

## طراحی سازه های فضا کار یک و چند لایه تاشو با هندسه آزاد

مهدی بابائی

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

mbabaei@znu.ac.ir

### چکیده:

سازه های تاشو یکی از انواع جالب و پیچیده از سازه های فضا کار می باشند که کاربردهای بسیار زیادی در زمینه های مختلف مهندسی از جمله مهندسی عمران، مکانیک و هوا فضا دارند. در این مقاله، پس از مرور کلی بر انواع سازه های فضا کار تاشو، نحوه طراحی با هندسه آزاد سازه های تاشوی یک و چند لایه قیچی سان بررسی شده و شرایط و روابط تاشوندگی برای این نوع سازه ها ارائه شده است. شرایط تاشوندگی به گونه ای توسعه داده شده است که در حالت های باز شده و جمع شده و در حین باز شدن هیچ تنش در سازه ایجاد نمی شود. بنابراین آزادی در هندسه و چند لایه بودن، طراحی این سازه ها را پیچیده تر می کند و شرایط خاص برای امکان تاشوندگی نیاز می باشد. روش طراحی سازه های چند لایه تشریح شده و چند نمونه از این سازه ها برای نشان دادن صحت روابط، طراحی و ارائه شده اند که نشان دهنده کارایی روابط می باشند.

کلید واژه ها: سازه های فضا کار تاشو، شرایط تاشوندگی، هندسه آزاد، سازه های چند لایه.

### مقدمه:

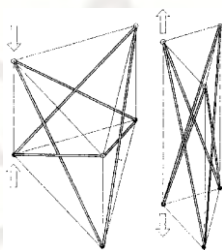
نیاز به سازه های متحرک که بطور ساده و سریع نصب شده و قابل حمل و نصب مجدد در مکانهای مورد نیاز باشند، باعث پیدایش سازه های فضا کار تاشو شده است. خصوصیت تاشوندگی ممکن است تنها برای یکبار یا برای چندین بار استفاده شود. شبکه فضایی، در هر زمان که ساختمان ساخته (برپا) می شود، باز شده و سپس قبل از انتقال به انبار یا محل دیگر بصورت یک بسته فشرده شده، تا می شود؛ بطوریکه روند فوق می تواند برای چندین بار تکرار شود. از بین مطالعات فراوان سازه ها، متفکر و هنرمند دوره رنسانس، لئوناردو داوینچی (۱۵۱۹-۱۴۵۲) یک مکانیزم بازشوی ساده مسطح طراحی کرده است. سازه های سه بعدی از این نوع برای اولین بار توسط مهندس اسپانیایی امیلیو پرز پینرو (۱۹۷۲-۱۹۳۶) توسعه داده شده است [۱]. در سالهای بعد نظریه او توسط دیگران دنبال شد و بیش از همه توسط افرادی چون Calatrava Ziegler، Valcarcel، Escrig، Hernandez، Gantes، Shan، Rosenfeld [۲] و سایر محققان توسعه بیشتری یافت.

برخی از کاربردهای مهم سازه های تاشو عبارتند از: سرپناه های اضطراری، پلهای اضطراری، جرثقیلهای، پله ها، برجها و دکلهای باز شو و تاشو، ساختمانها و سرپناه های موقت در نقاط دوردست، گنبد ها یا چلیک های کروی و سهموی ثابت و یا متحرک، داربستها، قالب بندیها، اسکلت بندی برای سازه های دائمی، سرپناه بعنوان سایه بان یا محافظت در برابر بارندگی، انبارها، پوششها، مخازن و تعمیرگاههای سهل الحصول موقت یا دائمی، آنتن های بشقابی، بازوها و اندامهای رباتها، اردوگاههای سبک وزن موقت و سازه های تفریحی، دیوارهای جداکننده، پرده ها، قوسها و تیر و دیوارهای سازه ای، گلخانه ها و سایر فضاهای سرپوشیده مورد نیاز در کشاورزی، تئاترها و کنسرت های سیار، صنایع بسته بندی و صنایع اسباب بازی، ابزار و وسایل مکانیکی و صنعتی، اجزاء ایستگاههای فضایی، پانلهای خورشیدی، رادیاتورها، بالها و تیرکهای تاشو، سیستم های محافظ ضربه، رفلکتورها و آنتن های سهمی وار، واحدهای اسکان برای ایستگاههای فضایی. مزایای اصلی سازه های تاشو عبارتند از: پیش ساخته بودن و سهولت ساخت، قابلیت سرعت و سهولت در نصب، سهولت انتقال و انبار کردن،

سبک بودن و کم حجم بودن در تاشه تا شده، قابلیت جمع‌آوری، انتقال و نصب مجدد به دفعات نامحدود، قابلیت استفاده در ابعاد و دهانه‌های مختلف، چند منظوره بودن، اقتصادی بودن و بالاخره سبز بودن.

