

بررسی اثر جدایش لایه در پاسخ ستون‌های ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

رضا سرایلو

سعید رهنا*

چکیده

پدیده جدایش لایه یکی از عیوبی است که در سازه‌های ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی اتفاق می‌افتد. از این‌رو، در این مقاله کمانش، اثر جدایش و رشد جدایش در بارگذاری فشاری بررسی شده است. رشد جدایش توسط المان‌های چسبنده به همراه کد نقص در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل شده است. در این تحقیق جدایش و رشد جدایش بین پوسته‌های کامپوزیتی و هسته مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل، سه شبیه‌سازی انجام گرفته است و نتایج آن، با نتایج تحقیقات گذشته مقایسه شده است. مدل اول سازه بدون نقص، مدل دوم سازه با در نظر گرفتن نقص اولیه جدایش و بدون رشد آن، مدل سوم، سازه با در نظر گرفتن نقص اولیه جدایش و رشد آن می‌باشد. در مدل دوم و سوم جدایش اولیه با طول‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نتایج در مدل دوم و سوم حاکی از دو مرحله‌ای بودن در نمودار نیرو- تغییر مکان است که وقوع کمانش محلی در محل جدایش را توجیه می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش طول جدایش اولیه باعث کاهش در بار کمانشی محلی و هم بار کمانشی کلی می‌شود. همچنین، بر خلاف تحقیقات گذشته با در نظر گرفتن رشد جدایش و استفاده از کد نقص در این پژوهش نتایج و نمودارهای نیرو- تغییر مکان به نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است.

واژه‌های کلیدی: کمانش سازه‌های ساندویچی، جدایش لایه، رشد تورق، چندلایه‌های کامپوزیتی.

Investigation of Debonding Effect on Response of Sandwich Panel Structure Columns Reinforced by Composite Fibers

R. Sarayloo
S. Rahnama

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

The delamination and debonding phenomena of the layer are two of the defects that occurs in composite-reinforced sandwich structures. In this paper, the debonding and debonding growth of buckling load has been investigated. Debonding growth is modeled by cohesive elements with defect code in Abaqus finite element software. In this study, debonding and growth of debonding between composite and core layers has been investigated. In this model, three simulations were performed and the results were compared with the results of previous research. The first model is a structure with no defect, the second considers the initial defect of debonding, and the third model is the structure considering the initial defect of debonding and its growth. In the second and third models, the initial debonding is considered to be 25 and 50 mm in length. The results in the second and third models indicate two stages in the load-displacement diagram that justify the occurrence of local buckling at the site of debonding. As expected, an increase in the length of the initial debonding would reduce the local and global buckling load. In contrary to previous research, considering the growth of debonding and the use of defect code, the results of load-displacement are closer to the empirical results.

Keywords: Buckling of sandwich structures, debonding, Lamination growth, Composite laminates.

چسب با اجزای سازه و همچنین اثرات لبه‌ها، تغییر مکان اجزای سازه و بارگذاری‌های مختلف، بسیار بالا است. جدایش و اثر آن، به شکل و موقعیت آن در سازه‌های ساندویچی وابسته است. وجود جدایش می‌تواند سبب افت بار کمانشی به دلیل بروز کمانش محلی و کاهش سفتی در لایه‌های کامپوزیتی که تحت بارگذاری فشاری هستند، گردد و سازه را به سوی کمانش سریع‌تر سوق دهد [۳]. جدایش لایه عبارت است از، جدا شدن موضعی چندلایه کامپوزیتی که به دلایل مختلف از جمله فرآیند تولید، ضربه، بارگذاری، خستگی، نحوه نصب در سازه‌های ساندویچی ایجاد می‌شود. جدایش لایه در مواد کامپوزیتی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین شکل‌های تخریب در چندلایه‌های کامپوزیتی مطرح می‌باشد. واداک و کارلسون، در تحقیقی که سازه ساندویچی از تک‌لایه ایزوتروپیک از جنس شیشه/ وینیل‌استر و ستون مرکزی از جنس پی-وی‌سی تشکیل شده است، اثر جدایش را بررسی کرده‌اند. جدایش در بین تک‌لایه ایزوتروپیک و ستون تعبیه شده است. هنگام بارگذاری در تک‌لایه ایزوتروپیک، کمانش محلی اتفاق افتاده است و در نهایت کل سازه ساندویچی دچار کمانش کلی و تخریب شده است و نتایج نشان

۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها از جمله موادی هستند که در صنعت می‌توانند جایگزین مناسبی برای فلزات و آلیاژهای آن باشند. کامپوزیت‌ها در صنعت کاربرد فراوانی دارند به طور مثال، امروزه خودروهایی ساخته می‌شوند که بدنه آن‌ها تماماً کامپوزیتی هستند که به علت ویژگی‌هایی چون وزن کمتر، در نتیجه سوخت کمتر و عمر طولانی‌تر، در صنعت خودرو استفاده می‌شوند. همچنین با توجه به پایداری بسیار زیاد و مقاومت بسیار خوب آن‌ها در محیط‌های خورنده، خواص مکانیکی متنوع و وزن کم، به یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع گوناگون تبدیل شده‌اند [۱]. برای داشتن سازه کامپوزیتی با عملکرد بالا، معمولاً الیاف به صورت پیوسته هستند و به عنوان ستون فقرات ماده به شمار می‌روند که تعیین کننده سفتی و استحکام در ماده کامپوزیتی هستند. در این دسته از کامپوزیت‌ها ماتریس، حفاظت از الیاف و انتقال تنش از یک الیاف به الیاف دیگر را بر عهده دارد [۲]. همواره با وجود رعایت اصول در طراحی‌ها و استفاده از استانداردهای مناسب، احتمال به وجود آمدن نقص و جدایش لایه در مرحله ساخت، به دلیل تماس ناکافی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: srahnama@birjand.ac.ir

کمانشی k، مشخص کرده‌اند که روشی پیشنهادی بوده و می‌تواند به عنوان ضریب مشخص، بار کمانشی را پیش‌بینی کند. بیشترین مقدار خطای به وجود آمده در تقویت کننده ایزوتروپیک و ارتوتروپیک تحت بارگذاری فشاری کمتر از ۲۰ درصد بوده است [۱۱].

روش استفاده از المان‌های چسبنده برای مدل‌سازی جدایش و رشد آن در چندلایه‌های کامپوزیتی روشی جدیدی محسوب می‌شود. به طور مثال، استفاده از روش المان‌های چسبنده در مطالعاتی نظیر، شبیه‌سازی جدایش لایه‌ها در سازه‌های کامپوزیتی و تاثیر آن بر روی سازه با توجه به استانداردها، شبیه‌سازی رشد جدایش لایه‌ها در یک سازه ساندویچی در بارگذاری فشاری و همچنین بررسی اثر رشد جدایش در میزان تحمل بار کمانشی، در طی سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان به خصوص در زمینه ماده کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این زمینه جیولیس و همکارانش، نیز به بررسی رشد جدایش در سازه‌های کامپوزیتی توسط المان‌های چسبنده پرداخته‌اند. این نوع حالت المان چسبنده به صورت گسترده برای بررسی شکست در مواد ترد، جهت نزدیک شدن به نتایج تجربی، به خوبی مورد استفاده قرار گرفته شده است [۱۲]. محمدی و شهابی، به بررسی رفتار کمانشی چندلایه‌های کامپوزیتی توسط المان‌های چسبنده با استفاده از المان‌های چسبنده پرداخته‌اند. در تحقیق آن‌ها جدایشی بین جسم و چندلایه‌های کامپوزیتی تعبیه شده است که اثرات جدایش، اندازه جدایش، موقعیت قرارگیری جدایش در سازه و رشد جدایش ناشی از المان چسبنده، مورد بحث قرار گرفته است. نتایج در تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که عدم وجود جدایش در سازه، سبب افزایش بار کمانشی تا ۲۰ درصد شده و اثر رشد جدایش در سازه سبب کاهش بار کمانشی تا ۵۰ درصد شده است [۱۳].

