

نشريه علمى يژوهشى

علوم و فناوری **کامیوز ی** http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تجربی و عددی سازههای ساندویچی با اتصال دو طرفه تحت بارگذاری استاتیکی *3 شىدخت رشىدداداش 1 ، مجتبى صدىقى 2 ، سهيل دار بوشى

1- دانشجو، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

* تهران، صندوق يستى s.dariushi@ippi.ac.ir ،14977-13115

چکیدہ	اطلاعات مقاله
سازههای ساندویچی به طور گسترده در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوا فضا، کشتی سازی، ساخت ناوگان ریلی و غیره کاربرد دارند.	دريافت: 96/7/24
این سازهها عموما در ابعاد محدود ساخته شده و با استفاده از اتصالات فلزی، چسب و یا پیچ به یکدیگر متصل میگردند. در مقاله حاضر،	پذيرش: 96/10/4
دو نوع اتصال فلزی با جنس یکسان و هندسه متفاوت بین سازههای ساندویچی با رویههای کامپوزیت اپوکسی- شیشه و هسته لانه زنبوری آلومینیومی درنظر گرفته شده است که این اتصالات با استفاده ار رزین اپوکسی به سازه ساندویچی متصل گردیدهاند. پس از اینده نیزیار از میناند.	کلیدواژگان: سازه ساندویچی
ساحت نمونهها، ازمونهای حمش سه نقطه بر روی تیر و حمش ورق بر روی نمونهها انجام شدند. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار برانجام ماندینچ دارام اتسال درار ازم نینه دارا استفاده از یک نیم افزار بر بایه بش الراز بحدید میت ذریف با تک می	اتصالات
سارههای ساندویچی دارای انصار، مدساری نمونهها با استانه از یک نرم افزار بر پایه روس انمان محدود صورت پدیرفت. با تغیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحه گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از کار عددی با	لانه زنبوری آزمون استاتیکی
نتایج تجربی مشاهده گردید. سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل	
پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.	

Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading

Shidokht Rashiddadash¹, Mojtaba Sadighi¹, Soheil Dariushi^{2*}

1- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran. 2- Composite group, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14977-13115, Tehran, Iran, s.dariushi@ippi.ac.ir

Keywords Sandwich panel Connection Honeycomb Static tests

Abstract

Sandwich structures are used in applications that required a combination of high rigidity and low weight same as aerospace, marine and automotive. Large and/or complicated sandwich structures are often manufactured by connecting pre-fabricated sandwich panels by means of connections, adhesive or bolts. In present study, two types of metallic connections were used to join two sandwich panels with glass-epoxy face-sheets and aluminum honeycomb core. Connections have the same material and different geometries and were bonded to the sandwich structures using the same epoxy as used to manufacture the face-sheets. Two groups of specimens were made and tested under bending loading. Also, a finite element simulation using LS-DYNA were performed to predict the behavior of sandwich structures. A good compliance between numerical and experimental results was observed. The effects of increasing the length and the thickness of the connections on the maximum force and energy absorption were investigated to examine the influences of involved parameters on bending response of a sandwich plates.

1-مقدمه

در بین هستههای مختلف، هستههای لانه زنبوری به علت داشتن ظرفیت جذب انرژی بالا از اهمیت به سزایی برخوردار میباشند. همچنین در این هستهها، با تغییر پارامترهای هندسی از قبیل ضخامت، ارتفاع، اندازه سلول و زاویه داخلی می توان خواص مختلغی بدست آورد [5].

سازههای ساندویچی بزرگ و یا پیچیده غالبا با ساخت سازههای ساندویچی از قبل ساخته شده و سپس اتصال آن ها به هم تولید می شوند. برای مثال، در کشتیهای ساختهشده با اجزاء ساندویچی، دیوارها به تنه کشتی با این روش متصل می گردند. [6]

توسط یک هسته ضخیم و کم وزن از هم جدا شدهاند. رویهها با چسب به هسته چسبانده میشوند تا امکان انتقال بار بین اجزاء حاصل گردد. [1-3] در سالهای اخیر استفاده از سازههای ساندویچی در صنایع مختلف به علت داشتن استحکام و سفتی نسبت به وزن کم، مقاومت خمشی بالا و بسیاری خواص دیگر مانند مقاومت به خوردگی و مقاومت به ضربه بالا افزایش یافته است. [4]

یک سازه ساندویچی متشکل است از دو رویه نازک، مستحکم و سفت که

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

تحلیلی استفاده شد و انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و عددی مشاهده

گردید. سیس یک اینسرت دایرهای در یک پنل ساندویچی عرشه کشتی در

نظر گرفته شد و مورد بهینهسازی قرار گرفت. نیکلاس⁶ روش پیدا کردن

هندسه بهینه یک اتصال پنل به پنل در چیدمان طولی که با استفاده از نرم

افزار انسیس انجام شد را ارائه داد[11]. پارامترهایی که مقادیر تا حد امکان

پایین ضرایب تمرکز تنش هندسی در جرم و تغییر شکلهای قابل قبول سازه را تضمین می کردند، پیدا شدند. با تحلیل نتایج بدست آمده، هندسه بهینه

