

# مدل‌سازی اجزای محدود اتصال T شکل در پانل‌های ساندویچی در معرض بارگذاری کششی

سید محمدرضا خلیلی<sup>۱\*</sup>; آیدین غزنوی اسگوئی<sup>۲</sup>

## چکیده

یکی از نقاط ضعف پانل‌های ساندویچی اتصالات آنها است که بر روی کاربرد گسترده آنها اثر می‌گذارد. اتصال T شکل یکی از متداول‌ترین اتصالات پانل‌های ساندویچی است. این مقاله به بررسی عددی این اتصال در بارگذاری استاتیکی می‌پردازد. درستی نتایج به دست آمده از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته بررسی شدند. در حالت کلی، نیروی شکست پیش‌بینی شده از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته همخوانی خوبی دارد. برای مدل‌سازی چسب موجود در اتصال، از المان‌های تماسی و طرح ماده منطقه چسبیده استفاده شده است. همچنین با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار انسیس قابلیت آسیب برای هسته پانل‌های ساندویچی تعریف شده است. در نتیجه هر دو حالت شکست اتصال T شکل (شکست برشی هسته و گسیختگی چسب) بررسی شده است. در مدل‌سازی پانل‌های ساندویچی، از چهار فوم دیوینیسول اچ صد، اچ صد و شصت، اچ دویست و پنجاه، اچ سی پی هفتاد استفاده شده است تا کارایی اتصال در مواد مختلف بررسی شود. در ادامه برای بررسی اثر هندسه اتصال، با تغییر زاویه فوم مثلثی، نه طرح مختلف هندسی ساخته شد. بررسی‌ها نشان دادند که تغییر جنس هسته پانل ساندویچی، علاوه بر تغییر حالت شکست اتصال، باعث افزایش چشمگیر نیروی شکست اتصال می‌شود.

**کلمات کلیدی:** اتصال T شکل، پانل ساندویچی، حالت شکست، روش المان محدود، اتصالات چسبی

## *Finite Element Modeling of T-joint in Sandwich Panels under Pull-off Loads*

S. M. R. Khalili and A. Ghaznavi

### ABSTRACT

One of the disadvantages of sandwich panels is their joints, which usually decrease the efficiency of sandwich structures. The T-joint is one of the most common joints for sandwich panels. This paper deals with the numerical study of the T-joint under static loading. The results of FEM analysis are validated by the experimental results available in the literatures. In general, the failure load predicted by the FEM is in good agreement as compared with the experimental results. In the modeling of the adhesive between joint components, contact elements and cohesive zone material model are used. In addition, damage and core shear failure of the base panel are modeled by using a written macro code in the ANSYS software. Therefore, both failure modes of sandwich panel joint are investigated. In addition, the effect of the joint geometry and material of the core of sandwich panels on failure modes and failure load are studied. Finally, the results show that changing the material of the core of the sandwich panel increases the joint failure load.

**KEYWORDS:** T-joint, Sandwich panel, Failure modes, Finite element analysis, Adhesive joint

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۲۶

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/۲۵

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول و استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، smrkhalili2005@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، aidin.ghaznavi@yahoo.com

اتصال بررسی نمودند. آنان نشان دادند که برای استفاده از مزایای فیلت ویسکو الاستیک، باید ابعاد اتصال را افزایش داد. تورگو و سان [۱۶] نیز به بررسی عملکرد اتصالات پانل‌های ساندویچی پرداختند. در تحقیق آن‌ها دو حالت شکست برای اتصالات پانل‌های ساندویچی شناخته شد: (۱) جدایی بین پانل‌ها و (۲) شکست برشی هسته در پانل افقی. تتوگولو و همکارانش [۹] اعلام نمودند که وجود عیوب ناشی از ساخت، مانند حباب‌ها در منطقه فیلت اثر چشمگیری در کاهش مقاومت اتصال دارد. در حالت کلی، اتصال را می‌توان با ثابت نگه داشتن پانل افقی و وارد نمودن نیروی عمودی فشاری به پانل عمودی [۴]، ثابت نگه داشتن پانل افقی و کشش عمودی پانل عمودی [۹]، [۱۰] و یا کشش ۴۵ درجه پانل عمودی [۵]، [۶]، [۱۱] و یا تست خمش سه نقطه با فشار عمودی زیر محل اتصال [۱۱] بارگذاری نمود.

لوسیا و همکارانش [۱] به بررسی عددی و تجربی اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی در بارگذاری‌های دینامیکی پرداختند. همچنین اثر وجود عیوب ساخت در اتصال را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که اتصال با فیلت مثلثی شکل عملکرد بهتری نسبت به اتصال با فیلت دایروی شکل با شعاع کوچک دارد. شنوی و همکارانش [۱۷] در مقاله‌ای دیگر اثرات حرارت رطوبتی طولانی مدت در سازه‌های ساندویچی را با استفاده از تحلیل تنش ترموالاستیک مورد بررسی قرار دادند. ناصر و همکارانش [۱۸] به بررسی شش طرح متفاوت پرداختند و سعی نمودند با مطالعه نحوه توزیع کرنش در این اتصالات، بهترین شکل ممکن را برای اتصال T شکل معرفی نمایند. تافتگارد و لیستراپ [۱۲] اتصال T شکل جدیدی را طراحی نمودند که وزن آن شصت درصد کمتر از اتصالات متداول بوده، در حالی که مقاومت آن بیست درصد بیشتر از آن‌ها است. آنان در اتصال خود به جای فیلت دایروی شکل و لایه‌های تقویت‌کننده، از دو فوم مثلثی شکل برای اتصال استفاده نمودند.

