ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):589-600

Modeling Bistable Behaviors in Exposure of Thermo-Viscoelastic Conditions by Link-Spring-Dashpot Structures

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Shahryarifard M.M. [1],
Golzar M. [2],
Tibert G. [3]

How to cite this article
Shahryarifard M M, Golzar M, Tibert G. Modeling Bistable Behaviors in Exposure of Thermo-Viscoelastic Conditions by Link-Spring-Dashpot Structures. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):589-600.

[1]Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
[2]Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
[3]Department of Engineering Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

**Correspondence*
Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Phone:
P.O.Box: 14115-111
m.golzar@modares.ac.ir

Article History
Received: October 25, 2020
Accepted: April 28, 2021
ePublished: July 28, 2021

ABSTRACT

Bistable composites have gained increased attention in the industry, especially in aerospace, due to their unique feature of shape-changing without any need for continuous energy. The advantage of using these structures is their ability to package in small size, whilst deploying in long lengths and high stiffness ratio along the length. This unique feature, along with the advantages of other fiber-reinforced composites such as high strength, lightweight, and high rigidity, has made them a good choice for applications such as deployable booms and antennas for satellites. In this paper, the bistability of shell structures at different time-temperature conditions is investigated. To explain the mechanical behavior of the Bistable Tape Springs (BiTSs) in different conditions, an analogous 2D-model consist of rigid linkages, elastic springs and viscous dampers is proposed. As a case study, four BiTSs are fabricated and subjected to a particular thermo-viscoelastic condition to verify all stability behaviors of the 2D link-spring-dashpot (LSD) model. It was also shown that the non-dimensional strain energy plot of the 2D-LSD model through the transition path is similar to the minimum strain energy path from the 3D classical-laminate-theory (CLT) shell model for a BiTS. The 2D-LSD model could simulate the elastic and viscoelastic behavior of the BiTS at three critical points of the minimum strain energy path with a negligible discrepancy. In addition, the results of the 2D-LSD model are in good agreement with the experimental results obtained from the four fabricated specimens in terms of bistability under the particular thermo-viscoelastic condition.

Keywords Bistable, Composite, Thermo-viscoelastic, Link-Spring-Dashpot, Non-Dimensional Strain Energy.

CITATION LINKS

[1] Bistable prestressed... [2] Effect of infill percentage ... [3] Evaluating the effects...[4] Viscoelastic effects... [5] Design and analysis...[6] Development of coilable...[7] Elastic memory... [8] Development of a prototype... [9] Deployable booms and antennas...[10] Analytical and experimental...[11] Design and Analysis...[12]Bi-stable composite shells [13]Effects of viscoelasticity...[14]Deployment Modeling [15] Highly compact...[16] Neutrally stable composite...[17] The fundamentals of designing ...[18]Shape memory polymers ...[19]Bistable composite slit tubes...[20]Bistable composite slit tubes... [21]Modelling and configuration...[22]Some observations...[23]On the thermally induced ...[24]The investigation of the effects...[25] Multi-stable composite twisting structure... [26]Experimental study on bistable... [27] Non-contact magnetic driving bioinspired...[28] The bistable behaviors... [29] Analytical models for bistable... [30] Highly multistable composite ... [31] Analysis of thermally... [32] Modelling and optimization of bistable... [33] Flight qualification testing... [34] Experiments and Simulations of the Deployment... [35] TRAC boom structural mechanics [36] Deployable space boom using bi-stable... [37] Deployment of Bistable Self-Deployable... [38] Toward thermal stimulation... [39] Pneumatically Actuated Soft Gripper... [40] A magneto-active soft gripper... [41] Design and analysis of laminates... [42] Zero stiffness elastic structures [43] Pseudo-bistable pre-stressed... [44] Pseudo-bistable self-actuated domes... [45] Orthotropy as a driver... [46] Shape Recovery Behavior... [47] Rate dependent finite strain ... [48] Viscoelastic bistable... [49] Pattern transformation... [50] Design and manufacturing...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدلسازی رفتار دوپایدارهای کامپوزیتی در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک با استفاده از ساختار میله-فنر-میراگر

محمدمهدی شهریاری‌فرد
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
محمد گلزار*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ، ایران.
گونار تیبرت
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه KTH، استکهلم، سوئد.

چکیده
دوپایدارهای کامپوزیتی به‌دلیل ویژگی منحصر به‌فرد در تغییر شکل بدون نیاز به انرژی پیوسته طرفداران زیادی در صنعت به خصوص صنایع هوافضا پیدا کرده است. مزیت استفاده از این سازه‌ها، خاصیت جمع‌شوندگی در عین دستیابی به طول‌های بلند و سفتی بالا نسبت به وزن در راستای طول است. این ویژگی منحصر به‌فرد در کنار مزایای دیگر کامپوزیت‌ها همچون، استحکام ویژه بالا، سبکی و صلبیت بالا، موجب شده که در کاربردهای زیادی همچون بوم‌های بازشونده، آنتن و صفحات خورشیدی ماهواره از آن‌ها استفاده شود. در این مقاله اثرات شرایط محیطی مختلف بر دوپایداری سازه دوپایدار کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای توضیح رفتار مکانیکی نوار دوپایدار کامپوزیتی (BiTS) در محیط‌های مختلف، مدل مقایسه‌ای دوبعدی متشکل از عضوهای میله‌ای صلب، فنرهای الاستیک و میراگرهای ویسکوز پیشنهاد شده است. روابط نیرو و انرژی حاکم بر مدل دوبعدی به‌دست آمد و از آن برای رسم منحنی انرژی کرنشی بی‌بعد در طول مسیر تغییر شکل برحسب متغیرهای مسئله استفاده شد. برای صحت‌سنجی رفتار مدل میله-فنر-میراگر دوبعدی در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک، چهار BiTS ساخته شده از مواد کامپوزیتی در معرض یک چرخه خاص ترمو-ویسکوالاستیکی قرار گرفتند. مدل دوبعدی، قادر به بیان آسان‌تر پدیده دوپایداری در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک است. نتایج حاصل از آزمایش تجربی حکایت از همخوانی رفتار دوپایدار مدل میله-فنر-میراگر دوبعدی در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک دارد. **کلیدواژه‌ها**: دوپایدار، کامپوزیت، ترمو-ویسکوالاستیک، میله-فنر-میراگر، انرژی کرنشی بی‌بعد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰٤
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸
*نویسنده مسئول: m.golzar@modares.ac.ir

۱- مقدمه
گسترش دانش دوپایداری (Bistability)، در دهه اخیر نشان می‌دهد که خاصیت این دسته از مواد راه موثری برای دستیابی به شکل هندسی دلخواه از شکل اولیه است. این مواد راه سریع و کم هزینه برای رسیدن به شکل هندسی مورد نظر از هر شکل کم حجم به مهندسان مکانیک پیشنهاد داده است.

سازه‌های دوپایدار (Bistable) کاربردهای زیادی دارند که رایج‌ترین آن‌ها در دستگاه‌های مکانیکی و الکترومکانیکی است که بین تعداد گسسته‌ای از حالت‌ها تغییر می‌کند. آن‌ها همچنین از جذابیت بالایی جهت استفاده در سازه‌های گسترش‌پذیر (Deployable) برخوردارند، جایی که می‌توان از خاصیت دوپایداری آن‌ها برای گستراندن ساختارهای بسیار ساده استفاده کرد که با اطمینان بالا از حالت بسته‌بندی خارج شده و در شکل عملیاتی خود باز می‌شوند[1].

این ساختار با قابلیت کوچک شدن و جمع شدن، اگر استحکام بالا در وضعیت باز مانند کامپوزیت‌ها داشته باشد، کاربردهای تخصصی و در عین حال راهگشا (مثل ستون برج نور سیار) و خاص (مثل صنایع فضایی) پیدا می‌کنند. ضرورت دستیابی به سازه‌هایی با حجم متغیر و سبک از آنجا به‌وجود آمده که حجم اولیه و وزن، عامل اصلی محدودکننده در ارسال تجهیزات و وسایل مخابراتی به فضا است.

در کنار پدیده دوپایداری، فن‌آوری جدید چاپ چهاربعدی نیز طرفداران بسیاری در میان پژوهشگران زمینه تغییر شکل دهنده‌ها(Shape-shiftings) پیدا کرده است. این فن آوری که از پلیمر گرمانرم با فرآیند چاپگر سه بعدی کمک میگیرد، با استفاده از محرک خارجی (عموماً دما) به شکل پیوسته در بعد چهارم (زمان) تغییر شکل می‌دهد تا به شکل مطلوب از قبل تعیین شده برای آن برسد. پژوهشگران با بررسی مولفه‌های مختلف مانند درصد پر شدگی و زاویه چاپ[2]، مولفه‌های فرآیندی شامل مولفه‌های فعال‌سازی، چاپ و مواد[3]، اثرات این مولفه ها را بر درصد بازیابی نیرویی و انحنای نمونه‌های چاپ شده به‌دست آوردند.

پلیمرهای تقویت شده با الیاف (Fiber reinforced polymer -FRP) در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع هوافضا کاربردهای شناخته شده‌ای دارد. آن‌ها دارای: (۱) وزن کم، (۲) سفتی بالا، و (۳) خواص مختلف در کنار هم هستند. اگر استحکام نسبت به وزن (استحکام ویژه) بالا در جهت خاص را مزیت اصلی کامپوزیت‌ها معرفی کنیم، شکل هندسی ثابت و غیر قابل تغییر، بزرگ‌ترین چالش پیش روی این مواد به‌شمار می‌رود. کاربرد خاص FRPها در صنعت فضایی، سازه‌های دوپایدار گسترش‌پذیر است که به‌خاطر قابلیت کوچک‌سازی در بسته‌بندی کوچک و نرخ بسته‌بندی بالا است، همچنین دارای خاصیت بازشوندگی به‌صورت هوشمند و بدون نیاز به موتور هستند[4-9].