هیمبز، پین ٔ رفتار شکست انواع مختلف اینسرتهای گلدانی یا

محفظهای ^{۱٬} و اتصالات گوشه را در سازه ساندویچیهای با هسته لانه زنبوری

نومکس مورد بررسی قرار دادند[12]. آزمونهای بیرون کشیدن^{۱۱} روی

اینسرت ها نشان داد که در ابتدا شکست برشی هسته اتفاق افتاد و پس از آن

سلولهای گلدانی تحت پارگی کششی دچار شکست شدند. تحت بارگذاری برش بیرون^{۱۲}، سلولهای گلدانی و رویه بالایی در برش دچار شکست شدند و

در این آزمون موقعیت اینسرت داخل ناحیه گلدانی تاثیر چشمگیری روی

نتایج داشت ولی نوع اینسرت هیچ تاثیری نداشت. در هر دو آزمایش تنش-

های شکست تحت تاثیر نوع بارگذاری بودند. رفتار شکست اتصالات گوشه

تحت بارهای خمشی یا برشی در ابتدا با جدایش سطوح اتصال مربوطه بدست

آمد. تحلیل المان محدود هم با نرم افزار ال اس داینا انجام شد و نتایج دو روش فوق انطباق خوبی با هم داشتند. سانگ و همکاران^{۱۳} یک مطالعه تجربی

روی بارهای شکست برشی و کشش بیرون اتصالات ساندویچهای کامپوزیتی انجام دادند[13]. جهت ساخت نمونهها از هسته لانه زنبوری نومکس و

كامپوزيت كربن-اپوكسى استفاده شد. 80 نمونه كه 16 نوع آنها بسته به

ارتفاع هسته، دانسیته هسته، ضخامت رویه، لقی اینسرت و جهت بارگذاری

متفاوت بودند، مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای بارگذاری

کشش بیرون گرچه بار شکست اتصال تحت تاثیر دانسیته و ارتفاع هسته

است ولى آنها شديدا از ضخامت رويهها تاثير مى پذيرند. اتصالى كه در آن

لقی قرار داده شده بود و آن لقی با مواد معدنی پرشده بود، بار شکست

بیشتری را نسبت به حالتی که اینسرت بدون لقی نصب شده بود، نشان داد.

در بارگذاری برشی، بارهای شکست اتصالات تحت تاثیر ضخامت رویه بود و

خواص هسته نظیر ارتفاع و جهت هسته تاثیر ناچیزی روی بار شکست داشت.

خستگی نمونههای ساخته شده از ورقهای فولادی و سازههای ساندویچی

کامپوزیتی که با اتصالات مکانیکی یا کور به هم متصل شده بودند انجام

دادند[14]. از دادههای حاصل از آزمون استاتیکی و خستگی میتوان

ملاحظاتی جهت استفاده از سازههای ساندویچی کامپوزیتی متصل شده با

اتصالدهندهها بدست آورد. عملیات متهزنی (که معمولا بحرانی میباشد و نیازمند ابزار خاص و راهحلهای فنی اصلاح شده است) احتمالا به علت اثر

محکم کنندگی چسب بین هسته و پوسته، کمتر از حد انتظار بحرانی بود. در

آزمونهای استاتیکی، اتصالات در بارگذاری برشی بهتر عمل کردند. پیرسازی پنلهای ساندویچی کامپوزیتی فقط تنزل جزئی ویژگیهای مکانیکی اتصال را

سبب شد. هم الیاف رویهها و هم ضخامت هسته سازه ساندویچی روی

دمليو و همكاران اليك پروژه تجربی جهت تعيين رفتار استاتيكی و

اتصال موردنظر ارائه شد.

این اتصالات عموما فلزی بوده و با استفاده از چسب و یا پیچ و یا هر دو به سازه ساندویچی متصل میشوند. برخی از مشکلات چسباندن قطعات فلزی و کامپوزیتها به یکدیگر مربوط به اختلاف زیاد بین خواص مکانیکی این دو و ناهمسانگردی زیاد کامپوزیتها میباشد. عدم تطابق سفتی^۱ عموما منجر به تمرکز تنش زیاد و اتصال ضعیف میشود. [7]

در بخش زیر به برخی از کارهای انجام شده در این حوزه اشاره شده است:

تفتگارد، لیستروپ^۲ چندین اتصال T-شکل بین سازههای ساندویچی که در کاربردهای نیروی دریایی استفاده میشوند را مورد بررسی قرار دادند[8]. در طرح موجود سازهها توسط فیلر و لمینیتهای خارجی که دارای ضخامت مشابه با لمینیتهای رویهها هستند، به هم متصل شدهاند. همچنین، یک مدلسازی المان محدود و مقایسه تنشها در شکلهای مختلف اتصال T انجام شد.

سائو، گرنستد^۲ دو نوع اتصال چسبی- پیچی و اتصال سوراخدار همراه با تزریق^۴ بین مقطعی از فولاد ضدزنگ از یک طرف و از طرف دیگر سازه ساندویچی با رویههای کامپوزیتی و هسته از جنس فوم را مورد بررسی قرار دادند[6]. نمونههای تیر شامل اتصال ساخته شد و تحت بارهای خمشی و برشی، مورد آزمایش قرار گرفتند. دو نوع تیر مرجع ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت: تیر ساندویچی کامپوزیتی و تیر مرجع فولادی. نتایج آزمونها نشان داد هر دو نوع اتصال استحکام خوبی دارند و در هیچ کدام شکست اتصال اتفاق نیفتاد. خرابی همیشه دورتر از اتصال و در بخش کامپوزیتی تیر ساندویچی و عموما در رویه تحت بار فشاری اتفاق میافتد.