در اکثر مطالعات عددی انجام شده، چسب و شکست برشی هسته پانل طراحی نشده اند. بنابراین طرح‌های ساخته شده، توانایی مدلسازی و بررسی حالت‌های شکست را نداشته و توانایی پیش‌بینی بیشترین نیروی شکست را ندارند. همچنین دلیل این‌که تافتگارد و لیستراپ [۱۲]، در ساخت پانل‌های ساندویچی به کار رفته در اتصال از فومی با مقاومت برشی به نسبت پایین استفاده نمودند، اتصال بر اثر شکست برشی هسته دچار گسیختگی شده و در پایان بیشترین نیروی شکست خود اتصال بدست نیامد. به همین دلیل انجام تحلیل‌های دقیق که قابلیت پیش‌بینی حالت‌های شکست را داشته باشند، با هسته‌های

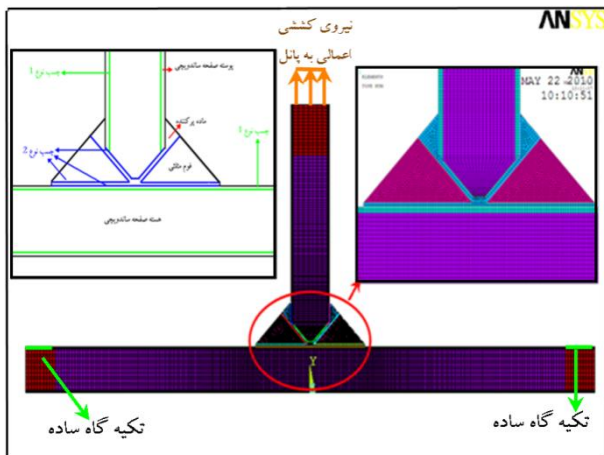
استفاده از پانل‌های ساندویچی در صنایع مختلف مانند هوافضا، کشتی‌سازی، حمل‌ونقل، عمران و غیره در حال گسترش است. به طور معمول پانل‌های ساندویچی با پوسته‌های کامپوزیتی، بدلیل مزایای فراوان مانند مقاومت خمشی، سفتی خمشی، وزن کم و مقاومت بالا در برابر خوردگی استفاده می‌شوند. اتصال چسبی از جمله پرکاربردترین اتصالات پانل‌های ساندویچی با پوسته‌های کامپوزیتی هستند. مزیت این نوع اتصال نسبت به اتصالات مکانیکی مانند پیچ‌وپوچ، نبودن آسیب‌های محلی و همچنین ضریب تمرکز تنش بالا در اجزای اتصال است. یکی از متداول‌ترین این اتصالات، اتصال T شکل است. این اتصال شامل پایه اصلی افقی، پایه عمودی و فیلت است. هدف از فیلت، انتقال نیرو و ایجاد پیوستگی بین پانل عمودی و افقی است [۱]. مقالات زیادی به مطالعه و بررسی اتصالات T شکل در کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند [۲]-[۱۱].

در حالت کلی اتصال T شکل، در دو نوع مثلثی و دایروی موجود است. تفاوت این اتصالات در شکل فیلت و فیلر آن‌ها است [۱۲]. اتصال شکل (۱) نشان‌دهنده نمونه‌ای از اتصال T شکل مثلثی است. چرا که در آن فیلت و فیلر مثلثی شکل هستند، در حالیکه در اتصال T شکل دایروی، فیلت و فیلر دایروی شکل هستند.

شنوی و همکارانش [۵]، [۶] دریافتند که شعاع فیلت و ضخامت لایه‌های تقویت‌کننده اثر زیادی در عملکرد اتصال دارند. در حالت کلی شعاع زیاد فیلت و ضخامت کم لایه‌های تقویت‌کننده باعث افزایش کارایی اتصال T شکل کامپوزیتی می‌شود. هارماوان و همکارانش [۷]، [۸] نیز به بررسی عملکرد اتصال T شکل مثلثی در اثر کشش ساده پرداختند. آن‌ها متوجه شدند که در بارگذاری کششی، جدایی بین فیلت و لایه‌های تقویت‌کننده باعث خمیدگی لایه‌های تقویت‌کننده به سمت بیرون می‌شود. همچنین بررسی آنان اهمیت فیلت در انتقال نیرو را بین اجزای اتصال نشان داد.

شنوی و همکارانش [۱۱] به بررسی اثر جدایش لایه‌های تقویت‌کننده با روش اجزای محدود پرداختند. استیکر و همکارانش [۱۳]، [۱۴] نیز از الیاف عرضی برای افزایش مقاومت اتصال در بارگذاری‌های مختلف استفاده نمودند. آنان دریافتند که در بارگذاری خمشی تعداد ردیف‌های الیاف تقویتی اثر چشمگیری در افزایش مقاومت خمشی اتصال دارد. بلیک و همکارانش [۱۵] اثر استفاده از فیلت ویسکو الاستیک را بر

گفته شد، اتصال دارای دو حالت شکست است: (۱) شکست برشی هسته و (۲) گسیختگی چسب و جدا شدن اعضای اتصال. در ادامه توضیح مختصری درباره نحوه مدلسازی هر یک از حالت‌های شکست داده می‌شود:



شکل (۱): موقعیت مواد بکار رفته در اتصال، طرح المان محدود اتصال T شکل پانل ساندویچی و شرایط مرزی اتصال

## ۲-۱- مدل‌سازی شکست برشی هسته (حالت اول شکست اتصال)

برای مدل‌سازی شکست برشی هسته، یک کد ماکرو در نرم‌افزار انسیس نوشته شده است. از راه اجرای این کد، بارگذاری در چندین مرحله انجام می‌شود. بین این مراحل تمام المان‌های هسته پانل‌های ساندویچی انتخاب می‌شوند و مقدار تنش برشی آن‌ها در جدولی ذخیره می‌شود. سپس تنش برشی آن‌ها با مقدار تنش برشی مجاز ماده موردنظر مقایسه شده و المان‌هایی که تنش برشی آن‌ها از حد مجاز بیشتر باشد، انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، با استفاده از قابلیت تولد و مرگ المان، المان‌های انتخاب شده از روند تحلیل حذف می‌شوند و بارگذاری، بدون المان‌های حذف شده ادامه می‌یابد. این روند تا شکست کامل سازه و یا رسیدن به بیشینه بار وارده به سازه ادامه می‌یابد. برای دقیق بودن جواب کد، باید از المان‌های کوچک برای مش‌بندی نواحی حساس اتصال استفاده نمود تا المان‌ها به تدریج وارد محدوده غیرمجاز شوند. همچنین باید بار وارده به اتصال را به تدریج افزایش داد (تعداد مراحل بارگذاری و تعداد حلقه‌های کد زیاد باشد) تا بتوان اثر افزایش بار را به خوبی دید.