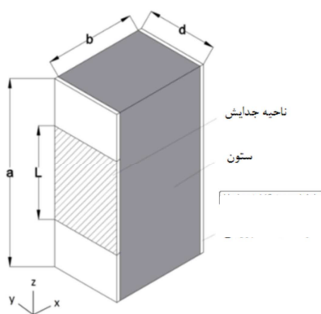
انجام مدل‌سازی خوب و مطلوب و همچنین شبیه‌سازی رفتارها و استخراج تحلیل عددی مناسب مستلزم آن است که نمونه مورد بررسی از نظر ساختاری به واقعیت هر چه بیشتر نزدیک باشد. لذا جهت انجام این امر کدهایی نوشته شده است که نمونه مورد نظر را به واقعیت ماده و از حالت کاملاً ایده‌آل به حالت واقعی نزدیکتر تبدیل شود و بتوان خروجی واقعی‌تری را استخراج نمود. جدایش بین پوسته‌های کامپوزیتی و هسته بوده که به عنوان Debonding (جدایش در بین دو جسم متفاوت) شناخته می‌شود. در تحقیقات گذشته، فقط به بررسی پدیده کمانش و اثر جدایش در بارگذاری فشاری پرداخته شده است، لذا در این تحقیق، اثر رشد جدایش در سازه مورد بررسی قرار گرفته است. رشد جدایش توسط المان‌های چسبنده به همراه کد نقص در سازه، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده است.

۲- مدل‌سازی و روش کار

در این قسمت مدل‌سازی سازه ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی و همچنین نحوه مدل‌سازی جدایش بین لایه‌های در نرم افزار المان محدود آباکوس شرح داده شده است. روش‌های مکانیک شکست، بر پایه فرضیه‌های اولیه عیب بنا شده است و باید از قبل مسیر رشد عیب مشخص شده باشد، همین‌طور، روند رشد عیب اولیه را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند [۱۴]. در سال‌های اخیر روش استفاده از المان‌های چسبنده به طور گسترده برای مدل‌سازی جدایش لایه‌ها استفاده شده

داده است که وجود جدایش تحمل بار کمانشی سازه را کاهش می‌دهد [۴]. موسی و اودین، نیز در بررسی سازه کامپوزیتی که انجام داده‌اند، در تحقیق آن‌ها، در سازه مورد تحلیل، شکست ناشی از بارگذاری فشاری، بدون هیچ جدایشی، بین چندلایه تقویت کننده و ستون اتفاق افتاده است. وقتی که بار فشاری به حد بحرانی برسد اعضای سازه شروع به کمانش می‌کنند که این بار بحرانی، دو تغییر شکل، گسترش پیدا می‌کند، یکی وابسته به خمش و دیگری تغییر شکل برشی خواهد بود [۵]. جی و واس، مطالعه‌ای در زمینه سازه‌های ساندویچی تقویت شده انجام داده‌اند که در مطالعه آن‌ها، از دو تحلیل استفاده شده که با نتایج در نرم افزار المان محدود آباکوس مقایسه شده است. در تحلیل اول چندلایه‌های همسانگرد در کنار ستون قرار گرفته و در تحلیل دوم نیز چندلایه‌های کامپوزیتی ارتوتروپیک در کنار ستون قرار دارند. نتایج در المان محدود آباکوس به دلیل پیش‌بینی‌های دقیق، بار کمانشی را به خوبی محاسبه کرده است و تقویت کننده‌ها با توجه به نوع خصوصیات مکانیکی می‌تواند در جهت تحمل بار وارده به هسته مرکزی کمک کند. همچنین، دو عامل خطا و افزایش خطا در محاسبات را به خوبی پیش بینی کرده‌اند که در طراحی سازه‌های ساندویچی پیشرفته اهمیت فراوانی دارند [۶]. جاپوتی و ریزو، نیز یک سازه ساندویچی را که تحت بارگذاری فشاری قرار داده و مورد بررسی خود قرار داده‌اند. در تحقیق آن‌ها، چندلایه‌ها در یک طرف هسته ستون اتصال کاملاً محکم و بدون جدایش دارند و در طرف دیگر ستون، جدایش اولیه در بین چندلایه‌های کامپوزیتی و هسته ستون تعبیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حین بارگذاری فشاری، در چندلایه‌های کامپوزیتی که دارای جدایش اولیه بوده است، کمانش محلی خیلی زود اتفاق افتاده است که به دلیل وجود جدایش بین چندلایه‌های کامپوزیتی و ستون مرکزی بوده و شیب نمودار تا وقوع کمانش کلی در سازه کاهش یافته است [۷]. وثوقی و همکاران، مطالعه‌ای در یک سازه کامپوزیتی انجام داده‌اند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌توان مقدار بار کمانشی وارد شده در سازه را با دقت بالا محاسبه نمود. در تحقیق آن‌ها اثرات زوایای مختلف لایه چینی الیاف نیز به طور مشخص در محاسبه بار کمانشی لحاظ شده است. نتایج آن‌ها حاکی است که روش استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به روش المان محدود آباکوس دقت بالاتری داشته است [۸]. چن و همکاران، در تحقیقی اثرات جدایش و وجود جدایش در یک سازه را مورد بررسی قرار داده‌اند. علاوه بر وجود جدایش، اثرات لایه چینی الیاف با زوایای مختلف را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتایج تحقیق آن‌ها چنین بوده است که علاوه بر وجود جدایش در سازه، زوایای قرارگیری الیاف کامپوزیتی نیز می‌تواند در طراحی و ساخت سازه‌های کامپوزیتی امری مهم تلقی شود [۹]. آیدوگدو و آکسنسر، نیز در تحقیقی به مطالعه کمانش سازه و محاسبه بار کمانشی با استفاده از روش ریتز پرداخته‌اند. آن‌ها شرایط مرزی مختلفی را در سازه اعمال کرده و خروجی نتایج استفاده شده از روش ریتز را با خروجی نتایج المان محدود آباکوس مقایسه کرده‌اند. خروجی نتایج با استفاده از روش ریتز نسبتاً دقیق‌تر گزارش شده است [۱۰]. ونگ و آبدالا، در مطالعه‌ای که در یک سازه‌های ساندویچی انجام داده‌اند، تک‌لایه ایزوتروپیک را یک‌بار به همراه تقویت کننده ایزوتروپیک و بار دیگر تک‌لایه ایزوتروپیک به همراه تقویت کننده ارتوتروپیک تحت بارگذاری محوری فشاری قرار داده‌اند، جدایش به وجود آمده در تک‌لایه را با ضریب بار

نظر گرفته شده است. در هر تحلیل، از چهار نمونه مختلف هسته با خصوصیات مکانیکی متفاوت استفاده شده است. هسته‌های اچ ۴۵، اچ ۸۰، اچ ۱۰۰ و اچ ۱۳۰ توسط چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت شده‌اند. خصوصیات مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی در سازه‌های ساندویچی ثابت هستند. منطقه دارای جدایش فقط در یک وجه ستون، بین هسته و چندلایه‌های کامپوزیتی وجود دارد و در وجه دیگر ستون، چندلایه‌های کامپوزیتی بدون منطقه جدایش بین لایه‌ای، به هسته متصل می‌باشند. شکل ۱ سازه بدون در نظر گرفتن رشد جدایش و سازه با در نظر گرفتن رشد جدایش را نشان می‌دهد. سازه‌های ساندویچی از چهار نوع ماده با خواص متفاوت در تحلیل استفاده شده است: ۱- ستون از جنس اچ ۴۵، ۲- ستون از جنس اچ ۸۰، ۳- ستون از جنس اچ ۱۰۰ و ۴- ستون از جنس اچ ۱۳۰. نام‌گذاری مواد، بر اساس مقدار عددی چگالی هر یک از آن‌ها می‌باشد. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی هسته ستون‌ها آمده است [۲۰ و ۲۱]. چندلایه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/وینیل استر می‌باشند که مشخصات مکانیکی آن‌ها در جدول ۳ آمده است [۲۰]. توالی لایه‌چینی در چندلایه‌های کامپوزیتی به صورت (۰/۹۰) که زاویه قرارگیری الیاف نسبت به یکدیگر هستند، می‌باشد. در مجموع از ۱۲ تک‌لایه تک جهته کامپوزیتی تشکیل شده است. چیدمان ۱۲ تک‌لایه کامپوزیتی در شکل ۲ نشان داده شده است. از المان‌های چسبنده به عنوان اتصال دهنده هسته ستون و چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده شده است که ضخامت المان چسبنده، یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی به کار رفته جهت تخصیص به لایه‌های چسبنده در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به این که در این نوع مدل‌سازی از روش استفاده از المان‌های چسبنده بر مبنای کشش-جدایش استفاده شده، برای شروع و رشد جدایش، از این المان‌ها استفاده می‌شود. چندلایه‌های کامپوزیتی در تمامی سطوح مشترک با هسته مرکزی ستون اتصالاً محکم دارند و به یکدیگر توسط اتصال گره‌به‌گره متصل هستند. اما در ناحیه‌ای که جدایش اولیه وجود دارد، المان‌های پوسته‌ای چندلایه‌های کامپوزیتی و هسته، در ناحیه جدایش، جهت جلوگیری از هم‌پوشانی المان‌ها، توسط اندرکنش‌ها و تماس بین سطحی به یکدیگر متصل شده‌اند. در قسمت بالای سازه که به صورت یک قید کوپل است، یک نقطه مرجع اختصاص داده شده است. جابه‌جایی وارده بر سازه‌ها در راستای عمود بوده و در تمامی جهات درجات آزادی بسته می‌باشد و بارهای کمانشی را می‌توان محاسبه نمود. همچنین تمامی وجوه در قسمت پایین سازه نیز از قید کوپل انتخاب شده، که در این شرایط تمامی درجات آزادی کاملاً محدود خواهد بود.