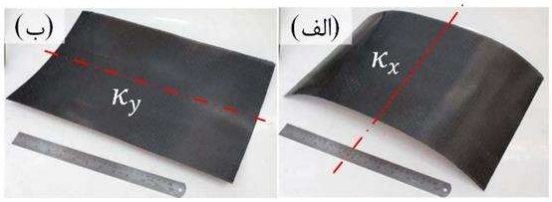
۱-۱-دسته‌بندی دوپایدار
دسته‌بندی‌های مختلفی برای دوپایدارها ارائه گردیده است. در دسته بندی کلی‌تر می‌توان دوپایدارها را به دو دسته پیش‌تنش یافته (pre-stressed) و غیر پیش‌تنشی (stress-free) دسته‌بندی کرد. نمونه‌ای از دوپایدار پیش‌تنش یافته، دوپایدارهای همسان‌گرد (Isotropic) هستند. این نوع دوپایدارها در هیچ حالتی خالی از تنش پسماند نمی‌باشند و در واقع اساس تغییر شکل آن‌ها از حالتی به‌حالت دیگر را می‌توان غلبه بر تنش پسماند دانست. از جمله دوپایدارهای دیگر موجود در این دسته، دوپایدارهای غیرهمسانگرد (Orthotropic) با لایه‌چینی غیرمتقارن (Asymmetric) هستند که در حین عملیات ساخت، به‌واسطه عدم

تطابق ضرایب انبساط حرارتی لایه‌ها در جهت‌های مختلف، تنش پسماند حرارتی ایجاد شده که موجب تغییر شکل دوپایدار می‌شود (شکل ۱).

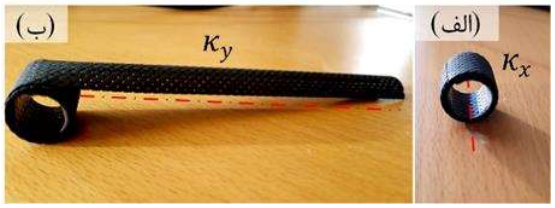
دسته دوم دوپایدار از مواد ارتوتروپی با لایه‌چینی پادمتقارن (Anti-symmetric) برنامه‌ریزی شده ایجاد می‌شود تا ممان خمشی در یک جهت را با تنش کششی در جهت عمود برهم مرتبط کند. این نوع دوپایدار که در حالت اولیه هیچ گونه تنشی در خود ندارد، با تئوری کلاسیک لایه‌ها (Classic Laminate Theory -CLT) مورد بررسی و واکاوی قرار گرفته است. نوارهای فنری (Tape Spring -TS)، نوعی دوپایدار پادمتقارن فوق‌العاده نازک از جنس FRP هستند که می‌توانند به‌صورت الاستیک جمع شوند و با دنبال‌کردن یک مسیر سینماتیک خاص، انرژی کرنش ذخیره شده آن‌ها آزاد می‌شود[11]. آن‌ها همچون متر اندازه‌گیری جمع می‌شوند، اما برخلاف مترهای اندازه‌گیری، در هر دو حالت بسته و باز، نشان داده شده در شکل ۲، پایدار هستند[12]. در ادامه به بررسی اجمالی هر یک از این دسته‌ها و موارد کاربرد آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲-دوپایداری با مواد همسانگرد (فلزی)

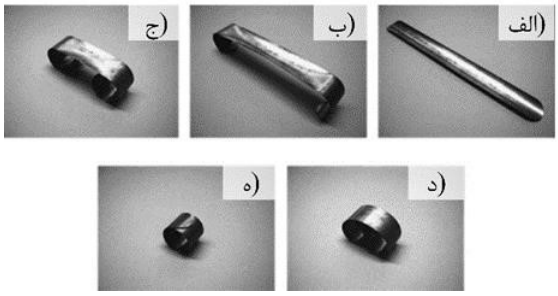
دوپایدار همسان‌گرد همان وسیله فانتزی است که در فروشگاه‌های لوازم‌التحریر به‌عنوان خط‌کش فروخته می‌شود و یا در اسباب‌بازی فروشی‌ها در بند ساعت استفاده می‌شود (شکل ۳). از اوایل اکتشافات فضایی، دوپایدارهای همسانگرد به‌عنوان اعضای سازه‌های گسترش‌پذیر محبوبیت زیادی کسب کرده و به‌عنوان مثال برای گستردن بادبان‌های خورشیدی تلسکوپ فضایی هابل مورد استفاده قرار گرفتند[13]. گسترش سریع ماهواره‌های نانو و پیکو برای مأموریت‌های فضایی نیاز به سیستم‌های گسترش‌پذیر داشت که بسیار قابل انعطاف و در عین حال بزرگ و دارای خواص مکانیکی کافی در هنگام گستردن باشد[14]. سازه‌های فضایی گسترش‌پذیر مدتهاست که به‌عنوان ابزاری برای کوچک کردن



شکل ۱) دو پایداری کامپوزیتی با لایه چینی غیرمتقارن[۰/۹۰] الف-در وضعیت پایدار اول ب-در وضعیت پایدار دوم[10]



شکل ۲) نوار دوپایدار کامپوزیتی، الف- در حالت بسته و ب- در حین باز شدن.



شکل ۳) حالات مختلف انتقال از حالت باز به حالت بسته در پوسته دوپایدار STEM[1].

سازه‌های فضایی حجیم در محدوده پرتابه مورد استفاده قرار می‌گیرند[15].

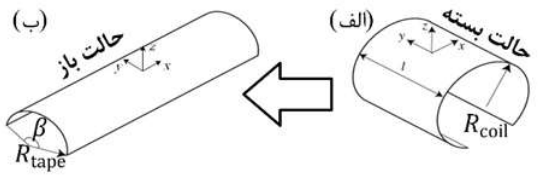
به‌طور معمول، دوپایدارهای همسانگرد از فولاد فنر ساخته می‌شوند و به‌صورت الاستیک بسته شده و در بسته‌بندی مقید شده قرار می‌گیرند. ویژگی بارز این سازه‌ها عدم پایداری در حالت بسته شده است که مانع از کم حجم بودن آن‌ها می‌شود و نیاز به مجموعه غلاف‌بندی برای مقید ساختن آن‌ها وجود دارد[1]. در نتیجه این سازه‌ها در وضعیت بسته مقدار قابل توجهی انرژی کرنش ذخیره می‌کنند. بدون مهار، چنین سازوکاری با شتاب زیاد، کنترل نشده و غیر قابل پیش‌بینی باز می‌شود[9,6].

کابادزه و همکارانش[1] به توصیف ایجاد دوپایداری در یک پوسته استوانه‌ای با تنش پسماند و توسط کرنش پلاستیک یکنواخت ناشی از خمش پرداختند. ایشان در مقاله خود عامل ایجاد دوپایداری را در مواد همسانگرد، تغییر شکل پلاسیتک معرفی کردند.

۱-۳-دوپایداری با مواد غیرهمسانگرد (کامپوزیتی)

فلزات کرنش‌پذیر مانند بریلیم-مس و فولاد ضدزنگ، عملکرد خمشی خوب و مدول الاستیک بالایی دارند، اما چهار تا پنج برابر کامپوزیت‌ها چگال‌تر هستند[17]. سبک بودن به‌همراه قابلیت بالای ترکیب خواص در کامپوزیت‌ها، عامل به‌کارگیری آن‌ها در کاربردهای فراوانی از جمله کاربرد فضایی شده است[16,11]. از جمله معایب دیگر فلزات نسبت به کامپوزیت‌ها در کاربرد سازه‌های بازشونده، شوک بازشوندگی زیاد است که موجب کاهش کارایی ماموریت‌های فضایی و ایجاد نوسانات غیر مطلوب در ماهواره می‌شود[18].

اگر در ساخت نوار دوپایدار به‌جای فلز از لایه‌چینی مخصوص کامپوزیتی استفاده شود، این نوار دارای دو حالت پایدار می‌شود: پایدار اول که در شکل ٤-الف نشان داده شده، حالت باز با انحنای عرضی می‌باشد اما خمیدگی طولی ندارد و پایدار دوم که در شکل ٤-ب نمایش داده شده، حالت بسته شده‌ای دارد که در آن حداقل انحنای عرضی وجود دارد[19].



شکل ۴) تغییر حالت یک لوله دوپایدار کامپوزیتی از الف- حالت تعادل اولیه (باز) به ب- حالت تعادل ثانویه (بسته)[20].

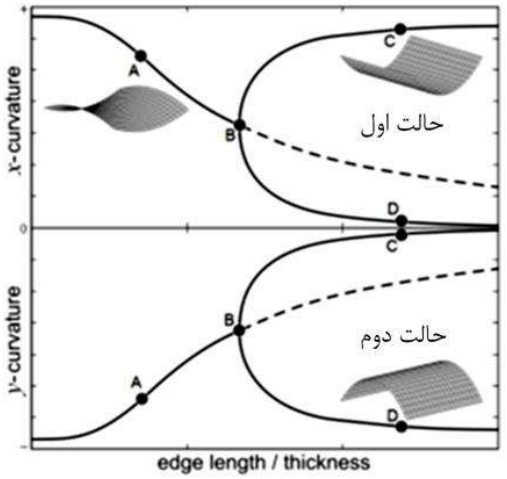
ویژگی منحصر به‌فرد این طبقه از سازه‌های غیر همسان‌گرد برخلاف مترهای اندازه‌گیری و تغییر وضعیت دهنده‌ها این است که بدون نیاز به نیروی خارجی پیوسته و فقط برای تغییر وضعیت بین حالات کاملاً باز و کاملاً بسته نیاز به مصرف انرژی دارند[16,21]. در نتیجه برای مهار انرژی کرنشی در وضعیت بسته یا باز کردن آن، نیازی به قید یا سازوکار گستردن نیست[5].