بنیاوانیچاکول و همکاران^۵ تحلیل عددی و تجربی بر روی اینسرتهای مورد استفاده در سازههای ساندویچی را انجام دادند[9]. در مورد سازه ساندویچی چرخهای هواپیما، نقطه اتصال با استفاده از یک تقویت موضعی که اینسرت نامیده میشود، ساخته میشود. این اینسرت با رزین ریخته شده در هسته نومکس ساخته میشود. آزمونهای کشش به بیرون⁵ به طور متناوب بر روی اینسرت انجام گرفته و جابجایی سه بعدی با روشهای نوری اندازه گیری شده است. مدهای خرابی بالقوه (لایهلایه شدگی، شکست موضعی الیاف، جدایش هسته و پوسته، له شدگی هسته و کمانش برشی هسته) زیاد بودند. آزمایشات نشان داد برای بارهای کمتر اثرات غیرخطی و هیسترزیس عمدتا به علت کمانش برشی هسته است. سپس قانون خرابی مدول برشی روی یک مدل المان محدود غیر خطی انجام شد.

بوژه ولنایا و همکاران^۷ اثرات خمشی موضعی را در مجاورت اینسرتهای داخل ساندویچ پنل مورد بررسی قرار دادند[10]. این اثرات خمشی موضعی به علت افزایش تنشهای خمشی در رویههای سازه ساندویچی و تنشهای نرمال و برشی در هسته بوجود میآیند. یک مدل تحلیلی قبلاتوسعه یافته (مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی سازه های ساندویچی (2002) (6-ICSS)) برای حالت یک سازه ساندویچی با اینسرتهای دایره ای با خواص الاستیک متفاوت با هسته اصلاح شد. تنشهای موضعی ایجادشده در رویهها و هسته به علت وجود اینسرت از طریق روابط تحلیلی ساده بیان میشوند. از روش المان محدود جهت اثبات کارامد بودن مدل

⁴ co-infused perforated

⁸ K Niklas

¹⁰ potted ¹¹ Pull out

12 Shear out

9 S Heimbs, M Pein

¹ Stiffness mismatch

² H. Toftegaard, A. Lystrup

³ J. Cao, J.L. Grenestedt

⁵ P. Bunyawanichakul, B. Castanie, J.-J. Barrau

¹³ K-I Song, J-Y Choi, J-H Kweon, J-H Choi, K-S Kim

¹⁴ G Demelio, K Genovese, C Pappalettere

⁷ E Bozhevolnaya, A Lyckegaard, O.T Thomsen, V Skvortsov

استحکام خستگی اتصالات آزمون شده تاثیر داشت. دودکینز و همکاران^۱،طراحی اتصالات در سازههای FRP کشتی را مورد بررسی قرار دادند و طرحهای اتصالات بهینهشده که دارای استحکام بالاتر و با وزن کاهشیافته میباشند، را ارائه دادند[15].

در این پروژه دو نوع اتصال فلزی با هندسههای متفاوت جهت اتصال سازههای ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون خمش بر روی نمونههای اتصال انجام شد و اتصال دارای استحکام بالاتر تعیین گردید. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار سازههای ساندویچی دارای اتصال، مدلسازی نمونهها با استفاده از یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحه گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.

2-تحليل تجربى

1-2- شكل شماتيك اتصالات

در این پروژه دو نوع اتصال بین سازههای ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل شماتیک دو نوع اتصال در شکل 1 و شکل 2 نشان داده شده است. مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی در جدول 1 قید گردیده است.

جدول 1 مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی

Table 1 characteristic of each of the sandwich components			
جنس	اجزاء		
Al 6063 T5	اتصالات		
كامپوزیت رزین اپوكسی و الیاف شیشه UD 350 gr/m2 با چیدمان	رويه فوقاني		
[0/90/0/90/0] با ضخامت 2.6 mm			
كامپوزيت رزين اپوكسى و الياف شيشه UD 350 gr/m2 با چيدمان	رويه تحتانى		
[0/90/0] با ضخامت 1.3 mm			
لانه زنبوری آلومینیومی با ضخامت دیواره mm 0.05 و اندازه سلول	هسته		
6 mm م ل تفاع 15 mm			



