست چسب به خاطر فشار بالا وجود ندارد. البته محاسبات اولیه به کمک روابط تحلیلی، بار کمانش استاتیکی این سازه‌ها را بالا پیش‌بینی نمی‌کند و از این رو از لحاظ استحکام با ملاحظات طراحی مهمی برخوردار نخواهیم کرد. برای مهار کردن نمونه‌ها بر روی کپ مخزن، یک سری شیار با ابعاد متنظر با قطر بزرگ نمونه‌ها تعبیه شده است. شعاع کوچکتر نمونه‌ها توسط یک کپ پلی‌اتیلنی مسدود می‌شود. تمامی لبه‌های مورد نظر نمونه‌ها با کمک چسب آب‌بندی به شیارهای فوق متصل خواهند شد.

۳-۱- انتخاب سیال عامل انتقال دهنده بار

با توجه به پایین بودن فشار کمانش سازه‌ها (اغلب سازه‌ها در محدوده زیر فشار اتمسفر) امکان استفاده از سیال تراکم‌ناپذیر مانند روغن و آب وجود ندارد. زیرا اکثر تجهیزات مورد نیاز برای تولید فشار این نوع سیالات در محدوده فشارهای بسیار بالاتر کار می‌کنند و همچنین برای ایجاد فشار دینامیکی باید از اکومولاتورهایی که بازهم در محدوده فشار بالاتری عمل می‌کنند، استفاده کرد. با فرضیات فوق باید گزینه سیال تراکم‌پذیر را مورد بررسی قرار داد. بدین منظور هوا به عنوان سیال عامل انتقال بار انتخاب شد. البته با تمهیداتی که در بخش بعدی شرح داده خواهند شد، اثرات تراکم‌پذیری هوا کمینه شده است.

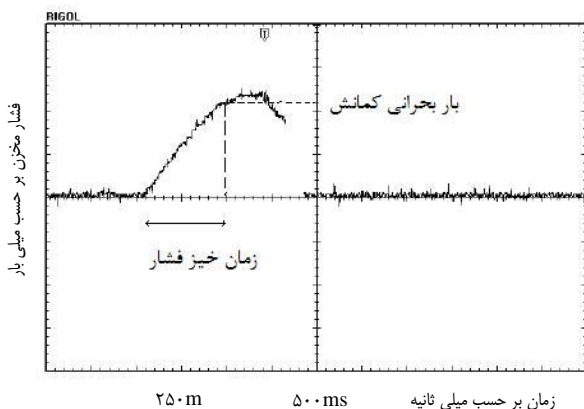
۳-۲- طرح مخزن تحت فشار و ابزار اندازه‌گیری فشار

اولین نکته‌ای که باید در مورد هندسه مخزن مورد توجه قرار داد، مسئله تراکم‌پذیر بودن سیال مورد استفاده است. به همین دلیل حجم مخزن تا حد ممکن نزدیک ابعاد هندسی نمونه‌ها و به اندازه بزرگترین نمونه در نظر گرفته شود. برای کاهش فضای مرده‌ای که به ناچار در مخزن ایجاد می‌شود، از

۴- انجام آزمایشات و نتایج

با توجه به ماهیت بار دینامیکی که با سرعت بسیار بالایی تغییر می‌کند، در این مقاله برای یافتن بار کماتش دینامیکی از یک روش مبتکرانه بهره گرفته شده است. اساس این روش بر پایه ثبت اطلاعات خروجی و تحلیل تاریخچه تغییرات فشار مخزن بنا نهاده شده است. نکته حائز اهمیت در بحث کماتش پوسته‌های جدار نازک تغییر شکل محسوس و ناگهانی سازه در هنگام وقوع ناپایداری است. با توجه به این که سازه تا پیش از وقوع کماتش تقریباً تغییر شکل خاصی ندارد، فشار مخزن با تقریب خوبی به صورت خطی افزایش خواهد یافت. وقتی فشار درون مخزن به اندازه بحرانی برسد، سازه تغییر شکل محسوسی خواهد یافت و در نتیجه حجم فضای مخزن افزایش پیدا می‌کند. این تغییر حجم روند افزایش فشار را با اغتشاش روبرو خواهد ساخت. این نقطه همان لحظه کماتش سازه است. با توجه به مطالب مذکور، برای بارگذاری دینامیکی دو پارامتر تعریف می‌شود:

- ۱- بار بحرانی کماتش: نقطه ایست که در آن اولین ناپایداری اتفاق می‌افتد.
 - ۲- زمان خیز فشار: مدت زمانی که لازم است تا فشار از فشار گنج صفر به فشار بحرانی کماتش برسد.
- شکل ۷ تاریخچه فشار و پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تاریخچه فشار و پارامترها.

