

بررسی تحلیلی، عددی و تجربی سازه‌های با صفحات تاشده کامپوزیتی

محمود مهرداد شکریه^{۱*}، زهرا شکریه^۲ و مهرداد داورپناه^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: سازه‌های با صفحات تاشده، کامپوزیت نمد شیشه/پلی استر، حل تحلیلی، روش المان محدود، آزمایش استحکام.</p>	<p>این تحقیق به مطالعه رفتار مکانیکی صفحات تاشده کامپوزیتی اختصاص یافته است. مفهوم صفحات تاشده کامپوزیتی یک ابداع جدید در طراحی است که بصورت اختراع به ثبت رسیده است. سازه‌های تاشده کامپوزیتی به دلیل توانایی باربری ده‌ها برابر وزن خود دارای مزایا و کاربردهای بسیاری می‌باشند. در این تحقیق به تشریح سازه‌های کامپوزیتی ساخته شده از صفحات تاشده پرداخته شده و جزئیات هندسی و انواع بارگذاری بر روی سازه کاملاً توضیح داده شده است. دو روش تحلیلی و عددی جهت تجزی و تحلیل سازه‌های استفاده گردید. روش حل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق، بعنوان یک روش محاسباتی حل بسته مناسب سازه فوق توسعه داده شده است. حل‌های تحلیلی برای هر یک از سازه‌های فولادی و کامپوزیتی (نمد شیشه/پلی استر) با ضخامت مساوی و همچنین با وزن مساوی انجام گردید و حداکثر بار اعمالی مجاز بر سازه و نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه برای هر یک از سازه‌های فوق محاسبه گردید. نتایج حل عددی و حل تحلیلی مقایسه و علت اختلاف نتایج این دو حل نیز توضیح داده شد. مزایا و معایب نمونه‌های فولادی و نمونه کامپوزیتی با یکدیگر مقایسه شدند. تحقیق حاضر نشان می‌دهد که سازه کامپوزیتی با وزنی کمتر از سازه فلزی دارای نسبت باربری به وزن بسیار بالاتری می‌باشد. بر اساس روش طراحی ارائه شده در این تحقیق، سازه‌ای با صفحات تاشده با استفاده از مواد کامپوزیت ساخته شده و مورد آزمایش استحکام قرار گرفت. نتایج آزمایش استحکام حاکی از قابلیت بالای باربری سازه فوق می‌باشد.</p>

۱- مقدمه

ابر سازه‌ها با استفاده از مواد کامپوزیت معطوف داشته اند. استفاده از این مواد در سقف‌های نمایشگاهی، ابر گنبدی و پل‌ها از نمونه‌های مختلفی در این زمینه می‌باشند. در ساخت چنین ابر سازه‌هایی معمولاً از مفهوم سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی استفاده می‌شود. ایده استفاده از صفحات ساندویچی از صنایع هوافضایی اخذ گردیده است. در فناوری فوق دو صفحه کامپوزیتی که در بین آنها ماده مغزی قرار گرفته به عنوان یک صفحه ساندویچی مسئولیت باربری را به عهده دارد. از دیگر ابر سازه‌های

با توجه به مزایای کامپوزیت‌ها نظیر وزن کم، استحکام و سفتی بالا معماران و مهندسان توجه ویژه‌ای به ساخت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shokrieh@iust.ac.ir

۱. استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. کارشناس، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

همراه نگهدارنده‌های فلزی در ساخت سازه تاشده استوانه‌ای استفاده می‌شود [۸].

در سال ۱۹۶۰ مطالعه و ساخت پوسته‌های بتنی تقویت شده به اوج خود رسید. اولین راه حل‌های صفحات تاشده از شباهت آن‌ها به صفحات موج و پوسته‌های استوانه‌ای اخذ گردید [۹]. راه حل‌های اساسی برای سازه‌های تاشده توسط محققین اروپایی و امریکایی در بین سال‌های ۱۹۲۴ تا ۱۹۶۴ ارائه شده که تئوری اروپاییان پیچیده تر و از لحاظ طراحی دشوارتر بود [۱۰]. در هلند از سازه‌های تاشده بتنی در ابعاد مختلف استفاده شده است. از نمونه‌های سازه‌های تاشده بتنی در اندازه کوچک می‌توان به پوسته سقف چند وجهی برج آب دابلدام^۲ که در سال ۱۹۱۴ با صفحات تاشده ساخته شد، اشاره کرد. این سازه در زمان خود بسیار موفق بود و باید به عنوان اولین سازه تاشده در هلند در نظر گرفته شود [۱۱]. نمونه‌ای از سازه‌های تاشده با ابعاد متوسط را می‌توان در کلیسایی در هونسبروک^۳ مشاهده کرد که در سال ۱۹۶۴ به طول ۲۵/۵ متر و سقفی به عرض ۲/۸ متر و طول ۲۱/۴ متر ساخته شده است. در این سازه نیز از اشکال تاشده با فرم V به ضخامت ۸ سانتی متر استفاده گردیده است [۱۲ و ۱۳]. اولین سقف تاشده با ابعاد بزرگ در هلند بر روی بازار ماهی چونینگن^۴ در ۱۹۶۴ ساخته شد. این سقف کل محوطه داخلی با ابعاد ۱۵×۳۵ مترمربع را پوشش می‌داد. سازه دارای سطح مقطع مثلثی شکل بود و در عصر خود بی نظیر به حساب می‌آمد، سازه فوق بدون میلگردهای پیش تنیده بنا گردید [۱۴]. دومین نمونه از سازه‌های بزرگ سقف مدرسه پلی تکنیک دلف^۵ می‌باشد. طراحی این سازه بسیار پیچیده‌تر از سازه‌های قبلی است. از سطح مقطع مثلثی در صفحات استفاده شده و سازه سطح بسیار وسیعی را پوشش می‌دهد [۱۵ و ۱۶].

کامپوزیتی می‌توان به کامپوزیت‌های تاشده اشاره کرد. طراحی سازه‌های کامپوزیتی تاشده از لحاظ مفهومی کاملاً نو بوده و با نیم‌نگاهی به فعالیت‌های محققین گذشته می‌توان دریافت که سازه‌های فوق کاملاً جدید محسوب می‌شوند.

کلمه سازه تاشده بیانگر فرم تاشده یک ساختار است که شامل صفحات و اجزایی که به صورت تاشده در فضا با هم ارتباط برقرار کرده‌اند. بعضی از محققان [۱] کلمه ساختارهای اورینگامی^۱ را به سازه‌های تاشده نسبت داده‌اند. این سازه‌ها می‌توانند از جنس فلز، چوب، شیشه، بتن و مواد پلاستیکی (پلی کربنات یا رزین تقویت شده با الیاف) باشند [۲].

سازه‌های تاشده فلزی می‌توانند از جنس فولاد یا آلومینیوم باشند. مزیت این سازه‌ها، قابلیت تغییر شکل و پایداری آن‌ها می‌باشد. از شبکه سازه‌های تاشده فولادی در سقف مرکز نمایشگاه بین‌المللی چین [۳] استفاده شده است. پلهایی که از سازه‌های تاشده فولادی ساخته می‌شوند، وزن کمی نسبت به دیگر سازه‌ها دارند. برای ایجاد سطح صاف روی پل، از پنل‌های صفحه‌ای صاف استفاده می‌کنند که در بین آن‌ها مسیری عبور داده می‌شود [۴].