شکل 1 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع اول





شکل 2 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع دوم

2-2- ساخت نمونهها

مواد مورد استفاده برای ساخت نمونهها الیاف شیشه تک جهته (E-Glass, Axson, Epolam 2002 resin with Epolam)، رزين اپوکسی (350 g/m² hardener) و لانه زنبوری آلومینیومی (40 kg/m³) میباشد. در ابتدا رویههای ساندویچپنل با روش تزریق در خلاء (VIP) ساخته شده و به ابعاد مناسب بريده شدند. سپس لانه زنبوری آلومينيومی به ابعاد مناسب برش داده شد و آلودگیهای آن با استفاده از محلول هیدروکسیدسدیم زدوده شد. به این ترتیب که 30 گرم هیدروکسید سدیم در 1 لیتر آب حل کرده و لانه زنبوری به مدت 5 دقیقه در این محلول قرار داده شد. به این عمل اصلاح سطح کم گفته می شود. پس از اصلاح سطح لانه زنبوری ها ظرف مدت 24 ساعت بايد عمل اتصال به رويهها انجام شود تا اثر اصلاح سطح از بين نرود. اتصال رویهها به هسته در دو مرحله انجام گرفت . در مرحله اول رزین با استفاده از قلممو، به رویه زیرین اعمال شد و لانه زنبوری در محل مناسب روی رویه زیرین قرار گرفت. یک وزنه 5 کیلوگرمی به شکل صفحه فلزی صاف به منظور ایجاد فشار بر روی سطح هسته قرار داده شد. پس از گذشت 12 ساعت و یخت رزین موجود بین رویه و هسته، رزین بر رویه بعدی اعمال شد و لانه زنبوری و بر روی آن قرار گرفت و دوباره وزنه روی کل مجموعه به مدت 12 ساعت قرار داده شد. سپس با داشتن هر یک از سازههای ساندویچی عملیات اتصال آنها به هم با استفاده از پروفیل اتصال آلومینیومی انجام شد. برای این منظور ابتدا پروفیل آلومینیومی به روش گفته شده اصلاح سطح گردید و سپس رزین اپوکسی بر روی آن اعمال شد و دو سازه ساندویچی درمحلهای مناسب روی پروفیل قرار گرفت و بر روی مجموعه به مدت 24 ساعت وزنه 5 کیلوگرمی قرار داده شد. نمونههای نهایی در شکل 3 نشان داده شده است. در كل 12 نمونه ساخته شدند، 3 تير با اتصال نوع اول، 3 تير با اتصال نوع دوم، 3 ورق با اتصال نوع اول و 3 ورق با اتصال نوع دوم.

نشریه علوم و فناوری ک**ا میو** *ز***یت**

¹ A.R. Dodkins, R.A. Shenoi, G.L. Hawkins

² Etching



Fig. 3 specimens a) plate with connection type 1 b) plate with connection type 2 c) beam with connection type 1 d) beam with connection type 2 $\frac{1}{2}$

شکل 3 نمونههای نهایی- a) ورق شامل اتصال نوع اول، b) ورق شامل اتصال نوع دوم، c) تیر شامل اتصال نوع اول.b) تیر شامل اتصال نوع دوم

3-2- آزمونهای تجربی

در این تحقیق دو نوع آزمون بر روی هر یک از دو اتصال انجام شد. این آزمونها به قرار زیر میباشند:

آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر با ابعاد 40 cm × 3 cm

آزمون خمش ورق بر روی ورق با ابعاد 25 cm × 25 cm 25

تمامی آزمونها در دمای اتاق (2°25) و رطوبت نسبی محیط (65%) انجام شدند. دستگاه مورد استفاده، دستگاه آزمون کشش سنتام (-STM 150) با ظرفیت 15 تن می باشد.

1-3-2 آزمون خمش بر روی ورق های با ابعاد 25 cm × 25 cm

برای آزمون خمش ورقها، نمونه آزمون بین دو فیکسچر فلزی به شکل قاب (هم از بالا و هم از پایین) قرار داده شد به طوریکه فقط 20 cm × 20 cm آن تحت بار قرار گرفت و نمونه آزمون و این صفحات توسط شش گیره به هم محکم شدند.

سمبه دارای قطر mm 145 در این آزمون استفاده شد به منظور اینکه تمامی اجزاء (اتصال، لانه زنبوری و رویهها) در پاسخ شرکت نمایند. آزمونها به صورت شبهاستاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. لازم به ذکر است که سرعت انجام آزمون 5 mm/min و بود. آزمون خمش بر روی صفحات طبق شکل 4 برای اتصال نوع اول و اتصال نوع دوم انجام شد.

2-3-2- آزمون خمش سه نقطه بر روی تیرهای با ابعاد 40 cm × 3 cm

برای هر اتصال سه تیر ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت. طول تیرها 40 cm و فاصله بین تکیهگاهها 30 درنظر گرفته شد. سرعت انجام آزمون 5 mm/min میباشد. آزمونها به صورت شبهاستاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. نمونه و دستگاه آزمون برای اتصال نوع اول و برای اتصال نوع دوم در شکل 5 نشان داده شده است.

در کل 12 نمونه تحت خمش مورد آزمون قرار گرفت: 3 ورق با اتصال نوع اول، 3 ورق با اتصال نوع دوم، 3 تیر با اتصال نوع اول و 3 تیر با اتصال نوع 2.





 Fig. 4 bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2

 شكل 4 آزمون خمش بر روى ورق- a) اتصال نوع اول، b) اتصال نوع دوم



Fig.5 Bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2 شکل 5 آزمون خمش بر روی ورق- a) اتصال نوع اول، b) اتصال نوع دوم

3-نتايج و بحث

نمودار نیرو- جابجایی برای ورق های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 6 نشان داده شده است، نمودار نیرو- جابجایی همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است به 4 بخش می تواند تقسیم شود. بخش اول (I) غیرخطی است و مربوط به شروع تماس بین نمونه و سمبه (فک اعمال بار) می باشد. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویه ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می شود. بخش سوم (III) به علت شروع خرابی ها غیرخطی می باشد. بین بخش سوم و چهارم، افت ناگهانی نیرو مشاهده می شود که علت آن گسترش خرابی می باشد و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی های گسترده کاهش می یابد.