دو روش لایه‌چینی برای ایجاد دوپایداری در پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی وجود دارد: ۱) لایه‌چینی غیرمتقارن که دوپایداری در فرآیند ساخت از کرنش‌های حرارتی به‌وجود می‌آید[2,22-24] . لایه چینی پادمتقارن که از مزایای کوپل خمشی بین دو جهت عمود ورقه برای ایجاد دوپایداری بهره می‌برد[25-28]. بر اساس این تقسیم بندی، لایه‌چینی متقارن (Symmetric) نمی‌تواند دوپایدار باشد و تلاش برای پیچاندن آن باعث مارپیچ شدن آن می‌شود[19]. توجه داشته باشید که در عبارت فوق، فرض بر این است که پوسته‌ها در شکل اولیه خود عاری از تنش پسماند است. در غیر این صورت، مواد همسان‌گرد و لایه‌چینی‌های متقارن نیز قادر به دوپایدار شدن با تنش پسماند هستند[29].

۱-۳-۱- دوپایدار کامپوزیتی با لایه‌چینی غیرمتقارن

دلیل ایجاد دوپایداری در پوسته کامپوزیتی غیرمتقارن، عدم تقارن ضرایب انبساط حرارتی در جهت‌های محوری و عرضی الیاف است که منجر به ایجاد عدم تقارن هندسی در نتیجه تنش‌های پسماند حرارتی حین فرآیند پخت لایه‌چینی می‌شود. این تنش‌های پسماند باعث می‌شود که پس از پختن، پوسته در یکی از دو شکل استوانه‌ای پایدار شود[30,31]. حال اگر به‌جای هندسه متقارن از ورق موجدار با لایه‌چینی متقارن استفاده شود (عدم تقارن هندسی)، در اثر اعمال بار حرارتی، ورق دچار انحنای گوسی خارج از صفحه می‌شود[10].

تحت شرایط هندسی خاصی اعوجاج حرارتی می‌تواند منجر به ایجاد دو حالت پایدار در یک ورق تخت کامپوزیتی شود که در نتیجه آن، تغییر شکل بزرگ ایجاد می‌شود. شکل ۵ این رفتار وابسته به هندسه را برای یک لایه‌چینی [۰/۹۰] نشان می‌دهد. در این تحلیل برای نسبت طول لبه به ضخامت کم، تنها یک حالت پایدار با انحنای مساوی حول محور x و y مشاهده می‌شود (نقطه



شکل ۵) حالت‌های پایدار (خط) و ناپایدار (خط چین) یک ورق کامپوزیتی تخت با لایه‌چینی غیرمتقارن [۰/۹۰][32].

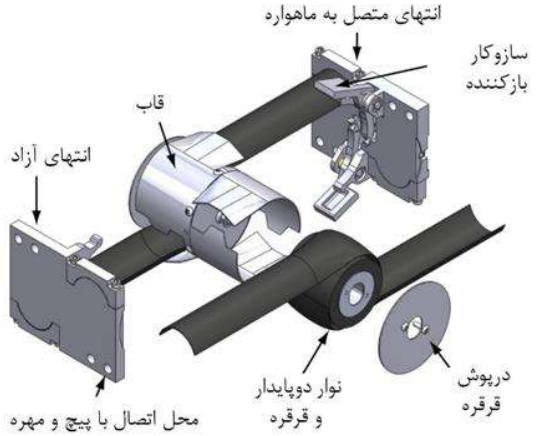
A). هر چه این نسبت افزایش می‌یابد، حل دو شاخه می‌شود (نقطه B). بعد از این نقطه دو حالت پایدار تقریباً استوانه‌ای مشاهده می‌شود (نقطه‌های C و D)، جایی که حالت زین اسبی ناپایدار می‌گردد (خط چین). مشابه همین رفتار در یک پوسته استوانه‌ای با لایه‌چینی [۰/۹۰] که از ابتدا دارای یک انحنا است (ورق موجدار) نیز مشاهده می‌شود.

۱-۳-۲- دوپایدار کامپوزیتی با لایه‌چینی پادمتقارن (نوارهای کامپوزیتی پادمتقارن)

نوارهای کامپوزیتی پادمتقارن را می‌توان به سه دسته بر اساس تمایل به دوپایداری تقسیم کرد: ۱) نوار تک پایدار با تنش بالا [33,34] ۲) نوار دوپایدار[35] و ۳) نوار با دوپایداری خنثی.

نوارهای دوپایدار کامپوزیتی (Bistable Tape Spring -BiTS) با لایه‌چینی پادمتقارن را می‌توان مانند یک متر اندازه‌گیری نجاری پیچاند، اما برخلاف یک متر اندازه‌گیری نجاری، در دو حالت جمع و باز پایدار است[12]. BiTSها در حالت باز (extended) ساخته می‌شوند، بنابر این در این حالت فاقد تنش پسماند کرنشی می‌باشند و در هنگام بسته (rolled) انرژی کرنشی بالاتری دارند[9,36]. BiTSها می‌توانند با آزادسازی این انرژی کرنشی ذخیره شده، از حالت بسته خودبه‌خود باز شوند[11].

BiTSها به‌دلیل قابلیت جمع شوندگی، خود بازشوندگی، هزینه کم، سبک بودن و سفتی طولی به‌عنوان سازه‌های گسترش‌پذیر فضایی مناسب هستند[37]. آن‌ها در کاوشگر کوچک (CubeSat) با حجم 3U برای مأموریت‌های پیشرفته (Small Excavator for Advance Mission-SEAM) به‌عنوان بوم‌های بازشونده مونتاژ شدنی متشکل از چهار دوپایدار پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (Glass Fiber Reinforced Composite-GFRP) چهار لایه با طول ۱ متر همانند شکل ٦ به‌کار گرفته شدند. این بوم‌ها به‌عنوان اجزای اصلی پشتیبانی از بارهای متمرکز همچون وزنه ثبات گرانشی، دوربین و سنسور در ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند[9].



شکل ۶) نمای انفجاری از چهار نوار دوپایدار کامپوزیتی با لایه‌چینی پادمتقارن مورد استفاده در مجموعه غلافبندی SIMPLE (Self-contained lInear Meter-class dePloyabLE (SIMPLE)) در ابتدای مسیر بازشدن[5].

در تحریک BiTSها برای باز شدن از وضعیت بسته یا برعکس از محرک‌های مختلفی استفاده شده است که ممکن است عملگر بخشی از ساختار BiTS باشد، به عنوان مثال پلیمر حافظه شکلی که زمینه کامپوزیت پلیمری را تشکیل داده است[38] و یا از خارج از ساختار BiTS تحریک صورت گیرد، به عنوان مثال از عملگرهای نیوماتیکی (بادی)[39]، مغناطیسی[40] و فنری[41,5]. در تحریک ساختاری، پیوستگی عملگر و ساختار دوپایدار از مزایای این تحریک بیان شده است که نسبت به عملگر خارجی، سازه یک‌دست‌تری ارائه می‌دهد.

۱-۴-نمای کلی مقاله

در این مقاله، ابتدا اثر شرایط محیطی مختلف بر رفتار یک دوپایدار کامپوزیتی از پیشینه پژوهش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای شبیه‌سازی الگوی رفتار دوپایدار در شرایط محیطی مختلف از نظر برابری سطوح انرژی نقاط بحرانی، یک مدل تحلیلی مبتنی بر شاخصه‌های ساختاری میله-فنر-میراگر پیشنهاد شده است که از الگوی مدل پایدار خنثی تارنای[42] الهام گرفته شده است. مدل دوبعدی میله-فنر الاستیک تارنای قادر به تغییر در شکل بدون تغییر در سطح انرژی است. روابط نیرو و انرژی برای مدل دوبعدی پیشنهادی در طول مسیر تغییر شکل به‌دست آمد و از آن برای مطالعه رفتار ساختار دوپایدار بر حسب شرایط اولیه مسئله استفاده شد. در پایان، به‌عنوان مطالعه موردی، چهار نمونه BiTS ساخته شده تحت شرایط مشخص دما-زمان قرار گرفتند و رفتار دوپایداری آن‌ها با رفتار ترمو-ویسکوالاستیک حاصل از مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک مقایسه گردید.

۲-شبیه‌سازی رفتار دوپایدار به‌کمک ساختار مکانیکی میله-میراگر-فنر

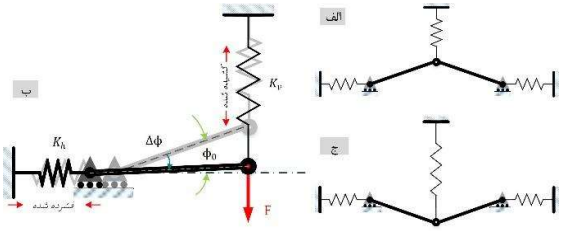
محققان مختلفی برای توضیح ساختارهای دوپایداری پوسته از مدل‌های دوبعدی (2D) میله-فنر الاستیک (ELS) استفاده کرده‌اند. کوی و سانتر[30] سطوح کامپوزیت متصل به‌هم را که درجه بالایی از چند پایداری داشتند، مورد بررسی قرار دادند. این پدیده به‌لطف یک مدل مقایسه‌ای ساخته شده توسط سه تیر فون میسز با قابلیت تغییر طول ارائه شد. در مدل تیر کوی و سانتر، تنش پسماند و کرنش پسماند می‌تواند در ساختار در هر حالت پایدار اعمال شود. مطالعه پارامتری برای توصیف اثر پارامترهای کنترلی بر میزان دوپایداری هر سیستم انجام شد. برینکمایر و همکارانش[43,44] یک مدل ELS (Elastic Link-Spring) ارائه کردند تا اصول شبه دوپایداری را تبیین کنند. مدل ELS آن‌ها از فنرهای خطی و پیچشی و میراگر برای پیش‌بینی ویسکوالاستیک ماده استفاده کرده است. در مدل مفهومی پیشنهادی، شکل تغییر نیافته (unstrained) تک پایدار است و پس از بارگذاری و تغییر شکل آن به حالت دیگر، کاهش سفتی ویسکوالاستیک سازه، باعث انتقال به یک ساختار دوپایدار می شود[43].

