

بررسی تاثیر ضخامت و اغتشاشات هندسی اولیه پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی در وقوع پدیده کمانش تحت فشار محوری

ابراهیم علیزاده^۱، جواد بابایی^۲، پویا دهستانی^{۳*}، رضا بطالبویی^۴ و حسین بهروز^۵

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۸	
واژگان کلیدی:	
پوسته جدار نازک، کامپوزیت، تحلیل اجزای محدود، اغتشاشات هندسی، فشار محوری.	امروزه پوسته‌های کامپوزیتی بطور گسترده‌ای در صنایع مختلف، جهت افزایش میزان کارایی سازه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجربه نشان داده است، زمانیکه پوسته‌ها تحت بارگذاری فشاری باشند، پدیده کمانش مهمترین عامل وقوع شکست در سازه خواهد بود. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، مطالعه بر روی رفتار کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی و عوامل تاثیرگذار در وقوع کمانش می‌باشد. به این منظور، از فرآیند شبیه‌سازی المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در ابتدا، تخمین نیروی کمانش برای یک نمونه آزمایشگاهی با استفاده از سه تحلیل کمانش خطی، استاتیک غیرخطی و دینامیکی صورت گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که تحلیل‌های دینامیکی و استاتیک غیرخطی، با دقت نسبتاً خوبی، حدود ۳ تا ۷٪، قادر به تخمین نیروی کمانش واقعی بوده‌اند. پس از صحت‌سنجی، نمونه‌هایی با اغتشاشات هندسی و ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نیروی کمانش با استفاده از تحلیل‌های کمانش خطی و استاتیک غیرخطی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که وجود اغتشاشات هندسی هر چند ناچیز، خصوصاً برای پوسته‌های با ضخامت کم، می‌تواند به شدت مقدار نیروی کمانش واقعی در پوسته را کاهش دهد. در نتیجه حساسیت بسیار بالای پوسته کامپوزیتی به اغتشاشات هندسی، سبب خواهد شد تا در صورت عدم شناخت کافی از میزان اغتشاشات هندسی، فرایند تخمین نیروی کمانش غیر قابل اعتماد باشد.

۱-مقدمه

توسعه یافته است، طراحی و ساخت مخازن تحت فشار هیدرواستاتیک می‌باشد [۱-۳]. این امر به دلیل وزن کم، استحکام بالا و مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر خوردگی در آب‌های شور از جمله آب دریا است. در بحث مخازن تحت فشار کامپوزیتی، به علت کوچک‌بودن ضخامت مخزن نسبت به شعاع آن، زمانی که تنش‌های فشاری ایجاد شده

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا-فضا، صنایع دریایی، سازه‌های زیر دریا و ساخت شناورهای زیرآبی، بطور گسترده‌ای رواج دارد. یکی از مواردی که استفاده از این کامپوزیت‌ها در آن به شدت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Pooya.deh@gmail.com

۱. استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر
۲. کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر
۳. دانشجوی دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال
۴. کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر
۵. دانشجوی دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال

از تحلیل اجزای محدود جهت تخمین فشار کمانش نمونه-های تحت تست با استفاده از نرم افزار ANSYS بهره گرفت.

با توجه به مطالبی که تا کنون در مورد پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی پدیده کمانش در مخازن کامپوزیتی تحت فشار بیان شده است، می‌توان نتیجه گرفت که روش-های تحلیل اجزای محدود به طور گسترده‌ای جهت مطالعه بر روی رفتار مخازن تحت فشار کامپوزیتی، توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله رایج ترین نرم افزارها که جهت انجام پروسه حل اجزای محدود به کار گرفته شده است، می‌توان به نرم افزار ABAQUS و ANSYS اشاره کرد. اما نتایجی که از حل المان محدود بدست می‌آید، نمی‌تواند یک تخمین قطعی و قابل اعتماد باشد. خصوصاً در بررسی پدیده کمانش در مخازن کامپوزیتی جدارنازک تحت فشار، که گاهی اوقات فشار کمانش تخمین زده شده از حل اجزای محدود، در مقایسه با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در پروسه آزمایشگاهی، دارای خطای نسبتاً زیادی می‌باشد. این خطا به دلیل این است که در عمل، تحت اثر پدیده کمانش تغییرشکل‌های غیرخطی هندسی در سازه ایجاد می‌شود که یک عامل مهم در تسریع وقوع پدیده کمانش در سازه خواهد بود. در حالی که تحلیل خطی کمانش صورت گرفته از حل المان محدود این تغییرات غیرخطی را که قبل از رسیدن به نیروی واقعی کمانش در سازه ایجاد می‌شود، در نظر نگرفته و در نتیجه مقدار نیروی لازم جهت وقوع کمانش در سازه را، بیشتر از مقدار واقعی آن در عمل تخمین می‌زند. اما اصلی‌ترین عامل که سبب ایجاد کمانش زود هنگام در سازه خواهد شد، اغتشاشات هندسی اولیه^۲ در سازه در حالت واقعی می‌باشد، که تحلیل خطی کمانش در حل عددی، این پارامتر را در پروسه حل در نظر نمی‌گیرد. یکی از این اغتشاشات هندسی، عدم استوانه‌ای بودن بدنه در بعضی از مقاطع خود می‌باشد. گرچه ممکن است میزان بیضیگونی^۳ نسبت به قطر بدنه کوچک باشد، اما همین میزان هم نقش مؤثری در تسریع وقوع شکست در بدنه ایفا می‌نماید.

اما نرم افزار المان محدود آباکوس نه تنها این قابلیت را دارد که تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی را در سازه انجام دهد، بلکه حتی قادر است تا با دریافت پارامتری

در مخزن تحت فشار خارجی به آستانه مشخصی برسد، پدیده کمانش اساسی‌ترین مکانیزم شکست در مخزن خواهد بود.

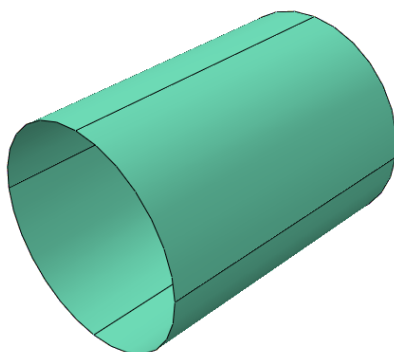
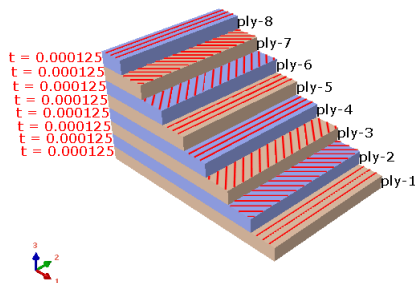
تاکنون رفتار کمانش و پس کمانش مخازن جدارنازک کامپوزیتی تحت فشارهای هیدرواستاتیک خارجی به طور گسترده با استفاده از روش‌های مختلف نظیر روش‌های محاسباتی، روش تحلیل المان محدود و پروسه‌های آزمایشگاهی توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. راشد و یوسف در پژوهش‌های خود، روابط تحلیلی استخراج شده برای رفتارهای ارتوتروپیک و انیزوتروپیک را در سیلندرهای جدار نازک با طول زیاد جهت پیش‌بینی فشار کمانش بحرانی بهبود بخشیدند [۴-۵]. مقایسه روش تحلیلی با حل عددی نشان داد که نتایج به دست آمده از حل تحلیلی به خوبی با نتایج حاصل از حل عددی مطابقت داشت. هور [۶]، مون [۷] و هان [۸] و همکارانشان، رفتارهای کمانش و پس کمانش سیلندرهای کامپوزیتی را با به کارگیری تست‌های فشار هیدرواستاتیک مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی‌ها از سه نرم افزار المان محدود شامل MSC.MARC، MSC.NASTRAN و Acos جهت انجام آنالیز شکست بهره گرفته شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش‌ها نشان داد که تخمین‌های حاصل از حل المان محدود با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در پروسه آزمایشگاهی مطابقت داشته است. کارولی و همکارانش فشار کمانش الاستیک را با استفاده از آنالیزهای عددی خطی و غیرخطی پیش‌بینی کرده و نتایج بدست آمده را با نظریه-های تحلیل انجام شده در سایر پژوهش‌ها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [۸-۱۱]. تفرشی نیز یک مدل-سازی انجام شده توسط یک الگوریتم، برای بررسی پدیده لایه لایه شدگی^۱ در اثر کمانش را برای سیلندرهای جدارنازک کامپوزیتی، زمانی که سیلندر به صورت ترکیبی تحت فشار محوری و فشار محیطی خارجی قرار دارد، پیشنهاد داده است [۱۲-۱۳]. تحلیل‌های عددی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس در پژوهش مذکور، نتایج بدست آمده از الگوریتم ارائه شده را تصدیق کرد. فرولنی [۱۴]، رفتار شکست سازه‌های توخالی کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک را مورد بررسی قرار داد. او در پژوهش-های خود جهت درک بهتر مکانیزم شکست در اثر کمانش،