البته خاطر نشان می‌سازد که بعد از مشاهده ایجاد کماتش در سازه، باید اقدام به انفصال منبع هوای فشرده از مخزن تست نمود در غیر این صورت احتمال تخریب انفجاری

خروجی دو سر این مقاومت به یکی از کانال‌های یک دستگاه اسیلوسکوپ ۱۵۰ MHz متصل شده و به این ترتیب قادر به قرائت ولتاژ و یا به عبارتی فشار مخزن به صورت نمودار بر حسب زمان شد. این اطلاعات به کامپیوتر انتقال یافت. شکل ۵ شمای مخزن و همچنین ترانسمیتر فشار مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

برای تولید هوای فشرده نیز از یک کمپرسور ۱۲۵ لیتری با فشار کاری حداکثر ۱۰ بار استفاده شده است. شکل ۶ نیز شمای کلی مجموعه تدارک دیده شده را نشان می‌دهد.

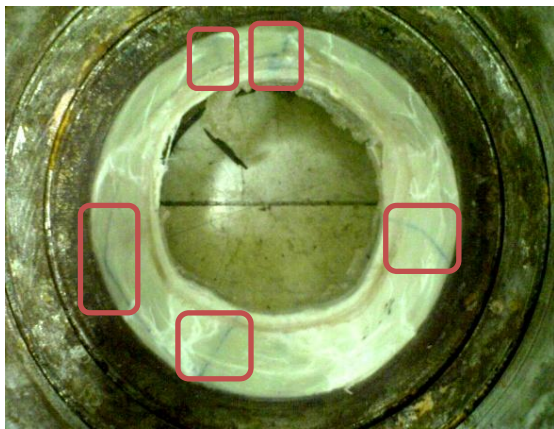
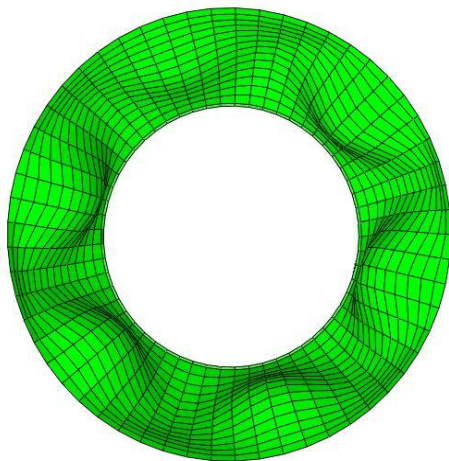


شکل (۵): مخزن ساخته شده (فشارسنج عددی در ابتدا برای کالیبراسیون دستگاه استفاده می‌شود).



شکل (۶): مجموعه برای بارگذاری دینامیکی خارجی یک نمونه کامپوزیتی آماده شده است.

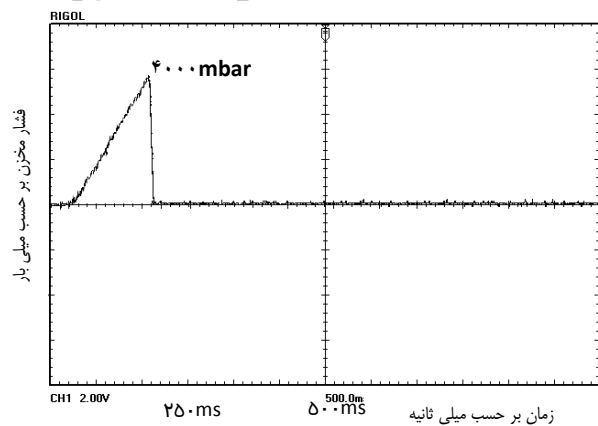
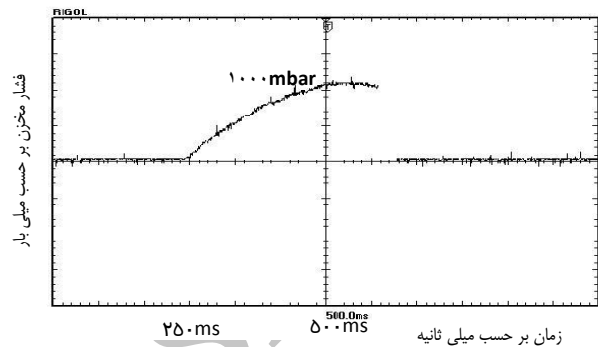
با توجه به این که قطعات ساخته شده دارای خاصیت ارتجاعی خوبی بودند، بعد از کمانش امکان بازگشت مجدد آنها به حالت اولیه بدون این که تغییری در بار کمانش آنها ایجاد شده باشد، وجود داشت. این مزیت باعث کاهش چشمگیر تعداد نمونه‌های مورد نیاز شد. با توجه به توضیحات فوق تست‌ها انجام شدند و نتایج آن در جدول‌های ۴ تا ۶ منعکس شده است.