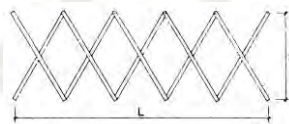
### سازه‌های تاشوی قیچی سان

سازه‌های X مجموعه‌هایی از قیچی‌های متعدد می‌باشند. هر کدام از اتصال قیچی بصورت نشان داده شده در زیر (شکل ۱) می‌باشد. اگر این الگوها به یکدیگر متصل شوند، بطوریکه سازگاری جابجایی هر قطعه فراهم شود، یک سیستم مختلطی که قادر است در یک یا دو یا سه جهت فضایی رشد یابد، بدست می‌آید. المانهای سازه‌ای، میله‌هایی هستند که در انتهایشان به یکدیگر متصل شده‌اند و در یک گره میانی بصورت لولا به هم اتصال یافته‌اند (شکل ۲).

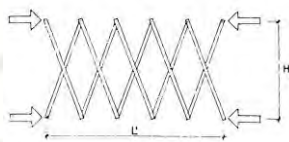


شکل ۱: اتصال قیچی سه بعدی.

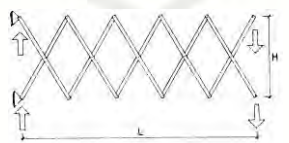
هرگاه ارتفاع شکل افزایش یابد، طول آن کاهش می‌یابد و برعکس (شکل ۳). در ادبیات فنی این یک مکانیزم نامیده می‌شود، که کاربرد آن بعنوان یک سازه، معنی ندارد، زیرا حرکت‌های آن، آنرا برای تحمل بارها ناتوان می‌کند. اما اگر با استفاده از میله‌های اضافی یا تکیه‌گاهها، ارتفاع H یا طول L آنرا ثابت نگه داریم. (شکل‌های ۴ و ۵)، سپس این مجموعه قادر به مقاومت در برابر بارها خواهد بود.



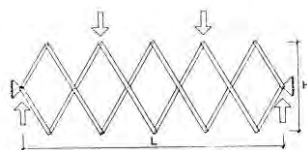
شکل ۲: پانتوگراف مسطح.



شکل ۳: تاشه در حال جمع شدن.

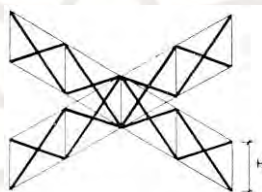


شکل ۴: تاشه تثبیت شده.

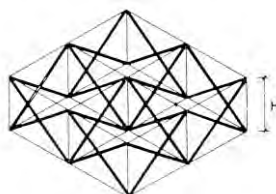


شکل ۵: تاشه بارگذاری شده.

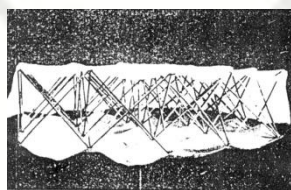
در سازه ای مشابه شکل ۶، اگر یک جهت تغییر شکل یابد، جهت دیگر همان شکل را به خود خواهد گرفت و این کار برای تغییر دادن ارتفاع  $H$  کل مجموعه، برای باز شدن یا فشرده شدن کل مجموعه کافی می‌باشد. با استفاده از این خصوصیت می‌توان یک ترکیب با تعدادی از این المانهای مسطح بسازیم (شکل ۷). در بسیاری مواقع نیاز به یک پوشش سطح برای محافظت از باران، آفتاب یا باد می‌باشد که می‌تواند به خود سازه متصل شود. این پوشش ها معمولا از پارچه می‌باشند (شکل ۸).



شکل ۶: پانتوگراف متقاطع.



شکل ۷: پانتوگراف سه بعدی.

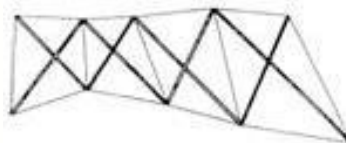


شکل ۸: تاشه پوشیده شده دو جداره.