شکل ۱- هندسه سازه

است. برخی از مشکلاتی که به کار بردن روش بستن ترک مجازی دارد را می‌توان با استفاده از روش ناحیه چسبنده از بین برد. برای مثال، با استفاده از این روش، هم شروع و هم گسترش عیب را می‌توان مدل کرد که در آن برای تحلیل شروع ترک از معیار استحکام و برای گسترش ترک از مکانیک شکست^۱ می‌توان استفاده کرد [۱۵]. استفاده از المان‌های پوسته‌ای جهت تحلیل رفتارهای پوسته‌ای کامپوزیتی در نرم افزار المان محدود به صورت کاملاً گسترده به کار برده می‌شود. به طور کلی، در سازه‌های تقویت شده به صورت راهبردی و وابسته به نوع تحلیل، با هدفی مشخص شبیه‌سازی می‌شوند [۱۶]. المان‌های پوسته-ای کامپوزیتی در تعیین روابط ماتریس سختی با استفاده از روابط تئوری لایه‌ای کلاسیک محاسبه می‌شوند و اندازه المان‌های شبکه‌بندی شده، به اندازه ضخامت پوسته کامپوزیتی در تحلیل وابسته است.

المان‌های شبکه‌بندی شده در تحلیل شبیه‌سازی در نرم افزار المان محدود، جهت اتصال گره‌به‌گره میان المان‌های پوسته‌ای متصل به هسته نیز از این موضوع تبعیت می‌کنند و عدم تطابق اندازه المان برای مدل کردن پوسته‌ها و هسته با استفاده از نظریه ساندویچی کلاسیک که پایه نظریه المان‌های پوسته‌ای لایه‌ها هستند، اجباراً پوسته کامپوزیتی سه بعدی را به یک پوسته کامپوزیتی دو بعدی کاهش می‌دهد، که این صفحات مرجع قابل تغییر شکل دارای خواص سختی برشی و خمشی مناسب هستند. از سوی دیگر، هزینه‌های محاسباتی مدل‌سازی سه بعدی در عملیات مهندسی روزمره در صنعت قابل توجه نیستند [۱۷]. از آنجا که المان‌ها، کرنش سه بعدی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، هنگامی که ابعاد ضخامت نسبت به ابعاد دیگر ناچیز نباشد، باید مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر، هنگامی که در محاسبه تنش خمشی مشکلی ایجاد شود، یک المان نیازمند به چندین المان دیگر در راستای ضخامت است که باید اثرات خمشی را به درستی محاسبه و اعمال کند [۱۸]. قفل برشی پدیده‌ای است که در آن یک المان در مقایسه با واقعیت بیش از حد به همدیگر جفت شده‌اند. در اصل، این پدیده ناشی از درون‌یابی استفاده شده برای نگاشت‌های تنش‌ها و کرنش‌ها در المان‌هایی است که قادر به نشان دادن مقادیر صفر (یا بسیار کوچک) در برش یا کرنش‌های صفحه‌ای نیستند. اگر المان نتواند کرنش‌های برشی صفر را نشان دهد، و وضعیت فیزیکی وابسته به مقادیر صفر (یا بسیار کوچک) باشد، المان‌ها بسیار سفت و فشرده می‌شوند؛ چنان که ضخامت المان‌ها نسبت به طول آن‌ها کاهش می‌یابد. جدایش بین پوسته‌های تقویت کننده و هسته یک جنبه کاملاً بحرانی در سازه به شمار می‌رود [۱۹]. سه تحلیل در شبیه‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است. تحلیل اول، مربوط به سازه‌های ساندویچی بدون جدایش، که یک سازه کاملاً بی‌نقص به شمار می‌رود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل دوم، مربوط به سازه‌های ساندویچی با داشتن جدایش لایه اولیه و بدون در نظر گرفتن رشد جدایش بین لایه‌ای است و تحلیل سوم، مربوط به سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش، که به واسطه استفاده از المان‌های چسبنده هستند، می‌باشد. در تحلیل‌های دوم و سوم، جدایش‌های اولیه، به طول‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر بین ستون و چندلایه‌های کامپوزیتی در

^۱ Fracture Mechanics

۱۶۴	استحکام طولی فشاری	۳۲۸۰۰	مدول طولی
۲۳۴	استحکام طولی کششی	۸۰	استحکام برشی
ضرایب پواسون			
۰/۰۷	ν_{23}	۰/۲۹	ν_{13}

جدول ۴- خصوصیات مکانیکی المان‌های چسبنده

مقادیر (MPa)	ویژگی‌ها	مقادیر (MPa)	ویژگی‌ها
۸۵۰	سفتی	۶۵	مدول طولی
۳/۳	استحکام کششی	۸/۵	مدول عرضی
۵/۲	استحکام برشی	۴/۶	برشی اصلی
چقرمگی شکست			
۰/۷ (N/mm)	مود دوم و سوم	۰/۳۱ (N/mm)	مود اول

۲-۱- مدل ناحیه چسبنده

مدل ناحیه چسبنده به عنوان یکی از کاراترین روش‌ها در پیش بینی جدایش بین لایه‌ای در سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. در این روش در محل‌هایی که احتمال رشد جدایش وجود دارد، از المان‌های چسبنده استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این روش نسبت به روش‌های مکانیک شکست، سادگی این روش در مدل‌سازی و پیش‌بینی شروع و رشد جدایش می‌باشد. رفتار المان‌های چسبنده با استفاده از رابطه کشش-جدایش مشخص می‌شود [۲۲].

۲-۲- تنش موثر

نقطه شروع کاربرد مدل مکانیک پیوسته برای پوسته‌های کامپوزیتی چندلایه، بررسی یک لایه از چندلایه در وضعیت تنش صفحه‌ای و تعیین تنش موثر می‌باشد، زیرا در یک لایه آسیب دیده، نیروهای وارده تابع تنش‌های موثر می‌باشد. تنش موثر از طریق ماتریس سفتی اولیه به کرنش مرتبط می‌شود. تنش واقعی به تنش موثر مرتبط می‌گردد و در نهایت عناصر ماتریس سفتی نهایی به صورت تابعی از متغیرهای آسیب در جهت الیاف، در جهت ماتریس، و متغیر برشی محاسبه می‌گردند.

