

A Review of Methods and Principles for Creating Bistability Using 3D Printing

Davood Zehtabnaji, Mohammad Golzar*

Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Bistable and multistable structures have attracted significant attention in recent years because of their ability to maintain multiple stable equilibrium states without continuous external energy input. These characteristics make them promising candidates for the design of adaptive, programmable, and intelligent structures. The rapid development of additive manufacturing technologies, particularly Fused Filament Fabrication, has created new opportunities for realizing such structures by enabling precise control of material anisotropy, thermal residual stresses, pre-strain, and structural geometry. This review presents a systematic overview of the fundamental principles and methods used to achieve bistability and multistability through 3D printing. The reviewed approaches include the controlled use of thermal residual stresses, pre-strained layers, geometry-driven bistable mechanisms, bio-inspired architectures, origami and kirigami based concepts, as well as reinforced and composite filaments. The literature demonstrates that by tailoring extrusion paths, layer orientations, thermal history, and material distribution, the potential energy landscape of printed structures can be effectively engineered, enabling control over the number and stability of equilibrium states. These capabilities have led to applications in soft robotics, deployable aerospace systems, biomedical devices, energy harvesting technologies, and adaptive metamaterials. Finally, key research challenges are discussed, including the prediction of stable equilibrium states, the dependence of mechanical performance on printing parameters, time-dependent material effects such as creep and fatigue, and the lack of comprehensive analytical design frameworks. Future research directions toward the development of next-generation programmable multistable structures enabled by additive manufacturing are also outlined.

KEYWORDS

Bistable, 3D Printing, Multistable, Residual Stress, Anisotropy

* Corresponding Author (Email: m.golzar@modares.ac.ir)

1. Introduction

Bistable and multistable structures have attracted considerable attention because of their ability to maintain two or more stable equilibrium states without continuous external energy input. Such structures can undergo large and reversible configuration changes and therefore provide attractive solutions for adaptive, reconfigurable, and programmable engineering systems[1, 2]. Their potential applications include aerospace deployable structures, soft robotics, biomedical devices, mechanical metamaterials, vibration control, and energy harvesting.

Recent advances in additive manufacturing, particularly Fused Filament Fabrication (FFF), have created new opportunities for designing and fabricating bistable and multistable structures with controlled geometry and material architecture. The ability to control layer orientation, deposition parameters, and material distribution can modify mechanical anisotropy, residual stresses, and the resulting structural response [2-4]. Consequently, additive manufacturing can be considered not only as a fabrication technique but also as a means of engineering the mechanical behavior and stable configurations of the final structure.

Several approaches have been developed to obtain bistability and multistability, including the use of process-induced residual stresses, prestressed layers, material anisotropy, geometry-driven mechanisms, and mechanical metamaterial architectures[5-7]. Numerical modeling has also become an important tool for predicting nonlinear deformation, equilibrium configurations, and snap-through behavior, although accurate prediction remains challenging because of material anisotropy, nonlinear geometry, manufacturing variability, and process-induced effects[3].

Therefore, this review systematically examines the principal methods and underlying principles used to create bistability and multistability through 3D printing. The reviewed studies are classified and critically compared according to their bistability mechanisms, material systems, manufacturing approaches, numerical and analytical methods, and engineering applications. The main contribution of this review is to provide an integrated perspective linking manufacturing parameters, material behavior, structural mechanisms, energy-based stability, and functional applications, while identifying current limitations and future research directions for the development of programmable multistable structures.

2. Methodology

A systematic literature review was conducted following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework. Relevant studies addressing bistable and multistable structures, additive manufacturing, 3D printing, Fused Filament Fabrication, residual stress, programmable structures, and mechanical metamaterials were identified through searches of major scientific databases. The retrieved publications were screened according to predefined inclusion and exclusion criteria, and duplicate or irrelevant studies were removed.