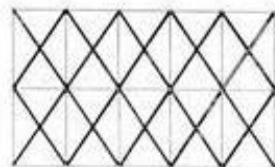
اگر بطور همزمان میله‌هایی با طولهای متفاوت و اتصال‌های خروج از مرکز را بکار بریم، گستره وسیعی از المانهای قیچی‌سان بدست می‌آید (شکل‌های ۹ تا ۱۳).

سازه‌های پانتوگراف همساز و غیرهمساز: سازه‌های پانتوگراف ممکن است بسته به روشی که دوپلت‌ها در مراحل مختلف تاشدن، تغییر شکل می‌یابند به دو گروه سازه‌های پانتوگراف همساز و غیرهمساز رده‌بندی می‌شوند. یک سازه پانتوگراف تاشو، همساز گفته می‌شود، در صورتیکه هیچ تغییر شکل داخلی در یونیت‌ها در هر مرحله از تاشدن وجود نداشته باشد، و در غیر اینصورت غیرهمساز نامیده می‌شود.





شکل ۹: پانتوگراف با هندسه آزاد.



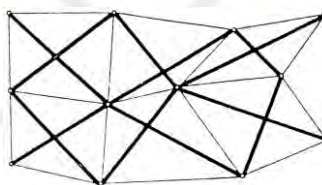
شکل ۱۰: پانتوگراف با واحدهای مستطیلی.



شکل ۱۱: پانتوگراف با واحدهای روزه‌ای.



شکل ۱۲: پانتوگراف با واحدهای متوازی الاضلاع.



شکل ۱۳: پانتوگراف آزاد.

### شرایط تاشوندگی و فرمولابندی

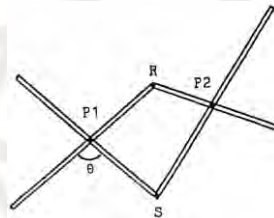
دوپلت: واحد سازنده سازه‌های تاشوی پانتوگراف دوپلت نامیده می‌شود، که شامل دو یونیت می‌باشد که توسط یک لولا به هم متصل شده‌اند (شکل ۱۴-الف). هر یونیت آزادانه حول محور چرخشی لولا و مفصل‌های متصل شده به انتهایش قابلیت دوران دارد. دوپلت‌ها می‌توانند مستطیلی، دوزنقه‌ای و لوزی باشند که هر جفت مجاور، رابطه زیر را ارضاء می‌کند (شرط تاشوندگی):

$$P1R + P1S = P2R + P2S$$

که P1R و P1S و P2R و P2S به ترتیب طول یونپیت‌های نشان داده شده می‌باشند.  
حال اگر به تعداد n دوپلت (n ≥ 2) به گره‌های R و S از شکل فوق وصل شود، شرایط قابلیت تاشوندگی را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$P_1R + P_1S = P_2R + P_2S = \dots = P_iR + P_iS \quad (2)$$

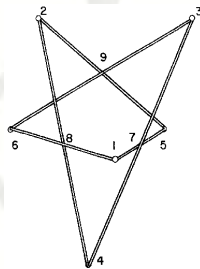
که در آن  $P_i$  لولای دوپلت نام و R و S اتصال مفصلی دوپلت نام و (i+1)ام است.



شکل ۱۴-الف: دوپلت‌های مجاور.

ممکن است یونپیت‌ها بصورت شکل (۱۴-ب) باشند. شرط لازم و کافی برای تاشدن و بازشدن سازه عبارتند از:

$$\begin{aligned} L_{1-8} + L_{4-8} &= L_{1-7} + L_{4-7} \\ L_{2-8} + L_{6-8} &= L_{2-9} + L_{6-9} \\ L_{3-7} + L_{5-7} &= L_{3-9} + L_{5-9} \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۱۴-ب: دوپلت‌های سه بعدی مثلثی.