۳- نتایج

انرژی کرنشی یک جسم از دو بخش تشکیل شده است، یکی

جدول ۱- اندازه سازه [۲۰]

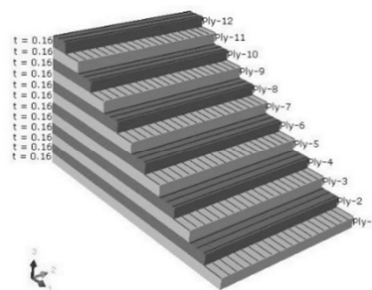
ناحیه	طول (mm)	ناحیه	طول (mm)
a	۱۰۰	d	۳۸
b	۵۰	L	۵۰

مربوط به تغییر حجم جسم است که انرژی اتساعی نام دارد و دیگری مربوط به تغییر شکل است که انرژی واپیچش نام دارد. در واقع، انرژی واپیچش بخشی از انرژی کرنشی کل در یک جسم است. با توجه به این که برای تک‌لایه، تنش صفحه‌ای فرض می‌شود ($\sigma = \tau_{31} = \tau_{23} = 0$)، معیار شکست به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\left[\frac{\sigma_1}{(\sigma_1)_{ult}} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1)_{ult}^2} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{(\sigma_2)_{ult}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1 \quad (1)$$

که در آن، σ ها تنش‌های اصلی و τ ها تنش‌های فرعی هستند.

یکی از مهم‌ترین و موثرترین عوامل بر نتایج تحلیل، انتخاب و نوع مناسب شبکه‌بندی می‌باشد. برای داشتن شبکه‌بندی منظم‌تر، از شبکه‌بندی ساختار یافته استفاده شده است. در نرم افزار المان محدود آباکوس شبکه‌بندی المان‌های هسته از (C3D8R) استفاده شده است که از المان‌های حجمی سه‌بعدی، هشت‌گره‌ای و انتگرال کاهشی هستند و می‌توانند تنش‌های برشی و قائم بین لایه‌ای را با دقت بالایی محاسبه نمایند. برای چندلایه‌های کامپوزیتی از المان‌های پوسته‌ای سه‌بعدی از (S8R) که به صورت پوسته‌ای، هشت‌گره‌ای و انتگرال کاهشی هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همین‌طور، به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی نحوه رشد عیب، برای المان‌های چسبنده از المان (COH3D8) که المان‌هایی به صورت سه‌بعدی و هشت‌گره‌ای هستند، استفاده شده است. هسته تغییرشکل پذیر و حجمی بوده با اندازه‌های مشخص که در جدول ۱ آورده شده، مدل‌سازی شده است. پوسته‌های کامپوزیتی نیز به صورت تغییر شکل پذیر و پوسته‌ای است تا بتوان در نرم افزار المان محدود آباکوس معیارها و پارامترهای مربوط به یک ماده کامپوزیتی را به آن تخصیص داد. همچنین، المان‌های چسبنده که به عنوان چسب در نظر گرفته شده است، به صورت حجمی و تغییر شکل پذیر است تا بتواند رشد و شروع خرابی را پیش‌بینی کند. لذا بایستی به گونه‌ای به نرم افزار معرفی گردد که معرف یک چسب با ویژگی‌های مکانیکی مخصوص به خود باشد تا بتواند رفتارهای یک چسب را داشته باشد. استفاده از شبکه‌بندی مناسب و عدم واگرایی در زمان تحلیل، در پیشبرد تحلیل امری ضروری است. همواره در این تحقیق سعی شده است از شبکه‌بندی‌های با اندازه یکسان و ساختاریافته استفاده گردد، تا در حین تحلیل با توجه به شرایط مرزی موجود و بارگذاری درصد خطای محاسباتی بسیار کاهش یابد.



شکل ۲- نمایی از لایه‌چینی در چندلایه‌های کامپوزیتی

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی ستون‌ها [۲۰، ۲۱]

نوع ستون	اچ ۴۵	اچ ۸۰	اچ ۱۰۰	اچ ۱۳۰
مدول الاستیک (MPa)	۴۲	۸۰	۱۱۱	۱۴۰
مدول برشی (MPa)	۱۸	۳۰	۴۰	۵۲
چگالی (kg/m^3)	۴۵	۸۰	۱۰۰	۱۳۰

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی [۲۰]

ویژگی‌ها	مقادیر (MPa)	ویژگی‌ها	مقادیر (MPa)
مدول برشی	۳۱۰۰	استحکام عرضی فشاری	۶۲
مدول عرضی	۷۷۰۰	استحکام عرضی کششی	۵۰

$$\delta_0 = \delta_{I0} \delta_{II0} \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{\delta_{II0}^2 + (\beta \delta_{I0})^2}} \quad (5)$$

که در آن، $\beta = \delta_I / \delta_{II}$ است؛ δ_I جابه‌جایی در مود اول، δ_{II} جابه‌جایی در مود دوم و δ_{I0} و δ_{II0} شروع جدایش در مود اول، δ_{I0} شروع جدایش در مود دوم، δ_0 شروع جدایش در مود ترکیبی است. بعد از وقوع جابه‌جایی در رابطه (5)، جابه‌جایی بحرانی در خرابی کامل، اتفاق می‌افتد. جابه‌جایی بحرانی با چقرمگی شکست با یک حالت ترکیبی چقرمگی شکست بحرانی پیشنهاد شده است، می‌تواند ارتباط پیدا کند و برای حل مسئله به کار رود. جابه‌جایی بحرانی می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\delta_c = \frac{2}{\delta_0 E_0} \left[G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن، δ_c جابه‌جایی بحرانی، δ_0 شروع جابه‌جایی، E_0 سفتی اولیه، η منحنی چقرمگی شکست هستند. المان چسبیده دو خطی، ویژگی‌های ناحیه جدایش سطح خمشی را با تنش قائم اعمال شده و اندازه جدایش با یکدیگر مرتبط می‌سازد [27].

۴- نتایج

سازه ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش و با در نظر گرفتن رشد جدایش، بررسی شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است سه تحلیل در شبیه‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است. تحلیل اول، مربوط به سازه‌های ساندویچی بی‌نقص است. تحلیل دوم، مربوط به سازه‌های ساندویچی با جدایش لایه اولیه بدون در نظر گرفتن رشد جدایش و تحلیل سوم، مربوط به سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش با استفاده از المان‌های چسبیده می‌باشد. در تحلیل‌های دوم و سوم، جدایش‌های اولیه، به طول‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر بین ستون و چندلایه‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. در هر تحلیل، چهار نمونه مختلف ستون با خصوصیات مکانیکی متفاوت وجود دارد. هسته مرکزی ستون‌ها از جنس اچ ۴۵، اچ ۸۰، اچ ۱۰۰ و اچ ۱۳۰، توسط چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت شده‌اند، خصوصیات مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی در سازه‌های ساندویچی در هر چهار نوع ستون یکسان هستند. منطقه دارای جدایش فقط در یک وجه ستون، بین هسته ستون و چندلایه‌های کامپوزیتی وجود دارد و در وجه دیگر ستون، چندلایه‌های کامپوزیتی بدون منطقه جدایش به ستون متصل می‌باشند. با توجه به مطالعات انجام شده، به ارزیابی رفتار کمانشی در سازه‌های تقویت شده با پوسته کامپوزیتی پرداخته شده است. پوسته‌های تقویت کننده کامپوزیتی که از جنس شیشه/وینیل‌استر هستند، به هسته از نوع اچ ۴۵ و اچ ۸۰ متصل شده‌اند و سازه دارای جدایش در بین پوسته‌های تقویت کننده و هسته‌ها هستند. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، نمودار بار-جابه‌جایی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در تحقیق حاضر، نسبت به نتایج شبیه‌سازی انجام شده در مرجع [۲۰] مقایسه شده است.

مدل کشش-جدایش در نرم افزار المان محدود آباکوس، ابتدا رفتار ماده را به صورت خطی الاستیک در نظر می‌گیرد. در ادامه، شروع خرابی و تکامل تدریجی آن اتفاق می‌افتد. رفتار الاستیک به صورت یک ماتریس نوشته می‌شود که تنش اسمی را به کرنش اسمی در فصل مشترک دو لایه ارتباط می‌دهد. تنش اسمی، عبارت است از تقسیم اجزای نیرو بر سطح اصلی در هر نقطه انتگرال‌گیری. این در حالی است که کرنش‌های اسمی به صورت جابه‌جایی تقسیم بر ضخامت اولیه در هر نقطه انتگرال‌گیری می‌باشد. ضخامت اصلی مورد استفاده، متفاوت از ضخامت هندسی برای رفتار کشش-جدایش می‌باشد و معمولاً بسیار نزدیک به صفر می‌باشد [۲۳].