A total of 69 relevant studies were selected for the final review and analyzed according to the mechanisms used to achieve bistability or multistability, material systems, manufacturing strategies, numerical and analytical modeling approaches, structural design concepts, and engineering applications. In addition to summarizing the reported developments, a comparative and critical analysis was performed to identify the advantages, limitations, research gaps, and emerging trends within the field

3. Discussion and Results

The systematic review of 69 selected studies demonstrates a clear evolution in the design of bistable and multistable structures from conventional mechanically induced configurations toward programmable structures enabled by advanced manufacturing and material systems[1, 2, 5]. The reviewed studies show that bistability can be achieved through several major strategies, including thermal residual stresses, pre-strained layers, geometry-driven mechanisms, bio-inspired architectures, origami- and kirigami-based designs, and composite or reinforced materials[3-5]. These approaches provide different levels of control over the number of stable states, deformation magnitude, energy barrier, structural stiffness, and reversibility [4, 5].

A major finding of the review is the increasing importance of additive manufacturing, particularly Fused Filament Fabrication, in controlling the structural parameters responsible for bistable behavior[2, 7]. Layer orientation, deposition path, material distribution, printing conditions, and thermal history can modify anisotropy and residual stress and consequently influence the final equilibrium configuration[2, 7]. Therefore, the manufacturing process should not be considered merely as a fabrication stage but as an integral part of the structural design strategy.

The reviewed studies also demonstrate the growing role of numerical simulation in predicting bistable behavior. Finite element and other computational approaches have been used to investigate nonlinear deformation, snap-through behavior, residual stress development, and stable equilibrium configurations [5-7]. However, accurate prediction remains challenging because of material anisotropy, nonlinear geometry, interlayer bonding, process-induced defects, and time-dependent effects [6, 7]. Integration of experimental characterization with numerical modeling is therefore essential for improving prediction accuracy and design reliability.

From an application perspective, bistable and multistable structures have progressed beyond fundamental mechanical demonstrations toward practical engineering systems [5]. The literature reports applications in deployable aerospace structures, soft robotics, biomedical and wearable devices, mechanical metamaterials, vibration control, and energy harvesting [5]. Recent studies also indicate an increasing convergence between multistable structures, programmable materials, machine learning, and data-driven design, which can provide new opportunities for automated optimization and customized structural responses [3].

Despite these advances, the literature reveals several persistent research gaps. The absence of unified design frameworks for predicting and controlling multiple equilibrium states remains a major limitation [5, 6]. In addition, the strong dependence of mechanical performance on manufacturing parameters, limited understanding of long-term effects such as creep and fatigue, and the computational cost of nonlinear multiphysics simulations restrict the scalability and reliability of current approaches [6, 7]. Future research should therefore focus on integrating experimental testing, high-fidelity numerical simulation, advanced optimization, and intelligent data-driven methods to develop reliable and programmable multistable structures [3].

4. Conclusions

The systematic review of 69 studies demonstrates that bistable and multistable structures have evolved from conventional mechanically induced configurations toward programmable and multifunctional systems. The reviewed literature confirms that additive manufacturing, particularly Fused Filament Fabrication, provides new opportunities to control structural geometry, material distribution, anisotropy, and process-induced effects, thereby enabling greater control over stable configurations and mechanical responses.

The findings further indicate that thermal residual stresses, pre-strained layers, geometry-driven mechanisms, bio-inspired and origami/kirigami architectures, and composite materials provide distinct approaches for achieving bistability and multistability. However, reliable prediction and control of multiple equilibrium states remain challenging because of nonlinear structural behavior, material anisotropy, manufacturing variability, and time-dependent material effects.

Future research should therefore emphasize the integration of experimental characterization, numerical simulation, advanced optimization, and data-driven methods. Such integration can support the development of reliable, programmable, and multifunctional multistable structures and accelerate their transition from laboratory-scale concepts toward practical engineering applications.

