



تحلیل آماری تاگوچی در طراحی آزمایش‌های تجربی پوسته‌های کامپوزیتی به منظور جذب انرژی

سیدمرتضی حسینی¹، محمود شریعتی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، کدپستی 9177948974، mshariati44@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 اردیبهشت 1394

پذیرش: 12 خرداد 1394

ارائه در سایت: 24 خرداد 1394

کلید واژگان:

تاگوچی

جذب انرژی مخصوص

پوسته استوانه‌ای

سازه‌های کامپوزیتی

چکیده

در این مقاله روش آماری تاگوچی، در طراحی سازه پوسته‌های جذب انرژی کامپوزیتی با هندسه استوانه‌ای پیاده‌سازی شد. پارامترهای شش‌گانه طراحی سازه جذب انرژی در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارتند از: پارامترهای هندسی قطرداخلی، طول و ضخامت و پارامترهای چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده و نوع فرآیند ساخت و تولید که پارامترهای قطرداخلی، طول و چیدمان لایه‌ها، چهار سطحی و سه پارامتر دیگر دو سطحی می‌باشند بنابراین از آرایه متعامد ال 16 برای تحلیل تاگوچی استفاده شده است. هدف از فرایند طراحی آزمایش در این پژوهش، بیشینه کردن میزان جذب انرژی مخصوص در سازه‌ی معرفی شده، بود. نتایج نشان داد که به ترتیب چیدمان لایه‌ها و پارامترهای هندسی قطرداخلی و ضخامت بیشترین اثر و پارامترهای دیگر کمترین اثر را بر روی میزان جذب انرژی مخصوص این دسته از سازه‌ها دارند و لذا پیشنهاد می‌گردد به سه پارامتر اول در فرآیند طراحی سازه‌های جذب انرژی اهمیت بیشتری داده شود. از دیگر نتایج مهم این تحلیل آماری، تعیین مشخصات بهینه پوسته جذب انرژی کامپوزیتی با چیدمان لایه‌های (90/0)، قطرداخلی 63 میلیمتر، ضخامت 2 میلیمتر، فرآیند تولید قالبگیری کیسه‌ای، نوع الیاف تقویت‌کننده کربن و طول 160 میلیمتر بود.

Taguchi statistical analysis of experimental tests designed to absorb the energy of the composite shells

Seyed Morteza Hosseini¹, Mahmoud Shariati^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

2- Department of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, mshariati44@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 May 2015

Accepted 02 June 2015

Available Online 14 June 2015

Keywords:

Taguchi

specific energy absorption

cylindrical shell

composite structures

ABSTRACT

In this paper, Taguchi statistical method is implemented in the design of energy-absorbing composite shell structures with cylindrical geometry. Six energy-absorbing structure design parameters considered in this study are: geometric parameters including internal diameter, length and thickness; the other parameters are the stacking sequence of layers, fiber reinforcement type and manufacturing process. The first three parameters and the remaining ones have four and two levels respectively. So the orthogonal array L16 was used for analysis of Taguchi. The purpose of design process of experiment in this study was to maximize the amount of specific energy absorbed in the structure. The result shows that the stacking sequence of layers and geometry parameter including internal diameter and thickness had some effect and the other parameters had minimal effect on specific energy absorption. The first three parameters had the most important role in design of energy absorbing structures. Another important result of this analysis was the optimal characteristics of composite energy absorbing shells with stacking sequence of layers (90/0), internal diameter 63 mm, thickness 2 mm, vacuum bag molding process, the fiber reinforcement type carbon and the length 160 mm were determined.

1- مقدمه

پارامترهایی مانند نوع الیاف، نوع رزین، نوع چیدمان لایه‌ها، هندسه نمونه‌ها، شرایط تولید، کسر حجمی الیاف و سرعت تست، وابسته است [1]. در نیمه دوم قرن گذشته، مسائل زیادی مربوط به جذب انرژی مطرح شده است، که این مسائل به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه‌هایی در حین برخورد کمک می‌کند. این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه‌های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارت‌های انسانی و

امروزه کاربرد سازه‌های کامپوزیتی در صنایعی مانند هوافضا، اتومبیل‌سازی و صنایع ورزشی به جهت مزایایی همچون وزن کم و استحکام بالا، به طور فزاینده‌ای در حال رشد می‌باشد. لذا این سازه‌ها برای حصول وزن و سفتی بهینه تحلیل می‌شوند.

قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی، یکی از موضوعات مهم در حوادث هواپیماها و اتومبیل‌هاست. جذب انرژی این نوع سازه‌ها به

Please cite this article using:

S. M. Hosseini, M. Shariati, Design, Taguchi statistical analysis of experimental tests designed to absorb the energy of the composite shells, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 345-352, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جذب انرژی داشت به علت اینکه برای این اختلاف نمی‌توان به طور واضح دلیلی مطرح کرد.

در سال‌های اخیر نیز اوجلسکی و گوتوویچی [10] یک تحقیق تجربی روی قابلیت جذب انرژی لوله‌ها و مخروط‌های ناقص کامپوزیتی از نوع کربن-اپوکسی و شیشه/اپوکسی انجام دادند و اثر پارامترهای نوع الیاف، نوع سازه، هندسه و شکل نمونه‌ها، زاویه الیاف و نوع لایه‌چینی را روی قابلیت جذب انرژی تحلیل کردند.

پالانیولو و سایرین [11] با انجام آزمایش‌های شبه‌استاتیک روی نه نمونه هندسه متفاوت از لوله‌های کامپوزیتی، اثر هندسه، ابعاد و مکانیزم ماشه⁸-گذاری را روی تغییرشکل پیش‌رونده لوله‌های کامپوزیتی سائز کوچک بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های خود را به روش لایه‌چینی دستی از الیاف شیشه تک-جهته و رزین پلی‌استر ساختند. تحقیقات ایشان نشان داد که جذب انرژی شکل‌های هندسی خاص نسبت به شکل‌های هندسی استاندارد ماند مقاطع مربعی و شش‌گوش، بهتر است.

جکسون و سایرین [12] با انجام آزمایش‌های شبه‌استاتیک و دینامیک روی نمونه نیم‌دایره‌ای شکل پوسته کامپوزیتی از نوع کربن/اپوکسی، اثر طراحی چندلایه را روی قابلیت جذب انرژی آن بصورت تجربی مورد پژوهش قرار دادند و یک چندلایه با لایه‌چینی شبه‌ایزوتروپیک را دارای بالاترین جذب انرژی مخصوص معرفی نمودند.

نیک‌نژاد و سایرین [13] آزمایش‌های شبه‌استاتیک را روی لوله‌های کامپوزیتی از نوع شیشه/وینیل‌استر، توخالی و همچنین توپر پر شده از فوم پلی‌اورتان با ویژگیهای هندسی مختلف جهت بررسی ویژگی‌های جذب انرژی نمونه‌ها انجام دادند. لازم به ذکر است که آن‌ها تعدادی از لوله‌های کامپوزیتی توخالی و توپر را به صورت عرضی بین دو صفحه صلب تحت بار فشاری قرار دادند که نتایج تجربی نشان داد که وجود فوم پلی‌اورتان در داخل لوله‌های کامپوزیتی میزان جذب انرژی مخصوص را افزایش می‌دهد.