مدهای خرابی مشاهده شده، در شکل 7 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا، تغییرشکل پلاستیک اتصال و تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری میباشد.



Fig. 8 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending $% \left({{{\mathbf{F}}_{{\mathbf{F}}}}_{{\mathbf{F}}}} \right)$

شکل 8 نمودار نیرو- جابجایی برای ورقهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 9 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا و تغییرشکل پلاستیک اتصال میباشد.

با اعمال نیرو بر مرکز تیر و روی اتصال، به علت آنکه اتصال دارای استحکام و صلبیت بالایی میباشد، نیروی اعمال شده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییر شکل برشی و کمانش می گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمی شود. در نمودار شکل 10 ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویه ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. همچنانکه جابجایی بیشتری اعمال گردید، افت نیرو به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می شود.

مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 11 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری میباشد.

نمودار نیرو- جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 10 نشان داده شده است.

نمودار نیرو- جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 12 نشان داده شده است.



b Fig. 9 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2, a)failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection

شکل 9 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع دوم a) گسیختگی رویه بالا، b) تغییر شکل پلاستیک اتصال نمودار نیرو-جابجایی برای ورقهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 8 نشان داده شده است. مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع 1، نمودار نیرو- جابجایی در شکل 8 را میتوان به 4 بخش تقسیم نمود. بخش اول (I) به علت شروع تماس بین نمونه و سمبه غیرخطی است. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویهها قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده میشود. بخش سوم (III) غیرخطی است که علت آن شروع خرابیها میباشد. بین بخش سوم و چهارم به علت گسترش خرابیها افت ناگهانی نیرو مشاهده میشود و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی-های گسترده کاهش مییابد.



Fig. 6 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending





Fig. 7 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1, a)failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection, c) shear deformation and buckling of honeycomb (a) ممهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع اول (a) مسیختگی رویه بالا، b) تغییرشکل پلاستیک اتصال، c) تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری



Fig. 10 Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending

شکل 10 نمودار نیرو- جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



Fig. 11 Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 1 شکل 11 تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع اول



Fig. 12 Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending

شکل 12 نمودار نیرو- جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع 1، در بخش اول نمودار شکل 12، ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویهها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. با اعمال جابجایی بیشتر، افت نیرو به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می شود. لازم به ذکر است

که به علت استحکام و صلبیت بالای اتصال، نیروی اعمالشده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییرشکل برشی و کمانش می-گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمیشود.

مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 13 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری میباشد.

مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجاییهای مربوط به آنها برای تیرها و ورقها در جدول 2 نشان داده شده است.



Fig. 13 Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 2 $\,$

شکل 13 تنییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم

جدول 2 مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجاییهای مربوط **Table 2** Comparison between maximum force and failure load and their corresponding displacements

تير با اتصال	تير با اتصال	ورق با اتصال	ورق با اتصال	
نوع ۲	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۱	
0.022	0.053	0.145	0.353	جرم اتصال (Kg)
557.7±0	495.9±119.7	21971.3±64.3	45410.4±144 5.7	نیروی ماکزیمم(N)
25350±0	9356.6±225 8.5	151526.5±44 3.4	128641,5±40 95.5	نيروى ماكزيمم بر واحد جرم (N/Kg)
4.904±0.784	2.814±0.383	3.285±0.0126	8.934±0.286	جابجایی مربوط به نیروی ماکزیمم (mm)
236.65±66.9 5	268.05±44.3 5	32983.7±341 3.9	47645.3±160 9.5	نیروی شکست(N)
10756.8±30 43.2	5057.5±836. 8	227473.8±23 544.1	134972.7±45 59.5	نیروی شکست بر واحد جرم (N/Kg)
39.731±3.24 9	32.066±0.29 22	13.503±0.175	13.812±0.567	جابجایی مربوط به نیروی شکست (mm)

www.SID.it

15

با توجه به جدول 2، به علت آنکه نیروی ماکزیمم و نیروی شکست نمونههای دارای اتصال نوع اول (ورق و تیر) بیشتر از نمونه های دارای اتصال نوع دوم است، اتصال نوع اول استحکام بیشتری را از اتصال نوع دوم فراهم می کند. اما نمونههای دارای اتصال نوع دوم دارای حداکثر نیرو بر واحد جرم و نیروی خرابی بر واحد جرم بیشتری میباشند.

بنابراین درصورتی که در طراحی، کاهش وزن حائز اهمیت نباشد (مانند صنعت ریلی)، استفاده از اتصال نوع اول منطقی به نظر میرسد، در غیر اینصورت (مانند صنایع هوا فضا) استفاده از اتصال نوع دوم پیشنهاد میشود.

4-تحليل عددى

1-4- توصيف مدل عددى

در این پروژه یک مدل عددی با استفاده از نرمافزار R7 -R7 IS-DYNA 971- R7 برای شبیهسازی آزمونها پیشنهاد گردید.