5. References

- [1] H. Y. Jeong, S. C. An, Y. Lim, M. J. jen, N. Kim, Y. C. Jun, 3D and 4D printing of multistable structures, *Applied Sciences*, 10(20) (2020) 7254.
- [2] H. Yu, Y. Fu, X. Zhang, L. Chen, D. Qi, J. Shi, W. Wang, Programmable active matter across scales, *Programmable Materials*, 1 (2023) 1-29.
- [3] Z. Lyu, J. Wang, Y. Chen, 4D printing: interdisciplinary integration of smart materials structural design and new functionality, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3) (2023) 032011.
- [4] R. Xu, C. Chen, J. Sun, Y. He, X. Li, M. H. Lu, Y. Chen, The design, manufacture and application of multistable mechanical metamaterials-a state-of-the-art review, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(4) (2023) 042013.
- [5] M. Sun, W. Gao, Z. Zhang, H. Shen, Y. Zhou, H. Wu, S. Jiang, A unified high-order semianalytical model and numerical simulation for bistable polymer composite structures, *Polymers*, 14(4) (2022) 818.
- [6] H. Alzyod, P. Ficzer, Optimizing fused filament fabrication process parameters for quality enhancement of PA12 parts using numerical modeling and taguchi method, *Heliyon*, 9(3) (2023) 14445.
- [7] N. A. Alderete, N. Pathak, H. D. Espinosa, Machine learning assisted design of shape-programmable 3D kirigami metamaterials. *npj Computational Materials*, 8(1) (2022) 191.

مروری بر روش‌ها و اصول ایجاد دوپایداری به کمک چاپ سه‌بعدی

داود زهتاب‌نجفی، محمد گلزار*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران m.golzar@modares.ac.ir

چکیده

سازه‌های دوپایدار و چندپایدار به دلیل توانایی حفظ چند حالت تعادل پایدار بدون نیاز به ورودی مداوم انرژی، جایگاه ویژه‌ای در طراحی سازه‌های هوشمند، تطبیقی و قابل برنامه‌ریزی یافته‌اند. ظهور فناوری چاپ سه‌بعدی، به‌ویژه روش فیلامنت مذاب، افق‌های جدیدی را برای ایجاد و کنترل این رفتارها فراهم کرده است؛ به‌گونه‌ای که امکان مهندسی دقیق ناهمسانگردی، تنش‌های پسماند حرارتی، پیش‌کرنش و هندسه سازه به‌صورت یکپارچه مهیا شده است. در این مقاله مروری، اصول و روش‌های ایجاد دوپایداری و چندپایداری به کمک چاپ سه‌بعدی به‌صورت نظام‌مند بررسی می‌شود. این روش‌ها شامل بهره‌گیری هدفمند از تنش‌های پسماند حرارتی، لایه‌های پیش‌کرنش‌یافته، طراحی مکانیزم‌های هندسی و اتصالات انعطاف‌پذیر، ساختارهای الهام‌گرفته از طبیعت، اورینگ‌های و کریگ‌های، و نیز استفاده از فیلامنت‌های تقویت‌شده و کامپوزیتی هستند. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که با کنترل مسیر اکستروژن، جهت‌گیری لایه‌ها، الگوی حرارتی و چیدمان مواد، می‌توان منحنی انرژی پتانسیل سازه را مهندسی کرده و تعداد و پایداری حالات تعادل را به‌طور مؤثر تنظیم نمود. این قابلیت‌ها منجر به توسعه کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌هایی نظیر رباتیک نرم، سازه‌های هوافضایی قابل استقرار، تجهیزات پزشکی، برداشت انرژی و فراسازه‌های تطبیقی شده است. در پایان، چالش‌های اصلی پژوهشی شامل پیش‌بینی دقیق تعداد حالات پایدار، وابستگی رفتار مکانیکی به پارامترهای چاپ، اثرات وابسته به زمان مواد پلیمری و کمبود مدل‌های تحلیلی جامع مورد بحث قرار گرفته و مسیرهای آینده برای طراحی نسل جدید سازه‌های چندپایدار چاپ سه‌بعدی ارائه می‌شود.