ماتریس سفتی رفتار کاملاً کوپل شده بین تمامی اجزای بردار کشش و بردار کرنش را نشان می‌دهد و می‌تواند وابسته به دما و یا متغیرهای میدانی باشد. اگر کوپل بین اجزای قائم و برشی وجود داشته باشد، عبارات غیر قطری در ماتریس سفتی صفر خواهد شد. برای رشد تدریجی خرابی که ترکیبی از تغییر شکل قائم و برشی در طول فصل مشترک است، بهتر است یک جابه‌جایی موثر تعریف شود، که به صورت رابطه زیر ارائه می‌شود [۲۴]:

$$\epsilon_m = \sqrt{(\epsilon_z)^2 + \gamma_y^2 + \gamma_x^2} \quad (2)$$

که در آن، ϵ_z تغییر شکل در راستای قائم و γ ها تغییر شکل‌های برشی هستند. حالت ترکیبی تغییر شکل‌ها در ناحیه چسبیده، تعیین کننده اندازه نسبت تغییر شکل‌های قائم و برشی می‌باشند. نرم افزار المان محدود آباکوس، از دو روش برای نشان دادن حالت ترکیبی بارگذاری استفاده می‌نماید، که یک مورد بر اساس انرژی‌ها و دیگری بر اساس کشش‌ها می‌باشد. با دانستن G_n و G_s و G_t ، کار انجام شده توسط کشش‌ها در جابه‌جایی‌های قائم، برشی اول و برشی دوم و تعریف $G_T = G_n + G_s + G_t$ ، تعاریف نسبت‌های حالت‌های ترکیبی مبتنی بر انرژی به صورت رابطه زیر می‌باشد:

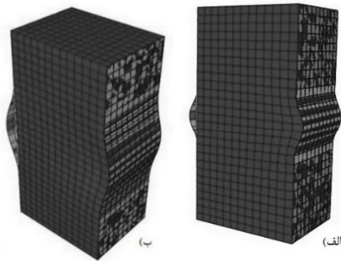
$$m_1 = \frac{G_n}{G_T} \quad m_2 = \frac{G_s}{G_T} \quad m_3 = \frac{G_t}{G_T} \quad (3)$$

واضح است که، تنها دو مورد از سه کمیت تعریف شده مستقل می‌باشند. در نرم افزار المان محدود آباکوس، خواص مواد مربوط به رشد خرابی باید به صورت تابعی از $m_2 + m_3$ و $\frac{m_3}{(m_2 + m_3)}$ تعریف گردد. در حالت کلی، نسبت‌های ترکیب حالت‌ها بر حسب انرژی‌ها و کشش‌ها، می‌تواند کاملاً متفاوت باشند. به طور خاص، برای یک ماده که دارای رفتار کشش-جدایش کوپل می‌باشد، کشش‌های قائم و برشی برای یک تغییر شکل در جهت قائم خالص ممکن است، مخالف صفر باشد. معیار B-K که معیاری از رفتار کشش-جدایش، زمانی استفاده می‌شود که انرژی‌های بحرانی شکست در جهت‌های برش اول و دوم یکسان باشند، که در این صورت [۲۵]:

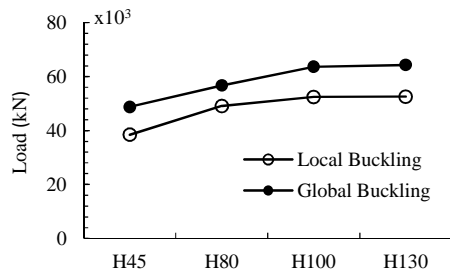
$$G_c = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right) \quad (4)$$

که در آن، G_I شکست در مود اول، G_{II} شکست در مود دوم، G_{III} شکست در مود سوم، G_{IC} نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی در مود اول، G_{IIC} نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی در مود دوم و G_c شکست بحرانی هستند. خرابی زمانی شروع می‌شود که جدایش اولیه در سازه شروع به حرکت کند. مشخص نمودن مقدار شروع در حالت خالص بحرانی، وابسته به استحکام بین لایه‌های در مدل دوخطی مواد دارد. رابطه زیر شروع جدایش در حالت ترکیبی را بیان می‌کند [۲۶]:

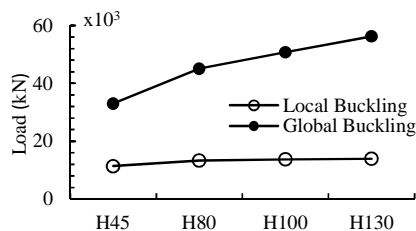
و ۸ دیده می‌شود، همانند شکل ۳، ابتدا نمودار در ناحیه اول، به صورت خطی بوده و پس از وقوع کمانش محلی در سازه، شیب کاهش می‌یابد، ادامه بارگذاری محوری تحت فشار، چندلایه‌های کامپوزیتی متصل در دو وجه ستون در نمونه ستون‌های اچ ۴۵، اچ ۸۰، اچ ۱۰۰ و اچ ۱۳۰، قابلیت تحمل نیروی فشاری وارده را نداشته و شیب نمودار به تدریج به سمت صفر میل می‌کند، تا زمانی که سازه دچار کمانش کلی می‌شود. سازه‌های ساندویچی که دارای جدایش اولیه به طول ۲۵ میلی‌متر هستند، نسبت به سازه‌های ساندویچی که دارای جدایش اولیه به طول ۵۰ میلی‌متر می‌باشند، بار کمانشی بیشتری را تحمل کرده‌اند. این مقدار، به دلیل کوچک‌تر بودن ناحیه جدایش در سازه‌های ساندویچی و اثرگذاری کمتر در افت بار کمانشی در سازه است. جدایش ۵۰ میلی‌متر، به دلیل بزرگ‌تر بودن و اثرگذاری بیشتر در افت بار کمانشی در سازه، بیشترین تاثیر را داشته است و سبب کاهش بیشتر در بار کمانشی محلی و کلی سازه‌های ساندویچی، شده است. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به ستون‌های اچ ۴۵ و اچ ۸۰ در نمودار شکل ۳، با نتایج مرجع [۲۰] مقایسه شده است. همچنین، لازم به ذکر است که نمودار بر اساس میزان تحمل سازه در بار کمانشی مشخص بوده است و در جدول ۵ و ۶، داده‌های حاصل از نتایج در شبیه‌سازی عددی، هم برای کمانش محلی و هم برای کمانش کلی در سازه‌ها آورده شده است.



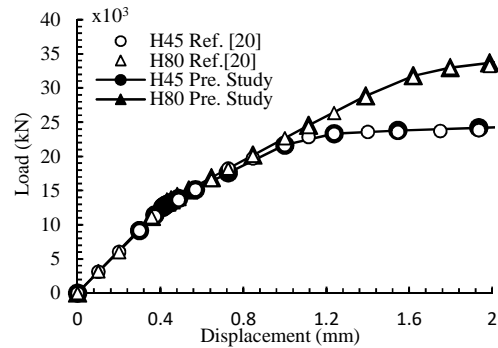
شکل ۶- تغییر شکل در سازه‌های بدون رشد جدایش (الف) ۲۵ میلی‌متر، (ب) ۵۰ میلی‌متر



شکل ۷- بار در سازه بدون رشد جدایش به طول ۲۵ میلی‌متر



شکل ۸- بار در سازه بدون رشد جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر

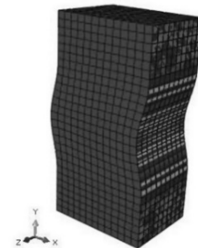


شکل ۹- نمودار بار-جابجایی در تحقیق حاضر و مرجع [۲۰]

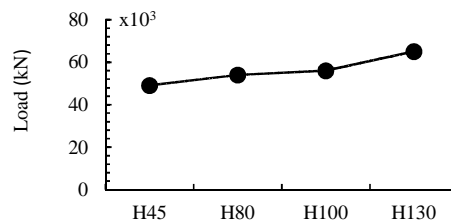
پس از انجام اعتبارسنجی موجه در تعیین و ارزیابی رفتار کمانشی سازه‌های جدایش‌دار، به تعیین رفتار کمانشی سازه‌های ایده‌آل، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش و با در نظر گرفتن رشد جدایش پرداخته شده است.