#### ۴-۱ فرمولاسیون کلی

باتوجه به محدودیت نرم افزار فرمین (Formian) [۷] برای ایجاد هندسه سازه‌های تاشو، در این مقاله فرمولاسیون هندسی بطور کامل انجام گرفته است. برای فرموله کردن هندسه در حالت کلی دو نوع دوپلت مستطیلی و ذوزنقه‌ای در یک صفحه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۵). شکل (۱۶) مقطع یک سازه چلیکی یا گنبدی با قوس دایره و شکل (۱۷) یک سازه با انحنا را نمایش می‌دهد. معادلات مربوط به هر دوپلت بصورت زیر می‌باشد [۸ و ۹]:

$$\beta_i = \pi/2 - b_i/2 \quad (4)$$

$$\alpha_1 = b_0 + b_1/2, \quad \alpha_2 = b_0 + b_1 + b_2/2, \quad \alpha_3 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3/2, \dots \quad (5)$$

شرایط تاشوندگی:

$$O_1A + O_1B = O_2A + O_2B$$

(۶)

پارامترهای لازم برای معرفی هندسه عبارتند از:

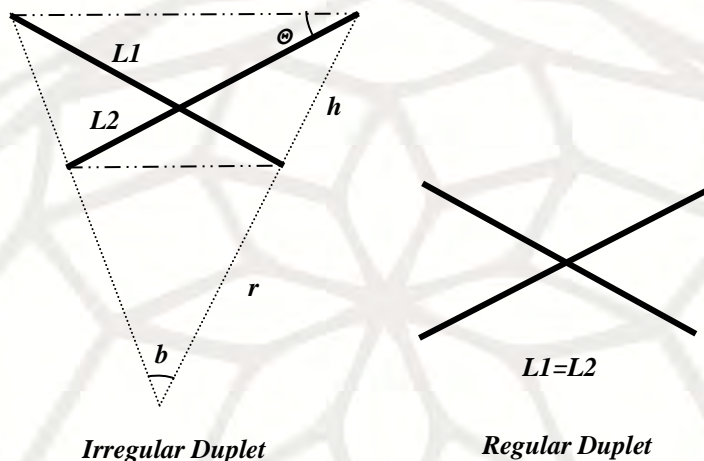
s: زاویه مرکزی چلیک (مجموع کل زوایای b)

b: زاویه مرکزی هر دوپلت دوزنقه ای

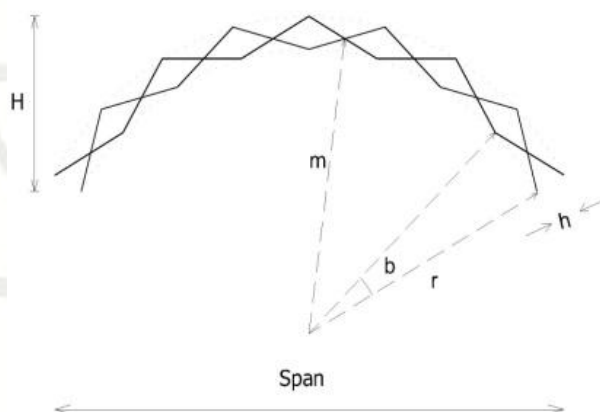
r: شعاع داخلی هر دوپلت دوزنقه ای

h: عمق سازه ای چلیک

L: طول هر یونیت

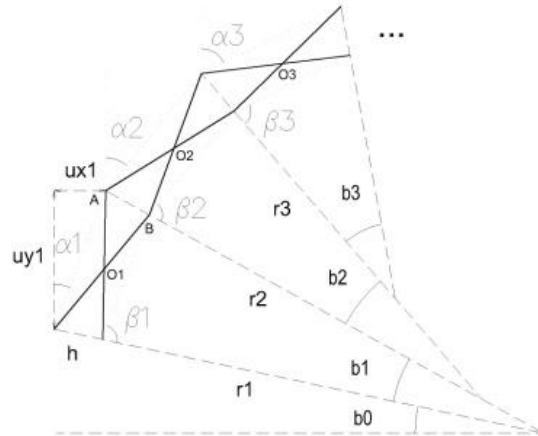


شکل ۱۵: دوپلتهای مستطیلی و دوزنقه ای در یک صفحه.



شکل ۱۶: چلیک با انحنای دایره ای.





شکل ۱۷: دوپلتهای ذوزنقه ای با انحنای آزاد.