پیکت و دایال [14] اثر هندسه لوله و زاویه الیاف را روی جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی دایره‌ای از جنس شیشه/اپوکسی بصورت عددی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و با نتایج تجربی که در جایی دیگر انجام شده بود مقایسه کردند که تطابق قابل توجه‌ای بین نتایج عددی و تجربی وجود داشت.

کیم و سایرین [15] مطالعه‌ای بر روی ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای کامپوزیتی با الیاف تقویت‌کننده متفاوت کربن، کولار و هیبرید کربن-کولار بوسیله آزمایش‌های شبه‌استاتیک انجام دادند.

پالانیولو و سایرین [16] یک تحقیق تجربی روی لوله‌های کامپوزیتی پالتروژن با پروفیل‌های مربعی و دایره‌ای از جنس شیشه/پلی‌استر و شیشه-/وینیل‌استر انجام دادند و اثرات شکل هندسی، ماشه، نرخ کرنش و نوع رزین را روی جذب انرژی بررسی نمودند.

وریر و سایرین [17] اثر شرایط مرزی را روی جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی پلیمری جدارنازک، مورد پژوهش قرار دادند.

در روش‌های آماری سنتی، میانگین‌ها برای مقایسه نتایج و انحراف از-معیار برای توانایی ادعای وجود اختلاف مشخص بین دو گروه استفاده می‌شوند. در روش تاگوچی نسبت سیگنال به نویز⁹ برای مقایسه نتایج به کار می‌رود. مقوله‌ی نسبت سیگنال به نویز کاملاً در ارتباط با توانا بودن طراحی یک محصول است. استحکام طراحی به توانایی محصول برای مقابله با

مادی به شدت کاهش می‌یابد. برای نشان دادن قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدارنازک، از پارامتر انرژی جذب شده بر واحد جرم¹ (جذب انرژی مخصوص) استفاده می‌شود که این پارامتر یک عامل سازه‌ای بوده و جزء خواص مواد نمی‌باشد. مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم برابر است با نسبت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بر جرم سازه [2].

محققین زیادی در مورد قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی تحقیق کرده‌اند. لوله‌های متقارن محوری²، به علت سادگی ساخت و نزدیک بودن به هندسه سازه‌های دارای شایستگی برخورد³ واقعی، برای انجام بیشتر کارهای تجربی روی مواد کامپوزیتی جاذب انرژی به کار می‌روند [2].

نتایج آزمایش‌های برخورد شبه‌استاتیک⁴ لوله‌های کامپوزیتی که توسط فارلی [3] انجام شدند نشان داد که لوله‌های گرافیت/اپوکسی مقادیر انرژی جذب شده مخصوص بزرگتری نسبت به لوله‌های کولار/اپوکسی و شیشه-/اپوکسی با ساختار لایه‌ای مشابه دارند.

هامادا و سایرین [4] روی لوله‌های کامپوزیتی با زمینه پلی‌اتراکتون که با الیاف کربن آس چهار⁵ و آی‌ام‌هفت⁶ و الیاف شیشه اس‌دو⁷ تقویت شده بود تحقیقاتی را انجام دادند. لوله‌های اس‌دو/پلی‌اتراکتون جذب انرژی مخصوص حدودا 20% پائین‌تری نسبت به لوله‌های آس‌چهار/پلی‌اتراکتون و آی‌ام-هفت/پلی‌اتراکتون داشتند.

توسط فارلی [5] روی لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی با لایه‌چینی⁴ $(0 \pm \theta)$ ، به صورتی که زاویه تتا از 0 تا 90 درجه متغیر بود آزمایش‌هایی صورت گرفت که تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در روند جذب انرژی این مواد دیده شد. انرژی مخصوص لوله‌های شیشه/اپوکسی و کولار/اپوکسی با افزایش زاویه تتا تا 45 درجه و بالای آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر انرژی مخصوص لوله‌های کربن/اپوکسی ابتدا با افزایش زاویه تتا تا 45 درجه کاهش می‌یابد و بعد از آن ثابت باقی می‌ماند.

فارلی و جونز [6] برخورد شبه‌استاتیکی لوله‌های کربن/اپوکسی و شیشه-اپوکسی با لایه‌چینی^s $(0 \pm \theta)$ ، را برای بیان اثر جهت‌گیری الیاف روی قابلیت جذب انرژی، مورد بررسی قرار دادند. همانطور که زاویه تتا افزایش می‌یابد، قابلیت جذب انرژی لوله‌های کربن/اپوکسی به طور غیرخطی کاهش می‌یابد اما قابلیت جذب انرژی لوله شیشه/اپوکسی به طور غیرخطی با زاویه تتا افزایش می‌یابد.

تورنتن و ادواردز [7] اثرات هندسه در جذب انرژی لوله‌های با مقاطع گرد، مربعی و مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج نشان داد برای یک لایه‌چینی و هندسه لوله مشخص، انرژی مخصوص ترتیب زیر را دنبال می‌کند:

دایروی < مربعی < مستطیلی

فیرفول [8] و فیرفول و هول [9] اثرات ابعاد نمونه‌ها بر انرژی مخصوص لوله-های شیشه/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند که 5 سری از لوله‌ها با دامنه قطر بین 16 تا 50 میلیمتر مورد بررسی واقع شدند. انرژی مخصوص با افزایش قطر لوله کاهش یافت. انرژی مخصوص برای یک قطر داده شده ابتدا افزایش یافت و سپس با کاهش نسبت قطر به ضخامت، کاهش یافت. این نتیجه‌گیری بدست آمد که نمی‌توان یک رابطه جهانی برای پیش‌بینی قابلیت

1- Specific Energy Absorption (SEA)

2- Axi-symmetrical

3- Crashworthy

4- Quasi-Static

5- AS4

6- IM7

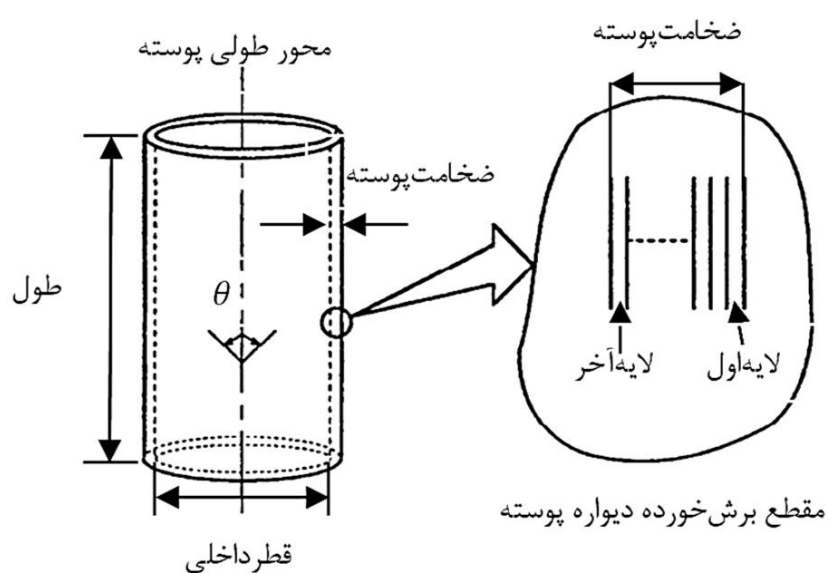
7- S2

8- Trigger

9- Signal to Noise Ratio (S/N)