## ۲-۲- گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال (حالت دوم شکست اتصال)

برای مدل‌سازی چسب و گسیختگی آن، از المان‌های تماسی دو بعدی کانتکت صد و هفتاد و نه و تارگت صد و شصت و نه

مقاوم‌تر ضروری بود. در این مقاله از چهار ماده با مقاومت‌های مختلف برای مدل‌سازی هسته استفاده شده است تا علاوه بر بررسی اثر جنس هسته بر عملکرد اتصال، بتوان مقاومت نهایی خود اتصال را نیز محاسبه نمود. علاوه بر آن در این مقاله اثر تغییر عامل هندسی زاویه فوم مثلثی بر عملکرد اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

برای مدل‌سازی چسب از المان‌های تماسی به همراه ماده منطقه چسبیده استفاده شده است تا بتوان گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال از یکدیگر را به خوبی طراحی نمود. با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار انسیس، شکست برشی در هسته پانل نیز مدل‌سازی شده است. همچنین درستی نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مقالات گذشته بررسی شدند.

## ۲- بسط طرح اجزای محدود

بدلیل این که مقدار کرنش‌ها در راستای ضخامت اتصال نسبت به سایر ابعاد ناچیز بوده و همه نیروهای وارده به اتصال در یک صفحه هستند، از فرض کرنش صفحه‌ای برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده است. برای رسیدن به دقت بالاتر طرح‌ها به صورت غیر خطی تحلیل شده و مش‌بندی‌ها منظم انجام گرفته‌اند، به طوری که در نواحی حساس‌تر از مش‌های ریزتری نسبت به سایر نواحی استفاده شده است تا علاوه بر حفظ دقت تحلیل‌ها بتوان سرعت آن‌ها را افزایش داد. اتصال مش‌بندی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در حالت کلی، اتصال گفته شده از شش ماده متفاوت تشکیل شده که عبارتند از: (۱) کامپوزیت (پوسته پانل‌های ساندویچی) (۲) فوم پی‌وی‌سی (هسته پانل‌های ساندویچی) (۳) فیلت (فوم مثلثی) (۴) فیلر (ماده پرکننده) (۵) چسب شماره یک، بین اجزای مختلف اتصال (۶) چسب شماره دو، بین پوسته و هسته پانل ساندویچی. خواص تمام مواد به کار رفته در تحلیل‌ها در جدول (۱) و موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان شده است. در جدول (۱)  $E_i$  نشان‌دهنده مدول یانگ ماده در راستای  $i$ ،  $G_{xy}$ ،  $(i = x, y)$ ، مدول برشی ماده در صفحه  $Y$ ، به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت تسلیم ماده در جهت  $x, y$ ،  $S$ ، مقاومت برشی ماده و  $\nu_{xy}$  بیانگر ضریب پواسون ماده است. برای مش‌بندی بخش‌های مختلف اتصال مانند پوسته، هسته، فیلت و فوم‌های مثلثی، از المان دو بعدی پلین هشتاد و دو استفاده شده است. این المان یک المان هشت گره‌ای ایزوپارامتریک است. برای رسیدن به نتایج دقیق، علاوه بر مش‌بندی منظم و مدلسازی غیرخطی مواد، حالت‌های شکست اتصال نیز طراحی شده‌اند. همان‌طور که در بخش قبل

جدول (۱): خواص مکانیکی مواد بکار رفته در مدل‌سازی اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی

مواد مختلف	نوع مواد	$E_x$ (MPa)	$X$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$Y$ (MPa)	$G_{xy}$ (MPa)	$S$ (MPa)	$\nu_{xy}$
پوسته صفحات ساندویچی	L1 Vinylester infusion [۱۲]	۲۶۱۰۰	۴۱۷	۱۱۵۰۰	۹	۴۴۰۰	۳۱/۴	۰/۱۴
ماده پرکننده	Crestomer I152 PA [۱۲]	۵۰۰	۱۵	۵۰۰	۱۵	۱۷۰	۸/۷	۰/۴۷
فوم مثلثی	Divinycell HD250 PVC [۱۹ و ۱۲]	۲۸۰	۶/۲	۲۸۰	۶/۲	۱۱۰	۴/۱	۰/۳
هسته صفحات ساندویچی	Divinycell H100 PVC [۲۰ و ۱۲]	۱۰۵	۲/۴	۱۰۵	۲/۴	۴۰	۱/۴	۰/۳
هسته صفحات ساندویچی	Divinycell H160 PVC [۲۱]	۱۷۰	۳/۹	۱۷۰	۳/۹	۷۳	۲/۶	۰/۲۷
هسته صفحات ساندویچی	Divinycell H250 PVC [۲۰]	۲۸۰	۶/۲	۲۸۰	۶/۲	۱۰۸	۴/۵	۰/۲۴
هسته صفحات ساندویچی	Divinycell HCP70 PVC [۲۲]	۴۵۰	۱۱	۴۵۰	۱۱	۱۴۰	۵/۲	۰/۳

جدول (۲) نشان‌دهنده خواص مواد چسب به کار رفته در بخش‌های مختلف اتصال است. همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، در مجموع دو نوع چسب متفاوت در اتصال به کار رفته است. چسب شماره یک برای چسباندن اجزای مختلف اتصال به یکدیگر، مثل فیلت و فوم‌های مثلثی به کار رفته است. چسب شماره دو نیز برای چسباندن پوسته پانل ساندویچی به هسته آن استفاده شده است.

### ۳- بررسی درستی نتایج بدست آمده از حل عددی

برای بررسی درستی جواب‌های بدست آمده از حل عددی، نتایج آن با نتایج تست تجربی تافتنگارد و لیستراپ [۱۲] مقایسه شد. به همین دلیل، در این بخش خلاصه‌ای از روند تست تجربی انجام شده توسط آنان ارائه می‌شود. در تحقیق تجربی [۱۲]، تست کشش در دستگاه کشش با سرعت ده میلی‌متر در دقیقه انجام شده است. بار کششی به پانل عمودی اتصال T شکل اعمال شده و پانل پایه ثابت نگه داشته شده است. طول معلق تکیه‌گاه نه‌صد و پنجاه میلی‌متر است. شرایط مرزی اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است. گفتنی است که برای مدل‌سازی، از ابعاد مرجع [۱۲] استفاده شده است.