جهت انجام تحلیل عددی در این پروژه، پس از ایجاد مدل هندسی در هریک از حالات، برای ایجاد شبکه، مدل در نرمافزار هایپرمش وارد گردید. لازم به ذکر است که تکیهگاهها و سمبه نیز در هر حالت مدل شدند. به منظور کاهش تعداد المانها و کاهش زمان حل، با استفاده از تقارن کافی است که فقط ^{4/} ورق مدل گردید و قیود تقارن اعمال گردید درحالی که تیرها به طور کامل مدل شدند. شبکه مربعی دوبعدی برای لانه زنبوری ایجاد گردید و برای سایر اجزاء شبکه هشتوجهی سه بعدی مورداستفاده قرار گرفت (لانه زنبوری solid و بقیه اجزاء bild مدل شدند). مراحل بررسی همگرایی نتایج تحلیل عددی انجام شده برای ورق با اتصال نوع اول به صورت نمودار در شکل 14 آورده شده است. این نمودار پیش بینی حداکثر میزان جابجایی نقطه مرکز ورق، بر حسب تعداد کل المانهای موجود در مدل را نشان می

تمامی تحلیلها با استفاده از روش explicit انجام شدند. در آزمونهای خمش، جابجایی برحسب زمان که از آزمایشات بدست آمد، به عنوان ورودی کار عددی مورد استفاده قرار گرفت و نیرو برحسب زمان بدست آمد. سمبه برای شبیه سازی آزمون خمش ورق، یک ورق صلب مدل گردید که دارای جابجایی با سرعت ثابت 5 mm/min می با قطر mm 5 مدل شدند و به تیر، تکیه گاهها و سمبه استوانه هایی صلب با قطر 5 mm 5 مدل شدند و به سمبه جابجایی ثابت 5 mm/min 5 اعمال گردید. با توجه به حداکثر جابجایی مشاهده شده در آزمون ها (15 mm/min 5) و سرعت انجام آزمون ها (5 mm/min 5)، زمان حل s 180 درنظر گرفته شد. بازه زمانی اولیه توسط نرمافزار تعیین گردید.



Fig. 14 FEM convergence analysis of plate with connection type 1 شكل 14 آناليز همگرايي تحليل المان محدود ورق با اتصال نوع اول

درطول حل، اندازه مرحله زمانی جدید با درنظر گرفتن حداقل مقدار در تمامی المانها و با استفاده از رابطه (1) بدست میآید.

$$\Delta t^{n+1} = TSSFAC \times min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\}$$
(1)

که در رابطه (1)، N تعداد المانها و TSSFAC طبق پیشنهاد راهنمای نرمافزار برای حالاتی که انفجار وجود ندارد، مقدار 0.9 درنظر گرفته میشود.

شرایط تماس contact surface to surface بین سمبه و رویه فوقانی اعمال گردید و شرایط تماس contact tied nodes to surface بین لانه زنبوری و رویههای فوقانی و تحتانی و اتصال با رویههای فوقانی و تحتانی اعمال گردید. شکل 15 و شکل 16شرایط مرزی و بارگذاری را برای ورقها و تیرها نشان میدهند.

خواص رویههای ساندویچ در سه جهت با استفاده از آزمون تجربی بر اساس استاندارد ASTM D638 بدست آمد[16] و رفتار پلاستیک اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش- کرنش دو خطی⁽ مدل شد[17]. خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری در جدول 3 و خواص مکانیکی رویههای GRP در جدول 4 قید شده است.



Fig. 15 Boundary conditions and loading for plates شکل 15 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق ها



Fig. 16 Boundary conditions and loading for plates شکل 16 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق ها

	دول 3 خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری
Table 3 Mechanical properties	of honeycomb and connections

تنشر		يب	ضر	J	مدوا		چگالی		جنس	اجزاء
يم(a	تسلب	سون	پوآد	بک	الاستب	((kg/m ³)			
				(0	SPa)					
1	45.0	0	.330		68.3		2690)	آلومينيوم	اتصالات
									6063-T5	
	90.0	0	.330		69.3		2680)	آلومينيوم	لانه
									5052-O	زنبورى

¹ bilinear

GRP	مكانيكى	4 خواص	جدول
-----	---------	--------	------

Table 4 Mechanical properties of GRP				
مقدار	خاصيت			
1540	چگالی (kg/m ³)			
44.6	مدول الاستیک در جهت 1 (GPa)			
17.0	مدول الاستیک در جهت 2 (GPa)			
16.7	مدول الاستیک در جهت 3 (GPa)			
0.079	ضريب پوآسون 12			
0.090	ضريب پوآسون 13			
0.353	ضريب پوآسون 23			
3.49	مدول برشی در جهت 1 (GPa)			
3.46	مدول برشی در جهت 2 (GPa)			
3.2	مدول برشی در جهت 3 (GPa)			
55.8	استحکام برشی (Mpa)			
1240	استحکام کششی طولی (Mpa)			
43.9	استحکام کششی عرضی (Mpa)			
179.0	استحکام فشاری عرضی (Mpa)			

رفتار رویههای کامپوزیتی تحت بار خمشی توسط معیار چانگ چانگ بررسی شده است که در نرم افزار از طریق تعریف ماده اورتوتروپ damage وارد گردید. ماده اورتوتروپ با شکست ترد انتخابی برای کامپوزیتها میباشد. ۵ خاصیت ماده در سه معیار مورد استفاده قرار می گیرند که این پارامترها در جدول 4 قید شدهاند.