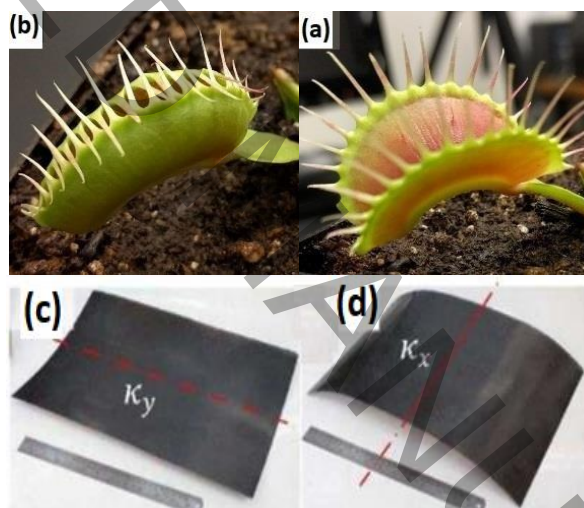
کلمات کلیدی

دوپایدار، چاپ سه‌بعدی، چندپایدار، تنش پسماند، ناهمسانگردی

۱- مقدمه

سازه‌های دوپایدار^۱ و چندپایدار^۲ به دلیل قابلیت حفظ دو یا چند حالت تعادل پایدار، بدون نیاز به ورودی انرژی خارجی، یکی از جذاب‌ترین موضوعات در مهندسی مکانیک و مواد هوشمند می‌باشند [۱]. این سازه‌ها با بهره‌گیری از مفاهیم مکانیک غیرخطی، می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگ و برگشت‌پذیر از خود نشان دهند و بین حالت‌های پایدار مختلف جابه‌جا شوند [۲، ۳]. بنابراین راهکاری مؤثر برای ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و برگشت‌پذیر بدون نیاز به مصرف مداوم انرژی فراهم می‌کنند [۱، ۴]. چنین رفتاری امکان طراحی سامانه‌هایی سبک، هوشمند [۱، ۳]، با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی الاستیک، تغییر شکل کنترل‌شده و واکنش به محرک‌های محیطی را فراهم می‌کند و زمینه‌ساز کاربردهای نوآورانه در حوزه‌های رباتیک نرم، ساختارهای هوافضایی قابل استقرار، ایمپلنت‌های پزشکی و مبدل‌های انرژی شده است [۵-۷].

با ظهور فناوری چاپ سه‌بعدی و به‌ویژه روش ساخت با فیلامنت ذوب شده^۳، پارادایم طراحی و ساخت این سازه‌ها متحول شده است [۸]. این فناوری با امکان کنترل دقیق پارامترهای فرآیند (نظیر دمای اکستروژن، جهت چاپ، سرعت و الگوی پرشدگی) [۹، ۱۰]، دقت هندسی بالا و قابلیت ایجاد تنش‌های پسماند برنامه‌ریزی‌شده، بستری ایده‌آل برای تحقق سازه‌های چندپایدار پیچیده فراهم کرده است [۱۱-۱۳]. رویکردهای متعددی برای ایجاد پایداری چندگانه با کمک چاپ سه‌بعدی توسعه یافته‌اند که از جمله می‌توان به استفاده از تنش‌های پسماند حرارتی [۱۳]، ناهمسانگردی مواد [۱۴]، لایه‌های پیش‌کرنش یافته [۱۵]، مکانیزم‌های هندسی [۱۶]، طراحی‌های الهام‌گرفته از طبیعت، اوربگامی و کریگامی [۱۷، ۱۸] و فیلامنت‌های تقویت‌شده [۱۹، ۲۰] اشاره کرد.



شکل ۱: (a) گیاه ونوس مگس خوار یک نمونه دوپایداری در طبیعت، در حالت باز. (b) در حالت بسته [۱۳]، (c) ورق دوپایدار کامپوزیتی با لایه چینی غیر متقارن [۹۰/۰] در وضعیت پایدار اول. (d) در وضعیت پایدار دوم [۱]

Figure 1. a) Venus flytrap, a natural example of a bistable system, in the open state; b) in the closed state [13]; c) a bistable composite sheet with an asymmetric [90/0] layup in the first stable state; d) in the second stable state [1].