#### ۳-۱- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان :

نمودار نیرو-تغییر مکان یکی از مهم‌ترین خروجی‌های تست کشش اتصال T شکل است که بیانگر رفتار و مقاوت کلی اتصال است. به همین دلیل برای اطمینان از درستی جواب‌های بدست آمده باید ابتدا نمودار به دست آمده از تحلیل عددی را با نمودار بدست آمده از تست تجربی مقایسه نمود.

شکل (۲) نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از حل عددی را با نمودار تست تجربی مقایسه می‌نماید. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این دو نمودار هم‌خوانی بسیار مناسبی

با طرح ماده منطقه چسبیده استفاده شده است. این طرح جدایش چسب را با رفتار دو خطی شبیه‌سازی می‌کند [۲۳]. در این طرح تنش‌های تماسی عبارتند از:

$$p = k_n u_n (1 - d) \quad (۱)$$

$$\tau_y = k_t u_y (1 - d) \quad (۲)$$

$$\tau_z = k_t u_z (1 - d) \quad (۳)$$

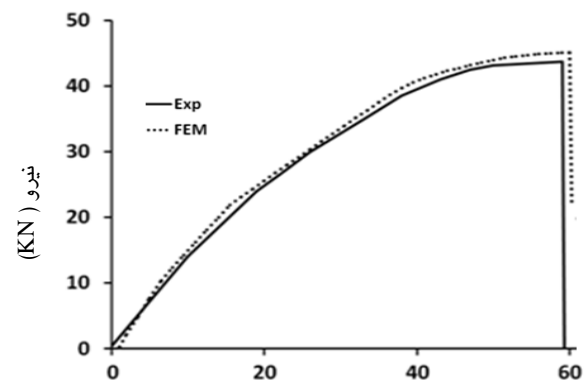
P تنش تماسی عمودی (کششی)،  $\tau_i$  تنش تماسی مماسی در راستای  $i$  ( $i=y,z$ )،  $k_i$  سفتی تماسی عمودی،  $k_t$  سفتی تماسی مماسی،  $u_n$  فاصله عمودی تماس،  $u_i$  فاصله لغزشی تماس در راستای  $i$  ( $i=y,z$ ) و  $d$  عامل جدایش است. در حالت کلی، به کمک عامل جدایش سه حالت شکست مختلف برای چسب تعریف می‌شود [۲۴]. این حالت‌ها عبارتند از:

- حالت اول شکست: در این حالت، شکست چسب بر اثر تنش تماسی عمودی است.
- حالت دوم شکست: در این حالت شکست چسب بر اثر تنش‌های تماسی لغزشی است.
- حالت سوم شکست (شکست ترکیبی): شکست چسب بر اثر مجموع تنش تماسی عمودی و لغزشی است. از آنجا که در اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی، شکست و گسیختگی چسب بر اثر مجموع تنش‌های تماسی عمودی و لغزشی است، حالت سوم شکست (شکست ترکیبی) برای مدل‌سازی گسیختگی چسب در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): خواص انواع چسب بکار رفته در اتصال [۱]

خواص چسب	چسب شماره ۱	چسب شماره ۲
چگالی بین لایه ای ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۹۰۰	۱۹۰۰
سفتی بین لایه ای (GPa)	۷۰	۷۰
بیشترین تنش عمودی (MPa)	۹	۹
بیشترین تنش برشی (MPa)	۳۱/۴	۳۱/۴
انرژی بحرانی شکست عمودی ( $\text{J/m}^2$ )	۱۵۰	۱۱۵۰
انرژی بحرانی شکست برشی ( $\text{J/m}^2$ )	۳۰۰	۲۳۰۰

دارند. به طوریکه نیروی شکست پیش‌بینی شده توسط حل عددی فقط در حدود پنج درصد با نیروی شکست تست تجربی اختلاف دارد.



جابجایی (میلی متر)

شکل (۲): نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از تست تجربی [۱۲] و حل عددی

### ۳-۲- مقایسه محل شکست اتصال:

نتایج حل عددی به کمک کد ماکرو نوشته شده در نرم‌افزار نشان دادند که حالت شکست اتصال مورد بحث، شکست برشی هسته پانل افقی است. شکل (۳-الف) المان‌هایی را نشان می‌دهد که در مراحل مختلف بارگذاری انتخاب شده و از روند تحلیل حذف شده‌اند. این المان‌ها، المان‌هایی هستند که تنش برشی آن‌ها از تنش برشی مجاز هسته پانل ساندویچی بیشتر شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود؛ المان‌های حذف شده، شکستی با زاویه تقریبی ۴۵ درجه را مدل‌سازی می‌نمایند که محل آن کمی دورتر از ناحیه اتصال است.

شکل (۳-ب) نشان‌دهنده نمونه آزمایشگاهی، بعد از اتمام بارگذاری و شکست است. با توجه به این شکل؛ شکست حاصل از تست تجربی نیز به صورت برشی و کمی دورتر از محل اتصال است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، حالت شکست پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود اتصال همان حالت شکستی است که در تست تجربی رخ داده است.

### ۴- تحلیل نتایج

#### ۴-۱- اثر مقاومت برشی هسته بر عملکرد اتصال

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، تافتگارد و لیستراپ

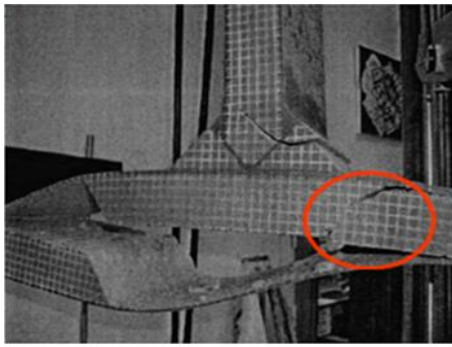
[۱۲] از فوم دیوینیسل اچ صد که دارای مقاومت برشی به نسبت پایینی است، برای ساخت هسته پانل ساندویچی استفاده نمودند. به همین دلیل، اتصال در اثر شکست برشی هسته گسیخته شد و مقاومت خود اتصال محاسبه نشد. از آنجا که محاسبه مقاومت نهایی خود اتصال ضروری به نظر می‌رسد، در تحلیل‌ها از ۴ فوم متفاوت برای مدل‌سازی هسته پانل استفاده شده است.