رفتار اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش کرنش دوخطی معادل شدند که ماده Mat plastic kinematic از نرم افزار انتخاب گردید و خواص مکانیکی آنها طبق جدول 3 قرار داده شدند و مدول تانژانت صفر قرار داده شد. معیار خرابی مورد استفاده، معیار کرنش ماکزیمم میباشد. در نرم افزار، مقدار fs (elongation at break =failure strain)، با توجه به شبه-استاتیک بودن مسئله و این که المانها در این حالت دچار شکست نمیشوند و فقط دچار تغییرشکل میشوند (اتصال فقط تغییرشکل پلاستیک دارد و دچار ترک و گسیختگی نمیشود)، عدد بزرگی قرار داده شد.

2-4- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی 1-2-4-ورق با اتصال نوع اول

نمودار نیرو- جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 17 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 18 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم میباشند.

2-2-4- ورق با اتصال نوع دوم

نمودار نیرو- جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 19 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 20 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم میباشند.

3-2-4- تير با اتصال نوع اول

نمودار نیرو- جابجایی تیر با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 21 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 22 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم میباشند.





(تجربی و عددی)



Fig. 18 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1 (Numerical and experimental) (Numerical and experimental) شكل 18 مدهاى خرابى حاصل از آزمون خمش بر روى صفحه داراى اتصال نوع اول



Fig. 19 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending (Numerical and experimental) (Numerical and experimental) شكل 19 نمودار نيرو- جابجايي براي ورق هاي با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

(تجربی و عددی)

¹ Chang- Chang composite failure model





Fig. 20 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2 (Numerical and experimental)



Fig. 21 Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending (Numerical and experimental شكل 21 نمودار نيرو- جابجايي براى تيرهاى با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش

(تجربی و عددی)



Fig. 22 Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 1 (Numerical and experimental) $\,$

شکل 22 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع اول (تجربی و عددی)

4-2-4- تير با اتصال نوع دوم

نمودار نیرو- جابجایی تیر با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 23 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 24 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم میباشند.



Fig. 23 Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending (Numerical and experimental)

شکل 23 نمودار نیرو- جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش (تجربی و عددی)



Fig. 24 Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 2 (Numerical and experimental)

شکل 24 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع دوم (تجربی و عددی)

5-تحليل پارامتری

برای هر یک از بارگذاریهای خمش و ضربه سرعت پایین و برای هر یک از اتصالات، دو تحلیل پارامتری روی طول اتصال و ضخامت اتصال انجام شده است.

برای تحلیل پارامتری روی ضخامت، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر t در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار 0.25 mm افزایش داده شد و منحنیهای نیرو- جابجایی در آزمون خمش ورق استخراج شدند. برای تحلیل پارامتری روی طول، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر l در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار mm 5 افزایش داده شد و منحنیهای نیرو-جابجایی در آزمون خمش استخراج شدند.

نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 1 در ضخامتهای مختلف اتصال، در شکل 25 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 25 مشاهده میشود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی نیرو- جابجایی در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش می ابد. همچنین مشاهده میشود که با افزایش ضخامت سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می ابد. در حقیقت با افزایش ضخامت تصل، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول نشان می دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، با افزایش 7.36% در ضخامت، جرم به مقدار %9.8%

از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 2 در ضخامتهای مختلف اتصال، در شکل 26 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 26 مشاهده میشود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی تنش-کرنش در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش مییابد. همچنین مشاهده می-شود که با افزایش ضخامت، سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می-یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت اتصال، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 6 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت نشان میدهد. همانطور که در این جدول مشاهده میشود، با افزایش ضخامت نشان میدهد. همانطور که در این جدول مشاهده میشود، با افزایش 3.2 فزایش می یابند.



Fig. 25 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection thicknesses شكل 25 نمودار نيرو- جابجايي براى ورق هاى با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در ضخامتهاى مختلف اتصال

جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول **Table 5** mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 1

3.5	3.25	3	ضخامت (mm)
0.386	0.37	0.353	جرم (Kg)
495.8458	479.4984	461.8391	جذب انرژی (J)
1284.57	1295.94	1308.33	جذب انرژی در
			واحد جرم (J/kg)



Fig. 26 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection thicknesses شكل 26 نمودار نيرو-جابجايى براى ورق.هاى با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در

ضخامتهای مختلف اتصال

در بخش انتهایی نمودارها در شکل 26، در ضخامتهای بالا، شیب نمودارها به شدت افزایشی می شود که علت آن این است که قسمتهای بالا و پایین اتصال به هم رسیده و روی هم فشرده می شوند و پدیدهای مانند چگالش در لانه زنبوریها اتفاق می افتد که باعث بالا رفتن شدید نیرو می شود.

نمودار نیرو- جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی در طولهای مختلف اتصال برای نمونه شامل اتصال نوع 1 در شکل 27 و برای اتصال نوع 2 در شکل 28 ارائه گردیده است.