² Initial Geometric Imperfection

³ Ovality

¹ Delamination

به نام ضریب اغتشاشات هندسی، تاثیر عیوب اولیه هندسی سازه، را بر روی پدیده کمانش مورد بررسی قرار دهد. ویلچلگر و همکارانش براساس تحلیل‌ها و آزمون‌های تجربی گسترده‌ای که در زمینه پدیده کمانش انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیدند که قابل اعتمادترین ارزیابی از مقدار نیروی کمانش که از حل المان محدود به دست می‌آید، زمانی رخ می‌دهد که مقدار ضریب اغتشاشات هندسی اولیه در سازه در محدوده اندازه ابعاد المانی که در تحلیل کمانش مورد استفاده قرار گرفته است، باشد [۱۵]. همچنین آقای بیساگنی در بررسی‌هایی که در زمینه کمانش پوسته‌های کامپوزیتی انجام داد، افزایش میزان همبستگی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از حل المان محدود را تا حدود ۱۵ الی ۲۰ درصد، با استفاده از اندازه‌گیری مقدار ضریب اغتشاش هندسی سازه مورد مطالعه، گزارش داد [۱۶].



شکل ۱- پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی و نحوه لایه‌چینی

۲-۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی و نتایج آزمون تجربی در این آزمون نیروی فشاری به صورت استاتیکی و در راستای طول سیلندر به پوسته کامپوزیتی اعمال شد. مراحل کامل انجام تست آزمایشگاهی در مرجع [۱۷] بیان شده است. شکل (۲) نمونه‌ی بارگذاری شده در این مرجع را نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده از تست کمانش برای پوسته کامپوزیتی مورد نظر نشان داد، زمانی که نیروی فشاری وارد شده به

در این پژوهش قصد بر آن است که در ابتدا با استفاده از تحلیل اجزای محدود، راهکاری ارائه گردد که بر اساس آن بتوان نیروی بحرانی کمانش را برای یک سیلندر جدار نازک کامپوزیتی که تحت نیروی فشاری محوری قرار گرفته است، تخمین زد و با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه نمود. در همین گام، از سه تحلیل کمانش خطی^۱، استاتیک غیرخطی^۲ و دینامیکی^۳ بهره گرفته شد. پس از انجام مرحله‌ی اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از حل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی، مقدار نیروی کمانش برای پوسته‌های معیوب^۴ کامپوزیتی با ضخامت و اغتشاشات هندسی مختلف تحت بارگذاری فشاری محوری، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا راهکاری جهت اندازه‌گیری میزان اغتشاشات هندسی اولیه پوسته معیوب و اعمال مقدار آن به عنوان یک پارامتر ورودی از طریق پروسه کدنویسی به نرم افزار ارائه شد. در این قسمت از تحلیل استاتیکی غیرخطی جهت محاسبه نیروی کمانش بهره برده شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است.

۲- فرآیند صحت‌سنجی تحلیل جزای محدود

جهت تحلیل اجزای محدود، یک پوسته‌ی استوانه‌ای بر اساس نمونه‌ی آزمایشگاهی مرجع [۱۷] و با قطر داخلی

³ Dynamic, Explicit

⁴ Imperfect Shell

¹ Linear buckle

² Static, Riks

کمانش ایجاد شده در نمونه تحت تست پس از وقوع کمانش نشان داده شده است.

پوسته در راستای طول، به $96/8 \text{ kN}$ رسید، پدیده کمانش به طور ناگهانی در سیلندر اتفاق افتاد و نیرو به طور آنی از $96/8 \text{ kN}$ به 36 kN افت پیدا کرد. در شکل (۲)، مود

جدول ۱- خواص مکانیکی به دست آمده از تست برای T300/914UD [۱۷]

ضخامت هر لایه (mm)	چگالی (kg/m^3)	ضریب پواسون ν_{12}	مدول برشی G_{12} (MPa)	مدول کششی عرضی E_2 (MPa)	مدول کششی طولی E_1 (MPa)
۰/۱۲۵	۱۷۰۰	۰/۲۸۶	۴۸۰۰	۹۸۵۰	۱۴۸۵۰۰

حول محور خود و حرکت سنسور در راستای محور، مقدار انحراف هندسی سطح خارجی از شعاع خارجی نامی پوسته اندازه گیری شد. در نهایت با اندازه‌گیری انجام شده، مقدار ضریب اغتشاشات هندسی اولیه در سازه، که طی فرایند ساخت در پوسته ایجاد شده بود، به میزان $0/23 \text{ mm}$ در شعاع جهت بررسی پدیده کمانش تخمین زده شد.

۲-۳- صحت‌سنجی نتایج

در این بخش، مقدار نیروی کمانش برای پوسته کامپوزیتی موردنظر با توجه به ضریب اغتشاشات هندسی اندازه‌گیری شده در مرجع [۱۷] و با استفاده از تحلیل اجزای محدود تخمین زده شده و با نتایج بدست آمده از آزمون تجربی مقایسه گشته است. مراحل تحلیل اجزای محدود به این صورت انجام گردید که پس از فرآیند مدلسازی، با استفاده از آنالیز کمانش خطی، مقدار نیروی کمانش بحرانی پوسته بدون در نظر گرفتن اغتشاشات هندسی اولیه سازه، تخمین زده شد و شکل مود بحرانی کمانش بدست آمد. سپس از مود کمانش پیش‌بینی شده در آنالیز کمانش خطی و ضریب اغتشاشات هندسی محاسبه شده از فرایند آزمایشگاهی، به عنوان پارامترهای ورودی جهت انجام تحلیل اجزای محدود استفاده شد و به صورت یک دستور یا کد نوشتاری در پروسه حل وارد گردید. شکل (۳) نحوه معرفی این پارامترها را به نرم افزار آباکوس نشان می‌دهد.



شکل ۲ مود کمانش ایجاد شده در نمونه تحت تست پس از وقوع کمانش [۱۷]

۲-۲- اندازه‌گیری ضریب اغتشاشات هندسی

گام بعدی انجام شده در پروسه آزمایشگاهی، اندازه‌گیری اغتشاشات هندسی اولیه در پوسته کامپوزیتی بود است [۱۷]. جهت انجام این کار، نمونه بر روی یک میز گردان قرار داده شد که قادر بود حول محور پوسته دوران کند. همچنین یک سنسور LVDT که دارای دقت اندازه‌گیری یک-هزارم میلی‌متر بوده است، طوری بر روی نگه دارنده قرار داده شده بود که در تماس با سطح خارجی پوسته در راستای شعاعی قرار داشته باشد و بتواند در راستای محور پوسته حرکت کند. در نتیجه با دوران پوسته

نام فایل خروجی حاصل از تحلیل کمانش خطی

نام دستور

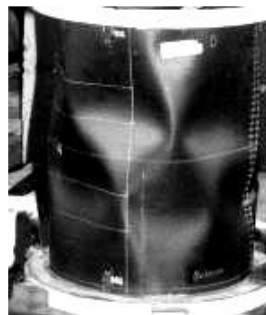
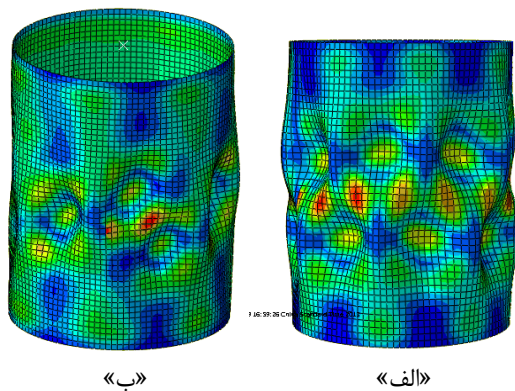
شماره مود کمانش در آنالیز کمانش خطی

ضریب اغتشاشات هندسی اولیه

شکل ۳- نحوه معرفی ضریب اغتشاشات هندسی محاسبه شده از فرایند تست و نتایج تحلیل کمانش خطی به نرم افزار آباکوس

کمانش را $100/1$ kN پیش‌بینی کرده است، که نسبت به دو تحلیل دیگر، دارای خطای کمتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بوده است (حدود $3/41\%$ خطا).