اگر چه ویژگی الاستیک دوپایدار را می‌توان در مدل ELS-2D کوی و سانتر[30] بررسی کرد، هدف این است که مدل طراحی شده در این مقاله با نوار دوپایدار کامپوزیتی به‌صورت بی‌بعد شده برابری انرژی داشته باشد. در این مقاله، یک مدل دوبعدی متشکل از المان میله-فنر-میراگر ویسکوالاستیک (2D-VELSD) برای درک پدیده‌شناختی رفتار ترمو-ویسکوالاستیک نوار دوپایدار کامپوزیتی (BiTS) معرفی شده است. در این روش، BiTS در شرایط الاستیک، ویسکوالاستیک و ترمو-ویسکوالاستیک با یک مدل دوپایدار ساده متشکل از شاخصه‌های میله-فنر-میراگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲-۱-تعریف مدل ELS در شرایط الاستیک (ریلکس نکرده)

مدل الاستیک در این بخش، برای شبیه‌سازی رفتار انرژی-یکسان دوپایدار به‌کمک ا شاخصه فنر و میله ارائه می‌شود. برای این منظور دو عضو صلب و بی وزن در صفحه 2D قرار دارند که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، هر کدام دارای طول L که می‌توانند به‌طور متقارن در اطراف سه مفصل بچرخند. سه فنر الاستیک خطی بدون وزن با سفتی $\mathbf{K_h}$ برای هر فنر افقی و $\mathbf{K_v}$ برای فنر منفرد عمودی، قابلیت دوپایداری میله‌های لولاشده را در 2D تامین می‌کند، که در شکل ۷-ب نشان داده شده است. یعنی دو حالت پایدار برای مدل 2D-ELS وجود دارد که یکی در شکل ۷-الف و دیگری در شکل ۷-ج نمایش داده شده است. مدل متقارن ELS در زاویه اولیه خود $\boldsymbol{\phi_0} > \mathbf{0}$ بدون کرنش است، شکل ۷ -الف، یعنی همه فنرها در حالت بدون تغییر شکل هستند. از این رو، این مدل همچون BiTSها برای زاویه اولیه خود ($\boldsymbol{\phi_0}$) بدون کرنش فرض شده است[9].

هنگامی که یک نیروی عمودی F روی مفصل بار (مفصل بالایی در شکل ۷-ب اعمال می‌شود، فنرهای الاستیک خطی $\mathbf{K_v}$ و $\mathbf{K_h}$ به‌ترتیب کشیده و فشرده می‌شوند و زاویه میله نسبت به افق، ϕ درجه کاهش می‌یابد. در همین حال، مفصل بار در شکل ۷-ب به



شکل ۷) مدل میله-فنر الاستیک: الف- در حالت پایدار اصلی (تعادل عمومی)، ب- دیاگرام سینماتیک در حالت تغییر شکل و ج- در حالت پایدار دوم تغییر شکل یافته (تعادل محلی).

صفحه افق نزدیک می‌شود، انرژی کرنشی ذخیره شده، U و بار اعمال شده بر روی مفصل بار، F به‌طور همزمان افزایش می‌یابد. پس از عبور از صفحه افق، به‌دلیل کشش معکوس (فشار) ایجاد شده در فنرهای $\mathbf{K_h}$ ، بار شروع به‌کاهش می‌کند[45]، اما انرژی کرنشی نیز همچنان بالا می‌رود. حرکت این مفصل تا نقطه تعادل ناپایدار، یعنی جایی که ساختار به‌حالت پایدار دوم (تعادل محلی) جهش می‌کند، ادامه می‌یابد (شکل ۷-ج)

روابط انرژی در این بخش با استفاده از رابطه ساده انرژی کرنشی در فنر، با توجه به تغییر شکل زاویه‌ای شاخصه میله به جهت اختصار در (پیوست الف بیان شده است. برای اولین نقطه تعادل یا همان نقطه تعادل عمومی (شکل ۷-الف)، انرژی کرنشی مدل ELS بنابر فرض اولیه مدل (کرنش-آزاد) برابر صفر است ($\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\phi_0} \rightarrow \hat{\boldsymbol{U}} = \mathbf{0}$). نقطه تعادل دوم یعنی حداقل انرژی محلی (شکل ۷-ج) و نقطه غیر تعادلی در جایی یافت می‌شود که گرادیان انرژی کرنش بی‌بعد شده، $\boldsymbol{\partial\hat{U}/\partial\phi}$، در طول مسیر تغییر شکل صفر باشد. جهت مقایسه رفتارهای مختلف انرژی از یک سازه دوپایدار و یا رفتارهای سازه‌های مختلف، از روابط بی‌بعدساز انرژی در پیوست الف استفاده شده است. مشتق دوم معادله انرژی، $\boldsymbol{\partial^2 U/\partial\phi^2}$ برای تعیین پایداری یا ناپایداری نقاط بحرانی، یعنی نقاط تعادل محلی و زین اسبی استفاده می‌شود.

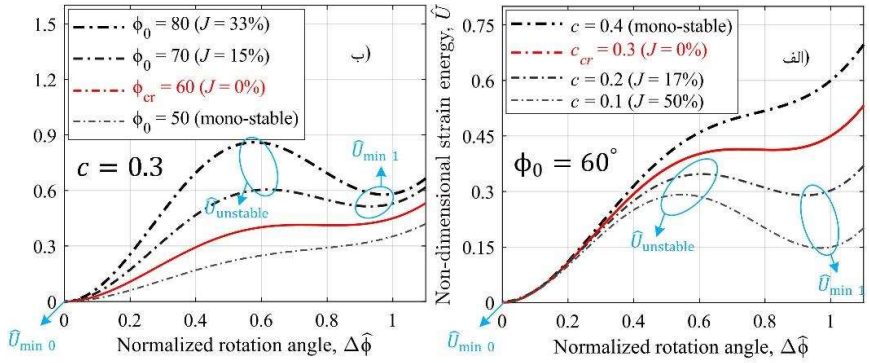
۲-۱-۱-تاثیر پارامترهای اولیه

در این بخش، مطالعه مولفه‌گرا بر روی نمودار انرژی کرنش بی‌بعد ساختارهای 2D-ELS در حین تغییر شکل بین دو نقطه تعادل و اثر دو مولفه $\mathbf{c}$ و $\boldsymbol{\phi_0}$ در نمودار انرژی کرنشی بی‌بعد شده شکل ۸ انجام شد. تأثیر c بر انرژی کرنش در شکل ۸-الف نشان داده شده است. با افزایش c، سطح انرژی کرنش وضعیت پایدار دوم، $\hat{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{min1}}$ و نقطه ناپایدار، $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{unstable}}$ افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش $\boldsymbol{\phi_0}$، نشان داده شده در شکل ۸-ب، بدون تغییر قابل توجه در $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{min\,1}}$، $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{unstable}}$ را افزایش می‌دهد.

انرژی کرنشی سازه برای دو نقطه بحرانی: تعادل محلی، $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{min\,1}}$ و نقطه ناپایدار $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{unstable}}$ ، برای مقادیر مختلف c و $\boldsymbol{\phi_0}$ از معادله تعادل انرژی مربوط به ساختار میله-فنر دوبعدی موجود در پیوست الف محاسبه می‌شود. نمودار کانتورهای انرژی کرنشی بی‌بعد شده $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{min\,1}}$ و $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{unstable}}$، برای این مقادیر در شکل ۹ به نمایش درآمده است تا کلیه جواب‌های نقاط تعادل محلی در محدوده مورد نظر را برای ساختارهای ELS-2D نشان دهد. این شکل نشان می‌دهد که چگونه مولفه های $\boldsymbol{\phi_0}$ و c در شکل ۸ برای تعیین مقادیر بحرانی $\boldsymbol{\phi_{cr}}$ و $\mathbf{c_{cr}}$، در لوزی سبز تغییر کرده است.

۲-۱-۲-معیار دوپایداری

در این مقاله، برای نمودارهای انرژی کرنشی بی‌بعد شده، یک پارامتر دوبعدی نوآورانه به نام J تعریف شده است. این پارامتر به‌جهت مقایسه‌ای بودن و قابلیت به‌نمایش درآمدن بر روی مسیر انرژی کمینه، از معیار دوپایداری S معرفی شده توسط گست و پلگرینو[29] ملموس‌تر است. معیار دوپایداری S تنها قادر به تمایز دوپایدار از تک پایدار است و در این مقاله به‌دلیل نیاز به بررسی "میزان دوپایداری" و مقایسه آن برای چند دوپایدار در شرایط مختلف، معیار موثری نیست. معیار J می‌تواند شدت گرایش دوپایدار برای برگشتن به تعادل اولیه را به‌صورت کمّی بیان کند. هرچه J بیشتر، تمایل به دوپایداری بیشتر. در معادله (۱) اگر $\boldsymbol{J > 0}$ روابط انرژی نشان می‌دهد که نوار کامپوزیتی دوپایدار است.