جدول 1 پارامترهای طراحی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی و سطوح آن‌ها در تحلیل آماری تاگوچی

پارامتر طراحی سازه	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
قطر داخلی (میلیمتر)	90	110	125	63
طول (میلیمتر)	40	80	120	160
ضخامت (میلیمتر)	1	2		
چیدمان لایه‌ها	(0)	(90/0)	(±45)	(45/0/-45)
الیاف تقویت‌کننده	الیاف شیشه	الیاف کربن		
فرآیند تولید	قالبگیری کیسه‌ای	تزریق رزین		



شکل 1 مشخصات هندسی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

برای تحلیل آماری به روش تاگوچی با توجه به اینکه طبق جدول 1، سه پارامتر چهارسطحی و سه پارامتر دیگر دوسطحی بودند، آرایه متعامد ال 16 برای طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. مزیت اصلی این روش کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش هزینه مواد مصرفی و زمان می‌شود. رتبه‌بندی پارامترها جهت تعیین اولویت‌های طراحی و از طرفی نیز تغییرات در اطراف هدف، از طریق بهینه‌سازی فرآیند به حداقل می‌رسد. عامل کلیدی فلسفه تاگوچی کاهش تغییرپذیری است. عموماً، مشخصه عملکرد هر محصول یا فرآیندی دارای یک مقدار هدف یا اسمی است. منظور، کاهش تغییرپذیری پیرامون این مقدار هدف است. پس از طراحی آزمایش‌ها، تعداد 16 آزمایش پیشنهاد داده شد که در جدول شماره 2 فهرست شده است.

2-2- آزمایش‌های تجربی

تعداد 16 عدد پوسته استوانه‌ای پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی در آزمایشگاه کارگاه غیرفلزی پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد تولید گردیدند. نوع زمینه مورد استفاده از نوع رزین‌های اپوکسی با نام تجاری آکسون 2040/2047¹ بود که برای تمامی این پوسته‌ها از آن با شرایط اختلاط رزین و هاردنر یکسان یعنی نسبت وزنی 100 به 32 استفاده شده است. برای پوسته‌ها از دو نوع الیاف تقویت‌کننده شیشه و کربن با لایه‌چینی مشابه استفاده شده است که دارای چهار نوع لایه‌چینی مختلف بودند. این چهار نوع لایه‌چینی مستلزم استفاده از الیاف تک‌جهته (با زاویه 0 نسبت به محور طولی لوله)، الیاف دوجته (90/0 و ±45) و الیاف سه‌جهته (45-/+45/0) بودند.

برای تولید پوسته‌های استوانه‌ای از مندرل‌هایی که جنس آن از نوع پی‌وی‌سی بود و دارای چهار قطر خارجی 63، 90، 110 و 125 میلی‌متر بود،

تغییرات بستگی دارد و بر مبنای این ایده است که کیفیت، تابع طراحی مناسب است. یک طراحی بدون عیب یا یک محصول خوب دارای سیگنال قوی است که کارایی مورد نظر را داشته باشد و با تغییرات نویزهای داخلی یا خارجی مقابله کند [18].

در روش تاگوچی متغیرها به دو دسته‌ی قابل کنترل و غیرقابل کنترل (دارای هزینه زیاد برای کنترل)، تقسیم می‌شوند. هرچه مقدار نویز بیشتر باشد، ناسازگاری محصول بیشتر است. از آن جایی که یک پروسه‌ی تولید خوب نیازمند طراحی خوب می‌باشد، قبل از شروع فرآیند تولید باید استحکام طراحی مطالعه شود. از نظر تاگوچی، اگر یک محصول برای جلوگیری از شکست در زمینه کاری‌اش طراحی شود در نتیجه‌ی آن محصولات معیوب به طور هم‌زمان کاهش پیدا می‌کند. این یکی از جنبه‌های روش تاگوچی است که اغلب برداشت اشتباهی از آن می‌شود. در این روش درواقع تلاشی برای کاهش تغییرات نمی‌شود بلکه تلاش بسیاری می‌شود که اثرات ناشی از آن را کم کرد. نویز در طی فرآیند وجود دارد ولی تلاش این است که با طراحی یک سیگنال قوی اثرات ناشی از آن را کم کرد. تلاش روش تاگوچی تنها انتخاب عامل‌های کنترلی‌ای، که به محصولی بهتر می‌انجامد، نمی‌باشد. بلکه هدایت کردن یک پروسه با حساسیت کم به نویز مد نظر می‌باشد. با وجود اینکه نویز را نمی‌توان حذف کرد می‌شود آن را به حداقل رساند [18].

نسبت سیگنال به نویز، میانگین را همانند انحراف بین جواب‌ها به حساب می‌آورد؛ بنابراین می‌توان تحلیل با آن را دوبعدی در نظر گرفت، درحالی‌که روش‌های عادی تحلیل تک‌بعدی هستند. با این حال، سیگنال به نویز بی‌بعد برای اندازه‌گیری عامل‌های کنترلی که اثر منفی بر کارایی یک طراحی دارند، استفاده می‌شود و اجازه‌ی تنظیم راحت عامل‌ها را می‌دهد. با داشتن یک فرآیند مطمئن، تنظیمات به راحتی با استفاده از نسبت سیگنال به نویز، برای رسیدن به هدف مطلوب انجام می‌شوند. نسبت سیگنال به نویز از جهتی ترکیب میانگین و انحراف‌هاست. ایجاد ثبات بیشتر و یا کم شدن انحرافات بین مقادیر، به این نسبت می‌افزایند. از نسبت سیگنال به نویز می‌توان برای نزدیک شدن به مقدار هدف و یا برای کاهش انحرافات در کیفیت محصول استفاده کرد. برای مثال یکی از نسبت‌هایی که به تاگوچی مربوط می‌باشد، مقدار بزرگ‌تر بهتر است، می‌باشد. این چنین نسبتی وقتی انتخاب می‌شود که مقدار هدف مشخصی مانند جذب انرژی مخصوص هدف باشد [18].