۴-۱- سازه‌های ایده‌آل

در این بخش تحلیل سازه‌های ساندویچی بدون نقص انجام شده است، همچنان‌که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در سازه هیچ‌گونه نقصی وجود نداشته و سازه به صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است. همچنین، مقادیر بارهای کمانشی برای ستون‌های اچ ۴۵، اچ ۸۰، اچ ۱۰۰ و اچ ۱۳۰ در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش چگالی هسته و به تبع آن افزایش سفتی هسته بار کمانشی افزایش یافته است.



شکل ۱۰- کمانش سازه ایده‌آل (بدون جدایش)

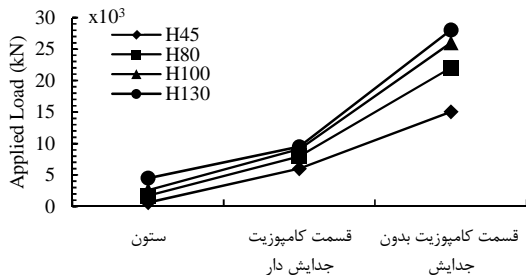


شکل ۱۱- بارهای کمانشی برای هر یک از ستون‌ها

۴-۲- سازه‌ها با نقص‌هایی به طول‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر

بدون در نظر گرفتن رشد جدایش

شکل ۱۲، تغییر شکل در سازه‌ها بدون در نظر گرفتن رشد جدایش را نشان می‌دهد. جدایش اولیه بین لایه‌ای که در هر یک از نمونه‌ها در بین هسته مرکزی ستون‌ها و چندلایه‌های کامپوزیتی وجود داشته باعث، کمانش محلی در ستون شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۷



جدول ۵- بارهای سازه بدون رشد جدایش به طول ۲۵ میلی‌متر

نوع ستون	بار کمانش محلی (kN)	بار کمانش کلی (kN)
اچ ۴۵	۳۸۴۲۵/۵	۴۵۸۱۵/۲
اچ ۸۰	۴۲۲۸۱	۵۱۸۹۱/۲
اچ ۱۰۰	۴۲۷۱۴/۷	۵۸۰۳۱/۹
اچ ۱۳۰	۴۳۱۲۵	۶۴۹۲۶/۶

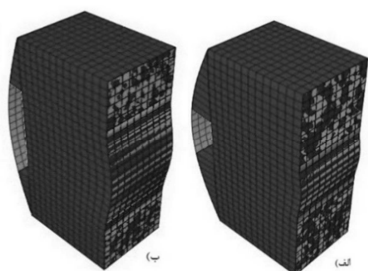
جدول ۶- بارهای سازه بدون رشد جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر

نوع ستون	بار کمانش محلی (kN)	بار کمانش کلی (kN)
اچ ۴۵	۱۳۵۲۹/۷	۲۲۶۳۹/۶
اچ ۸۰	۱۳۴۰۸/۸	۳۲۲۷۱/۲
اچ ۱۰۰	۱۳۸۸۵/۴	۳۷۱۱۲/۲
اچ ۱۳۰	۱۴۱۵۵/۲	۴۲۲۷۳/۴

شکل ۱۰- بارهای وارده بر اجزا بدون رشد جدایش ۵۰ میلی‌متری

۳-۴- سازه‌ها با نقص‌هایی به طول‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر با در نظر گرفتن رشد جدایش

در بررسی سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش و مقایسه آن با نتایج پیشین به مقایسه بار کمانشی در یک سازه ساندویچی پرداخته شده است. رشد ناشی از جدایش با استفاده از المان‌های چسبنده مدل‌سازی شده و در شبیه‌سازی‌ها نیز از کد نقص استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی المان‌های چسبنده که با توجه به نتایج تجربی و تعیین دقیق به منظور شبیه سازی درست در محدوده و وقوع کمانش محلی در سازه و پیش‌بینی مطلوب تا وقوع مرحله کمانش کلی در سازه، با توجه به بارهای وارد شده به سازه، به دست آمده است. در سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش، با شروع وقوع کمانش محلی خرابی در المان‌های چسبنده اتفاق می‌افتد، اما به دلیل پیشرای جدایش در سازه ساندویچی، شکست‌های بین‌لایه‌ای، نسبت به تحلیل قسمت قبل دیرتر اتفاق افتاده است. این پدیده را می‌توان این گونه توجیه کرد که انرژی‌ای که برای شکست لایه صرف شده، اکنون برای رشد جدایش صرف شده است. شکل ۱۱، تغییر شکل در یک سازه ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقدار بار کمانشی محلی و کلی در سازه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، کمانش محلی با در نظر گرفتن رشد جدایش که با توجه به استفاده از چسب‌های صنعتی جهت اتصال قطعات و اجزای یک سازه ساندویچی و انواع آن در تکنیک‌هایی مانند روش دستی و روش مکانیکی، به واقعیت بیشتر نزدیک است زودتر اتفاق می‌افتد.

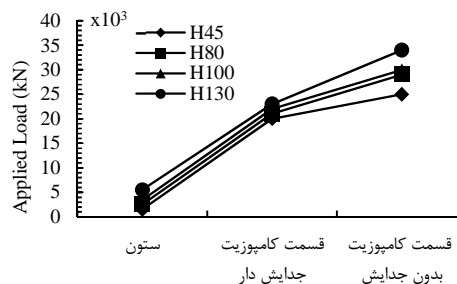


شکل ۱۱- تغییر شکل در سازه‌های با رشد جدایش (الف) ۲۵ میلی‌متر، (ب) ۵۰ میلی‌متر

علاوه بر آن، بار کمانشی کلی نیز در این حالت افت پیدا می‌کند. همچنین، سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش در

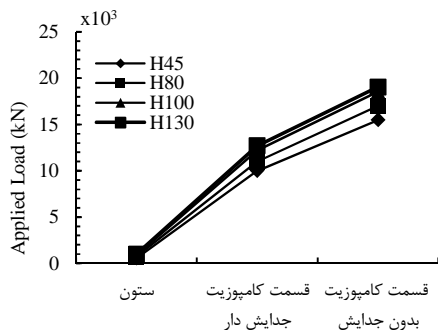
۲-۲-۱- بارهای وارده بر هر یک از اجزای سازه ساندویچی بدون در نظر گرفتن رشد جدایش

میزان بارهای اعمالی بر هر یک از اجزای سازه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، که هر یک از اجزای سازه مانند هسته و چندلایه‌های کامپوزیتی در دو وجه ستون را نشان می‌دهد. ستون جنسی ضعیف‌تر نسبت به چندلایه‌های کامپوزیتی دارد، بار کمتری را تحمل می‌کند همچنین، چندلایه کامپوزیتی متصل به ستون که بدون جدایش است بیشترین بار را متحمل شده و در وجه دیگر ستون، که جدایش بین ستون و چندلایه‌های کامپوزیتی وجود دارد، نسبت به وجه دیگر که هیچ جدایشی بین ستون و چندلایه کامپوزیتی وجود ندارد، بار کمتری را متحمل می‌شود. در سازه وجود جدایش به طول ۲۵ میلی‌متر، نسبت به جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر، به دلیل کوچک بودن اندازه جدایش، سازه توانسته است بار بیشتری را تحمل کند که این میزان افزایش بار کمانشی در سازه، تأییدی بر اثر و اندازه جدایش بر تحمل بار کمانشی در سازه است و سازه با جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر، بار کمتری را تحمل کرده است. تأثیرات اندازه جدایش در بار کمانشی کاملاً محسوس بوده است.