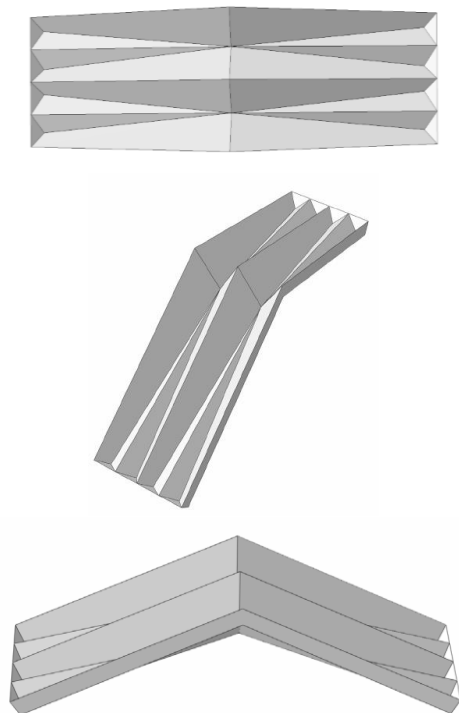
سازه‌های تاشده چوبی دارای مشخصه حمل و سرهم کردن آسان هستند. به دلیل کاهش ذخیره چوبی جهان، این مواد نسبت به فولاد و بتن تقویت شده دارای محدودیت هستند [۵]. آلمان این سازه‌ها از الوار یا صفحات چوبی تشکیل شده است که در نهایت قاب با صفحات نازک چوبی پوشیده می‌شوند [۶]. سازه‌های تاشده که از خرپاهای چوبی ساخته شده‌اند، می‌توانند نیاز به زیبایی را به خوبی تامین کنند [۷].

شیشه به عنوان یک ماده ساختمانی بطور وسیعی در آلمان‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. به دلیل محدودیت این ماده در تغییر فرم تحت نیرو یا فشار، معمولاً همراه با مواد دیگر بکار برده می‌شود. از آلمان‌های مثلثی شیشه‌ای به

² Dubbeldam
³ Hoensbroek
⁴ Scheveningen
⁵ Delft

¹ Origami

تنش‌های فشاری داخلی در صفحات قرینه که در جهات متضاد عمل می‌کنند، متعادل می‌شوند و مدولارها را در وضعیت متعادل و پایدار نگه می‌دارد. مدولارهای فضایی واحدهای سازه‌ای سه بعدی هستند که بارها را در سه جهت حمل و منتقل می‌کنند. این ویژگی سه بعدی سازه‌ای مدولار، استفاده از صفحات به عنوان اجزا و تنش در صفحات برای خنثی کردن نیروهای خارجی است که ویژگی منحصر به فرد مدولار فضایی را به وجود می‌آورد. صفحات به نحوی قرار گرفته، حائل و درگیر می‌شوند که به حداکثر ظرفیت باربری و حداکثر تنش مجاز برسند. مدولار فضایی به نوعی طراحی شده است که از هر چهار طرف تکیه گاه داشته باشد. مدولارهای پایینی و بالایی در زنجیره مدولارها، تکیه گاه طولی محسوب شده و مدولارهای مجاور یا صفحات قرینه بیرونی هر مدولار فضایی که در جهات متضاد عمل می‌کنند، تکیه گاه جانبی محسوب می‌شوند. در شکل ۱ نماهای متفاوت یک مدولار ارایه گردیده است. این طراحی نوین سازه‌ای بصورت اختراع به ثبت رسیده است [۱۷].



شکل ۱- نماهای مختلف یک مدولار فضایی

به دلیل وزن زیاد بتن، تمهیدات خاصی برای برپا نگاه داشتن چنین سازه‌هایی الزامی است. در مقابل، سازه‌های تاشده کامپوزیتی با وزن کم و استحکامی بالا به راحتی قابل ساخت و نصب می‌باشند. سازه‌های فوق توان باربری ده‌ها برابر وزن خود را دارا می‌باشند. نصب آسان و سریع سازه‌ای فوق، دقت فوق العاده بالا در تنظیم فواصل، آب بندی سریع و راحت، عمر طولانی، ضد زلزله بودن، عایق حرارتی بودن، عایق صوتی بودن و مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های مرطوب، قلیایی و اسیدی از مزایای بی نظیر چنین سازه‌هایی محسوب می‌شود.

۱-۱- شرح مختصر فنی سیستم

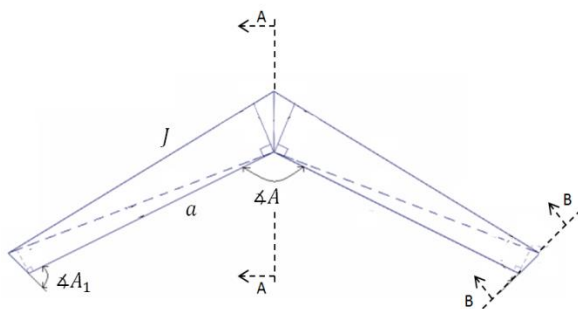
برخلاف سازه‌های متعارف که بار سازه به اسکلت و اجزاء آن منتقل می‌شود، بار سازه‌های فضایی بدون اسکلت با صفحات تاشده توسط کل پوسته سازه تحمل می‌شود. این طراحی نوین نیاز به اسکلت ساختمانی که بزرگترین و سنگین ترین جزء هر سازه است را منتفی می‌کند. سیستم سازه‌های فضایی بدون اسکلت با صفحات تاشده امکان ساخت سازه‌هایی را فراهم می‌کند که ساخت آنها به روش‌های ساختمانی موجود غیر عملی می‌باشد. وزن سیستم سازه‌های فضایی بدون اسکلت با صفحات تاشده چندین برابر کمتر از سازه‌های متعارف یا پیش ساخته است و چندین برابر بیشتر بار زنده را تحمل می‌کند.

۱-۲- مدولار فضایی

مدولار فضایی بر اساس تئوری سازه‌ای صفحات تاشده طراحی شده است. مدولارهای فضایی، واحدهای سازه‌ای یکپارچه‌ای^۱ هستند که از صفحات نازک سازه‌ای در سطوح و زوایای متفاوت به منظور شکل دادن به مدولارهای فضایی قرار گرفته، ساخته می‌شوند. نیروهای وارده بر مدولار فضایی ناشی از بارهای مرده و زنده، نیروهای باد و زلزله توسط تنش‌های کششی داخلی و

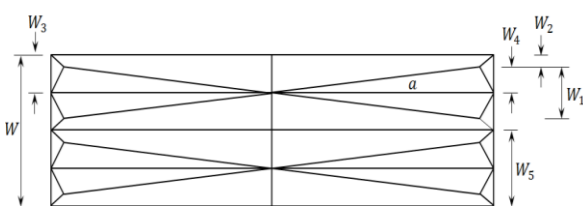
^۱ Monolithic

شکل ۲ نمای کناری یک نمونه مدولار را نشان می‌دهد. زاویه چرخش A ، زاویه اتصالات انتهایی A_1 و بازوی چرخشی a متغیر بوده و بر اساس مقطع طولی سیستم و قرارگیری هر مدولار در سیستم انتخاب می‌شوند. دهنه خواسته شده، ارتفاعات میانی و انتهایی هر مدولار و سایر الزامات سازه‌ای و معماری انتخاب این مقادیر را مشخص می‌کند.