شکل (۵) مود کمانش ایجاد شده در تحلیل استاتیک غیرخطی و تحلیل دینامیکی را نشان می‌دهد که با مود کمانش رخ داده در تست مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن بوده است که تحلیل دینامیکی توانسته است مود کمانش ایجاد شده در پوسته را تا حدود زیادی پیش‌بینی کند.

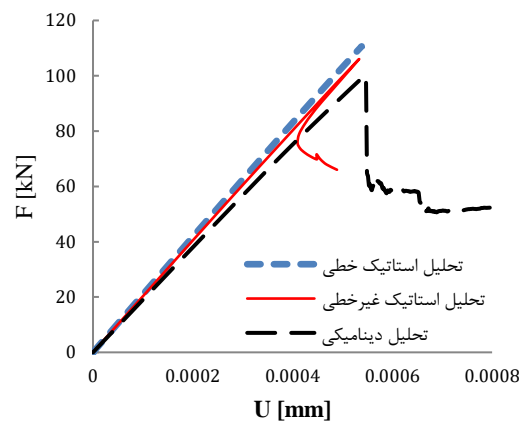


شکل ۵- مود کمانش ایجاد شده در «الف» تحلیل استاتیک غیرخطی، «ب» تحلیل دینامیکی و «ج» نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۷]

بنابراین نتایج بدست آمده از تحلیل‌های استاتیک خطی، استاتیک غیرخطی، دینامیکی و آنالیز کمانش، و مقایسه آنها با نتایج تست نشان داده است که میزان اغتشاشات هندسی اولیه پوسته کامپوزیتی که در فرایند ساخت حاصل می‌گردد، بشدت بر روی نیروی کمانش تاثیرگذار بوده است، بطوری که نیروی کمانش پیش‌بینی شده در تحلیل‌های استاتیک خطی، غیرخطی و دینامیکی، که در آنها اغتشاشات هندسی اولیه پوسته لحاظ شده بود، در مقایسه با نتایج آنالیز کمانش (بدون در نظر گرفتن اغتشاشات هندسی سازه) بشدت افت داشته است. همچنین نتایج هر سه تحلیل صورت گرفته، اعتبار و صحت حل المان محدود

فرآیند بررسی همگرایی شبکه‌بندی‌های مختلف برای پوسته‌ی مورد مطالعه نشان داد که شبکه‌بندی‌ای مشتمل بر 13320 المان که از 180 المان در راستای محیطی و 74 المان در راستای طولی تشکیل شده است، از لحاظ همگرایی نتایج و زمان لازم جهت تحلیل، بهترین شرایط را داراست. همچنین در تعیین نیروی کمانش پس از در نظر گرفتن اغتشاشات هندسی، از سه نوع تحلیل استاتیک خطی، استاتیک غیرخطی و دینامیکی استفاده شد. شکل (۴) نمودار نیروی کمانش بر حسب جابجایی محوری پوسته را برای هر سه نوع تحلیل نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار نیروی کمانش در تحلیل کمانش خطی، بدون در نظر گرفتن اغتشاشات هندسی اولیه سازه، مقدار $165/8$ تخمین زده شده، که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی $68/1\%$ خطا داشته است.

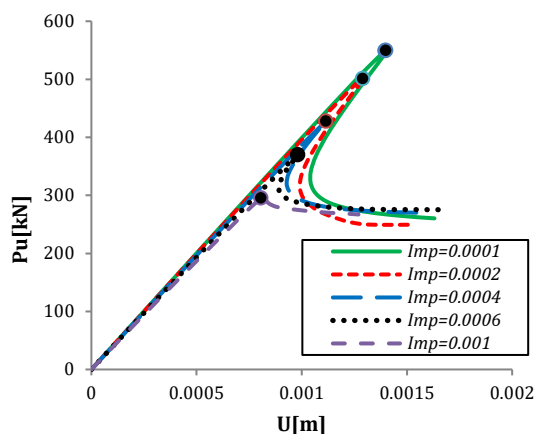
همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، رفتار پوسته در تحلیل استاتیک خطی و غیرخطی تا قبل از وقوع کمانش در نمونه، به یکدیگر بسیار نزدیک بوده است. اما نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در تحلیل استاتیک خطی، پدیده کمانش در نیروی بیشتری نسبت به تحلیل استاتیک غیرخطی رخ داده است، که مقدار آن $110/4$ kN بوده است (حدود $14/05\%$ خطا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی).



شکل ۴- نمودار نیروی کمانش بر حسب جابجایی محوری پوسته در سه تحلیل استاتیک خطی، استاتیک غیرخطی و تحلیل دینامیکی

همچنین مطابق نتایج تحلیل استاتیک غیرخطی، در لحظه‌ی وقوع کمانش، نیروی محوری در پوسته کامپوزیتی به 106 kN می‌رسد (حدود $7/5\%$ خطا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی). اما تحلیل دینامیکی رفتار متفاوت‌تری را در سازه در طی مدت زمان بارگذاری داشته و مقدار نیروی

می‌باشد، سبب خواهد شد تا در نتیجه این نامتقارنی‌ها، تغییر شکل‌های هندسی اولیه ناشی از کمانش در نمونه رخ دهد، که این عامل وقوع زود هنگام کمانش را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۶- نیروی کمانش بدست آمده از تحلیل استاتیک غیرخطی به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، برای پوسته کامپوزیتی با ضخامت ۲ mm

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، مقدار نیروی کمانش روند کاهشی داشته است. در تفسیر این موضوع می‌توان گفت که افزایش مقدار ضریب اغتشاشات هندسی که بالطبع نشان‌دهنده افزایش انحرافات هندسی در طی فرآیند ساخت می‌باشد، سبب خواهد شد تا در نتیجه این نامتقارنی‌ها، تغییر شکل‌های هندسی اولیه ناشی از کمانش در نمونه رخ دهد، که این عامل وقوع زود هنگام کمانش را به دنبال خواهد داشت.

جدول ۲ مقدار نیروی کمانش تخمین زده شده از آنالیز کمانش خطی و تحلیل استاتیک غیر خطی، را به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، برای نمونه‌های با ضخامت‌های گوناگون نشان می‌دهد. شایان ذکر است که ضرایب اغتشاشات هندسی مختلف از صفر تا ۱۰۰٪ ضخامت هر نمونه، در شبیه‌سازی‌ها اعمال شده است.

در شکل (۷) نیز نسبت نیروی کمانش حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی به نیروی کمانش بدست آمده از آنالیز کمانش خطی (P_U/P_C) بر حسب ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، برای همه نمونه‌ها با ضخامت‌های ۱ تا ۳ میلیمتر نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل صورت گرفته در شکل (۷) نشان می‌دهد که برای همه

در پیش‌بینی نیروی کمانش، در مقایسه با نتایج بدست آمده در پروسه تست را نشان می‌دهد، بطوری که تحلیل دینامیکی توانسته است تا نیروی کمانش واقعی را با دقت نسبتاً خوبی تخمین زده (1.1×10^5 kN در مقایسه با $96/8$) و حتی مود کمانش ایجاد شده در پوسته کامپوزیتی، در پروسه تست را تا حدود زیادی پیش‌بینی نماید.