شکل (۹): بالا: یک نمونه از لوب‌ها در شبیه‌سازی یکی از نمونه‌ها. پایین: نمونه S4 بعد از کمانش، تعداد لوب‌های کمانشی مشخص هستند (۵ لوب و نما از بالا).

در جدول ۴ برای نمونه B2 مقادیری برای بارکمانش دینامیکی مشاهده نمی‌شود. به دلیل آنکه بار کمانش این نمونه بسیار پایین بود امکان تعقیب دقیق تاریخچه فشار میسر نشد و همچنین زمان خیز فشار در این ستون فقط جهت مقایسه به طور دلخواه انتخاب شده است.

نمونه‌ها به خاطر بالا رفتن بیش از حد فشار درون مخزن وجود دارد. با تغییر دادن فشار منبع هوای فشرده می‌توان به نرخ‌های مختلف بارگذاری دست پیدا کرد. در شکل ۸ انواع مختلفی از تاریخچه فشار برای نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود.



شکل (۸): انواع مختلف تاریخچه فشار که در حین تست‌ها اتفاق افتادند (بالا: M4 با پیش‌بار ۱۰۰۰ mbar و پایین S4 با پیش‌بار ۴۰۰۰ mbar).

تاریخچه فشار بالایی در شکل ۸ حالتی را نشان می‌دهد که بعد از کمانش سازه، فشار مخزن به عدد ثابتی میل کرده و به دلیل قطع ارتباط با منبع هوای فشرده فرصت برای افزایش مجدد فشار مخزن وجود نداشته است. شکل پایینی نیز مربوط به نمونه S4 در بالاترین پیش‌فشار کمپرسور (۴۰۰۰ mbar) زمانی که منجر به تخریب نمونه شد، است. می‌توان افت فشار ناگهانی را در این مورد مشاهده کرد. شکل ۹ تصویر این نمونه را بعد از تست نشان می‌دهد. آثار تعداد لوب‌های کمانشی نیز بر روی نمونه مشخص و قابل شمارش است (۵ لوب).

جدول (۴): نتایج مربوط به نمونه‌های کوچک s.

نمونه	بار کمانش استاتیکی (mbar)	R1/2h	بار کمانش دینامیکی عددی (mbar)	بار کمانش دینامیکی تجربی (mbar)	زمان خیز فشار (s)	پیش‌بار کمپرسور (mbar)
S2	۱۴۰	۸۱/۱	۱۵۵	۱۴۰	۱/۲	۲۵۰
			۱۷۵	۱۵۰	۰/۸	۳۰۰
			۲۳۰	۲۰۰	۰/۶	۴۰۰
			۲۶۵	۲۵۰	۰/۴	۵۶۰
S3	۲۹۰	۵۶/۳	۳۵۰	۳۴۰	۱	۵۱۰
			۳۸۰	۳۷۵	۰/۸	۸۰۰
			۴۴۵	۴۵۰	۰/۶	۱۰۰۰
			۴۸۵	۴۷۵	۰/۴	۱۳۰۰
S4	۱۱۰۰	۳۸/۶	۱۲۱۰	۱۱۰۰	۱/۶	۲۵۰۰
			۱۳۰۰	۱۲۵۰	۱/۲	۳۰۰۰
			۱۳۴۰	۱۳۰۰	۱	۳۵۰۰
			۱۴۰۰	۱۵۰۰	۰/۶	۴۰۰۰

جدول (۵): نتایج مربوط به نمونه‌های متوسط M.