در ابتدا از فوم دیوینیسل اچ صد استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان دادند که مقاومت برشی فوم دیوینیسل اچ صد کمتر از توان اتصال است و به همین دلیل هسته دچار شکست برشی می‌شود. بیشترین نیرویی که اتصال در این شرایط تحمل می‌نماید ۴۵/۳ KN است.

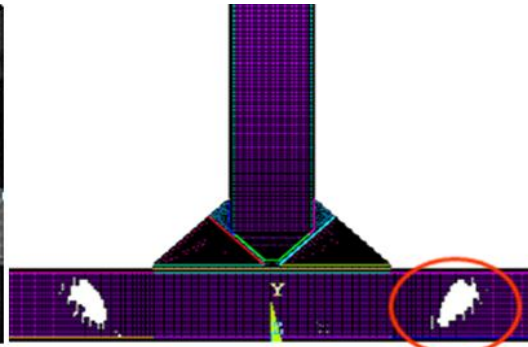
در مرحله بعد از فوم دیوینیسل اچ صد و شصت برای مدل‌سازی هسته استفاده شد. در این مرحله اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ و پنج درجه در برابر شصت میلی‌متر جابجایی دچار شکست نشد. هسته پانل ساندویچی در مقابل نیروهای برشی حاصله از جابجایی شصت میلی‌متری پانل عمودی مقاومت نموده و خود اتصال نیز گسیخته نشد. در مجموع اتصال نیرویی برابر با ۷۱/۹ KN را تحمل نمود. سپس از فوم دیوینیسل اچ دویست و پنجاه به عنوان هسته پانل استفاده شد که مقاوم‌ترین فوم در گروه دیوینیسل اچ است. در این حالت مقدار نیروی حاصله از شصت میلی‌متر جابجایی پانل عمودی برابر با ۱۱۰/۵ KN بود. اما همچنان اتصال مقاومت کرده و دچار گسیختگی نشد.

به همین دلیل در مرحله بعد از فوم دیوینیسل اچ سی پی هفتاد استفاده شد. این گروه (اچ سی پی) از فوم‌های دیوینیسل که کاربرد اصلی آن در ساخت شناورهای سطحی، زیر سطحی (مانند شناور زیر سطحی دابل ایگل ام‌کا سه) و سازه‌های محافظ است دارای خواص مکانیکی بسیار بالایی نسبت به سایر فوم‌های دیوینیسل است. به طوری که مدول یانگ فوم دیوینیسل اچ سی پی هفتاد بیش از چهار برابر مدول یانگ فوم دیوینیسل اچ صد و مدول برشی آن در حدود شش برابر مدول برشی فوم دیوینیسل اچ صد است. در این حالت نیروی اتصال در برابر شصت میلی‌متر جابجایی برابر با ۱۴۵/۹ KN بود، در حالی که هیچ کدام از اجزای اتصال دچار آسیب نشدند.



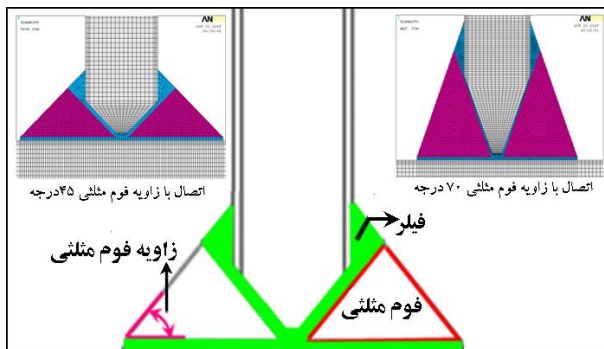


(ب)



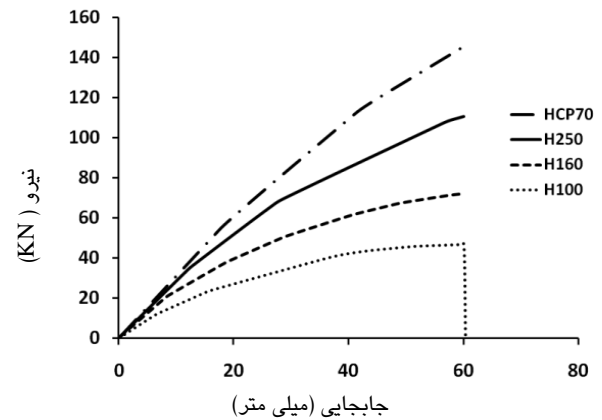
(الف)

شکل (۳): حالت و محل شکست اتصال T شکل در اثر تست کشش، الف) نتیجه حاصل از حل عددی، ب) نتیجه حاصل از تست تجربی [۱۲] به وضوح نشان داده شده است. همین‌طور دو مدلی که زاویه فوم مثلثی در آن‌ها ۴۵ و ۷۰ درجه می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل (۵): تغییر زاویه فوم مثلثی

در ابتدا رفتار طرح‌های هندسی با فوم دیوینیسل اچ‌صد مورد بررسی قرار گرفتند. اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه در جابجایی ۴۴ میلی‌متر، قبل از شکست برشی هسته گسیخته شد. سایر اتصالاتی که در مقابل نیروی وارده مقاومت کردند، رفتار یکسانی از خود نشان دادند و همه آن‌ها با حالت شکست هسته برشی در جابجایی شصت میلی‌متر و نیروی  $45/3 \text{ KN}$  گسیخته شدند. شکل (۶) نشان‌دهنده عملکرد طرح‌های هندسی مختلف با فوم دیوینیسل اچ‌صد است. سپس تحلیل‌ها با هسته فوم دیوینیسل اچ‌صد و شصت تکرار شدند. نمودار نیرو-تغییر مکان هر نه طرح هندسی، برای اتصال با هسته فوم دیوینیسل اچ‌صد و شصت در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه در جابجایی  $33/45$  میلی‌متر گسیخته شده است. در مجموع اتصال با زوایای فوم مثلثی ۲۵، ۳۰ و ۷۰ درجه در اثر گسیختگی چسب شکسته شدند، در حالیکه حالت شکست سایر زوایا (در این طرح، اتصال با هسته ای از جنس دیوینیسل اچ‌صد و شصت) شکست برشی هسته است.