پس از انجام پروسه اعتبارسنجی و بررسی توانایی حل روش اجزای محدود در تخمین نیروی کمانش، در ادامه میزان تاثیر ضریب اغتشاشات هندسی اولیه سازه (در این مقاله پوسته کامپوزیتی) در وقوع کمانش با ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- بررسی تاثیر ضریب اغتشاشات هندسی اولیه

هدف از این بخش، بررسی میزان حساسیت یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی به پدیده کمانش، تحت تاثیر اغتشاشات هندسی اولیه می‌باشد که در واقعیت به طور ذاتی در سازه وجود دارد. به عبارتی دیگر این موضوع بررسی شده است که چه زمانی میزان اغتشاشات هندسی تاثیر بیشتری بر وقوع پدیده کمانش در یک سازه خواهد داشت. برای انجام این کار از نمونه‌هایی با طول ۴۰۰ mm، قطر ۳۰۰ mm و ضخامت‌های مختلف ۱ mm، ۱/۵ mm، ۲ mm و ۲/۵ mm استفاده شده است که در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. هر یک از این نمونه‌ها در راستای ضخامت دارای ۸ لایه با حالت لایه چینی $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ می‌باشد. بدیهی است که ضخامت لایه‌ها در هر نمونه با نمونه‌های دیگر متفاوت خواهد بود.

پس از انجام فرایند مدلسازی، در هر پوسته به طور جداگانه، مقدار نیروی کمانش با استفاده از تحلیل استاتیک غیرخطی برای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف از صفر تا ۱۰۰٪ ضخامت هر نمونه، بررسی شده است. شکل (۶) مقدار نیروی کمانش بدست آمده از تحلیل استاتیک غیرخطی را به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، برای پوسته کامپوزیتی با ضخامت ۲ mm نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، مقدار نیروی کمانش روند کاهشی داشته است. در تفسیر این موضوع می‌توان گفت که افزایش مقدار ضریب اغتشاشات هندسی که بالطبع نشان‌دهنده افزایش انحرافات هندسی در طی فرآیند ساخت

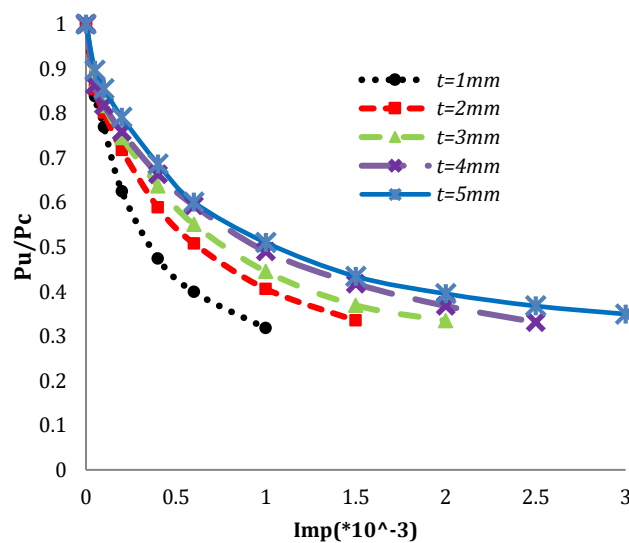
نرخ کاهش نیروی کمانش به ازای ضریب اغتشاشات هندسی جزئی، بیشتر بوده که این امر حساسیت بسیار بالای پوسته‌های با ضخامت کم به ضریب اغتشاشات هندسی را در برابر وقوع کمانش می‌رساند.

از توضیحات صورت گرفته در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که میزان اغتشاشات هندسی اولیه، که به طور ذاتی در طی فرایند ساخت در سازه ایجاد می‌شود، در زمان وقوع پدیده بسیار تأثیرگذار است. بنابراین آگاهی از میزان تأثیرگذاری این پارامتر می‌تواند در تخمین دقیق‌تر نیروی کمانش در یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی راه‌گشا باشد. در بخش بعد به طور مفصل‌تری تأثیر این پارامتر بر رفتار کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

نمونه‌ها، با افزایش ضریب اغتشاشات هندسی سازه، نیروی کمانش روند کاهشی داشته است، به طوری که به ازای ضریب اغتشاشات هندسی بسیار کوچک، افت شدیدی در مقدار نیروی کمانش دیده شده است و به تدریج با افزایش ضریب اغتشاشات هندسی، نرخ افت نیروی کمانش روند کاهشی داشته است. این موضوع حاکی از تأثیر بسیار زیاد اغتشاشات هندسی اولیه هر چند جزئی در هر سازه، بر وقوع پدیده کمانش خواهد داشت. از طرفی دیگر چون در عمل، امکان ساخت سازه‌ای بدون هیچگونه انحرافات هندسی اولیه وجود ندارد، عدم آگاهی از میزان اغتشاشات هندسی در هر سازه، بررسی رفتار کمانشی سازه را با مشکل روبه‌رو خواهد ساخت. همچنین نتایج بدست آمده در شکل ۷ نشان می‌دهد که هر چه ضخامت پوسته کامپوزیتی کمتر باشد،

جدول ۲- نیروی کمانش تخمین زده شده از تحلیل‌های کمانش خطی و استاتیک غیر خطی به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف

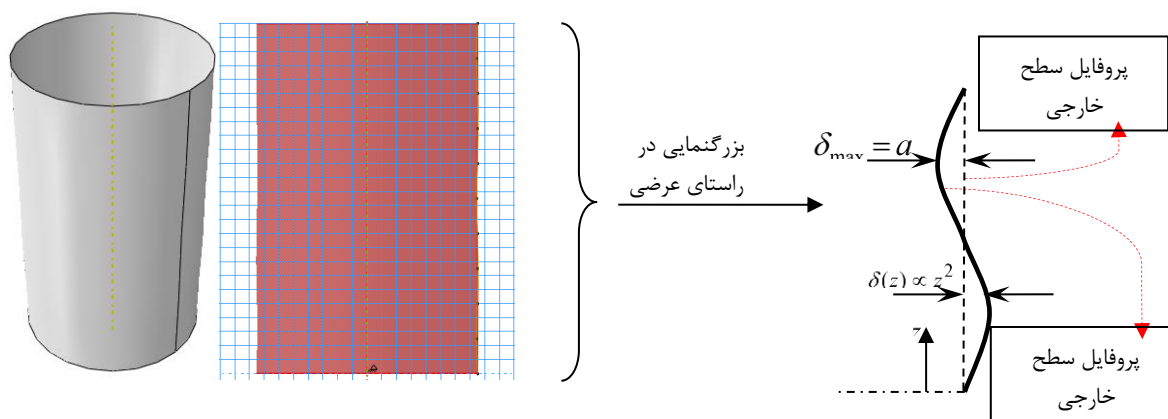
نیروی کمانش ($\times 10^5 N$)										تحلیل خطی (P_c)	ضخامت نمونه (mm)
تحلیل استاتیک غیر خطی (P_U)											
ضریب اغتشاش هندسی ($\times 10^3$)											
۰/۰۵	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳		
۱/۴۵	۱/۳۳	۱/۰۸	۰/۸۲	۰/۶۹	۰/۵۵	-	-	-	-	۱/۷۳	۱
۳/۲۶	۳/۰۶	۲/۷۴	۲/۲۵	۱/۹۴	۱/۵۵	۱/۲۸	-	-	-	۳/۸۲	۱/۵
۵/۸۲	۵/۴۹	۵/۰۱	۴/۲۸	۳/۷۰	۲/۹۹	۲/۴۸	۲/۲۵	-	-	۶/۷۲	۲
۹/۰۳	۸/۵۶	۷/۹۴	۶/۹۴	۶/۲۱	۵/۱۳	۴/۳۷	۳/۸۵	۳/۴۷	-	۱۰/۴۷	۲/۵
۱۳/۳۷	۱۲/۷۴	۱۱/۷۹	۱۰/۲۳	۸/۹۵	۷/۶۰	۶/۴۷	۵/۸۹	۵/۴۸	۵/۲۱	۱۴/۹۱	۳



شکل ۷- نسبت نیروی کمانش حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی به نیروی کمانش بدست آمده از آنالیز کمانش خطی (P_U/P_c) بر حسب ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، برای همه نمونه‌ها

معیوب و اعمال مقدار آن به صورت یک ضریب و به عنوان یک پارامتر ورودی از طریق پروسه کدنویسی به نرم افزار ارائه شده است. در انتها از تحلیل استاتیکی غیرخطی جهت محاسبه نیروی کمانش، برای هر دو پوسته معیوب (که در یکی اغتشاشات اولیه به صورت هندسی مدل شد و در دیگری با استفاده از یک ضریب و از طریق کدنویسی به مدل اعمال شد) استفاده گردید.