نمونه	بار کمانش استاتیکی (mbar)	R1/2h	بار کمانش دینامیکی عددی (mbar)	بار کمانش دینامیکی تجربی (mbar)	زمان خیز فشار (s)	پیش‌بار کمپرسور (mbar)
M2	۶۰	۲۳۰	۱۳۰	۱۲۵	۰/۴	۴۰۰
			۱۳۵	۱۲۸	۰/۳۵	۶۰۰
			۱۴۵	۱۳۰	۰/۳	۱۰۰۰
			۱۵۰	۱۳۲	۰/۲۶	۲۰۰۰
M3	۱۸۰	۸۱۱	۱۹۵	۱۹۰	۰/۷	۴۴۰
			۲۶۵	۲۵۰	۰/۵	۵۴۰
			۲۸۵	۲۷۵	۰/۴	۸۰۰
			۲۹۵	۳۰۰	۰/۳۴	۱۲۰۰
M4	۵۲۵	۱۵۷۷	۵۷۵	۵۵۰	۱/۵	۱۰۰۰
			۶۰۰	۵۶۵	۱/۱	۱۳۰۰
			۶۸۵	۶۲۵	۰/۹	۱۶۰۰
			۷۱۰	۶۲۵	۰/۷	۲۰۰۰

جدول (۶): نتایج مربوط به نمونه‌های بزرگ B.

نمونه	بار کمانش استاتیکی (mbar)	R1/2h	بار کمانش دینامیکی عددی (mbar)	بار کمانش دینامیکی تجربی (mbar)	زمان خیز فشار (s)	پیش‌بار کمپرسور (mbar)
B2	۳۰	۸۱/۲	۳۵		۱	
			۴۰		۰/۹	
			۶۵		۰/۶	
			۸۵		۰/۳	
B3	۱۹۰	۵۶/۳	۱۹۰	۱۸۵	۰/۵	۶۰۰
			۲۰۰	۱۹۰	۰/۴	۸۰۰
			۲۲۰	۲۱۵	۰/۳۵	۱۰۰۰
			۲۷۵	۲۶۰	۱/۱	۱۴۰۰
B4	۳۳۰	۳۸/۶	۳۸۰	۳۳۰	۱/۸	۵۰۰
			۴۳۰	۴۱۰	۱/۳	۶۰۰
			۵۵۰	۵۲۰	۱	۷۰۰
			۶۱۵	۶۱۰	۰/۸	۸۰۰

۵- حل عددی مسئله

برای حل عددی قسمت دینامیکی از نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است. برای این منظور در یک زمان مشخص، با بارگذاری خطی نسبت به زمان، مخروط کامپوزیتی را تحت بار دینامیکی قرار می‌دهیم و جابجایی یک گره خاص از آن را نسبت به زمان رسم می‌کنیم. سپس با تغییر مداوم بار و رسم نمودار آن بر حسب زمان، باری که در آن تغییر جابجایی نسبت به حالت قبل قابل ملاحظه بشود به عنوان بار کمانش دینامیکی ثبت می‌شود.

برای مش‌بندی از بخش‌بندی‌های ۴ گرهی پوسته استفاده شده است. نوع بخش‌بندی‌ها Explicit است. این بخش‌بندی‌ها در نرم‌افزار به نام S4R می‌باشند.

برای کم کردن میزان تکرار این روش از بارهای محاسبه شده استاتیکی شروع کرده و میزان این بارها افزایش می‌یابد.