شکل ۲- نمای کناری مدولار

شکل ۳ بیانگر نمای فوقانی مدولار فضایی می‌باشد. جزئیات این نقشه عرض کل مدولار W ، عرض هر قسمت W_5 ، تصویر عرض‌های انتهایی صفحات برابر W_4 ، W_2 و تصویر عرض میانی W_3 را نشان می‌دهد. در مدولار فضایی استاندارد اندازه W_3 نصف W_5 است. شکل ۴ مقطع A-A و مقطع B-B را نشان می‌دهد. مقطع A-A از وسط مدولار فضایی عبور می‌کند.



شکل ۳- نمای فوقانی مدولار

۳-۱- سیستم سازه‌های فضایی بدون اسکلت با صفحات تاشده

مدولارهای فضایی هسته اصلی سیستم سازه‌های فضایی بدون اسکلت با صفحات تاشده را تشکیل می‌دهند. مدولارها، از طریق پیچ و مهره کردن صفحات انتهایی به یکدیگر متصل شده و زنجیره‌ای طولی را تشکیل می‌دهند. هر مدولار در طول زنجیره توسط آجرهای بالایی و پایینی خود نگه داشته می‌شوند و بدینوسیله نیاز به تکیه گاه‌های داخلی (ستون‌ها) را منتفی می‌کنند. کل سیستم تنها توسط دو مدولار انتهایی نگه داشته می‌شوند که آنها نیز به فونداسیون پیچ می‌شوند. تعداد و نوع مدولارها که زنجیره را به وجود می‌آورند به ویژگی‌های معماری، ساختمانی و سازه‌ای سیستم مورد نیاز بستگی دارد.

۴-۱- بیان مسئله

هدف از تحقیق حاضر محاسبات سازه‌ای (تنش، کرنش، جابه‌جایی، توزیع نیروها و استحکام) یک سازه با صفحات تاشده توسط روش حل دستی و روش اجزاء محدود می‌باشد. سازه فوق از جنس کامپوزیت ساخته شده و تحت بارگذاری استاتیک قرار خواهد گرفت. لذا هدف اصلی این تحقیق انجام محاسبات سازه‌ای تحت شرایط بارگذاری آزمایش استاتیکی می‌باشد. پس از انجام محاسبات نتایج روش اجزاء محدود نتایج با روش دستی مقایسه خواهد گردید. روش دستی محاسباتی از مدارک موجود ثبت اختراع طراحی حاضر [۱۷] اقتباس گردیده است. قطعاً با توجه به قدرت نرم افزار اجزاء محدود در مدل‌سازی، امکان طراحی با جزئیات بیشتر در اختیار طراحان قرار خواهد گرفت. در این تحقیق؛ سازه تاشده فلزی و کامپوزیتی طراحی و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. هدف از انجام این بخش مقایسه وزنی و باربری سازه فلزی با سازه کامپوزیتی می‌باشد.

۲- هندسه سازه

$\angle\gamma = 60^\circ$	$W_3 = 0.60 \text{ m}$
$t = 6.5 \text{ mm}$	$W_2 = 0.25 \text{ m}$

۲-۳- کانون و محور خنثی

اگر فاصله بین محور خنثی کل این مقطع تا بالاترین نقطه آن مقطع l_{m1} باشد (شکل ۴)، معادله ممان‌ها حول محوری که از بالاترین نقطه آن منطقه عبور می‌کند عبارتست از:

$$l_{m1} = \frac{n.o.p \times r \times \frac{1}{2} + r_1^2}{n.o.p \times r + 2r_1} \quad (۱)$$

$$l_{m2} = l - l_{m1} \quad (۲)$$

که در این معادلات $n.o.p$ بیانگر تعداد صفحات می‌باشد. با توجه به ابعاد هندسی مدولار مقادیر l_{m1} و l_{m2} به ترتیب برابر $۰/۵۵$ و $۰/۶۳$ متر برای نمونه واقعی بدست آورده می‌شود.

۲-۴- ممان اینرسی

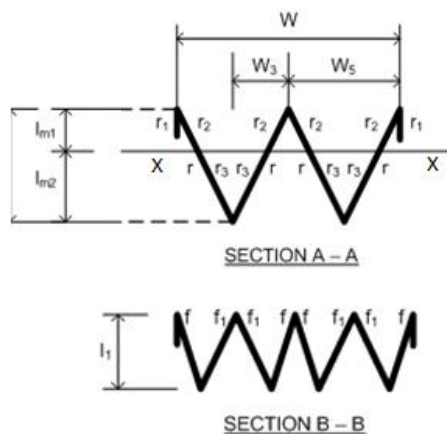
می‌توان نشان داد که ممان یک مقطع مستطیلی، با عرض b و عمق d که حول محوری که از کف آن عبور می‌کند برابر است با $I = \frac{b \times d^3}{3}$. همچنین می‌توان نشان داد که اگر I ممان اینرسی بخشی با مساحت A حول محور خنثی آن بخش باشد، ممان اینرسی همان بخش (I_x) حول محور $X-X$ که موازی محور خنثی آن بخش با فاصله h است برابر است با:

$$I_x = I + A \times h^2 \quad (۳)$$

با رجوع به مقطع A-A شکل ۴ ممان اینرسی I_x مدولار فضایی با ضخامت t حول محور خنثی X-X مجموع ممان اینرسی بخشهایی از همان مدولار حول همان محور است، بنابراین

$$r_2 = r \times \frac{l_{m1}}{l} \quad (۴)$$

$$r_3 = r - r_2 \quad (۵)$$



شکل ۴- نشان دهنده مقطع B-B و A-A

۲-۱- طراحی هندسی یک سازه تاشده

اولین گام در طراحی مدولار فضایی انتخاب متغیرهای طراحی است. متغیرهای طراحی شامل متغیرهای زیر می‌باشد: زاویه چرخش مدولار ($\angle A$)، زاویه اتصالات انتهایی ($\angle A_1$)، بازوی چرخشی مدولار (a)، پهنای مدولار (W)، تصویر عرض‌های انتهایی صفحات برابر اصلی (W_2 و W_4)، تصویر عرض میانی صفحات برابر اصلی (W_3)، ضخامت مدولار (t) و زاویه تقاطع صفحات اصلی برابر ($\angle \gamma$). برای بدست آوردن دیگر پارامترهای هندسی سازه با داشتن مقادیر متغیرهای طراحی، از معادلات حاکم بر هندسه سازه موجود در [۱۷] استفاده می‌شود.