آنچه که تاکنون در تحقیقات پیرامون این حوزه انجام شده است، بررسی برخی از پارامترهای طراحی به تنهایی و یا تعدادی از آن‌ها با هم است لذا با روش آماری تاگوچی می‌توان ترکیبی از این پارامترها را بصورت همزمان در طراحی سازه در نظر گرفت و بهینه نمود. هدف این پژوهش پیاده‌سازی روش تاگوچی و اولویت‌بندی پارامترهای هندسی (شامل قطر داخلی، طول و ضخامت)، چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده و نوع فرآیند ساخت و تولید جهت طراحی سازه‌های جاذب انرژی بهینه می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

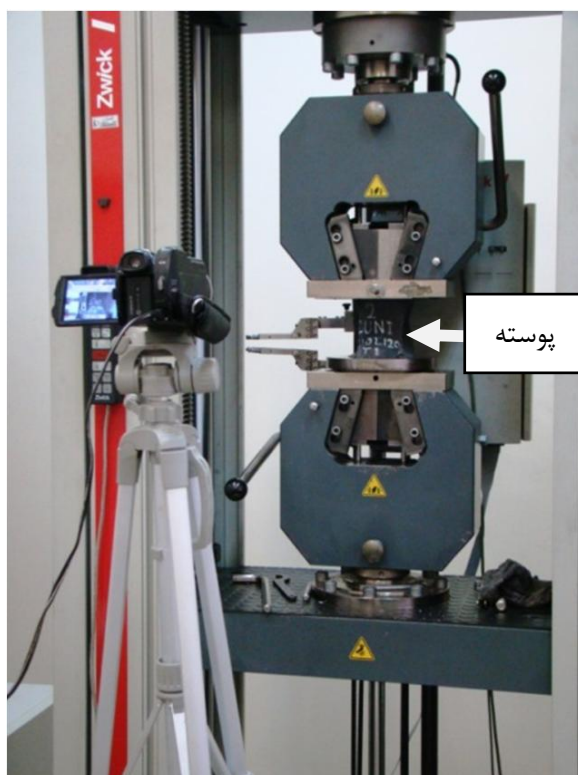
2-1- طراحی آزمایش‌ها

برای بررسی شش پارامتری که قبلاً گفته شد با توجه به اینکه مطابق جدول 1 برای هر پارامتر سطوحی در نظر گرفته شد، از روش آماری تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های تجربی شبه‌استاتیک محوری پوسته‌های استوانه‌ای با مشخصات هندسی مطابق شکل 1، استفاده گردید.

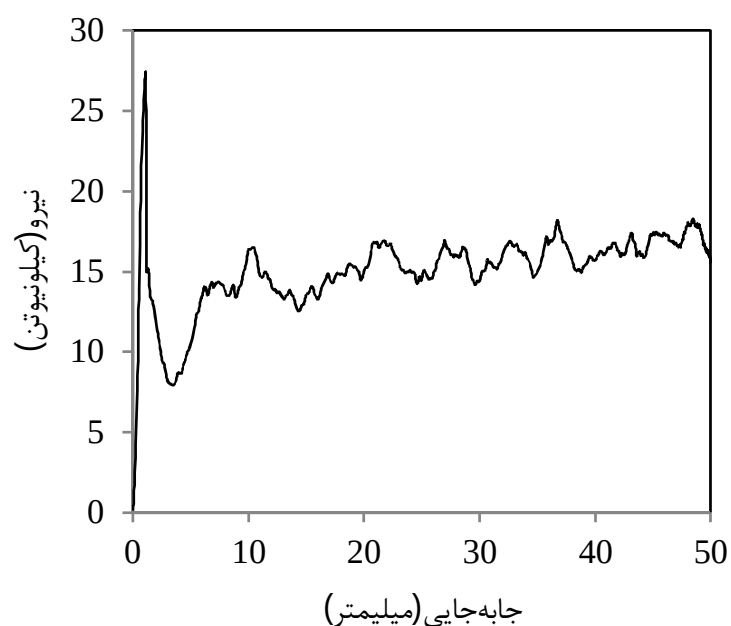
1- Axson Epolam 2040/2047

جدول 2 طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

شماره آزمایش	قطر داخلی (میلیمتر)	طول (میلیمتر)	ضخامت (میلیمتر)	لایه‌چینی	الیاف تقویت‌کننده	فرآیند تولید
1	63	40	1	(0)	الیاف شیشه	قالبگیری کیسه‌ای
2	90	80	2	(0)	الیاف شیشه	قالبگیری کیسه‌ای
3	110	120	1	(0)	الیاف کربن	تزریق رزین
4	125	160	2	(0)	الیاف کربن	تزریق رزین
5	63	80	1	(90/0)	الیاف کربن	تزریق رزین
6	90	40	2	(90/0)	الیاف کربن	تزریق رزین
7	110	160	1	(90/0)	الیاف شیشه	قالبگیری کیسه‌ای
8	125	120	2	(90/0)	الیاف شیشه	قالبگیری کیسه‌ای
9	63	120	2	(±45)	الیاف کربن	قالبگیری کیسه‌ای
10	90	160	1	(±45)	الیاف کربن	قالبگیری کیسه‌ای
11	110	40	2	(±45)	الیاف شیشه	تزریق رزین
12	125	80	1	(±45)	الیاف شیشه	تزریق رزین
13	63	160	2	(45/0/-45)	الیاف شیشه	تزریق رزین
14	90	120	1	(45/0/-45)	الیاف شیشه	تزریق رزین
15	110	80	2	(45/0/-45)	الیاف کربن	قالبگیری کیسه‌ای
16	125	40	1	(45/0/-45)	الیاف کربن	قالبگیری کیسه‌ای



شکل 3 دستگاه آزمون فشاری محوری پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی



شکل 4 نمودار نیرو-جابه‌جایی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

استفاده شد و دو نوع فرآیند ساخت و تولید کامپوزیت‌ها برای تولید پوسته‌ها به کار گرفته شد که عبارت بودند از روش قالبگیری کیسه‌ای¹ و روش تزریق رزین به کمک خلاء² که در روش اول لایه‌چینی بصورت دستی و با قلم‌مو و غلطک صورت گرفت و در نهایت بعد از زمان ژل شدن تحت فشار خلاء قرار گرفت. اما در روش دوم لایه‌چینی بصورت خشک با اسپری چسب مخصوص بر روی مندرل‌ها انجام گرفت و از فشار منفی خلاء برای راندن رزین داخل الیاف استفاده شد. در نهایت در انتهای هر دو روش تولید، پخت بصورت یکسان براساس مدل پخت پیشنهادی رزین که در برگه اطلاعات فنی آن آمده است یعنی 24 ساعت در دمای محیط و 16 ساعت در دمای 70 درجه توسط کوره صورت گرفت. پس از برش پوسته‌ها در طول‌های مورد نظر توسط دستگاه تراش آزمایشگاه طراحی به کمک کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد، نمونه‌ها همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است برای تست شبه‌استاتیک فشاری آماده شدند.

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است پوسته‌ها در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد توسط دستگاه یونیورسال³ با سرعت 0/3 میلیمتر بر ثانیه تحت آزمون فشاری محوری قرار گرفتند. و نمودار نیرو-جابه‌جایی برای تمام پوسته‌ها استخراج شد که بعنوان مثال نمودار یکی از پوسته‌ها در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 2 پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پس از ساخت و برش

- 1- Vacuum Bagging (VB)
- 2- Vacuum Infusion Process (VIP)
- 3- Zwick Z250

در نهایت مساحت زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی بر جرم تخریب‌شده پوسته‌ها در آزمایش تقسیم شده و میزان جذب انرژی مخصوص برای هر پوسته محاسبه شد که در جدول شماره 3 گزارش شده است.

3- نتایج و بحث

هدف از تحلیل تاگوچی بیشینه‌کردن جذب انرژی مخصوص می‌باشد. بنابراین برای بیشینه‌شدن این عامل بایستی بالاترین نسبت سیگنال به نویز مربوط به جذب انرژی مخصوص را در تحلیل، مورد توجه قرار داد. پس از محاسبه مقادیر جذب انرژی مخصوص مربوط به هر آزمایش، تحلیل آماری صورت گرفت که نتایج سیگنال به نویز هر آزمایش و نسبت سیگنال به نویز پارامترها و رتبه‌بندی آنها به ترتیب در جدول‌های 4 و 5 گزارش شده است.