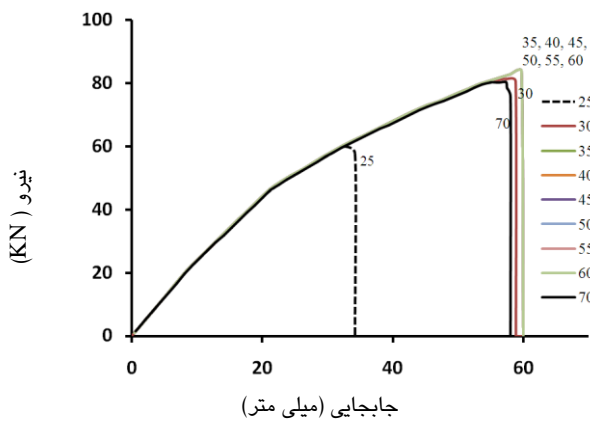


شکل (۴): اثر هسته بر عملکرد اتصال T شکل با فوم‌های مثلثی با زاویه ۴۵ درجه

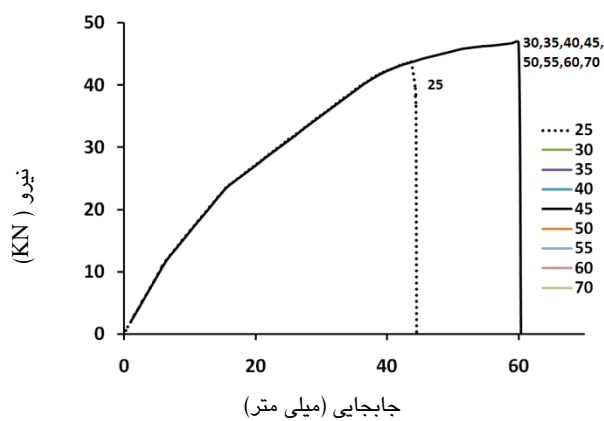
به همین دلیل میزان جابجایی پانل عمودی را افزایش داده تا در پایان اتصال در جابجایی  $87/8$  میلی‌متر و با نیروی  $175 \text{ KN}$  گسیخته شد. در شکل (۴) رفتار اتصال گفته شده (اتصال با فوم‌های مثلثی با زاویه ۴۵ درجه) با جنس هسته‌های متفاوت در مقابل  $60$  میلی‌متر جابجایی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییر جنس هسته باعث افزایش نیروی شکست از مقدار  $45/3 \text{ KN}$  (طرح با هسته از جنس دیوینیسل اچ‌صد) به مقدار  $175 \text{ KN}$  (مدل با هسته از جنس دیوینیسل اچ‌سی‌پی هفتاد) شد. به عبارت دیگر، این تغییر باعث افزایش  $286$  درصدی نیروی شکست شد.

#### ۲-۴- اثر زاویه فوم مثلثی بر عملکرد اتصال

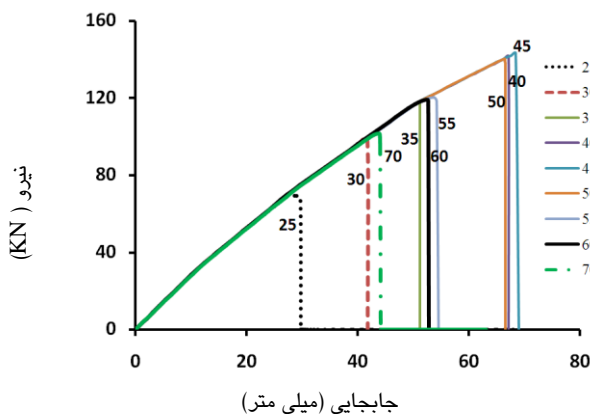
زاویه فوم مثلثی مهم‌ترین عامل هندسی است که بر عملکرد اتصال اثر می‌گذارد [۱۲]. به همین دلیل برای بررسی اثر این عامل، نه طرح هندسی متفاوت که فوم‌های مثلثی آن‌ها زوایای ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند. زوایا و سایر ابعاد اتصال طوری تغییر نمودند که حجم فیبر در تمام طرح‌ها یکسان باشد. در شکل (۵) فیبر (قسمت سبز رنگ)، فوم مثلثی و زاویه فوم که تغییر می‌کند



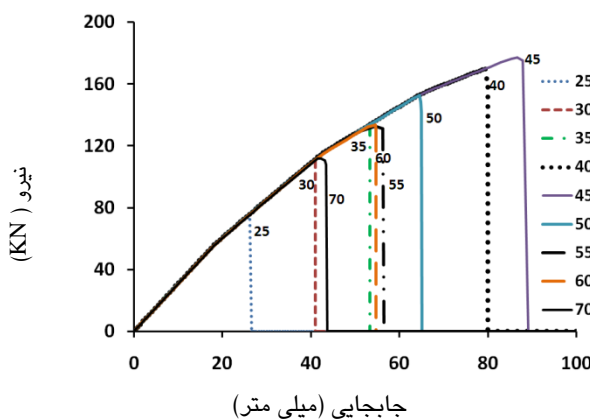
شکل (۷): عملکرد طرح‌های هندسی مختلف با فوم دیوینیسِل اچ‌صد و شصت