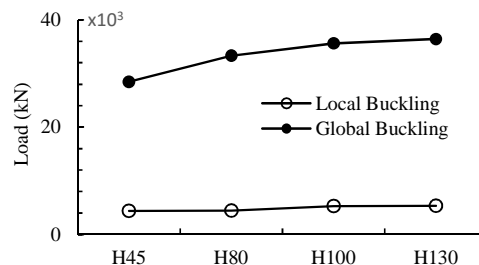


شکل ۹- بارهای وارده بر اجزا بدون رشد جدایش ۲۵ میلی‌متری

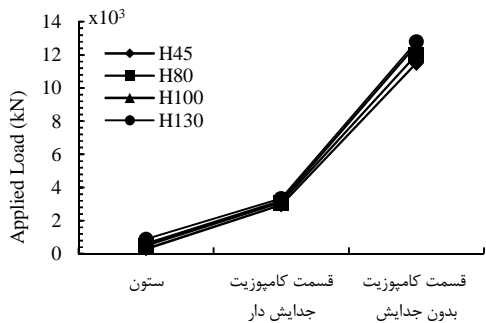
مقایسه با سازه‌های ساندویچی بدون در نظر گرفتن رشد جدایش، بار کمانشی کلی کمتری دارند که این افت زیاد بار کمانشی به دلیل رشد جدایش بوده است. استفاده از المان‌های چسبنده به دلیل نزدیکی به واقعیت یک سازه ساندویچی تقویت شده با الیاف کامپوزیتی منطقی بوده است، چرا که در انجام شبیه‌سازی‌ها، از قیود صرفاً محض و غیر واقعی اجتناب شده و از المان‌های چسبنده به عنوان چسب با خصوصیات مکانیکی مشخص در جدایش بین لایه‌ای بین ستون‌ها و چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده شده است. جدول‌های ۷ و ۸ مقادیر بارهای اعمال شده به سازه‌های ساندویچی را نشان می‌دهند.



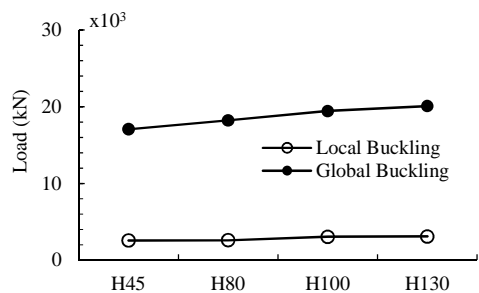
شکل ۱۲- بار در سازه با رشد جدایش به طول ۲۵ میلی‌متر



شکل ۱۳- بار در سازه با رشد جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر



شکل ۱۴- بارهای وارده بر اجزا با در نظر گرفتن رشد جدایش ۲۵ میلی‌متری



شکل ۱۵- بارهای وارده بر اجزا با در نظر گرفتن رشد جدایش ۵۰ میلی‌متری

جدول ۷- بارهای اعمال شده به سازه با رشد جدایش به طول ۲۵ میلی‌متر

نوع ستون	بار کمانش محلی (kN)	بار کمانش کلی (kN)
اچ ۴۵	۳۳۲۱/۲۶	۲۴۰۹۲/۹
اچ ۸۰	۳۳۵۶/۷۵	۲۸۶۶۰/۲
اچ ۱۰۰	۴۰۸۶/۶	۳۰۳۵۴/۶
اچ ۱۳۰	۴۱۲۳/۲۷	۳۱۱۰۲/۳

جدول ۸- بارهای اعمال شده به سازه با رشد جدایش به طول ۵۰ میلی‌متر

نوع ستون	بار کمانش محلی (kN)	بار کمانش کلی (kN)
اچ ۴۵	۱۹۸۰/۹۲	۱۴۵۰۸/۳
اچ ۸۰	۱۹۹۸/۴	۱۵۶۳۴/۴
اچ ۱۰۰	۲۵۴۰/۳۹	۱۶۲۲۴
اچ ۱۳۰	۲۵۵۹/۱۲	۱۷۰۱۳/۲

۴-۴- بارهای کمانشی بی‌بعد شده برای سازه‌های ساندویچی بدون در نظر گرفتن رشد و با در نظر گرفتن رشد جدایش

در این بخش بارهای کمانشی در سازه‌های ساندویچی بدون در نظر گرفتن رشد جدایش و سازه‌های ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش، نسبت به بار کمانشی سازه‌های ساندویچی بی‌بعد شده‌اند. یعنی بارهای کمانشی سازه‌های ساندویچی بدون رشد جدایش و سازه‌های ساندویچی با رشد جدایش، بر بار کمانشی سازه‌های ساندویچی بی‌نقص متناظر خود، تقسیم شده است. شکل‌های ۱۶ تا ۱۹، بارهای بی‌بعد شده (یکه شده) برای هر یک از ستون‌های اچ ۴۵، اچ ۸۰، اچ ۱۰۰ و اچ ۱۳۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ دیده می‌شود، دلایل اختلاف بار بی‌بعد شده، برای هر یک از

۳-۳-۱- بارهای وارده بر هر یک از اجزای سازه ساندویچی با در نظر گرفتن رشد جدایش نحوه قرار گیری المان چسبنده به گونه‌ای است که بین پوسته‌های

المان‌های چسبیده که به عنوان چسب در صنعت شناخته می‌شوند، قابل محسوس می‌باشد. کاهش مقدار بار کمانشی و نزدیک شدن نتایج شبیه سازی به نتایج واقعی به دلیل رشد جدایش و کاهش مقاومت ماده و به تبع آن کاهش بار کمانشی محلی است.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی اثر جدایش اولیه، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش در بار کمانشی سازه‌های ساندویچی پرداخته شده و سپس، اثر جدایش اولیه با در نظر گرفتن رشد آن در سازه‌های ساندویچی مورد ارزیابی قرار گرفته است. رشد جدایش با استفاده از المان‌های چسبیده مدل‌سازی شده و در شبیه‌سازی‌ها از کد نقص در بارگذاری فشاری استفاده شده است.

انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتارها و استخراج تحلیل عددی مناسب مستلزم آن است که نمونه‌های مورد بررسی از نظر ساختاری به واقعیت هر چه بیشتر نزدیک باشد. لذا جهت انجام این امر کدهایی نوشته شده است که نمونه‌های مورد نظر را به واقعیت ماده و از حالت کاملاً ایده‌آل به حالت واقعی نزدیکتر تبدیل کرده تا بتوان خروجی واقعی‌تری را از نرم افزار المان محدود آباکوس استخراج نمود. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، به بررسی پدیده کمانش و اثر جدایش در بارگذاری فشاری پرداخته شده و سپس، اثر رشد جدایش که توسط المان‌های چسبیده به همراه کد نقص در مدل‌سازی شده، در نرم افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است.

وجود جدایش در کاهش میزان تحمل در بارگذاری سازه‌های ساندویچی، و همینطور رشد جدایش، در بار گذاری سازه‌های نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به سازه‌ها تاثیرگذار بوده است.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۴۵ با طول جدایش اولیه ۲۵ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۷ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۵۱ درصد افت کرده است.

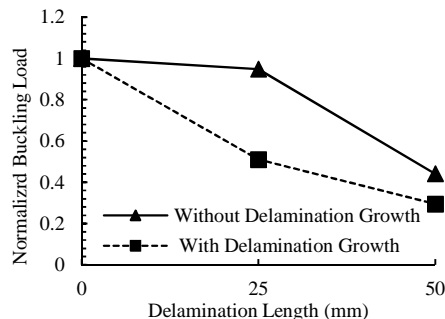
در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۴۵ با طول جدایش اولیه ۵۰ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۵۴ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۷۱ درصد افت کرده است.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۸۰ با طول جدایش اولیه ۲۵ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۴ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۴۷ درصد افت کرده است.

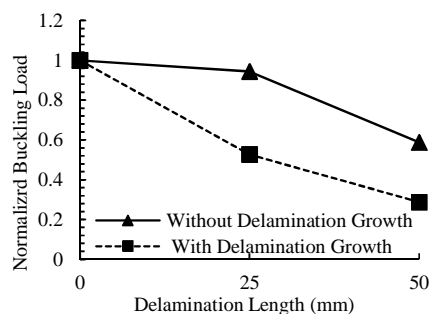
در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۸۰ با طول جدایش اولیه ۵۰ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۴۱ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۷۲ درصد افت کرده است.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۱۰۰ با طول جدایش اولیه ۲۵ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۹ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۴۷ درصد افت کرده است.