جدول 3 جذب انرژی مخصوص پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده

شماره آزمایش	جذب انرژی مخصوص (ژول بر گرم)
1	14/20
2	34/69
3	7/29
4	21/71
5	50/25
6	33/74
7	22/52
8	37/18
9	43/98
10	19/54
11	9/97
12	5/78
13	43/71
14	8/81
15	33/60
16	25/21

جدول 4 نسبت سیگنال به نویز بدست آمده برای آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نسبت سیگنال به نویز
1	23/05
2	30/80
3	17/25
4	26/73
5	34/02
6	30/56
7	27/05
8	31/41
9	32/87
10	25/82
11	19/97
12	15/24
13	32/81
14	18/90
15	30/53
16	28/03

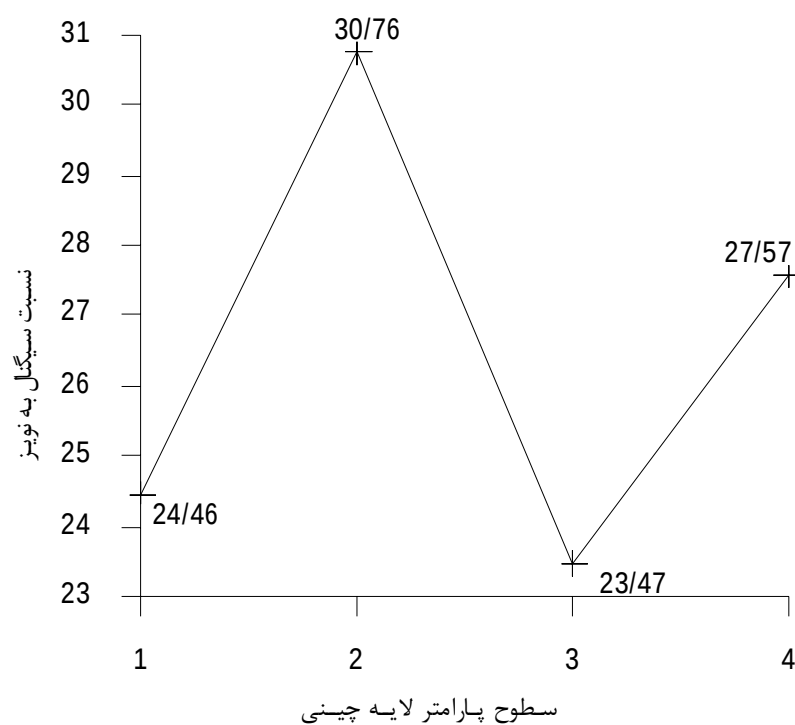
جدول 5 نسبت سیگنال به نویز و رتبه‌بندی پارامترها برای بیشینه‌کردن جذب انرژی مخصوص

نسبت سیگنال به نویز	لایه‌چینی	قطر داخلی (میلیمتر)	ضخامت (میلیمتر)	فرآیند تولید	الیاف تقویت کننده	طول (میلیمتر)
سطح 1	24/46	26/52	23/67	28/69	24/90	25/40
سطح 2	30/76	23/70	29/46	24/44	28/23	27/65
سطح 3	23/47	25/35				25/11
سطح 4	27/57	30/69				28/10
دلتا ^(*)	7/29	6/98	5/79	4/26	3/32	3
رتبه	1	2	3	4	5	6

^(*) اختلاف مقدار بیشینه و کمینه است.

همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، بیشترین نسبت سیگنال به - نویز مربوط به چیدمان الیاف سطح 2 یعنی لایه‌چینی با الیاف دوجهته (90/0) می‌باشد که الیاف در جهت صفر یا همراستا با محور طولی پوسته استوانه‌ای توسط الیاف جهت 90 بصورت عرضی حمایت می‌شود و لذا از کمانش یا فروریزی ناپایدار آن جلوگیری نموده و باعث افزایش جذب انرژی مخصوص آن می‌شود و لذا این موضوع تاییدکننده صحت نتایج می‌باشد. نسبت سیگنال به نویز بعدی مربوط به سطح چهار، یعنی لایه‌چینی با الیاف سه‌جهته (45/-45/0+) می‌باشد که این موضوع در مقایسه با جذب انرژی مخصوص به ترتیب الیاف تک‌جهته و دوجهته سطوح 1 و 3 بسیار قابل‌توجه بوده و لذا اثر ترکیب و ترتیب لایه‌چینی را بوضوح آشکار ساخته و اهمیت آن را با رتبه اول در طراحی این نوع سازه‌ها آشکار می‌سازد.

طبق شکل 6 نظم خاصی در ترتیب نسبت سیگنال به نویز دیده نمی‌- شود، لذا نمی‌توان یک رابطه کلی برای پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی براساس این دامنه قطر (63 تا 125 میلیمتر) داشت که البته این موضوع برای لوله‌- های شیشه/پوکسی با دامنه قطرهای بین 16 تا 50 میلیمتر نیز توسط فیرفول در مراجع [8,9] اتفاق افتاده بود. بنابراین استنباط منطقی که می‌- توان داشت این است که بایستی برای یک سازه جاذب انرژی خاص قطر بهینه را بدست آورد و طراحی سازه مربوطه را براساس آن انجام داد.



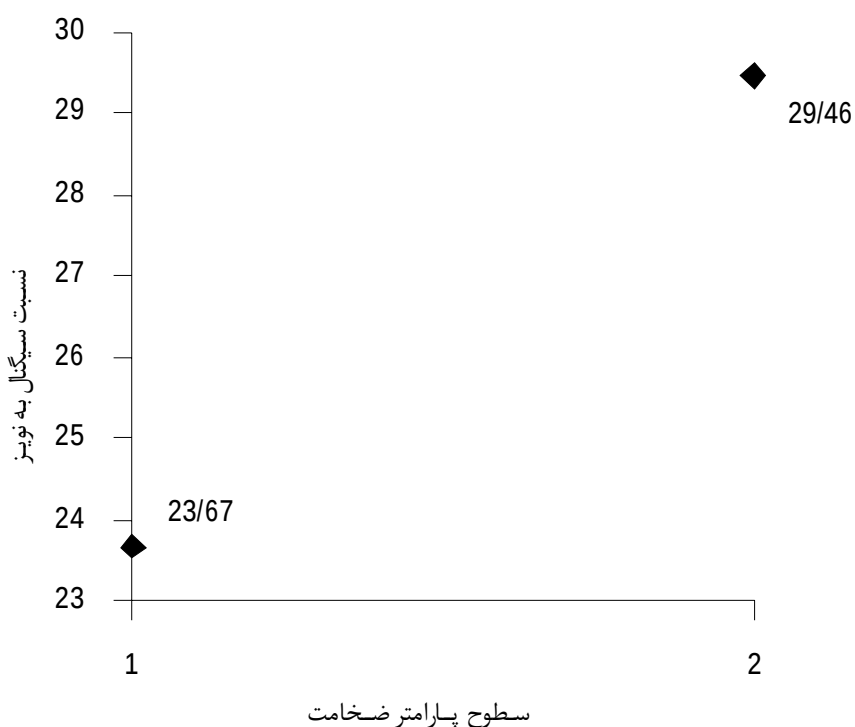
شکل 5 نسبت سیگنال به نویز پارامتر لایه‌چینی در سطوح چهارگانه

تولید در مقایسه با پارامتر لایه‌چینی و پارامترهای هندسی قطرداخلی و ضخامت تأثیر مهمی در جذب انرژی مخصوص ندارد.