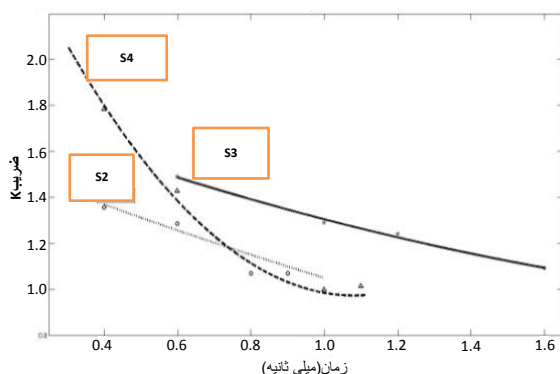
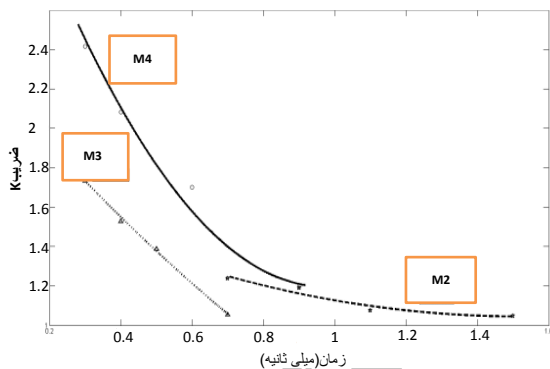
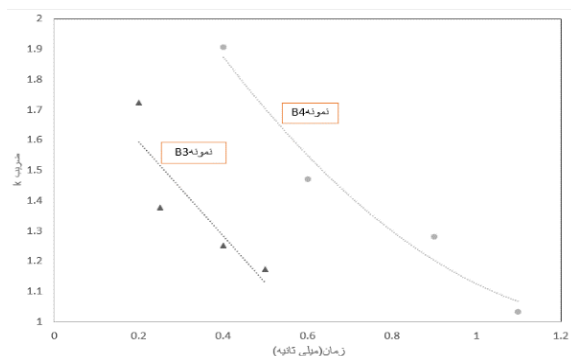
برای هر مخروط بارگذاری‌های خطی با نرخ‌های متفاوت در بازه زمانی یک ثانیه را اعمال می‌کنیم و برای یک گره مشخص از مخروط، جابجایی کلی آن را نسبت به زمان ثبت می‌کنیم. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، از آنجاکه همه گره‌ها در یک لحظه مشخص یکسان، تغییر شکل زیادی خواهند

داشت، در هر نمونه، یک گره به عنوان مبنای کار، انتخاب می‌گردد. در باری که این جابجایی پرش زیادی داشته باشد به عنوان بار کمانش دینامیکی انتخاب و با زمان اعمال بار ثبت می‌شود. برای تعریف خواص کامپوزیت‌ها از مشخصات بخش‌های قبل، استفاده می‌شود. لایه‌ها صفر و نود تعریف می‌گردند. شرایط مرزی گیردار برای دو انتهای مخروط انتخاب می‌گردد، با توجه به این نکته که در انتهای کوچک مخروط جابجایی در راستای محور، آزاد گذاشته می‌شود.

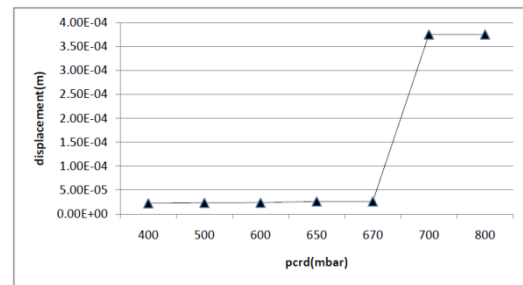
برای مخروط کوچک دو لایه، برای بارها نیز نمودارهای مشابه بدست آمده و از هر نمودار ماکزیمم جابجایی صورت گرفته یادداشت شده و در نموداری جدا که بر حسب بار- جابجایی است ترسیم گشته است. در شکل (۱۰). همان طور که از نمودار مشخص است تا بار ۶۷۰ میلی بار جابجایی گره ۱ مورد نظر با بار اعمالی رابطه‌ای خطی با شیب کم می‌باشد ولی در باری بین ۶۷۰ تا ۷۰۰ میلی‌بار این رابطه دارای یک پرش شدید است که در نتیجه باری بین این محدوده یعنی ۶۷۰ تا ۷۰۰ میلی‌بار را می‌توان به عنوان بار کمانش دینامیکی معرفی کرد.

$$K_d = \frac{P_d}{P_s} \quad (۳)$$

در رابطه فوق، P_d ، فشار دینامیکی کمانش و P_s ، فشار کمانش استاتیکی است. تغییرات ضریب فوق بر حسب زمان خیز فشار در شکل‌های ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده نیز می‌توان متوجه شد، تغییرات ضرایب دینامیکی در محدوده ۲/۵ - ۱ قرار دارند. این مقدار برای نمونه‌های با ابعاد هندسی مختلف متفاوت است.