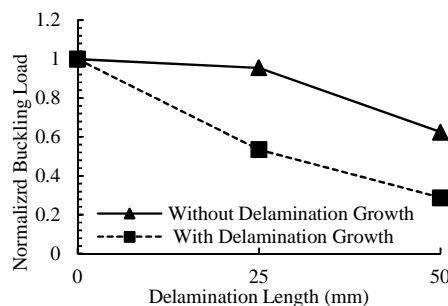
جدایش‌ها به طول ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر، برای سازه‌های بدون رشد جدایش، این گونه بوده است که وجود جدایش و به تبع آن تاثیر وجود آن در سازه سبب کاهش تحمل سازه در بار وارد شده که البته با توجه به اندازه جدایش و طول‌های مختلف، تاثیر پذیری سازه‌ها در تحمل بار، متفاوت بوده است.



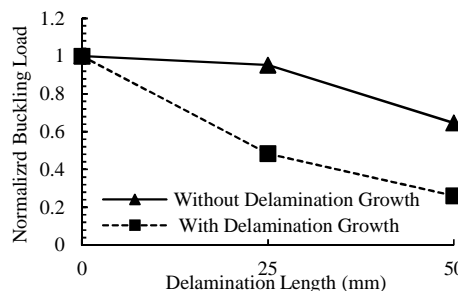
شکل ۱۶- بارهای کمانشی بی بعد شده ستون اچ ۴۵



شکل ۱۷- بارهای کمانشی بی بعد شده ستون اچ ۸۰



شکل ۱۸- بارهای کمانشی بی بعد شده ستون اچ ۱۰۰



شکل ۱۹- بارهای کمانشی بی بعد شده ستون اچ ۱۳۰

همچنین، در این شکل‌ها اثرات رشد جدایش در سازه‌ها، توسط

[11] Wang D., Abdalla M.M., Global and Local Buckling Analysis of Grid-Stiffened Composite Panels, *Composite Structures*, No. 119, pp. 767-776, 2015.

[12] Giuliese G., Palazzetti R., Moroni F., Zucchelli A., Pirondi A., Cohesive Zone Modelling of Delamination Response of a Composite Laminate with Interleaved nylon 6.6 nanofibers, *Composites Part B*, No. 78, pp. 384-392, 2015.

[13] Mohammadi B., Shahabi F., On Computation Modeling of Postbuckling Behavior of Composite Laminates Containing Single and Multiple Through the Width Delaminations Using Interface Elements with Cohesive Law, *Engineering Fracture Mechanics*, 2015.

[14] Knox E.M., Cowling M.J., Hashim S.A., Fatigue Performance of Adhesively Bonded Connections in GRE Pipes, *International Journal of Fatigue*, No. 22, pp. 513-519, 2000.

[15] Tarfaoui M., Gning P.B., Hamitouche L., Dynamic Response and Damage Modeling of Glass/Epoxy Tubular Structures, Numerical investigation, *Composites Part A*, No. 39, pp. 1-12, 2008.

[16] Plantema F.J., The Bending and Buckling of Sandwich Beams-Plates and Shells, Sandwich Construction, *John Wiley and Sons*, New York, 1966.

[17] Gaiotti M., Rizzo C.M., Branner K., Berring P., Finite Elements Modeling of Delaminations in Composite Laminates, *Advances in Marine Structures, Proceedings of the MARSTRUCT International Conference on Marine Structures*, Hamburg, March 28-30, 2011

[18] Chapelle D., Bathe K.J., The Finite Element Analysis of Shells- Fundamentals, *Springer-Verlag*, Berlin, 2003.

[19] Matthews F.L., Davies G.A.O., Hitchings D., Soutis C., Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures, *Woodhead Publishing Ltd*, Cambridge, pp. 3-5, 2000.

[20] Gaiotti M., Rizzo C., Finite Element Modeling Strategies for Sandwich Composite Laminated Under Compressive Loading, *Ocean Engineering*, No. 63, pp. 44-51, 2013.

[21] Vaddake V., Carlsson L.A., Experimental Investigation of Compression Failure of Sandwich Specimens with Face/Core Debond, *Composite Part B*, No. 35, pp. 583-590, 2004.

[22] Rodriguez-Ramos R., De Medeiros R., Guinovart-Diaz R., Bravo-Castillero J., Otero J.A., Tita V., Different Approaches for Calculating the Effective Elastic Properties Incomposite Materials Under Imperfect Contact Adherence, *Composite Structures*, No. 99, pp. 264-275, 2013.

[23] Kaw A.K., Mechanics of Composite Materials, Second Edition. *Taylor and Francis Group*, 2006.

[24] Yap C.W., Chai G.B., Song J., Joshi S.C., Upper and Lower Bound Buckling Load of Perfect and Delaminated Fiber-Reinforced Composite Columns, *Composite Structure*. No. 122, pp. 376-389, 2015.

[25] Riccio A., Scaramuzzino F., Perugini P., Embedded delamination growth in composite panels under compressive load. *Composites Part B*, No. 32, pp. 209-218, 2001.

[26] Gozluklu B., Coker D., Modeling of The Dynamic Delamination of L-Shaped Unidirectional Laminated Composites, *Composite Structures*, No. 94, pp. 1430-1442, 2012.

[27] Yamanaka T., Ghiasi H., Heidari-Rarani M., Lessard L., Feret V., Hubert P., Multiscale Finite Element Analysis of Mode I Delamination Growth in a Fabric Composite, *Composite Structures*, No. 133, pp. 157-165, 2015.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۱۰۰ با طول جدایش اولیه ۵۰ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۳۴ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۷۲ درصد افت کرده است.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۱۳۰ با طول جدایش اولیه ۲۵ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۱ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۵۳ درصد افت کرده است.

در سازه ساندویچی با هسته ستون اچ ۱۲۰ با طول جدایش اولیه ۵۰ میلی‌متر، بارهای کمانشی نسبت به سازه بی نقص متناظر خود، بدون در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۳۵ درصد و با در نظر گرفتن رشد جدایش حدود ۷۵ درصد افت کرده است.

در بررسی تحقیق حاضر و مطالعه وجود جدایش و رشد جدایش توسط المان‌های چسبیده در سازه‌های ساندویچی، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس انجام پذیرفته است و لذا جهت انجام فعالیت تجربی و مقایسه نتایج عددی در تحقیق حاضر با نتایج تجربی جهت ارزیابی دقیق‌تر، مورد مطالعه نویسندگان می‌باشد.

۶- مراجع

[1] Deniz M.E., Ozdemir O., Ozen M., Karakuzu R., Failure Pressure and impact Response of Glass-Epoxy Pipes exposed to seawater. *Composites, Part B*, No. 53, pp. 355-361, 2013.

[2] Isaac M.D., Ishai O., Engineering Mechanics of Composite Materials, *Northwestern University*, Evanston, IL, U.S.A, 1994.

[3] Hosseini-Toudeshky H., Hosseini S., Mohammadi B., Buckling and Delamination Growth Analysis of Composite Laminates Containing Embedded Delaminations, *Applied Composite Materials*, No. 17, pp. 95-109, 2010.

[4] Vaddake V., Carlsson L.A., Experimental Investigation of Compression Failure of Sandwich Specimens with Face/Core Debond, *Composite, Part B*, No. 35, pp. 583-590, 2004.

[5] Mousa M.A., Uddin N., Global Buckling of Composite Structural Insulated Wall Panels, *Materials and Design*, No. 32, pp. 766-772, 2011.

[6] Ji W., Waas A.M., Accurate Buckling Load Calculation of a Thick Orthotropic Sandwich Panel, *Composites Science and Technolog*, No. 72, pp.1134-1139, 2012.

[7] Gaiotti M., Rizzo C., Finite Element Modeling Strategies for Sandwich Composite Laminated Under Compressive loading, *Ocean Engineering*, No. 63, pp. 44-51, 2013.

[8] Vosoughi A.R., Darabi A., Anjabin N., Topal U., A Mixed Finite Element and Improved Genetic Algorithm Method for Maximizing Bbuckling Load of Stiffened Laminated Composite Plates, *Aerospace Science and Technology*, No. 70, pp. 378-387, 2017.

[9] Chen X., Wu Zh., Nie G., Weaver P., Buckling Analysis of Variable Angle Tow Composite Plates with a Through-the-Width or an Embedded Rectangular Delamination, *International Journal of Solids and Structures*, pp. 1-15, 2018.

[10] Aydogdu M., Aksencer T., Buckling of Cross-Ply Composite Plates with Linearly Varying In-Plane Loads, *Composite Structures*, No. 183, pp. 221-231, 2018.