براساس شکل 9 همانطور که تحقیقات پیشینیان [6,4,3] نیز نشان می‌داد، میزان جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کربنی با مشخصات فوق نسبت به پوسته‌های دارای الیاف تقویت‌کننده شیشه بیشتر بود که این خود نیز می‌تواند به عنوان یکی دیگر از نقاط بررسی و تأیید اعتبار نتایج تحلیل به شمار رود.

مطابق شکل 10 یک پراکندگی در نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی طول وجود دارد که نتیجه‌گیری مشخصی در مورد این پارامتر را با مشکل مواجه می‌سازد، لذا این پارامتر نیز به نظر می‌رسد بایستی برای سازه‌ای خاص بهینه گردد و به طور کل پارامتری با تأثیرگذاری ناچیز به حساب می‌آید.

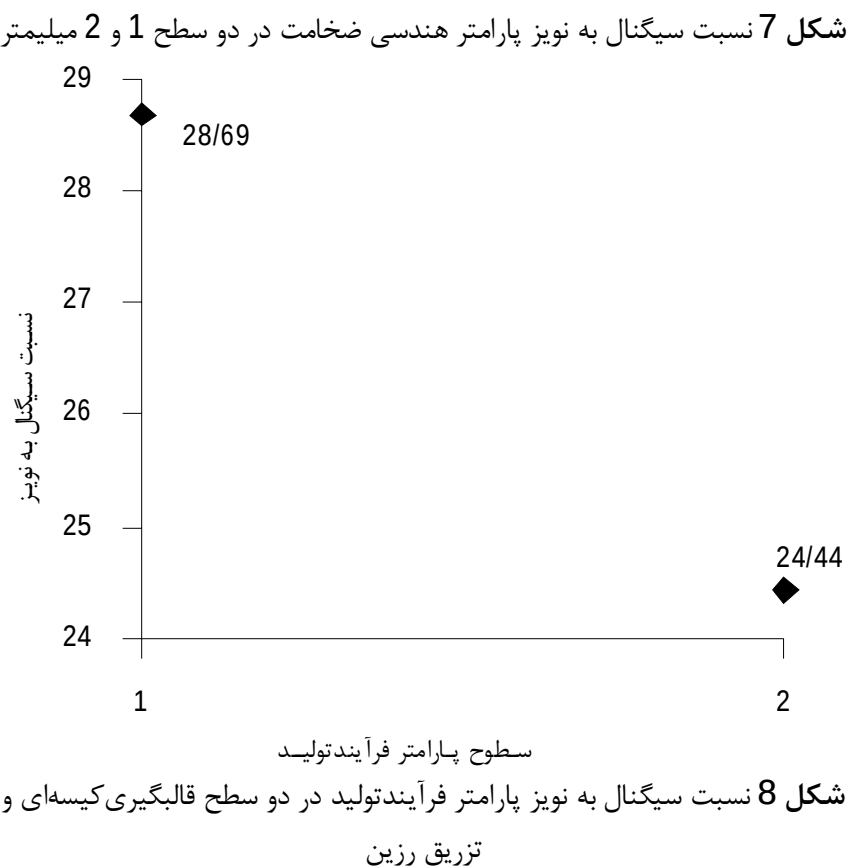
یکی دیگر از نتایج مهم این تحلیل آماری این بود که پوسته جاذب انرژی کامپوزیتی بهینه دارای چیدمان الیاف (90/0)، قطرداخلی 63 میلیمتر، طول 160 میلیمتر، ضخامت 2 میلیمتر، فرآیند تولید قالبگیری کیسه‌ای و نوع الیاف تقویت‌کننده کربن پیشنهاد شد که نسبت سیگنال به نویزی که برای این سازه بهینه پیش‌بینی گردید، 43/10 می‌باشد.



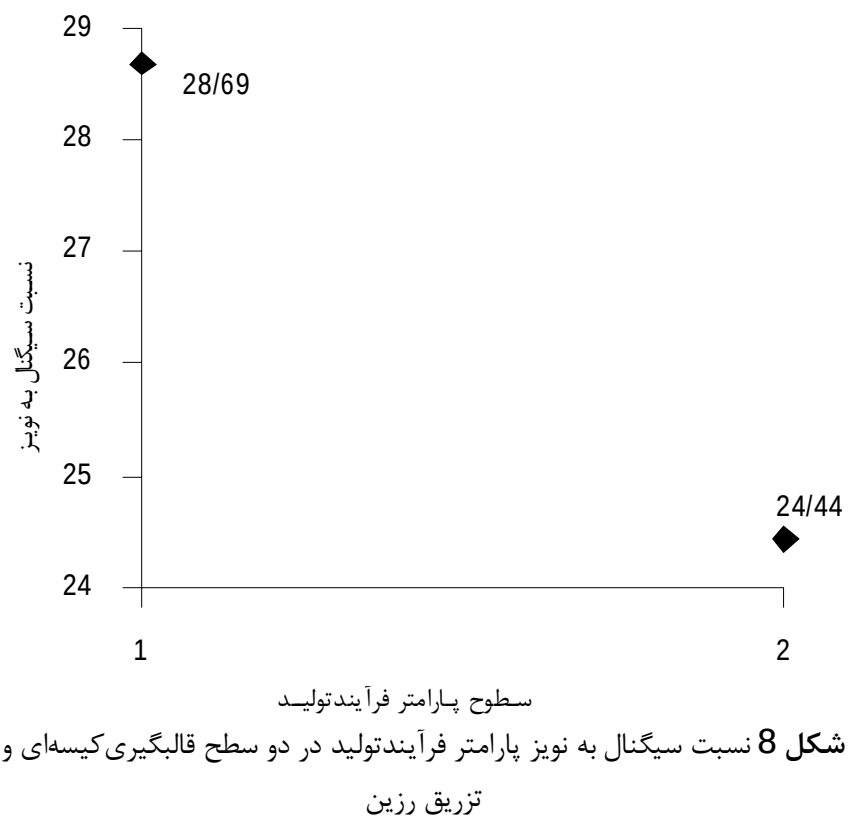
شکل 6 نسبت سیگنال به نویز پارامتر قطرداخلی در سطوح چهارگانه

همانطور که پیش‌بینی می‌شد، طبق شکل 7 میزان جذب انرژی پوسته‌های با ضخامت 2 میلیمتر بیشتر بود که این می‌تواند اعتبار نتایج را تأیید کند. البته راماکریشنا و هامادا [19] عملکرد برخورد لوله‌های کربن/پلی‌اتراکتون با تفاوت در مقادیر ضخامت و قطر را مورد مطالعه قرار دادند. وقتی که ضخامت بین 2 تا 3 میلیمتر بود، همه انواع لوله‌ها بالاترین انرژی مخصوص را به نمایش می‌گذاشتند. با افزایش ضخامت تا این دامنه بحرانی انرژی مخصوص افزایش می‌یافت، در حالی که بالای این محدوده مقدار آن کاهش می‌یافت. بنابراین به نظر می‌رسد که ضخامت پوسته‌ها نیز در محدوده‌ای مشخص دارای جذب انرژی مخصوص بالاتر نسبت به سایر ضخامت‌ها می‌باشند و این دامنه بهینه برای طراحی سازه‌های جاذب انرژی با مشخصات فوق می‌باشد.