شکل (۱۱): تغییرات ضریب دینامیکی بر حسب زمان خیز. بالا: نمونه‌های بزرگ، وسط: نمونه‌های متوسط و پایین نمونه‌های کوچک.



شکل (۱۰): نمودار جابجایی- بار برای مخروط متوسط (M4).

این روند برای بقیه نمونه‌ها اجرا شده و بار کمانش دینامیکی آنها در جدول‌های (۴) تا (۶) آورده شده است.

۵- تفسیر داده‌ها

به طور کلی عواملی که باعث ایجاد اختلاف میان نتایج بارگذاری دینامیکی و استاتیکی می‌شوند را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم نمود:

۱- فعال شدن نیروهای اینرسی به خاطر شتاب‌گیری ذرات ماده که به‌طور طبیعی باعث تغییر در توزیع تنش درون جسم خواهد شد.

۲- تغییر در ماهیت ماده به خاطر موثر شدن نرخ کرنش که معمولاً باعث تغییر نقطه تسلیم ماده و مشخصات پلاستیسیته آن خواهد شد.

در مورد بارگذاری خارجی با توجه به این که سازه تا پیش از کمانش دچار تغییر شکل محسوسی نمی‌شود، معمولاً اثرات نیروهای دینامیکی در مرحله تغییر شکل ناگهانی و پس از کمانش مشخص می‌شوند. به هر صورت باید همان‌طور که در مرحله مقدمه توضیح داده شد، عوامل موثر در پدیده پایداری دینامیکی را پیچیده‌تر در نظر گرفت.

با توصیفات اجمالی فوق انتظار آن می‌رود که در نمونه‌هایی که در آنها عوامل نیروهای اینرسی بیشتر شوند، بار دینامیکی نیز تفاوت بیشتری با بار متناظر استاتیکی داشته باشد. همان‌طور که نتایج تست‌ها در جدول ۴ نشان می‌دهند، بار کمانش دینامیکی از بار استاتیکی مقدار بیشتری را اختیار می‌کند. با بالاتر رفتن زمان خیز فشار (Δt)، مقدار اختلاف بار کمانش دینامیکی و استاتیکی بیشتر می‌شود.

به همین ترتیب یک ضریب دینامیکی به ترتیب زیر برای نشان دادن میزان افزایش فشار کمانش دینامیکی تعریف می‌شود:

آنچه که از تحلیل نمودار (۱۲) بر می آید، آن است که با افزایش معکوس عدد بدون بعد که متناظر با کوچک تر شدن ابعاد هندسی نمونه و ضخیم تر شدن آن است، بار کمانش دینامیکی مقدار بیشتری را اختیار می کند. کماکان نیز اثر کاهش زمان خیز فشار بر روی بیشتر شدن بار کمانش دینامیکی بر قدرت خود باقی است. ولی با توجه به اثرات هندسه و همچنین زمان بارگذاری، می توان به قوی تر بودن جایگاه اثرات هندسه پی برد.

نکته دیگر قابل توجه آن است که اندازه تجربی زمان خیز فشار نمونه ها به دلیل عدم کنترل این پارامتر، الزاما یکی نمی باشد. از آنجا که این پارامتر به بار کمانش نمونه و فشار مخزن کمپرسور بستگی دارد با این روش رسیدن به زمان خیز فشار مشخص، امکان پذیر نمی باشد. به دلیل آن که کنترل هردوی این پارامترها بسیار مشکل است و دستگاه های گران قیمت می خواهد.

با بررسی نتایج مشاهده می شود که در پوسته های بزرگتر و نازکتر به دلیل شتاب گیری ذرات پوسته تولید نیروی اینرسی قویتر، آسان تر شده و اثر نرخ افزایش بارگذاری بیشتر می شود.

بدلیل نرخ بالای پدیده کمانش دینامیکی، برای اندازه گیری کامل مدهای کمانش و شمردن لوب ها، نیاز به دوربین های سرعت بالا یا کرنش سنج دینامیکی متصل در چندین مکان می باشد. اما گاهی اوقات (مانند نمونه S4 طی انجام تست در بیشترین نرخ بارگذاری که در آن زمان خیز فشار برابر ۰.۶ می باشد) اثر لوب های کمانش ایجاد شده روی نمونه باقی می ماند. شکل ۹ این نمونه را پس از انجام آزمایش نشان می دهد. اگرچه این رویداد برای دیگر نمونه ها اتفاق نمی افتد. دیواره نازکتر و انعطاف پذیری بیشتر دیگر نمونه ها سبب شده است که به شرایط اولیه خود بعد از بارگذاری برسند بدون آن که هیچ اثر پسماندی داشته باشند. همچنین نسبت بالای انعطاف پذیری به مقاومت رزین استفاده شده اثر مهمی روی بازگشت پذیری نمونه دارد.