شکل ۸) نمودار انرژی کرنشی بی‌بعد شده برای سازه دوبعدی میله-فنر الاستیک در مسیر تغییر شکل بین دو حالت تعادل: الف- برای مقادیر متغیر نرخ سفتی، c و مقدار ثابت $\phi_0 = 60^\circ$، ب- برای مقادیر متغیر $\boldsymbol{\phi_0}$ و مقدار ثابت c=0.3.

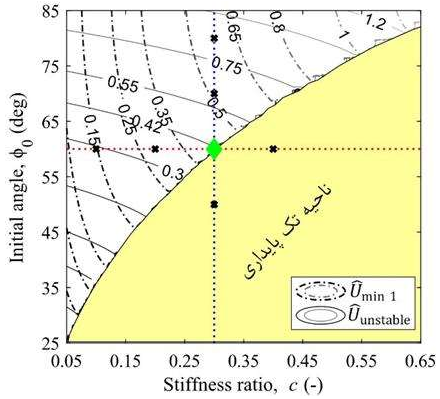
$$J = 1 - \frac{U_{min\,i}}{U_{unstable\,i}} \quad (۱)$$

معیار دوپایداری J که در معادله (۱) به‌دست آمد، در شکل ۸ برای منحنی‌های محدوده‌ی دوپایدار محاسبه شده است.

برای به‌دست آوردن نواحی دوپایداری در شکل ۹، از برابر صفر قراردادن گرادیان انرژی کرنشی نسبت به زاویه دوران میله، $\boldsymbol{\partial U/\partial \phi = 0}$، کمک گرفته شده است. برای مقادیر c و $\boldsymbol{\phi_0}$ که این معادله تعادل سه جواب داشته باشد (دو نقطه تعادل $\hat{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{min\,0}}$ و $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{min\,1}}$ و یک نقطه ناپایداری $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{unstable1}}$)، نواحی دوپایداری مشخص خواهد شد و برای آن معیار دوپایداری J قابل محاسبه است. اگر از معادله تعادل انرژی یک جواب حاصل شود (نقطه تعادل عمومی $\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathbf{min\,0}}$)، برای مقادیر c و $\boldsymbol{\phi_0}$ استفاده شده J=0 و نواحی تک‌پایداری زرد رنگ مشخص خواهد شد. دوپایداری سازه میله-فنر، برای ضریب سفتی‌های فراتر از حد بحرانی، $\mathbf{c_{cr}}$ یا زاویه اولیه کمتر از حد بحرانی، $\boldsymbol{\phi_{cr}}$ که با خط قرمز در شکل ۸ نشان داده شده است، از بین می‌رود. به بیان دیگر، کاهش c، و یا افزایش $\boldsymbol{\phi_0}$، منجر به افزایش دوپایداری مدل ELS می‌شود. مقادیر $\boldsymbol{\phi_{cr}}$ بر حسب مقادیر $\mathbf{c_{cr}}$ متغیر است که محدوده تک پایداری در شکل ۹ به رنگ زرد نشان داده شده است و مرزهای آن حدود بحرانی برای c و $\boldsymbol{\phi_0}$ را نشان می‌دهد.

۲-۲-مدل ویسکوالاستیک دوپایدار با میله-فنر-میراگر (VELSD)

پس از معرفی رفتارهای الاستیک سازه‌های دوپایدار با مدل میله-فنر ELS، از مدل ماکسول-ویچرت (Maxwell-Wiechert) برای شبیه‌سازی شرایط ویسکوالاستیک در دوپایدر BiTS استفاده می‌شود[4,46,47]، شکل ۱۰-الف اثرات رفتار ویسکوالاستیک در مدل ماکسول را به‌نمایش گذاشته شده است. در شکل ۱۰ مدل خاکستری رنگ مربوط به زمان $\mathbf{t = 0}$ (ریلکس نکرده) و مدل مشکی رنگ مربوط به زمان $\mathbf{t = \infty}$ (ریلکس کامل)، پس از جهش به پایدار دوم فرض شده است. در مدل ویسکوالاستیک، فنر الاستیک عمودی با مدل ماکسول-ویچرت جایگزین شده است تا رفتارهای زیر از یک دوپایدار BiTS در شرایط ویسکوالاستیک را نشان دهد:



شکل ۹) نمودار کانتور انرژی کرنشی نقاط تعادل در سازه‌های دوبعدی میله-فنر الاستیک.

۱) استراحت انرژی کرنشی به دلیل رفتار ویسکو الاستیک در شکل پایدار دوم که در مراجع[11,4] نیز گزارش گردید.

۲) استراحت انرژی کرنشی منجر به کاهش R_{coil} نوار دوپایدار کامپوزیتی در حالت بسته می‌شود[11,48].

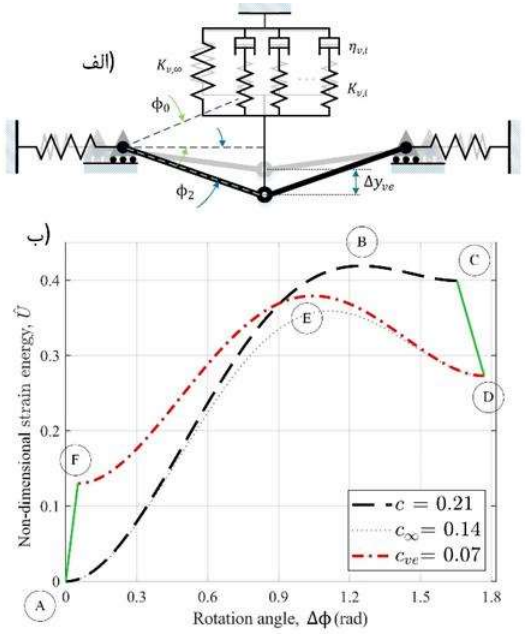
۳) هنگامی که در مدل میله-فنر-میراگر (2D-VELSD) هیچ گونه کرنشی وجود ندارد، ساختار در وضعیت تعادل عمومی است.

۴) میراگر بخشی از انرژی کرنشی را که در مسیر توسط زنجیره ماکسول به‌دست آورده است، مستهلک می‌کند[11,4].

۵) استراحت تنش باعث کاهش ضریب سفتی، c می‌شود. از این رو، کمیت دوپایداری J افزایش می‌یابد و تغییر شکل در حالت پایدار دوم (مقدار $\boldsymbol{\Delta y_{ve}}$ در شکل ۱۰-الف) را افزایش می‌دهد[11,4].

۶) ضریب سفتی باقی‌مانده پس از زمان نامحدود برابر $\boldsymbol{c_\infty = K_{v,\infty}/K_h}$ است و با داشتن آن ضریب سفتی ویسکوالاستیک، $\mathbf{c_{ve}}$ از کل ضریب سفتی $\mathbf{c = c_\infty + c_{ve}}$ نتیجه می‌دهد.

با استفاده از کانتور انرژی در شکل ۹، به‌منظور تعیین ضریب سفتی الاستیک، c و با در نظر گرفتن شش گام فوق برای تعیین $\mathbf{c_{ve}}$، منحنی انرژی کرنشی جدیدی برای مسیر برگشت از حالت پایدار دوم در ساختار 2D-VELSD پیشنهادی می‌شود که با رنگ قرمز (مسیر DEF) در شکل ۱۰ -الف نشان داده شده است. انرژی کرنشی



شکل ۱۰) مدل دوبعدی ویسکوالاستیک میله-فنر-میراگر برای یک سازه دوپایدار ویسکوز، الف- در زمان t=0 پس از جهش به تعادل محلی به‌رنگ خاکستری و زمان $\mathbf{t = \infty}$ به‌رنگ مشکی، ب- نمودار مسیر انرژی کرنشی بی‌بعد شده در نتیجه صحت سنجی با مدل پوسته سه‌بعدی CLT برای مسیر الاستیک استراحت نکرده (منحنی سیاه ABC) و مسیر ویسکوالاستیک ریلکس کرده پس از $\mathbf{t = \infty}$ (منحنی قرمز DEF). مسیرهای سینماتیک استراحت تنش در هر حالت تعادل (CD و FA) با رنگ سبز نشان داده شده است. منحنی آبی نشان دهنده مسیری است که دوپایدار VELSD، در صورت حذف زنجیره‌های ماکسول (میراگرها) طی می‌کند.

بی‌بعد شده در مسیر برگشت پس از استراحت تنش، از معادله تعادل انرژی بازنویسی شده برای مسیر ریلکس کرده موجود در پیوست الف حاصل می‌شود.

نمودار انرژی کرنشی بی‌بعد شده که از معادله تعادل انرژی برای مسیر بازگشت (ریلکس کرده)، در شکل ۱۰-الف به رنگ قرمز (مسیر DEF) نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۱۰-الف مشخص است، ساختار دوپایدار پس از استراحت تنش در حالت دوم (مسیر CD) از پایداری بیشتری برخوردار است. همچنین نقطه F در شکل ۱۰-ب، که با حالت تعادل بدون کرنش اولیه (نقطه A) یکسان نیست، نشان می‌دهد که استراحت تنش ساختار دوپایدار در حالت ثانویه منجر به ایجاد تنش پسماند در سازه دوپایدار می‌شود.