این سازه‌ها به دلیل توانایی در تغییر شکل و عملکرد تحت شرایط مختلف، کاربردهای گسترده‌ای در طراحی سیستم‌های هوشمند و رباتیک دارند. به‌علاوه، آن‌ها به‌واسطه سازگاری با فرآیندهای ساخت افزایشی، به طراحان اجازه می‌دهند تا پیچیدگی‌های بیشتری را در طراحی‌های خود پیاده‌سازی کنند که پیش‌تر امکان‌پذیر نبود [۱۳-۱۶]. رشد سریع تحقیقات در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که چاپ سه‌بعدی به بستری مؤثر برای توسعه سازه‌های دو/چندپایدار در مهندسی نوین تبدیل شده است [۱۷-۱۹]. در موارد زیادی دو/چندپایداری با الهام از طبیعت ایجاد می‌شود همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، گیاه ونوس مگس خوار^۴ یک نمونه گویا از

¹ Bistable

² Multistable

³ Fused Filament Fabrication(FFF)

⁴ Venuse Flytrap

دوپایداری در طبیعت می‌باشد که برگ این گیاه در ابتدا مانند شکل ۱-۱a، باز است و می‌تواند با تغییر در انحنای خود، همانند شکل ۱-۱b، بسته شده و حشره را به طور ناگهانی برباید [۱۳]. با الگوبرداری از آن یک ورق کامپوزیتی دوپایدار مطابق شکل ۱-۱c و ۱-۱d، ایجاد شده است که در شکل ۱-۱c، حالت اول پایدار و در شکل ۱-۱d، حالت دوم پایدار مشاهده می‌شود [۱].

علاوه بر کاربردهای متداول، چندپایدارها در مقایسه با دوپایدارها، کاربردهای گسترده‌تری در حوزه‌های گوناگون دارند، مثلاً در مهندسی هوافضا و هوانوردی سازه‌های دوپایدار در توسعه بال‌های مورفینگ، سطوح کنترلی تطبیقی و سازه‌های قابل استقرار به کار می‌روند و می‌توانند بدون نیاز به محرک‌های پرمصرف بین دو حالت پایدار جابه‌جا شوند و این بال‌ها با شکل متغیر، سازه‌های قابل گسترش، و بال‌های سازگار با نیروهای آیرودینامیکی استفاده می‌شوند. این ویژگی‌ها موجب بهبود بهره‌وری سوخت و عملکرد پروازی می‌گردند [۱، ۲۱، ۲۲]. در حوزه مهندسی پزشکی، از سازه‌های چندپایدار برای تولید ایمپلنت‌های تغییر شکل‌پذیر، استنت‌ها و پروتزهای هوشمند بهره گرفته می‌شود. این ساختارها می‌توانند به‌طور خودکار با تغییرات شکل بدن سازگار شوند و در ابزارهای جراحی رباتیک نیز به کار روند به گونه‌ای که این استنت‌های یه صورت قابل استقرار، ابزارهای جراحی کم‌تهاجمی و ایمپلنت‌های تغییر شکل‌پذیر استفاده می‌شود [۷، ۲۳]. همچنین در سامانه‌های رباتیکی، مکانیزم‌های دوپایدار برای ساخت مفاصل قفل‌شونده، عملگرهای کم‌مصرف و سازه‌های بازپیکربندی‌پذیر کاربرد دارند. در حوزه رباتیک نرم، ترکیب مواد انعطاف‌پذیر با رفتار دوپایدار امکان ایجاد عملگرهای نرم و گریزهای انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کند و با این سازه‌های چندپایدار امکان ساخت عملگرهای کم‌مصرف و انعطاف‌پذیر فراهم می‌شود. این ربات‌ها قادر به ذخیره و آزادسازی انرژی مکانیکی بوده و با کمترین ورودی خارجی، تغییر شکل سریع و سازگار دارند [۱۳، ۲۴، ۲۵]. در سیستم‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی، از سازه‌های چندپایدار با قابلیت تغییر شکل ناگهانی در حسگرها استفاده می‌شود. این سیستم‌ها می‌توانند ارتعاشات مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند. علاوه بر این، وجود مانع انرژی و پدیده جهش ناگهانی^۱ باعث شده است که سازه‌های چندپایدار در طراحی ضربه‌گیرهای سبک، سامانه‌های محافظت در برابر سقوط و اجزای ایمنی خودرو نیز مورد توجه قرار گیرند [۱۵، ۱۶]. همچنین این سازه‌ها به‌منظور طراحی فیلترهای صوتی قابل تنظیم، موانع حذف نویز و راهنمای امواج صوتی با قابلیت کنترل انتشار صدا به کار گرفته می‌شوند [۱۳، ۲۶].