۶- نتیجه گیری

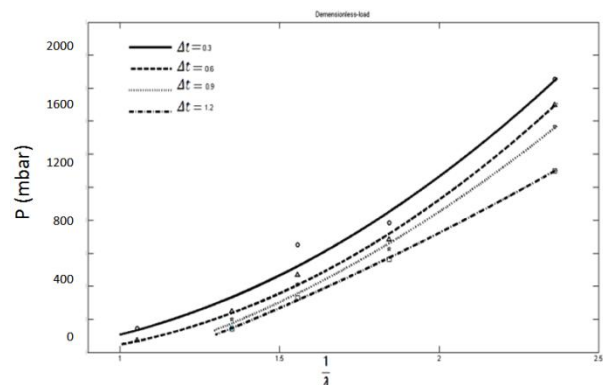
در این مقاله با استفاده از روش تجربی و عددی سعی بر ارزیابی پاسخ پوسته های مخروطی کامپوزیتی در برابر بارگذاری خارجی دینامیکی شده است. نتایج آزمایشات و شبیه سازی های انجام شده حاکی از آن است که با افزایش نرخ

اولین نکته ای که از نتایج استخراج می شود، افزایش بار کمانش دینامیکی با کاهش زمان خیز فشار برای هر نمونه است. این تغییرات با رگرسیون مرتبه دوم برازش شده اند. تغییرات ضریب دینامیکی با پیچیدگی بیشتری روبرو است. به عنوان مثال به طور کلی و تقریبی می توان گفت که با افزایش تعداد لایه ها در نمونه این ضرایب مقدار کمتری اختیار می کنند. به طوری که نمونه های دولایه دارای بیشترین ضریب دینامیکی هستند. در این میان با بزرگتر شدن نمونه، اثرات تکیه گاهی بر روی ذرات ماده کمتر خواهد شد. از این رو این انتظار که ضریب دینامیکی این نمونه ها بیشتر باشد، غیر منطقی نخواهد بود. از سویی با بزرگتر شدن نمونه ها نرخ افزایش بار کمانش دینامیکی بر حسب زمان خیز فشار نیز افزایش پیدا می کند. البته در نمودارها بیشترین ضرایب به نمونه های متوسط تعلق دارد که دلیل آن مورد تست قرار نگرفتن نمونه بزرگ B2 می باشد.

اگر بتوان به طریقی به مقایسه نمونه ها پرداخت که نیازی به دسته بندی آنها نباشد، می توان تحلیل موثرتری انجام داد. به همین دلیل برای هر کدام از نمونه ها عدد بدون بعد λ مانند زیر تعریف می شود [۱۷].

$$\lambda = \left(\frac{\left(\frac{L}{2 \times R_m \times \cos \gamma} \right)^2}{\left(\frac{t}{2 \times R_m \times \cos \gamma} \right)^3} \right)^{0.25} \times \left(\frac{\sigma_p}{E} \right). \quad (4)$$

در رابطه فوق، R_m میانگین شعاع های بزرگ و کوچک مخروط است. t نیز ضخامت کلی مخروط است. E مدول الاستیسیته ماده سازنده مخروط در یکی از جهت های اصلی و σ_p تنش تسلیم آن است. شکل ۱۲ نمایشگر تغییرات فشار دینامیکی کمانش بر حسب معکوس عدد بدون بعد در زمان های خیز فشار مختلف است.