شکل (۶): عملکرد طرح‌های هندسی مختلف با فوم دیوینیسِل اچ‌صد



شکل (۸): عملکرد طرح‌های هندسی مختلف با فوم دیوینیسِل اچ دو سیست و پنجاه



شکل (۹): عملکرد طرح‌های هندسی مختلف با فوم دیوینیسِل اچ‌سی‌پی هفتاد

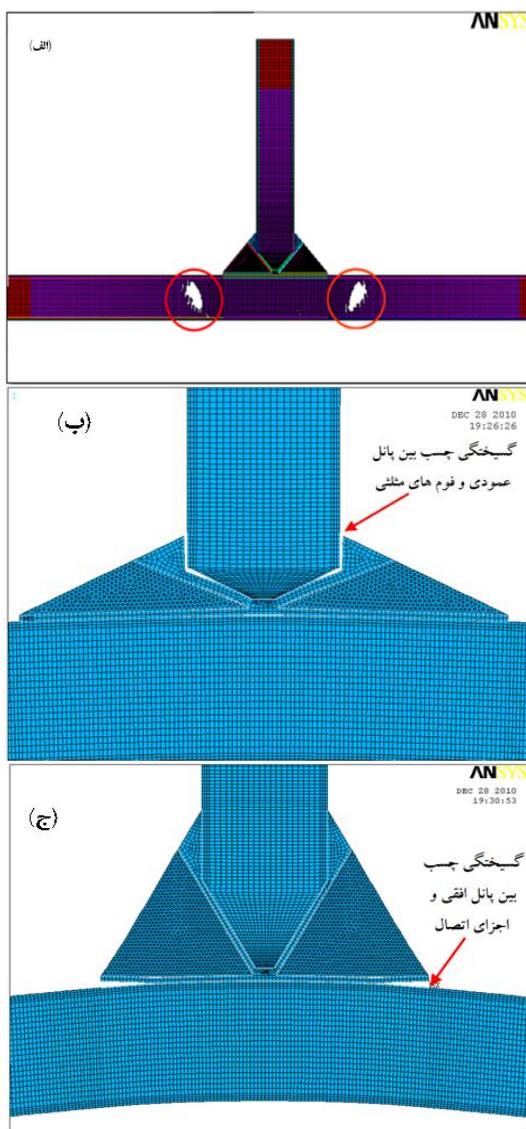
شکل (۱۰) نشان‌دهنده نیروی شکست طرح‌هایی است که هسته آن‌ها از جنس فوم دیوینیسِل اچ‌سی‌پی هفتاد (قوی‌ترین هسته در مدل‌سازی) و فوم دیوینیسِل اچ صد (ضعیف‌ترین هسته در مدل‌سازی) است. با مقایسه این نیروها می‌توان اثر مقاومت برشی هسته و تغییر زاویه فوم مثلثی را بهتر مورد بررسی قرار داد.

در ادامه اثر عامل هندسی زاویه فوم مثلثی در اتصالات با هسته دیوینیسِل اچ دو سیست و پنجاه بررسی شد. از آن‌جا که با افزایش سفتی هسته مقاومت پانل افقی در برابر جابجایی وارده افزایش می‌یابد، نیروی وارده به اتصال نیز بیشتر شد. رفتار مدل‌های مختلف اتصال در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه در اثر گسیختگی چسب، گسیخته شده و در برابر نیروی وارده مقاومت نکرده‌اند. اما اتصال با زاویه فوم مثلثی ۵۰، ۴۵ درجه، بدلیل شکست برشی هسته، صفحه ساندویچی افقی گسیخته شده‌اند.

در ادامه همه تحلیل‌ها با هسته از جنس فوم دیوینیسِل اچ‌سی‌پی هفتاد تکرار شد و مقدار جابجایی وارده به اتصال تا آنجایی افزایش یافت که همه اتصالات گسیخته شدند. این نوع بارگذاری به آن دلیل انجام شد که در مجموع بتوان اختلاف مقاومت نهایی تمام اتصالات را با یکدیگر مقایسه نمود. نمودار نیرو-تغییر مکان طرح‌های مختلف هندسی در این حالت در شکل (۹) نشان داده شده است. نکته قابل توجه آن است که رفتار تمام اتصالات تا لحظه قبل از گسیخته شدن به طور یکسان است. به طوری که نمودار نیرو-تغییر مکان تمام آنها قبل از گسیختگی روی یک خط است. همانطور که دیده می‌شود اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه بیش‌ترین و اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه کم‌ترین نیروی شکست را دارد. گفتنی است که حالت شکست همه مدل‌هایی که جنس هسته آن‌ها دیوینیسِل اچ‌سی‌پی هفتاد است، گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال است.

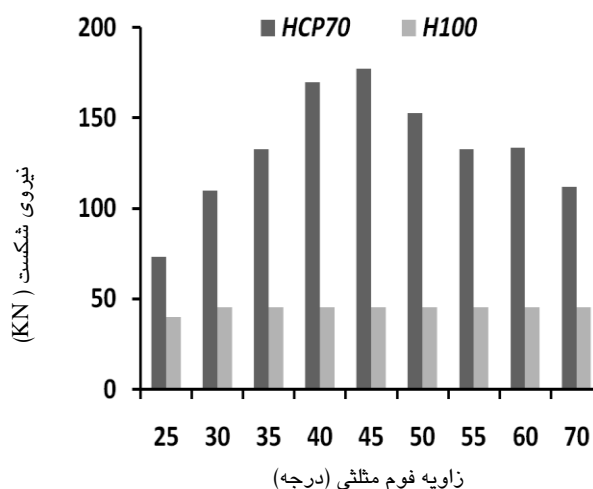
## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، طرحی دو بعدی برای تحلیل اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی ساخته شد. در طرح گفته شده از المان‌های تماسی و طرح منطقه چسبیده برای شبیه‌سازی گسیختگی چسب استفاده شده است. همچنین، شکست برشی هسته پانل‌های ساندویچی نیز با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار انسیس مدل‌سازی شده است.



شکل (۱۱): حالت شکست اتصال، الف) شکست برشی هسته پانل ساندویچی، ب) گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال برای اتصال با زوایای فوم مثلثی ۴۵ درجه تا ۷۰ درجه، ج) گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال اتصالات با زاویه فوم مثلثی ۲۵ تا ۴۰ درجه

همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود، تغییر جنس هسته پانل ساندویچی، باعث افزایش چند برابری نیروی شکست اتصال و مقاومت آن شد. علاوه بر آن تغییر مقاومت برشی هسته باعث تغییر حالت شکست اتصال شد. به طوری که حالت شکست در اتصال با هسته دیوینیسل اچ صد، شکست برشی هسته بوده در حالیکه حالت شکست در اتصال‌های با هسته دیوینیسل اچ‌سی‌پی هفتاد، شکست چسب می‌باشد. در شکل (۹) اثر زاویه فوم مثلثی نیز به خوبی دیده می‌شود. به طوری که با تغییر زاویه فوم مثلثی نیروی شکست اتصال به میزان ۱۴۱/۵٪ افزایش یافته است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در تست کشش، اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه، بهترین عملکرد را بین زاویه‌های ۲۵ تا ۷۰ درجه دارد.