همانطور که در شکل 27 و شکل 28 مشاهده میشود، افزایش طول اتصال تاثیر قابل توجهی بر نمودار نیرو- جابجایی در هیچ یک از دو اتصال ندارد.

جدول ۶ تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع دوم Table 6 mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 2

2.5	2	ضخامت (mm)
0.178	0.145	جرم (Kg)
321.1732	305.0765	جذب انرژی (J)
1804.38	2103.97	جذب انرژی در واحد
		جرم (J/kg)



Fig. 27 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection lengths

شکل 27 نمودار نیرو- جابجایی برای ورقهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



Fig. 28 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection lengths

شکل 28 نمودار نیرو- جابجایی برای ورقهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در طولهای مختلف اتصال نشریه علوم و فناوری **کا** *م***پو** *زیت*

Composite Panels Joined by Fasteners" Composites: Part B, Vol. 32, pp. 299-308, 2001.

- [15] Dodkins, A.R. Shenoi, R.A. and Hawkins, G.L., "Design of Joints and Attachments in FRP Ships' structures", Marine structures, Vol. 7, pp. 365-398, 1994.
- [16] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638, 2016.
- [17] Hufnagel W., "Key to Aluminum Alloys: Designations, Compositions, Trade Names of Aluminum Materials", the University of Michigan, 1982.

6-نتيجەگىرى

در این پروژه دو نوع اتصال ساندویچی درنظر گرفته شد و بر روی هر دو اتصال، آزمونهای خمش بر روی تیر و ورق انجام شدند. هر دو اتصال از آلیاژAL 6063-T5 ساخته شدند اما هندسه آنها متفاوت بود. نتایج نشان داد که استحکام اتصال نوع اول تقریبا 2 برابر استحکام اتصال نوع دوم میباشد ولی استحکام ویژه ورق با اتصال نوع اول کمتر از اتصال نوع دوم میباشد. البته با توجه به اینکه ممان اینرسی مقطع اتصال نوع اول بیشتر از ممان اینرسی مقطع اتصال نوع دوم است، بیشتر بودن استحکام اتصال نوع اول قابل پیشربینی میباشد.

تحلیل پارامتری روی طول و ضخامت دو اتصال انجام گرفت. در هر دو نوع اتصال، افزایش ضخامت اتصال منجر به استحکام بیشتر و جذب انرژی بیشتر میشود ولی استحکام ویژه و جذب انرژی ویژه کاهش مییابد. به علاوه، تغییر طول اتصال تاثیر چشمگیری بر روی استحکام نداشت.

7-مراجع

- Safari, M. and Biglari, H., "Frequency Dependent Damped Vibration of Composite Sandwich Beam With Viscoelastic and Transverse Flexible core Based on GHM Method" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 397-408, 2017. (In Persian)
- [2] Pirmohammadi, N. and Liaghat, G.H. and Hossein-Pol, M., "Experimental Investigation on Ballistic Behavior of Sandwich Panels Made of Honeycomb Core" Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014. (In Persian)
- [3] Hassanpour Roudbeneh, F. and Liaghat, Gh. Sabouri, H. and Hadavinia, H., "Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading" Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 23-31, 2016. (In Persian)
- [4] Azarafza, R. Davar, A. and Mahmoodi, A., "Three-point Bending Test of Metal and Composite Sandwich panels with Grid Stiffened Core" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017. (In Persian)
- [5] Vahdatazad, N. Ebrahimi, S. and Liaghat, G. H., "Oblique Crashworthiness Optimization and Sensitivity Analysis of Tapered Sandwich Columns" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 25-34, 2017. (In Persian)
 [6] Cao, J. and Grenestedt, J.L., "Design and Testing of Joints for
- [6] Cao, J. and Grenestedt, J.L., "Design and Testing of Joints for Composite Sandwich/Steel Hybrid Ship Hulls" Composites: Part A, Vol. 35, Issue 9, pp. 1091–1105, 2004.
- [7] Bitzer, T., "Honeycomb Technology", 1st edition, chapman & Hill, 1997.
- [8] Toftegaard, H. and Lystrup, A., "Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships" Composites: Part A, Vol. 36, pp. 1055–1065, 2005.
- [9] Bunyawanichakul, P. and Castanie, B. and Barrau, J. J., "Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures" Applied Composite Materials, Vol. 12, pp. 177–191, 2005.
- [10] Bozhevolnaya, E. Lyckegaard, A. Thomsen, O.T. and Skvortsov V., "Local Effects in the Vicinity of Inserts in Sandwich Panels", Composites: Part B, Vol. 35, pp. 619–627, 2004.
- [11] Niklas, K., "Search for Optimum Geometry of Selected Steel Sandwich Panel Joints" Polish Maritime Research, N. 2(56), Vol 15, pp. 26-3, 2008.
- [12] Heimbs, S. and Pein, M., "Failure Behavior of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts" Composite Structures, Vol. 89, pp. 575–588, 2009
- [13] Song, K. Choi, JY. Kweon, JH. Choi, JH. and Kim, KS., "An Experimental Study of The Insert Joint Strength of Composite Sandwich Structures" Composite Structures, Vol. 86, pp. 107–113, 2008.
- [14] Demelio, G. Genovese, K. and Pappalettere, C., "An experimental Investigation of Static and Fatigue Behavior of Sandwich

643

sive of the second