بررسی این کاربردها نشان می‌دهد که انتخاب نوع سازه دو/چندپایدار به شدت به نسبت ظرفیت تحمل بار به جرم، میزان نیاز به بازپیکربندی و محدودیت مصرف انرژی وابسته است. به‌طور کلی، سازه‌های مبتنی بر فیلامنت‌های تقویت‌شده برای کاربردهای هوافضایی و باربر مناسب‌تر هستند، در حالی که رویکردهای مبتنی بر تنش پسماند و مواد انعطاف‌پذیر در رباتیک نرم و تجهیزات پزشکی مزیت بیشتری دارند.

به دلیل توانایی در دستیابی به کرنش‌های بسیار بزرگ و تغییر شکل (پیکربندی) در سال‌های اخیر، تولید سازه‌های چندپایدار به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است [۲۷، ۲۸]. اما سازه‌های چندپایدار، دارای محدودیت‌هایی در رفتارهای بارگذاری خود هستند. آنها نمی‌توانند بارهای بزرگ را قبل از گیر دادن حمل کنند، و یا اگر بتوانند بارهای بزرگ را حمل کنند، به نیروهای زیادی برای تغییر پایداری نیاز دارند [۱۱، ۱۲]. در این سازه‌ها باید موقعیت و هندسه اجزا را در نظر گرفت. روابط در مورد حالات قبل و بعد از تغییر پایداری، طراحی این سازه‌ها را پیچیده و زمان‌بر می‌کند. بنابراین، رویکردهای جدید طراحی و تحقق همیشه مورد نیاز هستند. امروزه روش‌های طراحی جالبی برای ساختارهای قابل تنظیم مجدد مانند ربات‌های مدولار، پیکربندی مجدد سازه‌های بزرگ قابل استقرار در صنعت هوافضا بیان شده است و این الهام بخش بزرگی برای طرح ساختار قابل تنظیم مجدد است. با این حال، هنوز چالش‌های متعددی از جمله نحوه هندسه [۲۹]، تعیین دقیق تعداد حالات پایدار و کنترل دقیق پیکربندی‌ها [۱۱، ۲۱، ۳۰]، وابستگی شدید رفتار مکانیکی به جهت چاپ و نوع ماده‌ی مصرفی [۱۱، ۲۱]، تأثیر پارامترهای چاپ بر خواص ماده پایه [۳۱]، کمبود تحلیل جامع بر تأثیر پارامترهای فرآیند ساخت با فیلامنت ذوب شده [۹، ۳۲، ۳۳]، پیچیدگی ناشی از ناهمسانگردی ذاتی فرآیند ساخت با فیلامنت ذوب شده [۳۴]، اتصال دوپایدارها و ایجاد چندپایداری [۲۹]، پدیده‌های وابسته به زمان مانند خزش و خستگی در مواد پلیمری [۳۵، ۳۶]، پیچیدگی رفتار واقعی مواد چاپی [۳۷] و فعالسازی [۲۹] همچنان پابرجاست. این چالش‌ها بیانگر نیاز به توسعه مدل‌های تحلیلی جدید، روش‌های طراحی