در واقع پوسته معیوب خود دارای عیوب هندسی بوده و اغتشاشات هندسی در تمام نقاط سطح آن لحاظ شده است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که پوسته کامپوزیتی معیوب شبیه‌سازی شده، خود حکم یک نمونه واقعی را دارد که اغتشاشات هندسی اولیه در آن در طی فرایند ساخت ایجاد شده است و می‌توان از نتایج آن به عنوان مرجعی برای مقایسه نتایج دیگر تحلیل‌ها استفاده نمود. شکل ۸ یک نمونه از پوسته کامپوزیتی معیوب به همراه شماتیکی از پروفایل سطح پوسته را نشان می‌دهد که در فرایند شبیه‌سازی مدل شده است.



شکل ۸ نمونه از پوسته کامپوزیتی معیوب به همراه شماتیکی از پروفایل سطح پوسته

با ترتیب لایه‌چینی $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ در نظر گرفته شده‌اند. جهت بررسی راحت‌تر و سادگی کار، تحلیل‌های اجزای محدود انجام شده بر روی نمونه‌های سالم و معیوب به صورت ارائه شده در جدول ۳، نامگذاری شدند.

۴- روشی جهت تعیین ضریب اغتشاشات هندسی اولیه در پوسته‌های معیوب جهت استفاده در شبیه‌سازی

هدف از این بررسی، تعیین ضریب اغتشاشات هندسی اولیه یک پوسته معیوب کامپوزیتی (دارای عیوب هندسی اولیه) جهت محاسبه نیروی کمانش می‌باشد. برای این کار ابتدا پوسته کامپوزیتی که دارای عیوب هندسی اولیه است، از طریق فرایند شبیه‌سازی و به صورت هندسی مدل شد و مقدار نیروی بحرانی کمانش در پوسته معیوب با استفاده از تحلیل خطی کمانش، تخمین زده شد. سپس تحلیل کمانش خطی برای پوسته کامپوزیتی مشابه، اما بدون هیچ عیب هندسی (پوسته سالم یا ایده‌آل)، انجام گرفت و مقدار نیروی کمانش برای این حالت نیز به دست آمد. بدیهی است که نیروی کمانش محاسبه شده برای پوسته سالم نسبت به پوسته معیوب، بیشتر خواهد بود. در گام بعدی، راهکاری جهت اندازه‌گیری میزان اغتشاشات هندسی اولیه پوسته

نمونه‌های موردنظر جهت انجام فرایند شبیه‌سازی در این قسمت، پوسته‌های کامپوزیتی با طول ۵۰۰ mm، قطر ۳۰۰ mm و ضخامت‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر می‌باشند. این پوسته‌ها همانند نمونه‌های در نظر گرفته شده در بخش قبل، در راستای ضخامت دارای ۸ لایه کامپوزیتی

جدول ۳- نامگذاری تحلیل‌های المان محدود صورت گرفته برای نمونه‌های سالم و معیوب

A	تحلیل نوع	تحلیل کمانش خطی برای نمونه‌های سالم (بدون اغتشاشات هندسی اولیه)
B	تحلیل نوع	تحلیل کمانش خطی برای نمونه معیوب (همراه با اغتشاشات هندسی اولیه)
C	تحلیل نوع	تحلیل استاتیک غیرخطی برای نمونه سالم با در نظر گرفتن ضریب اغتشاشات هندسی اندازه‌گیری شده در نمونه معیوب
D	تحلیل نوع	تحلیل استاتیک غیرخطی برای نمونه معیوب بدون در نظر گرفتن ضریب اغتشاشات هندسی

می‌باشند. شعاع پوسته سالم دارای مقدار ثابت 0.15 m می‌باشد. در نهایت ضریب اغتشاشات هندسی موثر پوسته از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\delta_{rms} = \sqrt{\frac{1}{k}(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \dots + \delta_k^2)} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، پارامتر k تعداد نقاطی می‌باشد که در آن‌ها مقدار انحراف شعاع خارجی پوسته معیوب اندازه‌گیری شده است.

لازم به ذکر است که در این پژوهش سه حالت برای پروفایل سطح خارجی پوسته‌های کامپوزیتی، جهت انجام تحلیل-های موردنظر بررسی شده است. به طوری که هر سه حالت دارای مقدار b مشابه 50 mm و مقدار a مختلف 0.9 mm ، 0.45 mm و 0.3 mm بوده اند. در نتیجه با میل دادن k به سمت بی‌نهایت در رابطه‌ی (۲)، می‌توان ضریب اغتشاشات هندسی اولیه پوسته‌های معیوب را برای هر سه حالت، همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بدست آورد.

جدول ۴- ضریب اغتشاشات هندسی اولیه پوسته‌های معیوب برای سه حالت پروفایل سطح خارجی

مقدار ضریب اغتشاشات هندسی محاسبه شده از رابطه ۲ به عنوان پارامتر ورودی در تحلیل استاتیکی غیرخطی صورت گرفته در نمونه سالم (حالت تحلیل C) [$\times 10^{-3}$]	ویژگی های پروفایل سطح خارجی پوسته معیوب		
	حالت	$a(\text{mm})$	$b(\text{mm})$
۰/۶۵۸	۰/۹	۵۰	۱
۰/۳۲۹	۰/۴۵	۵۰	۲
۰/۲۱۹	۰/۳	۵۰	۳

سنجیده خواهند شد. جدول ۵ نیروی کماتش تخمین زده شده در همه تحلیل‌ها، برای ضخامت‌های مختلف پوسته‌های کامپوزیتی، به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف نشان می‌دهد.

در شکل (۹) نمودار نیروی کماتش تخمین زده شده برای ضخامت های مختلف پوسته کامپوزیتی، برای هر چهار حالت تحلیل المان محدود صورت گرفته، به ازای ضریب اغتشاشات هندسی $0.658E-3$ (حالت ۱) نشان داده شده است. اولین نکته‌ای که در این نمودار مشاهده می‌شود این است که ضریب اغتشاشات هندسی موثر اندازه‌گیری شده از رابطه ۲، جهت بکارگیری در تحلیل C، تخمین خوبی از میزان اغتشاشات هندسی نمونه معیوب بوده است.