۲-۲- نمونه حل شده طراحی هندسی یک سازه با

صفحات تاشده

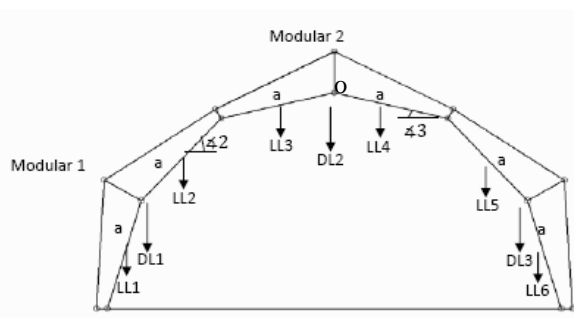
در این بخش مقادیر متغیرهای طراحی انتخاب شده است. جدول ۱ نشان دهنده مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای طراحی می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای طراحی

$a = 4.8 \text{ m}$	$W = 2.4 \text{ m}$
$\angle A = 138^\circ$	$W_5 = 1.21 \text{ m}$
$\angle A_1 = 81^\circ$	$W_4 = 0.35 \text{ m}$

¹ Number of Plates

بعد از طراحی هندسی هر مدولار، سازه‌ای با استفاده از سه مدولار طراحی شده است. که مدولارها در یک زنجیره قرار داشته و هر دو مدولار، در صفحه انتهایی با یکدیگر مشترک هستند (شکل ۵). سپس به تجزیه و تحلیل نیرو در سازه پرداخته شده است. در این بخش ابتدا سازه‌ای تشریح شده است که تحت بار وزن خود (بار مرده^۱) و بار خارجی (بار زنده^۲) می باشد و به هر نیمه مدولار بار خارجی متفاوتی اعمال شده است و در ادامه دیاگرام آزاد هریک از مدولارها رسم شده و نیروهای واکنشی هریک محاسبه گشته است. در شکل ۵ نیروهای مرده و زنده وارد شده به سازه نشان داده شده است. همچنین در این شکل شماره مدولارها نیز مشخص شده است.



شکل ۵- بارهای وارد شده به سازه

برای تحلیل نیرو هریک از مدولارها جدا شده و دیاگرام آزاد آنها رسم شده است. شکل‌های ۶ و ۷ نمایشگر دیاگرام آزاد مدولار ۱ و ۲ می‌باشند.

$$I_x = n.o.p \times \frac{t}{3} \times (r_2^3 + r_3^3) + 2 \times t \times \left[\frac{r_1^3}{12} + r_1 \times \left(l_{m1} - \frac{r_1}{2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

که با توجه به ابعاد هندسی مدولار مقادیر r_2 و r_3 و r_1 را به ترتیب ۰/۶۲ متر، ۰/۷۱ متر و ۰/۰۰۵۷ متر به توان چهار برای نمونه واقعی بدست آورده می شود.

۲-۵- حداکثر ممان طولی مجاز

فرمول ممان $M = f \times \frac{I}{c}$ برای طراحی مدولار فضایی استفاده می‌شود که در آن M حداکثر ممان خمشی مجاز، f_c حداکثر تنش فشاری مجاز، f_t حداکثر تنش کششی مجاز، c فاصله دورترین الیاف از محور خنثی و I ممان اینرسی حول محور خنثی می‌باشد. مقطع A-A در شکل ۴ مقطع عرضی وسط مدولار را نشان می‌دهد که اگر مدولار تحت ممان خارجی مثبت باشد، سطح بالای محور خنثی در حالت فشرده‌گی و سطح زیرین محور خنثی در حالت کشش قرار دارد. یا به عبارت دیگر اگر:

$$M \geq 0 \quad (7)$$

$$M_{xc} = f_c \times \frac{I_x}{I_{m1}} \quad (8)$$

$$M_{xt} = f_t \times \frac{I_x}{I_{m2}} \quad (9)$$

و

$$M(\max) \leq M_{xc} \quad (10)$$

$$M(\max) \leq M_{xt} \quad (11)$$

و اگر

$$M \leq 0 \quad (12)$$

$$M_{xc} = f_c \times \frac{I_x}{I_{m2}} \quad (13)$$

$$M_{xt} = f_t \times \frac{I_x}{I_{m1}} \quad (14)$$

و

$$M(\max) \leq M_{xc} \quad (15)$$

$$M(\max) \leq M_{xt} \quad (16)$$

۲-۶- معادلات نیروهای واکنشی، بارها

¹ Dead load (DL)

² Live Load (LL)

$$R_{1y} = R_{2y} = -\frac{(TDL+TLL)}{2} \quad (21)$$

$$r_{1y} = -\frac{(LL1+DL1)}{2} \quad (22)$$

$$W_1 = \frac{[TDL+TLL-(LL1+DL1)]}{2} \quad (23)$$

$$r_{2y} = -W_1 \quad (24)$$

$$W_2 = -r_{1y} \quad (25)$$

$$r_{3y} = -\frac{[(LL1+DL1)+(LL2+DL2)]}{2} \quad (26)$$

$$W_3 = \frac{[TDL+TLL-(LL1+DL1)-(LL2+DL2)]}{2} \quad (27)$$

۷-۲- معادلات حداکثر ممان

برای محاسبه ممان در هر مدولار با توجه به تقارن مدولار نسبت به نقطه‌ای که محور خنثی از آن می‌گذرد، تنها به محاسبه بر روی نیمی از مدولار اکتفا می‌شود. برای ساده سازی نقطه‌ای که محور خنثی از آن می‌گذرد، نقطه 0 در شکل 5 در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 6 برای مدولار 1 خواهیم داشت:

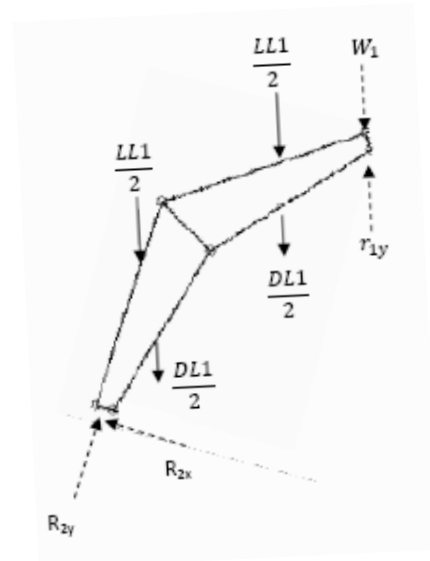
$$M_{a-1} = (r_{1y} + W_1) \times a + \left(\frac{LL1}{2} + \frac{DL1}{2} \right) \times \frac{a}{2} \quad (28)$$

با توجه به شکل 7 برای مدولار 2 خواهیم داشت:

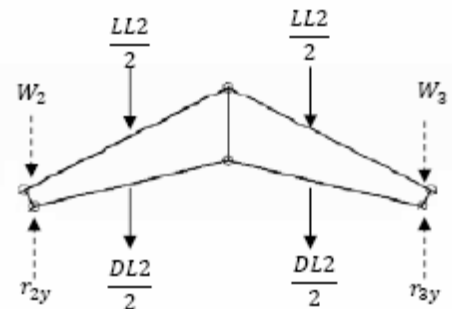
$$M_{a-2} = (r_{2y} + W_2) \times a + \left(\frac{LL2}{2} + \frac{DL2}{2} \right) \times \frac{a}{2} \quad (29)$$

۸-۲- محاسبات حداکثر بار مجاز

برای بدست آوردن حداکثر بار مجازی که می‌توان به سازه وارد کرد از روابط بخش ۲-۵ تا ۲-۷ استفاده شده است. در نمونه واقعی بار زنده وارد شده به سازه به وسیله سه طناب از مدولار 2 آویزان می‌شود و از زمین ۱/۲ متر فاصله دارد (شکل ۸). برای مدل کردن این نیرو بصورت دو بعدی، از سه نیروی متمرکز F نشان داده شده در شکل ۹ استفاده شده است. با توجه به تاثیر ناچیز مولفه افقی این نیرو، از در نظر گرفتن آن در محاسبات صرف نظر شده است.