از بین چهار پارامتر  $L, h, b, r$  سه پارامتر باید انتخاب شود و پارامتر چهارم بر اساس شرایط تاشوندگی و معادلات هندسی تعیین می شود. به عنوان مثال با معلوم بودن سه پارامتر  $r, h, b$  مقدار  $L$  بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$L = \sqrt{[(2r + h)\sin(b/2)]^2 + h^2 \cos^2(b/2)} \quad (7)$$

پارامترهای دیگر عبارتند از:

$$m = (r + h) \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + b/2)}, \quad L_1 = (r + h) \frac{\sin(b/2)}{\sin(\theta + b/2)}, \quad L_2 = L - L_1 \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{r}{L} \sin b\right) \quad (8)$$

دهانه و ارتفاع کل سازه بصورت زیر محاسبه می شود:

$$Total \ span = \sum ux = \sum_{i=1}^n [2(r_i + h) \sin(b_i/2) \sin \alpha_i] \quad (9)$$

$$Total \ height = \sum uy = \sum_{i=1}^n [2(r_i + h) \sin(b_i/2) \cos \alpha_i] \quad (10)$$

(n = number of duplets)

برای سهولت در طراحی هندسی این نوع سازه های تاشو، برنامه کامپیوتری مربوطه تهیه شده است. اتصالات این سازه های در مرجع [۱۰] بررسی شده است.

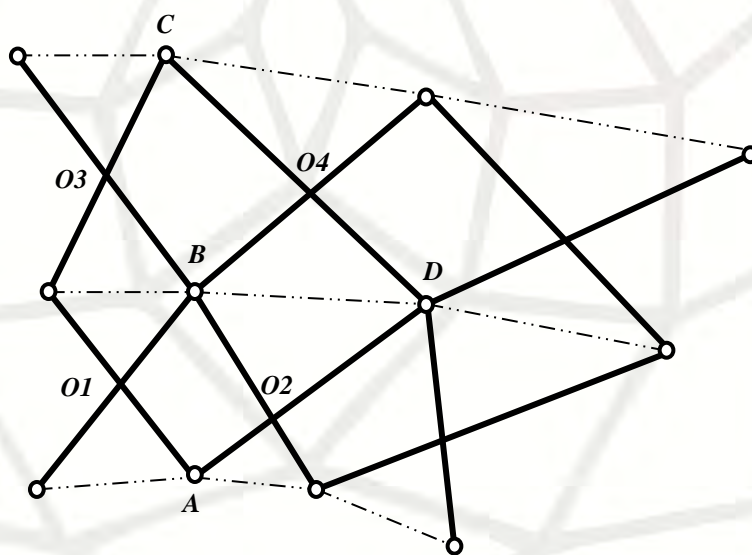
### سازه های تاشوی چند لایه

شبکه های تاشوی چند لایه برای افزایش مقاومت سازه ای یا به دلایل زیبایی شناسی مورد توجه می باشند. شکل ۱۸ یک شبکه دو لایه را نشان می دهد. به طور کلی می توان شبکه های چندلایه را براساس زاویه داخلی دوپلت لایه های روی هم به دو نوع تقسیم کرد. (۱) شبکه های با زاویه داخلی ثابت برای لایه ها؛ (۲) شبکه های با زاویه داخلی متغیر برای لایه ها. نوع اول پیچیدگی کمتری داشته و از نظر اجرایی مزیت دارد. این نوع در عین سادگی منجر به شکلها و احجام مورد نظر خواهد شد. نوع دوم آزادی بیشتری داشته و از طرف دیگر طراحی آن نیز مشکل تر خواهد بود.

شرایط تاشوندگی شبکه‌های دو و چند لایه به صورت می‌باشند:

$$\begin{aligned} O_1A + O_1B &= O_2A + O_2B \\ O_3B + O_3C &= O_4B + O_4C \\ O_2B + O_4B &= O_2D + O_4D \end{aligned} \quad (11)$$

روش طراحی شبکه‌های چندلایه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:  
طراحی لایه تحتانی (پایین‌ترین لایه) با معلوم بودن ۳ پارامتر هندسی و محاسبه پارامتر چهارم با استفاده از فرمولهای ارائه شده در بخش قبلی. روند طراحی در مرجع [۱۱] توسط بابائی و ثنائی (۲۰۰۹) بررسی شده است.  
طراحی لایه بعدی با در نظر گرفتن نوع شبکه (بر اساس تقسیم بندی بالا). در نوع اول که  $r$  و  $b$  معلوم می‌باشند (زاویه داخلی ثابت) اگر ارتفاع لایه‌ها یکسان فرض شوند، طول دوپلت‌ها به کمک فرمولها بدست می‌آید؛ اما اگر طول دوپلتها برابر فرض شوند و ارتفاع سازه‌ای لایه مجهول باشد ممکن است مسئله جواب نداشته باشد. زیرا منجر به حل معادله درجه ۲ خواهد شد که بعضی مواقع جواب ندارد. در نوع دوم نیز ممکن است بعضی مواقع مسئله جواب نداشته باشد. در این حالت متغیرهای طراحی هندسی را باید تا زمان رسیدن به جوابهای قابل قبول تغییر داد و فرآیند طراحی را تکرار کرد.