لازم به ذکر است که پیش از فرآیند شبیه سازی و تحلیل اجزای محدود، ابتدا ضریب اغتشاشات هندسی نمونه‌های معیوب تعیین می‌گردد. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقدار انحراف شعاع پوسته معیوب از شعاع نامی (شعاع پوسته سالم)، به صورت تابعی درجه ۲ از طول پوسته کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان انحراف برای تمام نقاط پوسته در راستای محیطی در یک طول مشخص یکسان در نظر گرفته شده است. مقدار انحراف شعاع پوسته معیوب (اغتشاشات هندسی) از رابطه‌ی (۱) قابل محاسبه شده است:

$$\delta(z, \theta = 0: 2\pi) = |R_{Imperfect}(z) - R_{perfect}| = -\frac{a}{b^2}z^2 + 2\frac{a}{b}z, \quad 0 < z < 2b \quad (1)$$

که در این رابطه پارامترهای z ، $R_{Imperfect}(z)$ و $R_{perfect}$ به ترتیب طول پوسته، شعاع خارجی پوسته معیوب (وابسته به طول پوسته) و شعاع پوسته سالم

همانطور که پیشتر به آن اشاره شد، نمونه معیوب می‌تواند نقش یک نمونه آزمایشگاهی را داشته باشد که مقدار اغتشاشات هندسی اولیه برای هر نقطه از سطح پوسته لحاظ شده است. همچنین نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی نشان داده بود که تحلیل استاتیکی غیرخطی نسبت به تحلیل کماتش خطی در پیش‌بینی مقدار نیروی کماتش بسیار دقیق‌تر بوده است. با توجه به این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل استاتیکی غیرخطی صورت گرفته برای نمونه معیوب (تحلیل D)، می‌تواند نزدیکترین نتایج را به تست آزمایشگاهی (در صورتی که نمونه معیوب شبیه-سازی شده را یک نمونه آزمایشگاهی بدانیم) داشته باشد. بنابراین نتایج سه تحلیل دیگر (A، B و C) نسبت به تحلیل

زیرا نتایج تحلیل C با نتایج تحلیل D تا حدود زیادی

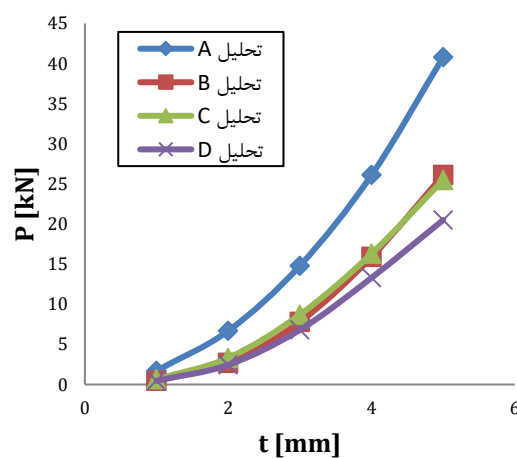
همخوانی داشته است.

جدول ۵- نیروی کمانش تخمینی برای ضخامت‌های مختلف پوسته‌ی کامپوزیتی به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف

نیروی کمانش ($\times 10^5 N$)				ضخامت (mm)	ضریب اغتشاشات هندسی ($\times 10^{-3}$)
تحلیل نوع D	تحلیل نوع C	تحلیل نوع B	تحلیل نوع A		
۰/۴۷	۰/۶۵	۰/۴۷۷	۱/۷۲۸	۱	۰/۶۵۸
۲/۴۵	۳/۳۱	۲/۷۰	۶/۶۸۵	۲	
۶/۹۱	۸/۷	۷/۸	۱۴/۸	۳	
۱۳/۳	۱۶/۳	۱۵/۹	۲۶/۱	۴	
۲۰/۵	۲۵/۵۱	۲۶/۱	۴۰/۸	۵	
۰/۷۹	۰/۹۶	۰/۸۶۴	۱/۷۲۸	۱	۰/۳۲۹
۳/۶۶	۴/۳۵	۴/۲۱	۶/۶۸۵	۲	
۹/۲	۱۰/۳۹	۱۰/۸۰	۱۴/۸	۳	
۱۷/۳	۱۸/۸۰	۲۱	۲۶/۱	۴	
۲۶/۴	۲۸/۱	۳۴/۳۱	۴۰/۸	۵	
۰/۹۱	۱/۰۵	۰/۹۸۲	۱/۷۲۸	۱	۰/۲۱۹
۴/۴۸	۴/۸۱	۵/۱۵	۶/۶۸۵	۲	
۱۱/۲	۱۱/۵۵	۱۳/۱	۱۴/۸	۳	
۱۹/۲	۱۹/۵	۲۳/۳	۲۶/۱	۴	
۲۹/۶	۳۰/۱	۳۷/۵	۴۰/۸	۵	

اولیه‌ای برای پوسته کامپوزیتی (نه به طور ذاتی در پوسته و نه از طریق فرایند کدنویسی) در نظر گرفته نشده است، این امر طبیعی است که این تحلیل بیشترین مقدار نیروی کمانش را پیش‌بینی کرده و بیشترین میزان خطا را نسبت به تحلیل D داشته باشد. در ادامه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های A، B و C برای نمونه‌های کامپوزیتی مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. برای بررسی دقیق‌تر نتایج، نیروی کمانش تخمین زده شده به صورت درصد خطا نسبت به نتایج تحلیل D بیان شده است. در شکل (۱۰) نمودار درصد خطای نیروی کمانش محاسبه شده از تحلیل‌های A، B و C نسبت به تحلیل D، برای ضخامت‌های مختلف پوسته کامپوزیتی، و به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف نشان داده شده است.

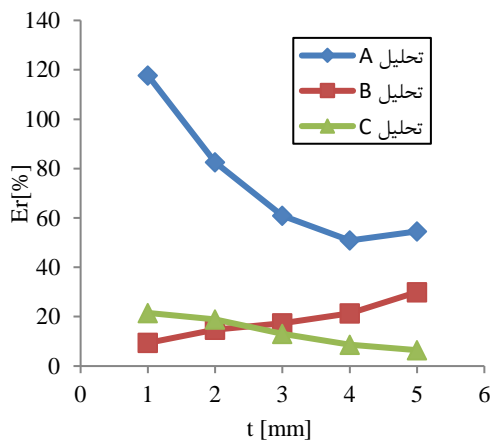
نتایج به دست آمده در شکل (۱۰) برای هر سه نمودار حاکی از آن است که تحلیل A دارای بیشترین میزان خطا بوده است، به طوری که برای پوسته‌های با ضخامت کمتر، این خطا به شدت افزایش یافته است (خطای بیش از ۲۵٪ در نمودار «الف» برای پوسته با ضخامت ۱ mm و ضریب اغتشاشات هندسی $0.658E-3$). در حالی که تحلیل‌های B و C دارای خطای به مراتب کمتری در مقایسه با تحلیل



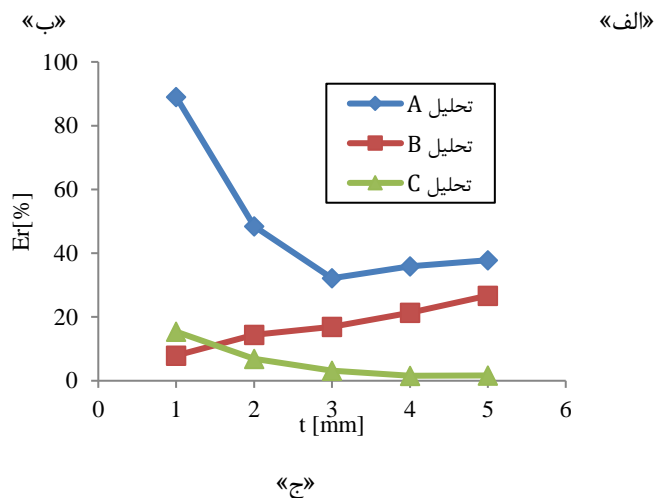
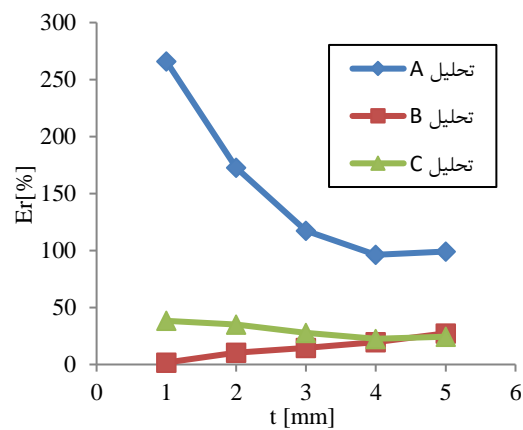
شکل ۹- نمودار نیروی کمانش برای ضخامت‌های مختلف پوسته کامپوزیتی، برای هر چهار نوع تحلیل صورت گرفته، به ازای ضریب اغتشاشات هندسی $0.658E-3$