شکل ۶- دیاگرام آزاد مدولار ۱



شکل ۷- دیاگرام آزاد مدولار ۲

به علت تقارن به انجام محاسبات برای یکی از دو مدولار پایین اکتفا می‌شود. پارامترهای استفاده شده در تحلیل عبارتند از:

بازوی چرخشی مدولار^۱ (a)، مجموع بار زنده^۲ (TLL)، مجموع بار مرده^۳ (TDL)

$$TLL = LL1 + LL2 + LL3 + LL4 + LL5 + LL6 \quad (17)$$

$$TDL = DL1 + DL2 + DL3 \quad (18)$$

$$\angle 2 = 39^\circ \quad (19)$$

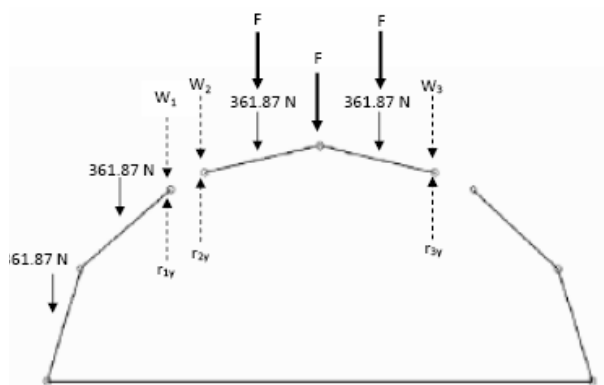
$$\angle 3 = 21^\circ \quad (20)$$

نیروهای داخلی مشخص شده در اشکال ۶ و ۷ و از روابط زیر بدست می‌آیند.

¹ Modular Rotation Arm

² Total Live Load

³ Total Dead Load



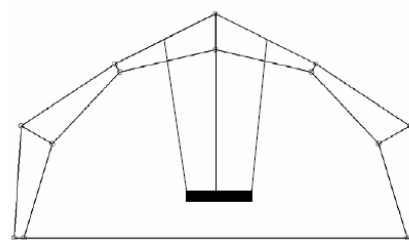
شکل ۱۰- دیاگرام آزاد سازه

در جدول ۲ خواص مکانیکی کامپوزیت از جنس نمد شیشه پلی استر آورده شده است.

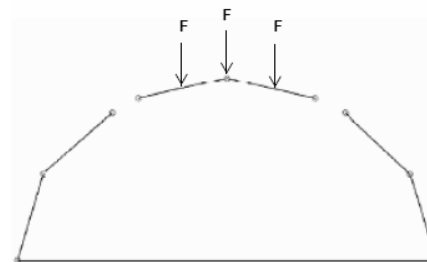
جدول ۲- خواص مکانیکی کامپوزیت از جنس نمد شیشه-پلی استر [۱۸]

چگالی	kg/m ³	۱۶۸۰
مدول الاستیسیته طولی	MPa	۷۴۱۵/۲
مدول الاستیسیته عرضی	MPa	۷۴۱۵/۲
ضریب پواسون ۱-۲	-	۰/۳
مدول برشی ۱-۲	MPa	۲۴۶۸/۸
مدول برشی ۱-۳	MPa	۲۴۶۸/۸
مدول برشی ۲-۳	MPa	۲۸۵۲/۰
استحکام کششی طولی	MPa	۱۰۲/۸
استحکام فشاری طولی	MPa	۱۴۵/۰
استحکام کششی عرضی	MPa	۱۰۲/۸
استحکام فشاری عرضی	MPa	۱۴۵/۰
استحکام برشی طولی	MPa	۷۹/۲
استحکام برشی عرضی	MPa	۷۹/۲

با توجه به روابط تحلیلی ارائه شده در بخش های ۲-۳ تا ۲-۷ و جدول خواص مکانیکی کامپوزیت، حداکثر بار قابل تحمل سازه و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه آن بدست آورده شده و در جدول زیر موجود می‌باشند.



شکل ۸- نشان دهنده بار خارجی وارد شده به سازه



شکل ۹- نمایشگر بار خارجی مدل شده

محاسبات حداکثر بار برای سه سازه فوق صورت گرفته است:

- سازه کامپوزیتی از جنس نمد شیشه-پلی استر با ضخامت ۶/۵ میلی متر
- سازه فولادی با ضخامت ۶/۵ میلی متر
- سازه فولادی با ضخامت ۱/۳۸ میلی متر که دارای وزنی برابر با سازه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر می‌باشد.

۲-۸-۱- مثال ۱

در این قسمت حداکثر باری که به سازه از جنس کامپوزیت نمد شیشه-پلی استر و به ضخامت ۶/۵ میلی متر می‌توان وارد نمود، بدست آورده خواهد شد. سازه با ضخامت ذکر شده جرمی معادل ۲۱۷۱/۲ کیلوگرم را دارا می‌باشد. وزن هر مدولار بصورت دو نیروی متمرکز ۳۶۱/۸ نیوتنی می‌باشد. در شکل ۱۰ دیاگرام آزاد نشان داده شده است.

سازه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر است، وارد نمود. در مدل کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر از جنس نمد شیشه-پلی استر سازه جرمی معادل ۲۱۷۱/۲ کیلوگرم را دارا می‌باشد. برای طراحی سازه با همین جرم از جنس فولاد از رابطه زیر برای بدست آوردن ضخامت آن استفاده می‌شود.

$$m = \rho V \quad (30)$$

که m جرم سازه، ρ چگالی و V حجم می باشد. با برابر قرار دادن جرم سازه کامپوزیتی و سازه فولادی روابط زیر بدست می آید:

$$\rho_c V_c = \rho_s V_s \quad (31)$$

$$\rho_c t_c = \rho_s t_s \quad (32)$$

که t ضخامت و اندیس c مربوط به کامپوزیت و اندیس s مربوط به فولاد است. چگالی کامپوزیت و فولاد به ترتیب برابر ۱۶۸۰ و ۷۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. با قرار دادن ضخامت سازه کامپوزیتی در رابطه ۳۲، ضخامت سازه فولادی، ۱/۳۸ میلی متر محاسبه می‌شود. با استفاده از روابط تحلیلی برای این سازه، حداکثر بار قابل تحمل سازه و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه آن در جدول ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶- نتایج حل تحلیلی برای سازه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر

۲۵۴/۴	kN	حداکثر بار مجاز
۱۱/۹	-	نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه

۳- حل عددی

در این بخش سازه تا شده با استفاده از روش اجزاء محدود مدل شده، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی بر روی آن اعمال گردیده است. مدلسازی برای ضخامت و جنس‌های

جدول ۳- نتایج حل تحلیلی برای سازه کامپوزیتی

۵۷۰/۴	kN	حداکثر بار مجاز
۲۶/۸	-	نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه

۲-۸-۲- مثال ۲

در این قسمت نیز حداکثر باری که می‌توان به سازه از جنس فولاد و به ضخامت ۶/۵ میلی متر وارد نمود، بدست آورده شده است. سازه با ضخامت ذکر شده جرمی معادل ۹۱۷۱/۴ کیلوگرم را دارا می‌باشد. خواص مکانیکی فولاد را می‌توان در جدول ۴ مشاهده کرد.