شکل ۱۸: شبکه دو لایه با هندسه آزاد

### نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا مروری کلی بر انواع سازه‌های فضاکار تاشو انجام شده است. توسعه شرایط تاشوندگی برای فراهم کردن امکان بازشدن و تاشدن این سازه‌ها انجام شده است. این شرایط به گونه‌ای توسعه داده شده است که در حالت‌های باز شده و جمع شده و در حین باز شدن و تاشدن هیچ تنش‌ی در سازه ایجاد نمی‌شود. فرمولها و مراحل طراحی سازه‌های تاشوی یک و چند لایه قیچی سان ارائه شده و شرایط و روابط تاشوندگی برای این نوع سازه‌ها در حالت هندسه آزاد ارائه گردیده است.  
برای طراحی هندسی سازه‌های تاشو تعدادی از پارامترهای طراحی باید فرض شده و پارامترهای دیگر بر اساس آنها بدست آیند که در



حالت کلی نیاز به حل معادلات درجه دوم می باشد. با توجه به اینکه آزادی هندسه و چندلایه بودن، طراحی این سازه‌ها را پیچیده تر می کند در برخی حالتها با فرض مقدار مشخص برای تعدادی از پارامترها حل این معادلات درجه دوم به جوابهای غیر ممکن منجر می شوند و لذا فرآیند طراحی هندسی باید با مقادیر جدید برای پارامترها تا زمانی که جوابهای قابل قبول ایجاد شوند باید تکرار شوند. اما به هر حال، نتایج این تحقیق نشان می دهد که امکان آزادی هندسی برای سازه های تاشوی قیچی سان وجود دارد و با یک فرآیند طراحی مناسب می توان به جوابهایی دست یافت که قابل قبول و عملی بوده و ملاحظات معماری را نیز تأمین کند.

## مراجع

- 1 - Chiltion, J. *Space Grid Structures*, Prentice Hal, 2002
- 2 - Valcarcel, J. P., Escrig, F., Vazquez, J. A. and Domainguez, E. "Computer design of expandable structures." *Space Structures* 5, Thomas. Thelford, London, PP. 1583-1592, 2002
- 3 - Escrig, F. and Valcarcel, J. P. "Geometry of expandable space structures." *Int. J. of Space Structures*, Vol. 8, No. 182, PP. 71-84, 1993
- 4 - Gantes, C., Logcher, R. D. and Connor, J. J. "Deployability conditions for curred and flat, polygonal and trapezoidal deployable structures." *Int. J. of Space Structures*, Vol. 8, No. 182, PP. 97-106, 1993
- 5 - Shan, W. "Foldable space structures." *A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy*, University of Surrey, 1990
- 6 - Rosenfeld, Y. and Logcher, R. D. "New concepts for deployable collapsible structures." *Int. J. of Space Structures*, Vol. 3, No. 1, PP. 20-32, 1988
- 7 - Nooshin, H. *Formex configuration of processing in structural engineering*. Elsevier Applied Science Publishers, 1984
- ۸ - بابایی، م. "تحلیل غیرخطی هندسی سازه های تاشوی قیچی سان." پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲
- ۹ - بابایی، م. "طراحی و ساخت سازه های تاشو با شکل و هندسه دلخواه." ثبت اختراع. اداره ثبت شرکتها و مالکیت صنعتی، ایران، ۱۳۸۴
- ۱۰ - بابائی، م. "ایده‌ای جدید برای سازه‌های تاشوی قیچی سان با هندسه متغیر"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۵، صفحات ۷۴۹ تا ۷۵۶، ۱۳۸۵
- 11 - Babaei M. , Sanaei E., *Geometric and Structural Design of Foldable Structures*, IASS Symposium 2009, Valencia, Spain, pp. 2392-2403, 2009