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تحلیل A بیشترین مقدار نیروی کمانش را برای پوسته‌های کامپوزیتی در ضخامت‌های مختلف تخمین زده است. اما تحلیل D که انتظار می‌رود بهترین تقریب از مقدار نیروی کمانش واقعی را داشته باشد، کمترین مقدار نیروی کمانش را نسبت به سه تحلیل دیگر پیش‌بینی کرده است. بنابراین با توجه به اینکه در تحلیل A هیچ اغتشاشات هندسی

برای تحلیل C، حکایت از آن دارد که مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، بر روی تخمین‌های صورت گرفته تاثیرگذار بوده است. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، نمودارهای درصد خطا بر حسب ضخامت نمونه‌ها، به ازای هر سه مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، به طور جداگانه برای تحلیل‌های B و C در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



A بوده‌اند، به طوری که در بدترین حالت مقدار خطا از ۴۰٪ تجاوز نکرده است. همچنین نتایج تحلیل B نشان داده است که با افزایش ضخامت نمونه، میزان درصد خطا روند افزایشی داشته در حالی که در تحلیل C، با افزایش ضخامت نمونه مقدار خطا کاهش یافته است، به طوری که برای برخی از نمونه‌ها مقدار خطا بسیار ناچیز بوده است. بررسی‌های بیشتر بر روی نتایج بدست آمده در سه نمودار

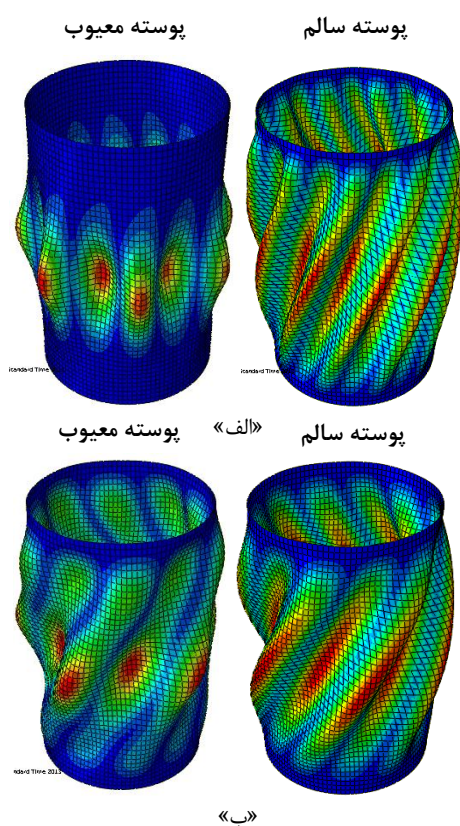


شکل ۱۰- نمودار درصد خطای نیروی کمانش محاسبه شده از تحلیل‌های A، B و C نسبت به تحلیل D، برای ضخامت‌های مختلف پوسته کامپوزیتی، و به ازای ضریب اغتشاشات هندسی «الف» 0.658×10^{-3} ، «ب» 0.329×10^{-3} و «ج» 0.219×10^{-3}

A بوده‌اند، به طوری که در بدترین حالت مقدار خطا از ۴۰٪ تجاوز نکرده است. همچنین نتایج تحلیل B نشان داده است که با افزایش ضخامت نمونه، میزان درصد خطا روند افزایشی داشته در حالی که در تحلیل C، با افزایش ضخامت نمونه مقدار خطا کاهش یافته است، به طوری که برای برخی از نمونه‌ها مقدار خطا بسیار ناچیز بوده است. بررسی‌های بیشتر بر روی نتایج بدست آمده در سه نمودار

نتایج به دست آمده در شکل (۱۰) برای هر سه نمودار حاکی از آن است که تحلیل A دارای بیشترین میزان خطا بوده است، به طوری که برای پوسته‌های با ضخامت کمتر، این خطا به شدت افزایش یافته است (خطای بیش از ۲۵۰٪ در نمودار «الف» برای پوسته با ضخامت ۱ mm و ضریب اغتشاشات هندسی $0.658E-3$). در حالی که تحلیل‌های B و C دارای خطای به مراتب کمتری در مقایسه با تحلیل

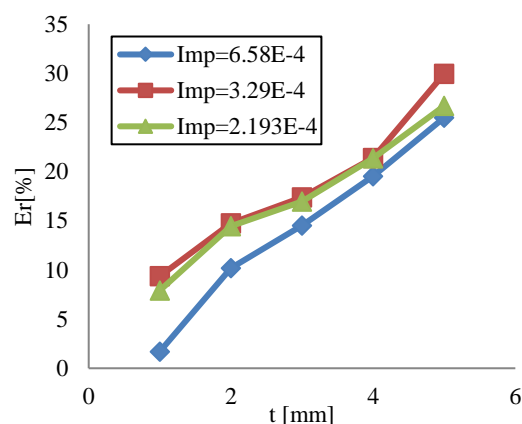
جهت تفسیر این موضوع که میزان خطای نتایج در اثر کاهش ضریب اغتشاشات در تحلیل C، کاهش می‌یابد، مود کمانش برای نمونه‌های سالم (متعلق به تحلیل C) و نمونه‌های معیوب (متعلق به تحلیل D) به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف، با هم مقایسه شده است. این مقایسه در شکل (۱۲) نشان داده شده است که مربوط به نمونه‌های با ضخامت ۵ mm می‌باشد. لازم به ذکر است که منظور از نمونه‌ی سالم، نمونه‌ای است که اغتشاشات از طریق کدنویسی به آن اعمال شده است.



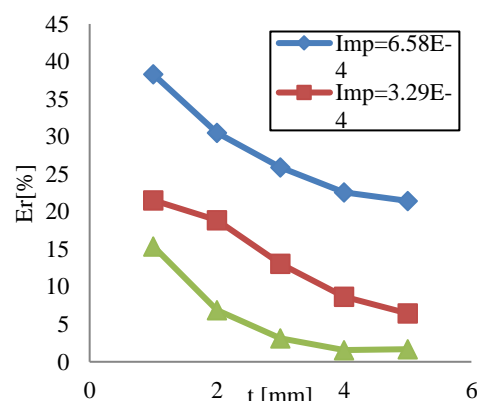
شکل ۱۲- موده‌های کمانش برای نمونه سالم و نمونه‌های معیوب با ضخامت ۵ mm و به ازای ضریب اغتشاشات هندسی مختلف؛ الف) $0.658E-3$ و ب) $0.219E-3$

همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، کاهش ضریب اغتشاشات هندسی در پوسته سبب شده است که شکل مود پیش‌بینی شده در نمونه معیوب از تحلیل غیرخطی استاتیک (تحلیل D)، به شکل مود بدست آمده برای نمونه سالم از تحلیل غیرخطی استاتیک (تحلیل C)، شباهت بیشتری داشته باشد. از طرفی مود کمانش پیش‌بینی شده در تحلیل کمانش خطی نمونه سالم (تحلیل A) به همراه ضریب اغتشاشات اندازه‌گیری شده، به عنوان پارامترهای ورودی بوده‌اند که در تحلیل C از طریق فرایند کدنویسی

برای تحلیل C، حکایت از آن دارد که مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، بر روی تخمین‌های صورت گرفته تاثیرگذار بوده است. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، نمودارهای درصد خطا بر حسب ضخامت نمونه‌ها، به ازای هر سه مقدار ضریب اغتشاشات هندسی، به طور جداگانه برای تحلیل‌های B و C در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار درصد خطا بر حسب ضخامت نمونه‌ها، به ازای هر سه مقدار ضریب اغتشاشات هندسی برای تحلیل B



شکل ۱۲- نمودارهای درصد خطا بر حسب ضخامت نمونه‌ها، به ازای هر سه مقدار ضریب اغتشاشات هندسی برای تحلیل C

نمودار مربوط به تحلیل B در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مقدار ضریب اغتشاشات هندسی چندان بر روی مقدار نیروی کمانش تخمین زده شده، که به صورت درصد خطا نسبت به تحلیل D بیان شده، تاثیرگذار نبوده است. اما در تحلیل C، میزان خطا با کاهش ضریب اغتشاشات هندسی پوسته، به شدت روند کاهشی داشته است، به طوری که برای نمونه‌هایی با ضریب اغتشاشات هندسی $0.219E-3$ (حالت ۳)، میزان خطا به خصوص با افزایش ضخامت نمونه، بسیار ناچیز بوده است.