جدول ۴- خواص مکانیکی فولاد [۱۹]

Steel (ASTM-A36)		نوع ماده
۷۸۶۰	(kg/m ³)	چگالی
۲۰۰	(GPa)	مدول الاستیسیته
۲۵۰	(MPa)	استحکام تسلیم
۴۰۰	(MPa)	استحکام نهایی

با توجه به جدول خواص مکانیکی فولاد و روابط تحلیلی، حداکثر بار قابل تحمل سازه و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه آن در جدول ۵ نمایش داده شده است.

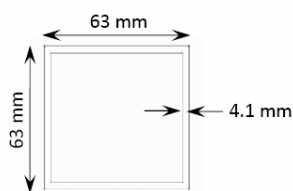
جدول ۵- نتایج حل تحلیلی برای سازه فولادی به ضخامت ۶/۵ میلی متر

۱۲۰۹/۳	kN	حداکثر بار مجاز
۱۳/۴	-	نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه

۲-۸-۳- مثال ۳

محاسبات زیر برای بدست آوردن حداکثر باری است که می‌توان به سازه از جنس فولاد که دارای وزنی برابر با

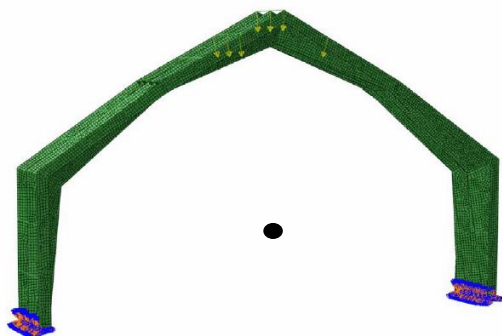
شکل ۱۱- مدولار به همراه پنج تقویت کننده عرضی



شکل ۱۲- سطح مقطع تقویت کننده عرضی

۲-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

در نمونه واقعی بار وارد شده به سازه توسط سه طناب می‌باشد و هر طناب در سه نقطه با مدولار تماس دارد و از این سه طناب جسمی (در این تحقیق یک مینی بوس) با فاصله ۱/۲ متر از زمین آویزان می‌شود. برای مدلسازی بارگذاری، از نیروی متمرکز در ۹ نقطه نشان داده شده در شکل ۱۳ استفاده شده است و جهت نیروها به سمت نقطه مشخص شده در شکل است که این نقطه ۱/۲ متر از زمین فاصله دارد. وزن سازه نیز با داشتن حجم و چگالی مواد در نظر گرفته شده است. به دلیل مقید بودن دو صفحه انتهایی نمونه واقعی به زمین، دو صفحه پایینی نشان داده شده در شکل، کاملاً به زمین مقید شده است.



شکل ۱۳- شرایط مرزی

۳-۳- نتایج حل اجزای محدود سازه کامپوزیتی از جنس نمد شیشه-پلی استر با ضخامت ۶/۵ میلی متر

شکل ۱۴ نمای سازه بعد از بارگذاری می‌باشد. به علت هندسه پیچیده سازه چگونگی بازی صفحات در برابر بار وارد شده مشاهده می‌شود. انحنای بسوی داخل بالاترین

مختلف صورت گرفته است. انواع مدلسازی‌های عددی انجام شده عبارتند از:

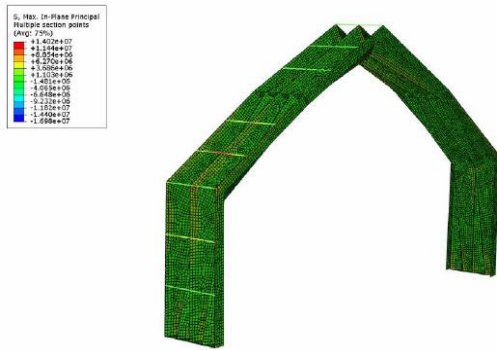
- سازه ۱: مدولارها از جنس فولاد با ضخامت ۶/۵ میلی متر
- سازه ۲: مدولارها از جنس کامپوزیت نمد شیشه-پلی استر با ضخامت ۶/۵ میلی متر
- سازه ۳: مدولارها از جنس فولاد با ضخامت ۱/۳۸ میلی متر

۳-۱- شرح مدلسازی

مدلسازی بوسیله نرم افزار اباکوس^۱ [۲۰] انجام شده است. مدلسازی در فضای سه بعدی صورت گرفته است. سازه در مجموع شامل سه مدولار می‌باشد بعلاوه ۱۵ عدد تقویت کننده عرضی از جنس فولاد که هر مدولار دارای ۵ تقویت کننده عرضی می‌باشد. تقویت کننده‌های عرضی هر کدام به فاصله ۱/۸ متر از یکدیگر قرار دارند. هدف از قرار دادن این تقویت کننده‌های عرضی بر روی مدولارها اولاً این تقویت کننده‌های عرضی نقش مدولارهای جانبی را بازی می‌کنند و ثانیاً برای حمل و جابجایی مدولارها از این قسمت استفاده می‌شود. در شکل ۱۱ تقویت کننده‌های عرضی با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. تقویت کننده عرضی بطول ۲/۴ متر می‌باشد و هندسه سطح مقطع آن در شکل ۱۲ موجود است. برای مش بندی مدولارها از المان‌های پوسته چهار گره ای و برای تقویت کننده‌های عرضی از المان تیر دو گره ای استفاده شده است.



¹ ABAQUS



شکل ۱۶- توزیع تنش اصلی حداکثری در سازه

۳-۳-۲- محاسبات عددی

در جدول ۷ مقادیر حداکثر جابجایی و تنش اصلی حداکثری استخراج شده از نرم افزار مشاهده می شود.

جدول ۷- مقادیر استخراج شده از نرم افزار

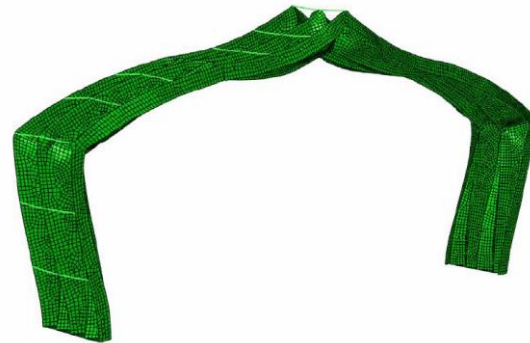
۲/۹	cm		حداکثر جابجایی
۱۵/۵	کششی	MPa	تنش اصلی حداکثری
۱۲/۰	فشاری		

مقدار بار وارد شده به سازه برابر ۲۰ کیلو نیوتن می باشد. با توجه به معیار حداکثر تنش می توان مقدار ضریب اطمینان و حداکثر بار مجاز سازه را به ترتیب ۶/۶۲ و ۱۳۲/۴ کیلو نیوتن بدست آورد. در نتیجه نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه برابر ۶/۲۲ می شود. به همین ترتیب در جدول های ۸ و ۹ نتایج حل عددی برای سازه های فولادی به ضخامت ۶/۵ و ۱/۳۸ میلی متر موجود می باشد.