شکل (۱۲): تغییرات فشار کمانش دینامیکی بر حسب عدد بدون بعد λ

- Models of Complete and Improved Spring-Mass” Aerospace Mechanics Journal, Vol.10, pp. 1-12, 2014. (in Persian).
8. Humphreys, R.S., Roth, R.S., Zatlars, J., “Experiments on Dynamic Buckling of Shallow Spherical Shells under Shock Loading”, AIAA Journal, Vol.3, No. 1, pp. 33-39, 1965.
 9. Haung, N.C., “Axisymmetric Dynamic Snap-Through of Elastic Clamped Shallow Spherical Shells”, AIAA Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 215-220. 1969.
 10. Tawadros, K.Z., Glockner, P.G., “Experiments on the Non-linear Dynamic Response of Shells under Blast Waves”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 26, No. 4, pp. 441-463, 1973.
 11. Anderson, D.L., Lindberg, H.E., “Dynamic Pulse Buckling of Cylindrical Shells under Transient Lateral Pressures”, AIAA Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 589-598, 1968.
 12. Lakshmikantham, C., Tsui, T.U., “Dynamic Stability of Axially-Stiffened Imperfect Cylindrical Shells under Axial Step Loading”, AIAA Journal, Vol. 12, No. 2, pp.163-169, 1974.
 13. Jones, N., Papageorgiou, E.A., “Dynamic Axial Plastic Buckling of Stringer Stiffened Cylindrical Shells”, International Journal Of Mechanical Sciences, Vol. 24, No. 1, pp. 1-20. 1982.
 14. Shadmehri, F., “Buckling of Laminated Composite Conical Shells; Theory and Experiment”, PhD Thesis, University of Concordia, Canada. 2012.
 15. Eglitis, E., “Dynamic Buckling of Composite Shells”, PhD Thesis, Riga Technical University, Latvia. 2011.
 16. Gay, D., V.Hoa, S., W.Tsai, S., Composite Materials, Design and Applications, CRC, Press. 2003.
 17. T.F. Ross, C., Sawkins, D., Johns, T., “Inelastic buckling of thick-walled circular conical shells under external hydrostatic pressure”, Ocean Engineering, Vol. 26, pp. 1297-1310, 1999.

بارگذاری بر روی نمونه‌های ساخته شده از الیاف شیشه و زمینه اپوکسی آستانه تحمل سازه در برابر ناپایداری بالاتر از حالت استاتیکی خواهد شد. البته این اتفاق به شرط گذرا بودن بارگذاری خواهد افتاد و در صورت ادامه داشتن بارگذاری، سازه ناپایدار خواهد شد. این تحقیق نشان می‌دهد که اگر احتمال شرایط کارکرد سازه در برابر بارگذاری دینامیکی وجود داشته باشد، می‌توان به همان ملاحظات طراحی در برابر بارگذاری استاتیکی بسنده نمود. ملاحظات طراحی پایداری دینامیکی برای برخی از سازه‌ها مانند پوسته نوک موشک‌های بالستیک که با برگشت مجدد به جو تحت بارگذاری ناگهانی با نرخ بالا قرار می‌گیرند، ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش گامی در جهت شناسایی ابعاد مجهول پدیده پیچیده کمانش دینامیکی است.

۷-مراجع

1. Aksogan, O. and Sofiyev, A.H. “Dynamic buckling of a cylindrical shell with variable thickness subject to a time-dependent external pressure varying as a power function of time” Journal of Sound and Vibration, Vol.254, No.4, pp.693-702, 2002.
2. Sofiyev, A.H., Aksogan, O. “Buckling of a conical thin shell with variable thickness under a dynamic loading”, Journal of Sound and Vibration, Vol.270, pp.903-195, 2004.
3. Sofiyev, A.H., “The buckling of an orthotropic composite truncated conical shell with continuously varying thickness subjected to a time dependent external pressure”, Composites, Part B: engineering Vol.34, pp.227-233, 2003.
4. Eslami, M.R., Shariyat, M., “A high-order theory for dynamic buckling and post-buckling analysis of laminated cylindrical shells”, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.121, pp.94-102, 1999.
5. Hoo Fatt, M. S., Pothula, S.G., “Dynamic pulse buckling of composite shells subjected to external blast”, Composite Structures, Vol. 92, pp. 1716-1727, 2010.
6. Dumir, P.C., Dube, G.P., Mulick, A., “Axisymmetric static dynamic buckling of laminated thick truncated conical cap”, International Journal of Non-linear Mechanics, Vol. 37, pp.903-910, 2003.
7. Ghajar, R., Malekzadeh, K., “Dynamic Response Analysis of Doubly Curved Composite Shells Subjected to Low Velocity Impact Using two