۵- نتیجه‌گیری و بحث

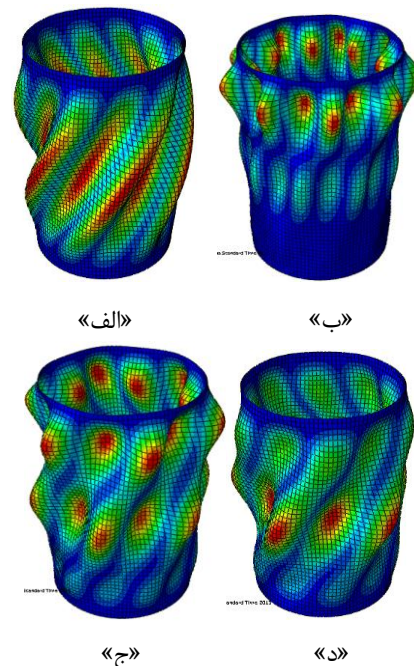
در این پروژه، تاثیر اغتشاشات هندسی اولیه و ضخامت پوسته‌های کامپوزیتی بر روی وقوع پدیده کمانش در سیلندره‌های کامپوزیتی تحت فشار محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا فرایند صحت‌سنجی تحلیل المان-محدود با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده که حاکی از سازگاری نتایج تحلیل المان‌محدود با نتایج آزمایشگاهی بوده است. در این بررسی که از سه تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی و دینامیکی استفاده شد، نتایج حدود ۳ تا ۱۴٪ با مقدار بدست آمده از نتیجه‌ی آزمایشگاهی متفاوت بود که حاکی از دقت بالای مدلسازی (به‌خصوص به روش دینامیکی و استاتیکی غیرخطی) حکایت داشت

همچنین بررسی‌های صورت گرفته در رفتار کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی با اغتشاشات هندسی اولیه و ضخامت‌های مختلف، نشان داد که وجود اغتشاشات هندسی هرچند ناچیز در سازه، به طور محسوسی مقدار نیروی کمانش بحرانی در پوسته را کاهش خواهد داد. مطابق این نتایج، هر چه ضخامت پوسته کامپوزیتی کمتر باشد، میزان افت نیروی کمانش به ازای اغتشاشات هندسی در پوسته شدیدتر خواهد بود.

بنابراین تغییرات کاهشی شدید در مقدار نیروی کمانش، به دلیل تاثیرپذیری شدید آن از میزان اغتشاشات هندسی پوسته‌های کامپوزیتی خصوصا با ضخامت کم، بررسی رفتار کمانشی پوسته‌ها را بسیار پیچیده خواهد ساخت. به عبارتی دیگر، در پوسته‌های کامپوزیتی با ضخامت کم، عدم شناخت کافی از میزان اغتشاشات هندسی، که در فرایند ساخت ایجاد می‌شود، تخمین غیرقابل اعتماد از مقدار نیروی کمانش بحرانی را به همراه خواهد داشت.

وارد شده‌اند. در نتیجه شباهت مود کمانش بدست آمده برای نمونه سالم، به مود کمانش نمونه‌های معیوب با ضریب اغتشاشات هندسی کم، سبب شده است تا تخمین نیروی کمانش با استفاده از تحلیل C، برای این نمونه‌ها (با ضریب اغتشاشات هندسی کمتر)، کمترین میزان خطا را داشته باشد. لازم به ذکر است که مود کمانش خطی برای ضخامت‌های مختلف به یکدیگر شباهت دارد.

همچنین بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت پوسته‌های کامپوزیتی معیوب، مود کمانش برای این پوسته‌ها، نسبت به مود کمانش پیش‌بینی شده برای نمونه سالم، شباهت بیشتری داشته است (در مقایسه با پوسته‌های با ضخامت کمتر)، که این موضوع در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در نتیجه در تحلیل C، میزان خطا با افزایش ضخامت پوسته روند کاهشی داشته است.



شکل ۱۳- شکل مود کمانش برای؛ «الف» پوسته سالم، پوسته‌های معیوب با ضریب اغتشاشات هندسی یکسان و ضخامت‌های مختلف «ب» ۱ mm، «ج» ۳ mm و «د» ۵ mm

مراجع

- [1] A. Ahmadi, J. Skandari, H. Poorshahsavar, "Three dimensional buckling analysis of FG cylindrical panels under various thermal load conditions", Journal of Modeling in Engineering, Semnan University, Vol. 14, No. 46, 2016, pp. 39-50.
- [2] A. Ahmadi, R. Akbari, "Mechanical buckling analysis of functionally graded thick cylindrical shells using third order shear deformation theory", Journal of Modeling in Engineering, Semnan University, Vol. 12, 2014, pp. 129-142.

- [3] H. Shariatmadar, H. Abbaszadeh, "Modeling of Buckling Restrained Braces Subjected to Dynamic loads", *Journal of Modeling in Engineering*, Semnan University, Vol. 4, 2009, pp. 1–11.
- [4] H.A. Rasheed, O.H. Yousif, "Buckling of thin laminated orthotropic composite rings/long cylinders under external pressure", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 01, No. 4, 2001, pp. 485–507.
- [5] H.A. Rasheed, O.H. Yousif, "Stability of anisotropic laminated rings and long cylinders subjected to external hydrostatic pressure", *Journal of Aerospace Engineering (ASCE)*, Vol. 18, No. 3, 2005, pp. 129–138.
- [6] S.H. Hur, H.J. Son, J.H. Kweon, J.H. Choi, "Post-buckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure", *Journal of Composite Structure (COMPOS STRUCT)*, Vol. 86, No. 1–3, 2008, pp. 114–124.
- [7] C.J. Moon, I.H. Kim, B.H. Choi, J.H. Kweon, J.H. Choi, "Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications", *Journal of Composite Structure (COMPOS STRUCT)*, Vol. 92, No. 9, 2010, pp. 2241–2251.
- [8] J.Y. Han, H.Y. Jung, J.R. Cho, J.H. Choi, W.B. Bae, "Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1–3, 2008, pp. 742–745.
- [9] D. Graham, "Composite pressure hulls for deep ocean submersibles", *Journal of Composite Structure*, Vol. 32, No. 1–4, 1995, pp. 331–343.
- [10] D. Graham, "Buckling of thick-section composite pressure hulls", *Journal of Composite Structure*, Vol. 35, No. 1, 1996, pp. 5–20.
- [11] V. Carvelli, N. Panzeri, C. Poggi, "Buckling strength of GFRP under-water vehicles", *Department of Structural Engineering, Composites: Part B*, Vol. 32, No. 2, 2001, pp. 89–101.
- [12] A. Tafreshi, "Delamination buckling and post-buckling in composite cylindrical shells under external pressure", *thin walled structures journal*, Vol. 42, No. 10, 2004, pp. 1379–1404.
- [13] A. Tafreshi, "Delamination buckling and post buckling in composite cylindrical shells under combined axial compression and external pressure", *Journal of Composite Structure*, Vol. 72, No. 4, 2006, pp. 401–418.
- [14] E. Frulloni, J.M. Kenny, P. Conti, L. Torre, "Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications", *Journal of Composite Structure*, Vol. 78, No. 4, 2007, pp. 519–528.
- [15] L. Wullschleger, H.R. Meyer, "Buckling of geometrically imperfect cylindrical shells- definition of a buckling load", *International Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 37, No. 4–5, 2002, pp. 645–657.
- [16] C. Bisagni, "Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post buckling", *Composite: Part B: Engineering*, Vol. 31, No. 8, 2000, pp. 655–667.
- [17] R.S. Priyadarsini, V. Kalyanaraman, S.M. Srinivasan, "Numerical and experimental study of buckling of advanced fiber composite cylinders under axial compression", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 12, No. 4, 2012, pp. 651–676.