جدول ۸- نتایج حل اجزای محدود سازه با مدولارهایی از جنس فولاد با ضخامت ۶/۵ میلی متر

۲/۰	mm	حداکثر جابجایی
۳۱	MPa	تنش فون مایسس
۱۶۱/۲	kN	حداکثر بار مجاز
۱/۷	-	نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه

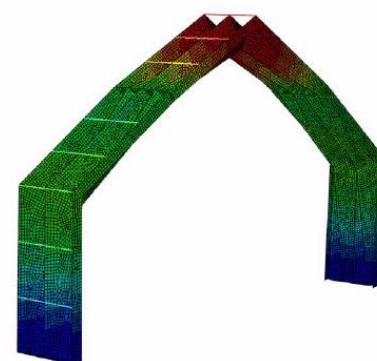
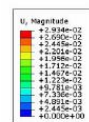
تقویت کننده عرضی (وسط مدولار ۲) نشان دهنده تمایل به جمع شدن صفحات در این مدولار می باشد و همچنین انحنا بسوی بیرون تقویت کننده های عرضی مدولارهای پایینی بیانگر تمایل باز شدن صفحات در هر یک از مدولارهای پایینی می باشد.



شکل ۱۴- نمای سازه بعد از بارگذاری

۳-۳-۱- توزیع جابجایی و تنش در سازه

همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می شود بیشترین جابجایی در بالاترین قسمت سازه می باشد و در قسمت پایین سازه جابجایی سازه کمتر می شود و در صفحات مقید شده به زمین به صفر می رسد. توزیع تنش اصلی حداکثری در سازه به جز نقاط تمرکز تنش یکنواخت است. نقاط تمرکز تنش در محل تقاطع صفحات به یکدیگر در هر مدولار می باشد. در شکل ۱۶ توزیع یکنواخت تنش اصلی حداکثری در سازه مشاهده می شود.



شکل ۱۵- توزیع جابجایی سازه

جدول ۱۰- نتایج بدست آمده از حل تحلیلی و حل عددی برای نمونه‌ها

نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه	حداکثر بار مجاز (kN)		جرم سازه (kg)	سازه
	حل عددی	حل تحلیلی		
۱/۷	۱۳/۴	۱۶۱/۲	۱۲۰۹/۳	سازه ۱
۶/۲	۲۶/۸	۱۳۲/۴	۵۷۰/۴	سازه ۲
۳/۰	۱۱/۹	۶۴/۰	۲۵۴/۴	سازه ۳

۴-۲- مقایسه سازه فولادی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و سازه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر

همان طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، از مقایسه نمونه فولادی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و نمونه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر مشخص است که جرم سازه فولادی ۴/۲ برابر سازه کامپوزیتی می‌باشد. در صورتی که حداکثر بار قابل تحمل سازه کامپوزیتی اختلاف زیادی نسبت به سازه فولادی ندارد، مثلاً با استفاده از نتایج حل عددی، سازه فولادی دارای حداکثر باربری ۱۶۱/۲ کیلو نیوتن و سازه کامپوزیتی ۱۳۲/۴ کیلو نیوتن می‌باشد. هم چنین سازه فولادی با ضخامت ۶/۵ میلی متر به دلیل وزن زیاد سازه و در نتیجه غیر ممکن شدن جابه جایی سازه، هزینه بسیار زیاد قالب گیری، جوشکاری مشکل صفحات به یکدیگر، شرایط نصب دشوار و خوردگی فولاد از لحاظ عملی غیر قابل اجرا بوده و به صرفه نمی‌باشد. در صورتی که سازه کامپوزیتی با وزنی حدود یک چهارم سازه فولادی دارای باربری معادل سازه فولادی و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه ۶/۲ می‌باشد که این عدد در سازه فولادی ۱/۷ است. همچنین سازه کامپوزیتی دارای مزایای وزن سبک، استحکام بالا، نصب آسان و سریع، دقت فوق العاده بالا در تنظیم فواصل، آب بندی سریع و راحت، عمر طولانی، ضد زلزله بودن، عایق حرارتی بودن، عایق صوتی بودن و

جدول ۹- نتایج حل اجزای محدود سازه با مدولارهایی از جنس فولاد با ضخامت ۱/۳۸ میلی متر

حداکثر جابجایی	mm	۸/۸
تنش فون مایسی	MPa	۷۸
حداکثر بار مجاز	kN	۶۴/۰
نسبت حداکثر بار مجاز به وزن سازه	-	۳/۰

۴- مقایسه حل تحلیلی و عددی

در این بخش به مقایسه نتایج حل تحلیلی و حل عددی نمونه فولادی به ضخامت ۶/۵ میلی متر، نمونه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و نمونه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر پرداخته شده است و مزایا و معایب آن‌ها نسبت به یکدیگر سنجیده شده است. در جدول ۱۰ مقادیر حداکثر بار و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه حل عددی و حل تحلیلی برای سه سازه فوق موجود می‌باشد.

۴-۱- علت تفاوت حل تحلیلی و حل عددی

حل تحلیلی برای انجام محاسبات هندسه سازه را بسیار ساده فرض می‌کند و رفتار کلی و تیر گونه سازه را مورد بررسی قرار می‌دهد در صورتی که حل عددی رفتار محلی یا پوسته ای سازه را بررسی می‌کند. همچنین با توجه به روابط حل تحلیلی که در بخش ۸-۲ برای بدست آوردن حداکثر بار مجاز ارائه شده است، مشاهده می‌شود که در روابط حل تحلیلی برای بدست آوردن حداکثر بار مجاز، از مدول الاستیسیته استفاده‌ای نمی‌شود، در صورتی که در اجسامی که دارای اشکال پیچیده هستند مدول الاستیسیته بر روی تنش‌های سازه تاثیر می‌گذارد. حل عددی با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته نتایج قابل اعتمادتری نسبت به حل تحلیلی در اختیار قرار می‌دهد. حل عددی از بدست آوردن جابجایی‌ها، تنش‌ها را محاسبه می‌کند که در طی این مراحل با عمل مشتق گیری می‌تواند موجب ایجاد خطا در محاسبات شود.



شکل ۱۷- تصویر یک مدولار واقعی و تقویت کننده‌های عرضی



شکل ۱۸- صفحات انتهایی مدولارهای پایینی



شکل ۱۹- نمونه واقعی سازه کامپوزیتی با صفحات تاشده

۶- خلاصه و نتیجه گیری

طی انجام تحقیق حاضر، ابتدا مروری بر فعالیت‌های انجام شده بر روی صفحات تاشده صورت گرفت. موضوع ابرسازه‌های کامپوزیتی کاملاً جدید بوده و از لحاظ طراحی بی بدیل و کاملاً نوآورانه محسوب می‌گردد. در این تحقیق سازه‌های با صفحات تاشده تشریح شده و جزئیات مدولارها و شرایط هندسی و انواع بارگذاری بر روی سازه کاملاً توضیح داده شد.

با توجه به شرایط مرزی و بارگذاری مشخص شده، حل دستی و حل عددی برای هر یک از سازه‌های فولادی به

مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های مرطوب، قلیایی و اسیدی می‌باشد.

۳-۴- مقایسه سازه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر و سازه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر

با مقایسه نمونه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و نمونه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر در جدول ۱۰ در می‌یابیم که هر دو سازه دارای وزن مساوی می‌باشند، در صورتی که سازه کامپوزیتی دارای حداکثر باربری ۱۳۲/۴ کیلو نیوتن و سازه فولادی دارای حداکثر باربری ۶۴ کیلو نیوتن می‌باشد، که تقریباً نصف باربری سازه کامپوزیتی است. سازه کامپوزیتی دارای نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه ۶/۲ و در سازه فولادی این نسبت ۳ می‌باشد. علاوه بر این با توجه به مزایای کامپوزیت‌ها که در قسمت مقایسه نمونه فولادی و کامپوزیتی ذکر شد، نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه فولادی بسیار به صرفه تر و عملی تر می‌باشد.