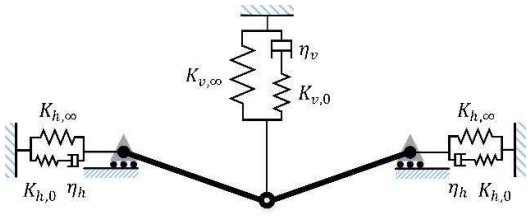
۲-۳-ساختار دوپایدار در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک

برای مطالعه رفتارهای ترمو-ویسکوالاستیک مواد پلیمری، مدل‌های ساختاری مختلفی برای توصیف ویژگی‌های پیچیده ترمومکانیکی پیشنهاد شده است. پژوهشگران معمولاً در نظریه‌های خود از مدل‌های ساده رئولوژی استفاده کردند که ساختار آن‌ها معمولاً از عناصر ساده‌ای همچون فنر، میراگر و شاخصه لغزنده (اصطکاکی) تشکیل شده‌است[49].

در بین مدل‌های ساختاری مختلف برای مطالعه رفتار دوپایدار در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک (به عنوان مثال[46,49]) مدلی که بتواند به‌طور همزمان سه شرط الاستیک، ویسکوالاستیک و ترموالاستیک را تحت پوشش قرار دهد، پیشنهاد شده است. ساده‌ترین شکل مدل دوبعدی برای تحلیل ساختار دوپایدار در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک از سه عنصر ماکسول-ویچرت با یک زنجیره ویسکوالاستیک در شکل ۱۱ به‌تصویر کشیده شده است تا رفتارهای عمومی BiTS ها را در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک پوشش دهد.

۳-مطالعه موردی (تعمیم مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر برای شرایط ترمو-ویسکوالاستیک)

برای مطالعه نحوه رفتار نوار دوپایدار کامپوزیتی در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک و مقایسه با رفتار مدل پیشنهادی 2D-VELSD، در یک مطالعه موردی، چهار نمونه نوار کامپوزیتی با پلیمر حافظه شکلی ساخته شد و در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک تعریف شده قرار گرفت تا مشاهده شود که شرایط دما-زمان، چه تاثیری در رفتار دوپایدار دارد. در این بخش منظور از رفتار دوپایدار، تمایل به دوپایداری در حالت دوم ساختار دوپایدار می‌باشد.



شکل ۱۱) مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر VELSD برای سازه‌های دوپایدار در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک.

۳-۱-مشاهدات تجربی از تاثیر شرایط ترمو-ویسکوالاستیک بر رفتار دوپایدار نوار کامپوزیتی

براساس مدل ساختاری مقایسه‌ای ارائه شده در بخش ۲، می‌توان از مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر VELSD در شکل ۱۱ این نتیجه را گرفت که اثر شرایط ترمو-ویسکوالاستیک می‌تواند با توجه به خواص مواد و تاریخچه شرایط ترمو-ویسکوالاستیک، باعث افزایش و یا کاهش میزان دوپایداری شود.

آزمایش بر روی چهار نوار SMPC نمایش داده شده در شکل ۱۲ انجام شد تا صحت نتایج به‌دست آمده از مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک با آزمایش‌های تجربی سنجیده شود. در ساخت نمونه‌های دوپایدار کامپوزیتی از رزین گرماسخت SMP MP-5510 شرکت SMP Technologies, Inc، توکیو، ژاپن استفاده شد. جنس الیاف پارچه‌ای از شیشه HexForce 1080 1100 TF970 تهیه شده از شرکت Hexcel است. این پارچه بافتی حصیری غیرمتقارن با وزن اسمی ۴۸ گرم بر متر مربع دارد. روش تزریق رزین به‌کمک مکش (Vacuum Infusion Pregnation -VIP) انتخاب شد که در انجام آن از پایان‌نامه ایکلو کمک گرفته شد[50]. از قالب نر نیم استوانه مشابه قالب توضیح داده شده در[11] برای ساخت نوار دوپایدار کامپوزیتی استفاده شد. سطح مقطع عرضی تمام نمونه‌ها نیم‌دایره و دارای شعاع داخلی $\mathbf{R_{tape}}$=۷ $\boldsymbol{mm}$ با زاویه کمان ($\boldsymbol{\beta}$) حدوداً ۱۸۰ درجه است. نوار فنری با چیدمان‌های چهار لایه، $[\pm 45/90_2/\mp 45]$ ، پنج لایه، $/\pm 45_2$ $/90/\mp 45_2$، شش لایه، $[\pm 45_2/0_2/\mp 45_2]$، و هفت لایه، $/\pm 45_2]$ $[0_3/\mp 45_2]$، ساخته شد که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

داده‌های انتخابی جهت مقایسه با مدل تحلیلی دوبعدی میله-فنر-میراگر، وضعیت تک یا دوپایداری نوار و شعاع پیچش نوار به دور خود در شرایط ویژه ترمو-ویسکوالاستیک می‌باشند.

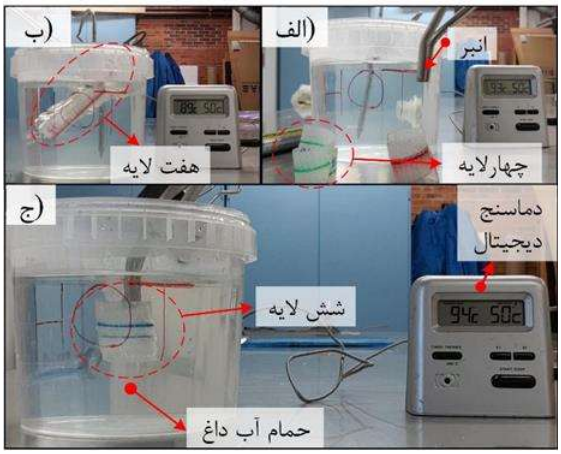
شکل ۱۲) نوارهای دوپایدار (BiTS) با لایه‌چینی مختلف، پیچیده شده (در حالت تعادل دوم)

مطالعات تجربی نشان داد که لایه‌های [±۴۵] موجب افزایش دوپایداری نوار BiTS می‌شوند، اما آن‌ها به استراحت تنش حساس‌تر هستند. بنابراین، برای رسیدن به خود باز شوندگی در بلند مدت، لایه‌های [۰/۹۰] اضافه می‌شوند[11]. نوارهای دوپایدار ساخته شده به اسامی ساده نامگذاری شدند: نوارهای دوپایدار چهار، پنج، شش و هفت لایه.

با هدف مطالعه رفتار وابسته به دما-زمان به‌صورت ترکیبی، شرایط ترمو-ویسکوالاستیک خاصی طراحی شد. نوارهای دوپایدار ابتدا به مدت یک هفته در معرض استراحت تنش در دمای اتاق (۲۷ درجه سانتیگراد) قرار گرفتند. سپس دمای نوارهای دوپایدار به یک‌باره با غوطه‌ور شدن در آب تا دمای حدود ۹۰ درجه سانتیگراد بالا رفت. به بیان دیگر، چهار نمونه تولید شده از چهارلایه تا هفت‌لایه پس از تولید به‌مدت یک هفته در وضعیت تعادل محلی (بسته شده) نگهداری شدند تا دوپایداری در آن‌ها در اثر شرایط ویسکوالاستیک ایجاد شود. سپس نمونه‌ها در حمام داغ نشان داده شده در شکل ۱۳ با دمای حدوداً ۹۰ درجه سانتیگراد به یکباره فروبرده شدند. بنابراین اگر نمونه‌ها در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد به حالت باز جهش کنند، به‌عبارتی از دوپایدار به تک‌پایدار تبدیل شوند، کمیت دوپایداری J در آن‌ها از بین رفته است ($\boldsymbol{J=0}$). آزمایش‌ها نشان داد که نمونه‌های چهارلایه و هفت‌لایه، در کمتر از ۳۳ میلی ثانیه (یک فریم در فیلم ۳۰ فریم در ثانیه) پس از ورود به آب ۹۰ درجه سانتیگراد به‌حالت اول (باز) جهش کردند. از طرف دیگر، نمونه‌های پنج‌لایه و شش‌لایه، نتوانستند به‌طور خودکار به‌حالت باز جهش کنند، و در عوض شروع به کاهش $\mathbf{R_{coil}}$ یا افزایش انحنای حالت بسته، $\boldsymbol{\kappa_x}$ کردند.

علت این پدیده نسبت تعداد لایه‌های ±۴۵ به ۰/۹۰ می‌باشد که در نوارهای فنری چهار و هفت لایه به ترتیب برابر یک و چهار/سوم است. در حالی این این نسبت در نوارهای پنج و شش لایه به ترتیب برابر چهار و دو می‌باشد. این نسبت از اهمیت لایه‌های ±۴۵ بر افزایش دوپایداری نوارهای فنری حکایت می‌کند. با افزایش این نسبت، نوارها دوپایدارتر شده و امکان بازگشت آن‌ها پس از افزایش دما به حالت تک پایدار کمتر است.

به‌طور خلاصه آزمایش شکل ۱۳ مشخص کرد که نوارهای بسته شده که به‌صورت ویسکوز در دمای اتاق دوپایدار شدند را می‌توان در شرایط خاص ترمو-ویسکوالاستیک به تک‌پایدار تبدیل کرد (به‌عنوان مثال چهارلایه و هفت لایه). با کوتاه کردن زمان استراحت تنش، دوپایدارها از کمیت دوپایداری کمتری برخوردار می‌شوند. بنابراین قادر خواهند بود که با دما تحریک شوند و جهش کنند. این رفتار توسط لایه‌چینی پنج‌لایه مشاهده شد که توانست پس از یک روز باقی‌ماندن در وضعیت بسته، توسط دما جهش کند. اما همین قطعه نتوانست پس از یک هفته استراحت تنش، در شرایط دمایی یکسان به وضعیت باز جهش کند.



شکل ۱۳) چهار نمونه پس از یک هفته انبارش در حالت بسته در آب گرم با دمای حدود ۹۰ درجه سانتیگراد غوطه ور شده اند: الف- نمونه های چهار و هفت لایه در شکل‌های بسته قبل از غوطه ور شدن، BiTS ب-هفت لایه در هنگام جهش به حالت باز شده در زمان کمتر از ۳۳ میلی ثانیه و BiTS ج- شش لایه در دمای ۹۴ درجه سانتیگراد در حالی که دوپایدار باقی‌مانده است.