براساس شکل 8 نسبت سیگنال به نویز فرآیند تولید قالبگیری کیسه‌ای نسبت به فرآیند تزریق رزین به کمک خلاء بیشتر بود. این موضوع با توجه به تحقیقاتی که توسط ولی‌زاده و سایرین [20] روی نمونه‌های ساخته شده از همین نوع رزین و الیاف انجام شده بود و نتایج آن حاکی از افزایش استحکام نمونه‌های ساخته شده به روش تزریق رزین به کمک خلاء نسبت به قالبگیری کیسه‌ای بود، به ظاهر در تضاد بود. البته علت این مسئله در تحقیق آن‌ها، کسر حجمی الیاف بیشتر در فرآیند تزریق رزین به کمک خلاء عنوان شده بود. اما در واقعیت این مطلب صحت ندارد که فکر کنیم با افزایش مقدار الیاف، میزان جذب انرژی مخصوص مواد کامپوزیتی بهتر می‌شود. توضیح قابل قبول این موضوع این است که با افزایش کسر حجمی الیاف، در واقع حجم رزین (ماتریس) بین الیاف کاهش می‌یابد که این سبب افزایش چگالی رزین شده که در نهایت منجر به کاهش استحکام بین‌لایه‌ای مواد کامپوزیتی می‌گردد و کاهش استحکام بین‌لایه‌ای، سبب ایجاد ترک‌های بین‌لایه‌ای در بارهای پایین شده و در نهایت قابلیت جذب انرژی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین تغییرات در جذب انرژی در اثر تغییر کسر حجمی الیاف، بوسیله پاسخ برخورد¹ مواد کامپوزیتی تعیین می‌گردد [2]. و از طرفی نیز با توجه به اختلاف کم نسبت سیگنال به نویز در این پارامتر به نظر می‌رسد که فرآیند



شکل 7 نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی ضخامت در دو سطح 1 و 2 میلیمتر



شکل 8 نسبت سیگنال به نویز پارامتر فرآیند تولید در دو سطح قالبگیری کیسه‌ای و تزریق رزین

یک سازه جاذب انرژی خاص، قطر بهینه را بدست آورده و طراحی سازه مربوطه را براساس آن انجام داد. البته این اتفاق در پارامتر هندسی طول نیز می‌افتد که درجه اهمیت در آن بسیار کم است.

تحقیق درمورد پارامتر هندسی ضخامت مطابق پیش‌بینی‌های اولیه پیش رفت و پوسته با ضخامت بیشتر جذب انرژی مخصوص بالاتری را از خود نشان داد که البته با توجه به پژوهش‌هایی که توسط سایر محققین صورت گرفته است، به نظر می‌رسد که دارای یک محدوده بهینه بین 2 تا 3 میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به اینکه کسر حجمی الیاف در فرآیند تزریق رزین به کمک خلاء نسبت به فرآیند قالبگیری کیسه‌ای بیشتر بود نتایج نشان دادند که با افزایش کسر حجمی الیاف، قابلیت جذب انرژی کاهش پیدا می‌کند، و از طرفی با توجه به رتبه‌بندی که به دست آمد به نظر این پارامتر خیلی تأثیرگذار نمی‌باشد.

در بررسی پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده نیز همانطور که پیش‌بینی می‌شد، جذب انرژی لوله‌های کربنی بیشتر از شیشه‌ای بود.

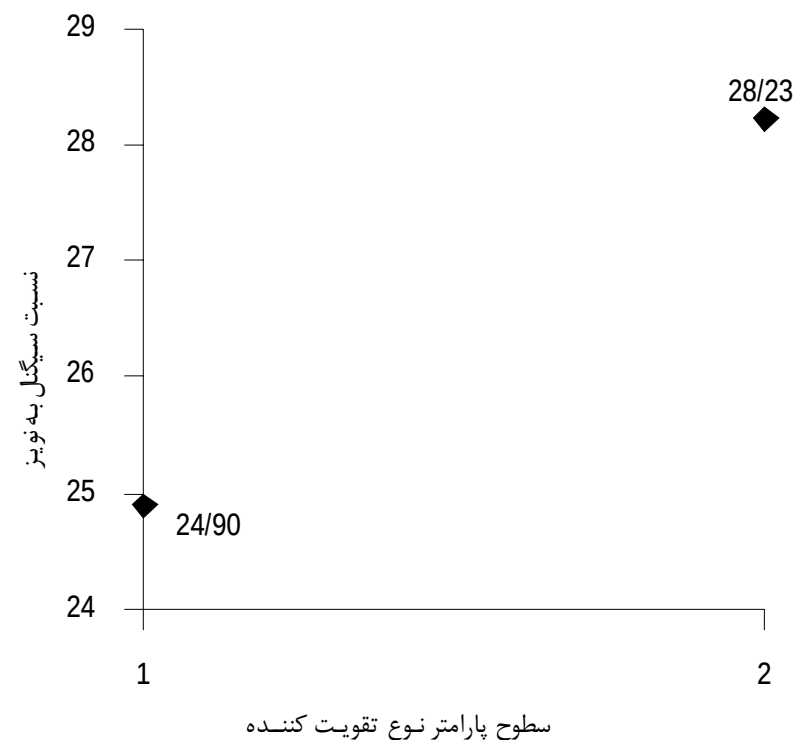
یکی دیگر از نتایج مهم این تحلیل آماری این بود که پوسته جاذب انرژی کامپوزیتی بهینه دارای چیدمان الیاف (90/0)، قطرداخلی 63 میلیمتر، طول 160 میلیمتر، ضخامت 2 میلیمتر، فرآیند تولید قالبگیری کیسه‌ای و نوع الیاف تقویت‌کننده کربن می‌باشد.