شکل (۱۰): اثر جنس هسته و زاویه فوم مثلثی بر عملکرد اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی

در ادامه در شکل (۱۱) حالت‌های شکست اتصال نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد، اتصال T شکل دارای دو حالت شکست است (شکست برشی هسته و گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال). اما نکته مهم این است که در همه طرح‌های هندسی با حالت شکست گسیختگی چسب، گسیختگی چسب از یک نقطه شروع نمی‌شود. بلکه با تغییر زاویه محل شروع گسیختگی نیز تغییر می‌نماید. به طوری که در پایان مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه و بزرگتر از آن، اتصال به علت جدایش صفحه ساندویچی عمودی از اتصال گسیخته می‌شود. در حالی که در سایر اتصالات (اتصالات با زاویه فوم مثلثی ۲۵ تا ۴۰ درجه) جدایش صفحه ساندویچی افقی باعث گسیختگی اتصال می‌شود.



تغییر نمودند که در پایان حجم فیلر در همه طرح‌ها یکسان است. در ضمن برای بررسی اثر جنس هسته پانل ساندویچی بر عملکرد اتصال و حالت‌های شکست آن از چهار فوم متفاوت در مدل‌سازی استفاده شده است.

تحلیل‌ها نشان دادند که تغییر جنس هسته و افزایش مقاومت برشی آن باعث تغییر حالت شکست اتصال و مقاومت آن می‌شود. به عنوان مثال تغییر جنس هسته از فوم دیوینیل اچ‌صد به فوم دیوینیل اچ‌سی‌پی هفتاد باعث افزایش ۲۸۶٪ نیروی شکست شد. از طرفی تغییر زاویه فوم مثلثی نیز باعث افزایش مقاومت اتصال شد. در پایان تحلیل‌ها نشان دادند که در تست کشش، زاویه ۴۵ درجه بهترین زاویه برای فوم مثلثی و زاویه ۲۵ درجه بدترین زاویه است. به طوری که نیروی شکست اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه، ۲/۴ برابر نیروی شکست اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه است.

نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته نشان دادند که اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی دارای دو حالت شکست هستند: (۱) شکست برشی هسته پانل ساندویچی افقی، (۲) گسیختگی چسب، که هر دو حالت شکست در طرح المان محدود شبیه‌سازی و بررسی شده است. در پایان درستی نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته بررسی شدند، به طوری که نیروی شکست پیش‌بینی شده توسط حل عددی فقط ۵٪ با نیروی شکست حاصله از تست تجربی اختلاف داشت.

زاویه فوم مثلثی مهم‌ترین عامل هندسی است که عملکرد اتصال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل برای بررسی اثر این عامل، نه طرح هندسی متفاوت که فوم‌های مثلثی آن‌ها زوایای ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه دارند، مورد بررسی قرار گرفتند. زاویه‌ها و سایر ابعاد اتصال طوری

## ۶- مراجع

- stitched T-joints in bending. *Composite Structures* 2000; 50:17-27.
- Stickler P.B, Ramulu M, Parametric analyses of stitched composite T-joints by the finite element method. *Materials and Design* 2002; 23 : 751-758. [۱۴]
- Blake J.I.R, Sheno R.A, House J, Turton T. Progressive damage analysis of tee joints with viscoelastic inserts. *Composite: Part A* 2001;653-32:641. [۱۵]
- Turaga UVRS, Sun CT. Failure modes and load transfer in sandwich T-joints. *J Sandwich Struct Mater* 2000;2:225-45. [۱۶]
- Earl J.S., Dulieu-Barton J.M., Sheno R.A. Determination of hygrothermal ageing effects in sandwich construction joints using thermoelastic stress analysis. *Composites Science and Technology* 2003; 63: 211-223. [۱۷]
- Neser G., Diler E., Ozes C., Effect of T-Joint Geometry on the Performance of a GRP/PVC Sandwich System Subjected to Tension. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2009; 28: 49-58. [۱۸]
- Technical manual, Divinycell HD, Copyright © DIAB Group AB October 2009. [۱۹]
- Gdouts E.E., Daneil I.M., Wang K.A., Failure of cellular foam under multiaxial loading. *Composite : Part A* 2002;36:163-176. [۲۰]
- Lim T., Lee C., Lee D.G., Failure Modes of Foam Core Sandwich Beams under Static and Impact Loads. *Journal of Composite Materials* 2004; 38; 1639-1662. [۲۱]
- Technical manual, Divinycell HCP, Copyright © DIAB Group AB March 2009. [۲۲]
- Alfano G., Crisfield M.A., "Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001;50: 1701-1736. [۲۳]
- ANSYS user's manual. [۲۴]
- D.W. Zhou, L.A. Louca, M. Saunders. Numerical simulation of sandwich T-joints under dynamic loading. *Composites: Part B* 2008;39: 973-985. [۱]
- Rispler AR, Steven GP, Tong L. Failure analysis of composite T-Joints including inserts. *J Reinf Plastic Compos* 1997; 16:1642-58. [۲]
- Kumari S, Sinha PK. Finite element analysis of composite wing Tjoints. *J Reinf Plastic Compos* 2002; 21:1561-85 [۳]
- Sheno RA, Violette FLM. A study of structural composite Tee joints in small boats. *J Compos Mater* 1990; 24:644-66. [۴]
- Sheno RA, Hawkins GL. Influence of material and geometry variations on the behaviour of bonded tee connections in FRP ships. *Composites* 1992; 23:335-45. [۵]
- Dodkins AR, Sheno RA, Hawkins GL. Design of joints and attachments in FRP ships' structures. *Marine Struct* 1994; 7:365-98. [۶]
- Dharmawan F, Thomson RS, Li H, Herszberg I, Gellert E. Geometry and damage effects in a composite marine T-joint. *Compos Struct* 2004; 66:181-7. [۷]
- Li HCH, Dharmawan F, Herszberg I, John S. Fracture behaviour of composite maritime T-joints. *Compos Struct* 2006; 75:339-50. [۸]
- Theotokoglou EE, Moan TJ. Experimental and numerical study of composite Tee-joints. *J Compos Mater* 1996;30:190-209. [۹]
- Theotokoglou EE. Strength of composite T-joints under pull-out loads. *J Reinf Plast Compos* 1997;16:503-18. [۱۰]
- Phillips HJ, Sheno RA. Damage tolerance of laminated tee joints in FRP structures. *Compos Part A* 1998; 29:465-78. [۱۱]
- Toftegaard H, Lystrup A. Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships. *Composites: Part A* 2005; 36:1055-1065. [۱۲]
- Stickler P.B, Ramulu M., Johnson P.S., P.S. Experimental and numerical analysis of transverse [۱۳]