به‌طور مشابه در مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر در شکل ۱۱ این پدیده با اثر المان‌های ماکسول افقی و عمودی قابل مقایسه است. به‌طوری که کاهش سفتی المان‌های ماکسول عمودی در گذشت زمان، همانند اثر لایه‌های ±۴۵ به افزایش دوپایداری سازه‌ی دوپایدار با گذشت زمان نتیجه می‌شود و کاهش سفتی المان‌های افقی ماکسول در دما، همانند اثر لایه‌های ۰/۹۰ به کاهش دوپایداری سازه‌ی دوپایدار با افزایش دما نتیجه می‌شود.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار مشاهده شده از نوارهای دوپایدار کامپوزیتی در شرایط مختلف ترمو-ویسکوالاستیک بررسی شد و با نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیلی مقایسه گردید.

برای تشریح رفتار مکانیکی دوپایدار کامپوزیتی در شرایط مختلف ترمو-ویسکوالاستیک، مدل مقایسه‌ای دوبعدی، متشکل از عضوهای میله‌ای صلب و فنرهای الاستیک و میراگرهای ویسکوز پیشنهاد شد. برای مدل پیشنهادی، روابط نیرو و انرژی حاکم بر مسئله استخراج شد و نمودار انرژی کرنشی بی‌بعد مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر در طول مسیر تغییر شکل بر حسب متغیرهای مسئله به‌دست آمد. همچنین با استفاده از منحنی انرژی به‌دست آمده، معیار دوپایداری ملموس‌تری (J) نسبت به معیارهای دوپایداری معرفی شده جهت تشخیص میزان تمایل نوارهای دوپایدار برای پایدار ماندن در وضعیت بسته تعریف شد. نشان داده شد که شرایط ویسکوالاستیک باعث افزایش دوپایداری نوارهای کامپوزیتی می‌شوند. مدل دوبعدی، قادر به بیان ساده‌تر ابعاد مختلف پدیده دوپایداری در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک است.

مدل میله-فنر-میراگر دوبعدی توانست رفتار ترمو-ویسکوالاستیک را برای دوپایدار کامپوزیتی پیش‌بینی کند که با

تغییر پارامترهای ورودی اتفاق می‌افتاد. بر طبق این مدل، دوپایدار در اثر اعمال شرایط ترمو-ویسکوالاستیک ممکن است دوپایداری خود را از دست دهد و یا دوپایداری در آن افزایش یابد.

در مطالعه موردی انجام شده بر روی چهار نوار دوپایدار ساخته شده انواع رفتارهای قابل مشاهده از دوپایدار در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک مورد بررسی و مشاهده قرار گرفت. چهار نوار دوپایدار BiTS در معرض یک چرخه ترمو-ویسکوالاستیک طراحی شده قرار گرفتند تا مدل میله-فنر-میراگر دوبعدی را برای رفتار ویسکوالاستیک و درجه حرارت بالا صحت‌سنجی کنند. در این چرخه چهار لایه‌چینی مختلف ساخته شده به‌مدت یک هفته در وضعیت بسته قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در حمام داغ با دمای حدود ۹۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. مدل تحلیلی میله-فنر-میراگر دوبعدی توانست تغییرات دوپایداری را در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک حاکم بر مدل به‌درستی پیش‌بینی کند. آزمایش‌ها نشان داد که قابلیت تغییر وضعیت دوپایداری در نوارهای دوپایدار کامپوزیتی تحت اثر شرایط ترمو-ویسکوالاستیک به لایه‌چینی نوار دوپایدار کامپوزیتی بستگی دارد. نمونه‌های چهارلایه و هفت‌لایه در شرایط ترمو-ویسکوالاستیک توانست در دمای بالا در کسری از ثانیه (کمتر از ۳۳ میلی ثانیه) به‌حالت اول جهش کند. در حالی که شرایط یکسان ترمو-ویسکوالاستیک منجر به افزایش دوپایداری در نمونه‌های پنج‌لایه و شش‌لایه از طریق افزایش انحنای وضعیت بسته شد. این درحالی است که نمونه پنج‌لایه در زمان استراحت کمتر (یک روز) توانست در دمای بالا جهش کند که نشان از اهمیت تاریخچه ترمو-ویسکوالاستیک در توان تحریک دوپایدار کامپوزیتی دارد.

به‌عبارت دیگر، شرایط ویسکوالاستیک (استراحت تنش) باعث افزایش دوپایداری نوار کامپوزیتی شد و برخی از نوارها که به‌صورت ویسکوالاستیک دوپایدار بودند، در شرایط خاص ترمو-ویسکوالاستیک خاصیت دوپایداری خود را از دست داده‌اند و به شکل باز، جهش کردند. علت این پدیده به نسبت تعداد لایه‌های تعداد لایه‌های ±۴۵ به ۰/۹۰ ارتباط داده شد. هرچه این نسبت بالاتر باشد، امکان بازگشت نوار دوپایدار در شرایط خاص ترمو-ویسکوالاستیک به حالت باز کمتر خواهد بود. همچنین ارتباط اثر لایه‌های ±۴۵ و ۰/۹۰ بر پدیده دوپایداری ترمو-ویسکوالاستیک با اثر شاخصه های ماکسول عمودی و افقی در مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر مقایسه شد و تشابه رفتار این مدل با نتایج تجربی به‌دست آمده در شرایط خاص ترمو-ویسکوالاستیک مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

فهرست علائم

c	سفتی بی‌بعد شده (-)
F	نیروی عمودی بر مدل میله-فنر (N)
L	طول هر میله در مدل میله-فنر (m)
S	معیار دوپایداری توسط گست و پلگرینو (-)
t	زمان (s)
U	انرژی کرنشی کل (J/m^2)
y	جابجایی عمودی نقطه اعمال بار (m)

علائم یونانی

β	زاویه کمان (rad)
ϕ	زاویه دوران میله (deg)

زیرنویس‌ها

0	مقدار اولیه در زمان صفر
cr	بحرانی
ve	اتلاف ویسکوالاستیک بعد از زمان بی‌نهایت
^	مقادیر بی‌بعد شده
∞	باقیمانده پس از زمان بی‌نهایت

پیوست الف) معادلات تعادل نیرو و انرژی برای مدل دوبعدی میله-فنر-میراگر (2D-VELSD)

شرایط الاستیک (ریلکس نکرده)

در این بخش به بیان روابط تعادل نیرو و انرژی برای مدل میله-فنر الاستیک (استراحت نکرده) پرداخته شده است. برای کاهش تعداد مولفه های مستقل در مسئله، ضریب سفتی بی‌بعد شده فنر، c در معادله (۱-الف) تعریف شده است. برای مقادیر مختلف c و $\boldsymbol{\Phi_0}$ ، نیروی عمودی اعمال شده بر روی مفصل فوقانی مدل ELS در طول مسیر، نشان داده شده در شکل ۷-ب ، از معادله (۲-الف) به‌دست می‌آید. به‌منظور مقایسه مدل‌های ELS با هم و همچنین با مدل پوسته سه‌بعدی CLT از نظر سطوح انرژی، پارامتر بی‌بعد شده برای نیرو در معادلات (۴-الف) معرفی شده‌اند.:

$$c = K_v/K_h \quad \text{(۱-الف)}$$

$$\hat{F} = c[\sin\phi_0 - \sin\phi] + 2\tan\phi[\cos\phi - \cos\phi_0] \quad \text{(۲-الف)}$$

در جایی که:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \quad \text{(۳-الف)}$$

و با فرض:

$$\hat{F} = \frac{F}{K_h L} \quad \text{(۴-الف)}$$

رابطه انرژی بی‌بعد شده برای سازه میله-فنر الاستیک شکل ۷ در معادله (۵-الف) بیان شده است. از مساوی صفر قرار دادن گرادیان انرژی بر حسب زاویه دوران، معادله (۶-الف)، برای محاسبه نقاط تعادل محلی و عمومی و عدم تعادل در طول مسیر تغییر شکل ساختار دوپایدار 2D-ELS استفاده شده است. همچنین برای بیان مسیر تغییر شکل سازه دوپایدار، از دوران بی‌بعد شده میله نسبت به زاویه اولیه $\boldsymbol{\Phi_0}$، در رابطه (۷-الف) کمک گرفته شده است.

$$\hat{U} = \frac{c_0}{2}(\sin\emptyset - \sin\emptyset_0)^2 + (\cos\emptyset - \cos\emptyset_0)^2 \quad \text{(۵-الف)}$$

$$\frac{\partial\hat{U}}{\partial\emptyset} = 0 \quad \text{(۶-الف)}$$

در جایی که:

$$\hat{U} = \frac{U}{K_h L^2}, \qquad \Delta\hat{\phi} = \frac{\Delta\phi}{2\phi_0} \quad \text{(۷-الف)}$$

شرایط ویسکوالاستیک (استراحت کرده)

معادله تعادل انرژی برای ساختار 2D-VELSD در معادله (۸-الف) که بازنویسی شده معادله (۵-الف) برای حالت ویسکوالاستیک است، برای وضعیتی استفاده می‌شود که سازه دوپایدار 2D-VELSD در حالت پایدار دوم (حالت خاکستری در شکل ۱۰-الف ریلکس کرده باشد و سفتی آن کاهش بیابد. در معادله (۸-الف)، c_∞ ضریب سفتی زنجیره الاستیک، c_{ve} ضریب سفتی زنجیره ویسکوالاستیک، و ϕ_2 زاویه تعادل محلی پس از استراحت تنش به‌مدت $t = \infty$ در حالت پایدار دوم است (شکل ۱۰-الف).

$$\hat{U}_{ve} = \frac{c_\infty}{2}[\sin\phi - \sin\phi_0]^2 + \frac{c_{ve}}{2}[\sin\phi - \sin\phi_2]^2 + (\cos\emptyset - \cos\emptyset_0)^2 \quad (۸\text{-الف})$$

تاییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت گردیده است و محتویات علمی مقاله، حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محمدمهدی شهریاری‌فرد (پژوهشگر اصلی، نگارنده بحث، نگارنده مقدمه، ۷۰٪)، محمد گلزار (استاد راهنما، بازنگری، ۲۰٪)، و گونار تیبرت (استاد مشاور، بازنگری، ۱۰٪).