5- تقدیر و تشکر

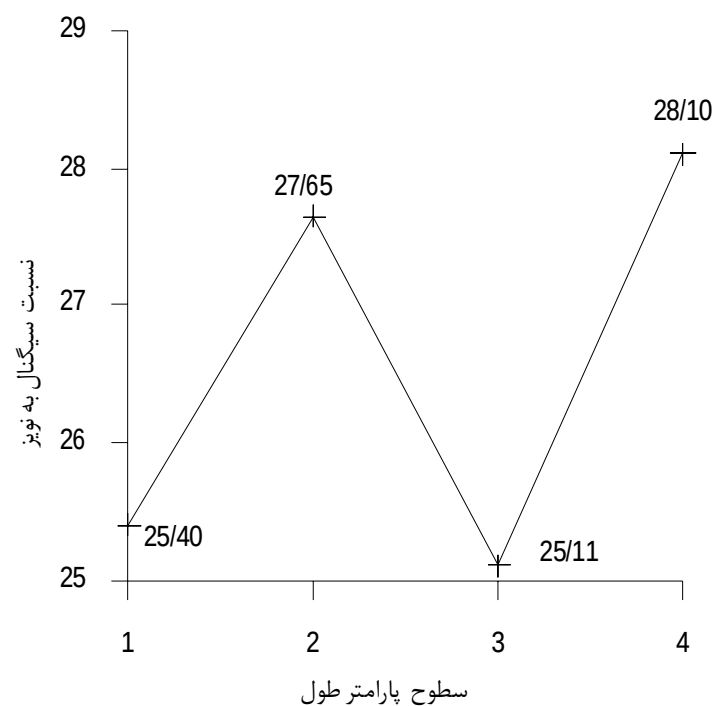
در اینجا لازم است از ریاست محترم پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد، جناب آقای دکتر احد ضابط و همچنین مدیر فنی پروژه توربین‌های بادی پژوهشکده هواخورشید، جناب آقای دکتر بهنام معتکف ایمانی که با در اختیار گذاشتن مواد اولیه، امکانات و تجهیزات کارگاهی و آزمایشگاهی تولید و آزمایش این نمونه‌ها را امکان‌پذیر ساختند و همچنین پرسنل محترم کارگاه‌های فلزی و غیرفلزی پژوهشکده هواخورشید و آزمایشگاه‌های طراحی به کمک کامپیوتر و خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد که در ساخت و آزمایش این پوسته‌ها کمک فراوانی کردند، تقدیر و تشکر شود.

6- مراجع

- [1] G. Lu, T. Yu, *Energy absorption of structures and materials*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, England, pp.317-341, 2003.
- [2] G. C. Jacob, J. F. Fellers, S. Simunovic, J. M. Starbuck, *Energy Absorption in Polymer Composite Materials for Automotive Crashworthiness*, J. Comp. Mater., vol. 36, pp. 813-850, 2002.
- [3] G. L. Farley, Effect of Fiber And Matrix Maximum Strain on the Energy Absorption of Composite Materials, *J. Comp. Mater.*, Vol. 20, pp. 322-334, 1986.
- [4] H. Hamada, S. Ramakrishna, Effect of fiber material on the energy absorption behavior of Thermoplastic composite tubes, *J. Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 9, No. 3, pp. 259-279, 1996.
- [5] G. L. Farley, Energy Absorption of Composite Material and Structures, *Proc. 43rd American Helicopter Society Annual Forum*, St. Louis, USA, pp. 613-627, 1987.
- [6] G. L. Farley, R. M. Jones, Energy Absorption Capability of Composite Tubes and Beams, *NASA TM-101634, AVSCOM TR-89-B-003*, 1989.
- [7] P. H. Thornton, P. J. Edwards, Energy absorption in composite tubes, *J. Comp. Mater.*, Vol. 16, pp. 521-545, 1982.
- [8] A. H. Fairfull, *Scaling Effects in the Energy Absorption of Axially Crushed Composite Tubes*, Ph.D Thesis, University of Liverpool, UK, 1986.
- [9] A. H. Fairfull, D. Hull, Effects of Specimen Dimensions on the Specific Energy Absorption of Fibre Composite Tubes, *Proc. Of ICCM 6*, Edited by F. L. Matthews, N. C. R. Buskell, J. M. Hodgkinson, J. Morton, Elsevier Science and Publishers, pp. 3.36-3.45, 1987.
- [10] S. Ochelski, P. Gotowicki, Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites. *Composite Structures*, Vol. 87, pp. 215-224, 2009.
- [11] S. Palanivelu, W. V. Paepegem, J. Degrieck, J. Vantomme, D. Kakogiannis, J. V. Ackeren, D. V. Hemelrijck, J. Wastiels, *Crushing and energy absorption*



شکل 9 نسبت سیگنال به نویز پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده در دو سطح الیاف شیشه و کربن



شکل 10 نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی طول در سطوح چهارگانه

در انتها لازم به ذکر است که دو پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده و ضخامت با توجه به تحقیقات زیادی که در گذشته توسط محققین روی این دو پارامتر صورت گرفته است و همچنین نتایج بدست آمده در این پژوهش قابل پیش‌بینی بودند، که این موضوع خود تأییدکننده اعتبار این سازه بهینه پیشنهادی می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل که در جدول 5 آمده است، نشان می‌دهد که:

به ترتیب چیدمان لایه‌ها و پارامترهای هندسی قطر و ضخامت بیشترین اثر را روی میزان جذب انرژی مخصوص این نوع سازه‌ها دارند و فرآیند ساخت و تولید، نوع الیاف تقویت‌کننده و پارامتر هندسی طول کمترین اثر را دارند و لذا بایستی در فرآیند طراحی سازه‌های جاذب انرژی به سه پارامتر اول و بخصوص پارامتر چیدمان لایه‌ها اهمیت بیشتری داد.

لایه‌چینی با الیاف دوجته (90/0) بیشترین جذب انرژی مخصوص را در بر داشت و لایه‌چینی با الیاف سه‌جته (45/0/-45) در مرتبه بعدی از نظر میزان جذب انرژی قرار داشت.

بررسی پارامتر هندسی قطرداخلی پوسته‌ها نیز نشان داد بایستی برای

- [17] N. A. Warrior, T. A. Turner, E. Cooper, M. Ribeaux, Effects of boundary conditions on the energy absorption of thin-walled polymer composite tubes under axial crushing. *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 905–913, 2008.
- [18] R. K. Roy, *Design of Experiments Using the Taguchi Approach : 16 Steps to Product and Process Improvement*. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.369-402, 2001.
- [19] S. Ramakrishna, H. Hamada, Energy Absorption Characteristic of Crash Worthy Structural Composite Materials, *Key Engineering Materials*, Vol. 141–143, pp. 585–620, 1998.
- [20] P. Valizadeh, S. M. Hosseini, H. Alvandi, Studying the physical and mechanical behavior of fibre-reinforced epoxy composite, fabricated by VARTM and VB, *The 3rd International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-3)*, Tehran, Iran, 2012.
- performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions. *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 992-1007, 2011.
- [12] A. Jackson, S. Dutton, A. J. Gunnion, D. Kelly, Investigation into laminate design of open carbon-fibre/epoxy sections by quasi-static and dynamic crushing. *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 2646-2654, 2011.
- [13] A. Niknejad, H. Assaei, S. A. Elahi, A. Golriz, Flattening process of empty and polyurethane foam-filled E-glass/vinylester composite tubes – An experimental study. *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 479-492, 2013.
- [14] L. Pickett, V. Dayal, Effect of tube geometry and ply-angle on energy absorption of a circular glass/epoxy crush tube – A numerical study. *Composites: Part B*, Vol. 43, pp. 2960-2967, 2012.
- [15] J. S. Kim, H. J. Yoon, K. B. Shin, A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, pp. 198-207, 2011.
- [16] S. Palanivelu, W. V. Paepegem, J. Degrieck, J. V. Ackeren, D. Kakogiannis, D. V. Hemelrijck, J. Wastiels, J. Vantomme, Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes. *Polymer Testing*, Vol. 29, pp. 224-234, 2010.