۵- ساخت نمونه و انجام آزمایش

در این بخش تصاویری از نمونه واقعی سازه تاشده کامپوزیتی آورده شده است. شکل ۱۷ نشان دهنده یک مدولار واقعی از جنس کامپوزیت نمد شیشه / پلی استر می‌باشد. تقویت کننده‌های عرضی نیز به وضوح در تصویر قابل مشاهده می‌باشند. همچنین در تصویر ۱۸ می‌توان پیچ شدن صفحات انتهایی مدولار به زمین را مشاهده کرد. با پیچ کردن صفحات انتهایی مدولار بالایی با مدولارهای پایین مراحل نصب سازه به پایان رسید. در شکل ۱۹ از یک سازه ساخته شده از صفحات تاشده کامپوزیتی یک مینی‌بوس به جرم ۵ تن آویزان گشته و آزمایش استحکام سازه بطور موفقیت‌آمیزی به انجام رسیده است.

که سازه کامپوزیتی دارای حداکثر باربری و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه بالاتری می‌باشد. علاوه بر این سازه‌های تا شده کامپوزیتی برخلاف سازه‌های متعارف نیاز به هر گونه اسکلت شامل ستون‌ها و تیرها را منتفی می‌کنند. ویژگی صفحات تا شده، این سیستم را قادر می‌سازد که ده‌ها برابر وزن خود را تحمل کند. بارهای وارده بر این سازه‌ها در کل سازه پخش و به فونداسیون منتقل می‌شود عدم تمرکز نیروها و وزن سبک این سازه‌ها نیاز به فونداسیون‌های بزرگ را منتفی می‌کند و امکان ساخت سازه‌هایی با دهانه‌های بسیار بزرگ را فراهم می‌سازد. این سازه‌ها دارای قابلیت مانور در معماری داخلی می‌باشند. حمل و ذخیره‌سازی آسان، نصب ساده و سریع، اتصالات ساده پیچ و مهره‌ای، تعداد اندک قطعات، زمان و نیروی مورد نیاز برای برپایی و نصب را در مقایسه با سازه‌های متعارف تا چندین برابر کاهش می‌دهد. در نهایت با توجه به مزایای کامپوزیت‌ها که در قسمت مقایسه نمونه فولادی و کامپوزیتی ذکر شد، نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه فولادی بسیار به صرفه‌تر و عملی‌تر می‌باشد. بر اساس روش طراحی ارایه شده در این تحقیق، سازه‌ای با صفحات تا شده با استفاده از مواد کامپوزیت ساخته شده و مورد آزمایش استحکام قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش سازه فوق، بیانگر قابلیت بالای باربری سازه فوق می‌باشد.

ضخامت ۶/۵ میلی متر، سازه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و سازه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر که دارای وزنی برابر با سازه کامپوزیتی می‌باشد، انجام شد و حداکثر بار اعمالی مجاز بر سازه و نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه برای هر یک از سازه‌های فوق، در هریک از دو روش بدست آورده و مقایسه شد.

از مقایسه نمونه‌های فولادی و نمونه کامپوزیتی نتیجه می‌شود که نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه فولادی هم ضخامت خود دارای نسبت حداکثر بار قابل تحمل سازه به وزن سازه بالاتری است. وزن سازه فولادی حدود چهار برابر سازه کامپوزیتی است که این حمل و نقل چنین سازه‌ای را مشکل می‌نماید، همچنین سازه فولادی دارای هزینه بسیار زیاد قالبگیری، جوشکاری مشکل صفحات به یکدیگر، خوردگی و شرایط نصب دشوار می‌باشد. در مقابل سازه کامپوزیتی دارای مزایای مزایای وزن سبک، استحکام بالا، نصب آسان و سریع، دقت فوق العاده بالا در تنظیم فواصل، آب بندی سریع و راحت، عمر طولانی، ضد زلزله بودن، عایق حرارتی بودن، عایق صوتی بودن و مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های مرطوب، قلیایی و اسیدی می‌باشد.

با مقایسه نمونه کامپوزیتی به ضخامت ۶/۵ میلی متر و نمونه فولادی به ضخامت ۱/۳۸ میلی متر مشاهده می‌شود که هر دو سازه دارای وزن مساوی می‌باشند، در صورتی

۷- مراجع

- [1] Hani, B., Yves, W. (2008). "Origami - Folded Plate Structures, Architecture". The Proceeding of 10th World Conference of Timber Engineering, Miyazaki, Japan, IBOIS-CONF-2008-021
- [2] Šekularac, N., Ivanović Šekularac, J., Čikić Tovarović, J. (2012). "Folded Structures in Modern Architecture". Architecture and Civil Engineering, Vol. 10, No 1, pp. 1 – 16
- [3] <http://www.gmp-architekten.de>, accessed 12th Oct (2009).
- [4] Tonias, D., Zhao, J. (2006). "Bridge Engineering: Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges". McGraw-Hill Professional, USA, pp. 86
- [5] Petrović, M. (1978). "Arhitektonske konstrukcije II". Izdavačko-informativni centar studenata (ICS) Beograd, pp. 5
- [6] Weinand, Y. (2009). "Innovative Timber Constructions". Journal of the International Association for Shell Structures and Spatial Structures IASS, Madrid, Vol. 50, pp. 115.

- [7] Herzog, Natterer, Schweitzer, Volz, Winter (2004). "Timber Construction Manual". Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel Boston Berlin, pp. 243
- [8] Wurm, J. (2007). "Glass Structures, Design and Construction of Self-Supporting Skins". Birkhäuser Verlag AG, Basel, Boston, Berlin, PP. 158, 181-183
- [9] Cassinello, F. (1974). Construcción. Hormigonería. Madrid: Rueda.
- [10] Wilby, CB. (1998). Concrete folded plate roofs. London: Arnold.
- [11] Cement (1961), "Overzicht Nederlandsche shaalconstructies", p. 424-53.
- [12] Brekelmans, LGM. (1964). "Geprefabriceerde wand elementen en vouwschalen voor een kerk te Hoensbroek". Cement, n.8, pp. 468-9.
- [13] Meischke, JC. (1964). "Geprefabriceerde wandelementen en vouwschalen voor een kerk te Hoensbroek". Cement, n. 6, pp. 352-4.
- [14] Seyn, W. K. and Hofman, J. W. (1964). "De constructie van het visafslaggebouw te Scheveningen". Cement, n.8, pp. 461-7.
- [15] Broek, JH. (1963). "Het auditorium voor de Technische Hogeschool te Delft (I). Stedebouwkundige en architectonische conceptie". Cement, n. 12, pp. 730-2.
- [16] Dusschotten, H. (1964). "Het auditorium voor de Technische Hogeschool te Delft (II). De constructie". Cement, n.3, 161-170.
- [۱۷] شماره اختراع: ۶۲۴۳۰، تاریخ ثبت اختراع: ۸۸/۹/۲۵، موضوع اختراع: سازه‌های فضایی بدون اسکلت.
- [18] Iran Composites Institute, Internal Report, (2010).
- [19] Beer, F. P., Johnston E. R. (2006). "Mechanics of materials". John T. DeWolf,
- [20] ABAQUS, Standard User's Manual Version 6.10, Hibbit, Karlsson, Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I, (2011).