منابع

1-Kebadze E, Guest SD, Pellegrino S. Bistable prestressed shell structures. International Journal of Solids and Structures. 2004;41(11-12):2801-20.

2 -Abidaryan S, Barmouz M, Hedayati SK. Effect of Infill Percentage and Raster Angle in Fused Deposition Modeling (FDM) Process on Shape Memory Properties of Poly (lactic acid) and Comparison with Compression Molding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020;7(5):14-23.

3 -M. G. Iman Salimi Nezhad, Amirhosein Behravesh, "Evaluating the effects of FDM 3D printing process parameters on shape-shifting behavior of PLA 4D printed structures," (in (in Persian)), Amirkabir J of Mechanical Engineering, vol. 53, no. 6, pp. 20-20, 2021.

4 -Kwok K, Pellegrino S. Viscoelastic effects in tape-springs. In52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t 2011 (p. 2022).

5 -Jeon S, Murphey T. Design and analysis of a meter-class CubeSat boom with a motor-less deployment by bi-stable tape springs. In52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t 2011 (p. 1731).

6 -Lake M, Hazelton C, Murphey T, Murphy D. Development of coilable longerons using elastic memory composite material. In43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 2002 (p. 1453) .

7 -Arzberger SC, Munshi NA, Lake MS, Wintergerst J, Varlese S, Ulmer MP. Elastic memory composite technology for thin lightweight space-and ground-based deployable mirrors. InOptical materials and structures technologies 2003 (Vol. 5179, pp. 143-154). International Society for Optics and Photonics.

8 -Hazelton C, Gall K, Abrahamson E, Lake M, Denis R. Development of a prototype elastic memory composite STEM for large space structures. In44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 2003 (p. 1977).

9 -Murphey T, Jeon S, Biskner A, Sanford G. Deployable booms and antennas using bi-stable tape-springs.

10-Mostafavi S. Analytical and experimental investigation of thermal deformation of corrugated composite laminates. Ph.D., Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, (In Persian), 2017.

11 -Mao H, Shipsha A, Tibert G. Design and analysis of laminates for self-deployment of viscoelastic bistable tape springs after long-term stowage. Journal of Applied Mechanics. 2017;84(7):071004.

12 -Iqbal K, Pellegrino S. Bi-stable composite shells. In41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit 2000 (p. 1385).

13 -Brinkmeyer A, Pellegrino S, Weaver PM, Santer M. Effects of viscoelasticity on the deployment of bistable tape springs .

14 -Mallol P, Tibert G. Deployment modeling and experimental testing of a bi-stable composite boom for small satellites. In54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 2013 (p. 1672) .

15 -Reynolds W, Murphey T, Banik J. Highly compact wrapped-gore deployable reflector. In52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t 2011 Apr (p. 1728).

16 -Schultz M, Hulse M, Keller P. Neutrally stable composite tape springs. In47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th 2006 (p. 1810).

17 -Lake MS, Campbell D. The fundamentals of designing deployable structures with elastic memory composites. In2004 IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720) 2004 (Vol. 4, pp. 2745-2756). IEEE.

18 -Liu Y, Du H, Liu L, Leng J. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review. Smart Materials and Structures. 2014 ;23(2):023001.

19 -Galletly DA, Guest SD. Bistable composite slit tubes. I. A beam model. International Journal of Solids and Structures. 2004;41(16-17):4517-33.

20 -Galletly DA, Guest SD. Bistable composite slit tubes. II. A shell model. International Journal of Solids and Structures. 2004;41(16-17):4503-16.

21 -Arrieta AF, Bilgen O, Friswell MI, Ermanni P. Modelling and configuration control of wing-shaped bi-stable piezoelectric composites under aerodynamic loads. Aerospace Science and Technology. 2013;29(1):453-61.
22 -Hyer MW. Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates. Journal of Composite Materials. 1981;15(2):175-94.
23 -Mostafavi S, Golzar M, Alibeigloo A. On the thermally induced multistability of connected curved composite plates. Composite Structures. 2016; 139:210-9.
24 - Oftadeh Y, Golzar M. The investigation of the effects of Dimension's and Mold's Temperature on Bistability of PVC/Glass Fiber composites. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(4):161-7.
25 -Lachenal X, Weaver PM, Daynes S. Multi-stable composite twisting structure for morphing applications. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012;468(2141):1230-51.
26 -Zhang Z, Wu H, Ye G, Yang J, Kitipornchai S, Chai G. Experimental study on bistable behaviour of anti-symmetric laminated cylindrical shells in thermal environments. Composite Structures. 2016;144:24-32.
27 -Zhang Z, Chen D, Wu H, Bao Y, Chai G. Non-contact magnetic driving bioinspired Venus flytrap robot based on bistable anti-symmetric CFRP structure. Composite Structures. 2016;135:17-22.
28 -Zhang Z, Wu H, He X, Wu H, Bao Y, Chai G. The bistable behaviors of carbon-fiber/epoxy anti-symmetric composite shells. Composites Part B: Engineering. 2013;47:190-9..
29 -Guest SD, Pellegrino S. Analytical models for bistable cylindrical shells. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2006;462(2067):839-54.
30 -Cui Y, Santer M. Highly multistable composite surfaces. Composite Structures. 2015;124:44-54.
31 -Mattioni F, Weaver PM, Potter KD, Friswell MI. Analysis of thermally induced multistable composites. International Journal of Solids and Structures. 2008 Jan 15;45(2):657-75.
32 -Betts DN, Kim HA, Bowen CR. Modeling and optimization of bistable composite laminates for piezoelectric actuation. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2011;22(18):2181-91.
33 -Fulton J, Jeon SK, Murphey TW. Flight qualification testing of a meter-class cubesat deployable boom. In4th AIAA Spacecraft Structures Conference 2017 (p. 0621).
34 -Mallol P, Mao H, Tibert G. Experiments and simulations of the deployment of a bistable composite boom. Journal of Spacecraft and Rockets. 2018;55(2):292-302.
35 -Murphey TW, Turse D, Adams L. TRAC boom structural mechanics. In4th AIAA Spacecraft Structures Conference 2017 (p. 0171).
36 -Murphey TW, Sanford GE, Jeon S, inventors; US Air Force, assignee. Deployable space boom using bi-stable tape spring mechanism. United States patent US 8,770,522. 2014.
37 -Mao H, Ganga PL, Ghiozzi M, Ivchenko N, Tibert G. Deployment of bistable self-deployable tape spring booms using a gravity offloading system. Journal of Aerospace Engineering. 2017;30(4):04017007.
38 -Shahryarifard M, Golzar M, Tibert G. Toward thermal stimulation of shape memory polymer composite bistable tape springs. Smart Materials and Structures. 2021;30(2):025030.
39 -Zhang Z, Ni X, Wu H, Sun M, Bao G, Wu H, Jiang S. Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures. Soft Robotics. 2021.
40 -Li X, Zhang Z, Sun M, Wu H, Zhou Y, Wu H, Jiang S. A magneto-active soft gripper with adaptive and controllable motion. Smart Materials and Structures. 2020 ;30(1):015024.
41 -Mao H, Shipsha A, Tibert G. Design and analysis of laminates for self-deployment of viscoelastic bistable tape springs after long-term stowage. Journal of Applied Mechanics. 2017 ;84(7):071004.
42 -Tarnai T. Zero stiffness elastic structures. International Journal of Mechanical Sciences. 2003;45(3):425-31.
43 -Brinkmeyer A, Pirrera A, Santer M, Weaver PM. Pseudo-bistable pre-stressed morphing composite panels. International Journal of Solids and Structures. 2013 ;50(7-8):1033-43.
44 -A. Brinkmeyer, M. Santer, A. Pirrera, and P. Weaver, "Pseudo-bistable self-actuated domes for morphing applications," J International Journal of Solids Structures, vol. 49, no. 9, pp. 1077-1087, 2012.
45 -Groh RM, Pirrera A. Orthotropy as a driver for complex stability phenomena in cylindrical shell structures. Composite Structures. 2018;198:63-72.
46 -Ozdemir VB, Kwok K. Shape recovery behavior of carbon nanopaper shape memory polymer composite. InAIAA Scitech 2019 Forum 2019 (p. 0483).
47 -Shim J, Mohr D. Rate dependent finite strain constitutive model of polyurea. International Journal of Plasticity. 2011;27(6):868-86.
48 -Zhang Z, Li Y, Wu H, Chen D, Yang J, Wu H, Jiang S, Chai G. Viscoelastic bistable behaviour of antisymmetric laminated composite shells with time-temperature dependent properties. Thin-walled Structures. 2018;122:403-15.
49 -He Y, Guo S, Liu Z, Liew KM. Pattern transformation of thermo-responsive shape memory polymer periodic cellular structures. International Journal of Solids and Structures. 2015;71:194-205.
50 -Ekelöw J. Design and manufacturing of thin composite tape springs.