^۱ Snap-through

مبتنی بر شبیه‌سازی عددی، و بررسی تجربی اثرات پارامترهای چاپ بر پایداری ساختار می‌باشد. از سوی دیگر، مقایسه‌ی تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از الگوهای زیستی، اورگامی، کریگامی و نیز بهره‌گیری از تنش‌های پسماند حرارتی و پیش‌کرنش‌های کنترل‌شده در چاپ، از مؤثرترین روش‌ها برای دستیابی به چندپایداری قابل تنظیم بوده‌اند [۱۲، ۱۵، ۳۸]. با این حال، هنوز رابطه‌ی میان پارامترهای طراحی، هندسه سلول واحد، و تعداد حالات پایدار به‌صورت جامع بررسی نشده است. اگرچه مرورهای ارزشمندی در زمینه سازه‌های دوپایدار و چندپایدار منتشر شده‌اند ولی اغلب آن‌ها بر حوزه‌های خاصی نظیر لمینیت‌های کامپوزیتی دوپایدار [۱۹] یا سازه‌های چندپایدار مبتنی بر چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی [۲] تمرکز داشته‌اند. در مقابل، مقاله حاضر تلاش می‌کند با تمرکز ویژه بر سازه‌های دو/چندپایدار تولیدشده به کمک فناوری‌های ساخت افزایشی، ارتباط میان مکانیزم‌های ایجاد پایداری، فرآیندهای ساخت، پارامترهای چاپ، چارچوب‌های مبتنی بر انرژی، رفتار مکانیکی و کاربردهای مهندسی را به‌صورت یکپارچه بررسی نماید.

علاوه بر این، در این مرور، رویکردهای مختلف ایجاد دو/چندپایداری به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل شده، چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در ادبیات بررسی گردیده و خلأهای پژوهشی و مسیرهای آینده تحقیق شناسایی شده‌اند. از این رو، مقاله حاضر فراتر از یک جمع‌بندی توصیفی، دیدگاهی تحلیلی درباره وضعیت فعلی و روندهای آینده این حوزه ارائه می‌دهد. بر این اساس، هدف از این مقاله مروری، تحلیل و مقایسه‌ی نظام‌مند روش‌ها و اصول ایجاد سازه‌های چندپایدار به کمک چاپ سه‌بعدی است تا ضمن شناسایی الگوهای مؤثر در ایجاد دوپایداری، مسیرهای تحقیقاتی آینده برای طراحی سازه‌های چندپایدار هوشمند و قابل برنامه‌ریزی مشخص شود.

در مقایسه با سایر فناوری‌های ساخت افزایشی نظیر استریولیتوگرافی^۱ و تف‌جوشی انتخابی لیزری^۲، فرآیند ساخت با فیلامنت ذوب شده اگرچه دارای محدودیت‌هایی مانند ضخامت لایه بیشتر، زبری سطح بالاتر و دقت هندسی پایین‌تر است، اما به دلیل قابلیت کنترل جهت اکستروژن، ایجاد ناهمسانگردی مکانیکی و کدگذاری تنش‌های پسماند حرارتی، بستر بسیار مناسبی برای ایجاد سازه‌های دو/چندپایدار محسوب می‌شود [۲، ۹، ۱۰]. در روش استریولیتوگرافی، رفتار نسبتاً همگن رزین‌های فوتوپلیمری و کاهش ناهمسانگردی ذاتی فرآیند موجب می‌شود ایجاد چندپایداری بیشتر وابسته به طراحی هندسی و مکانیزم‌های ساختاری باشد [۲، ۵]، در حالی که در ساخت با فیلامنت ذوب شده علاوه بر هندسه، میدان تنش پسماند ناشی از سردشدن لایه‌ها نیز نقش فعالی در ایجاد چاه‌های انرژی و رفتار جهش ناگهانی ایفا می‌کند [۱۳، ۲۳]. از سوی دیگر، روش تف‌جوشی انتخابی لیزری به دلیل کیفیت مکانیکی مناسب و قابلیت تولید هندسه‌های پیچیده، پتانسیل بالایی در ساخت فراسازه‌ها دارد [۱۶، ۱۷]، اما کنترل موضعی جهت‌گیری ماده و برنامه‌ریزی تنش‌های پسماند در آن نسبت به ساخت با فیلامنت ذوب شده محدودتر است [۲، ۹]. همچنین در فرآیند ساخت با فیلامنت ذوب شده، پارامترهایی مانند ضخامت لایه، دمای نازل، سرعت چاپ و کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای می‌توانند بر سختی خمشی، دقت رفتار جهشی و پایداری حالت‌های تعادلی اثرگذار باشند [۹، ۱۰].

۲- روش‌شناسی مرور ادبیات

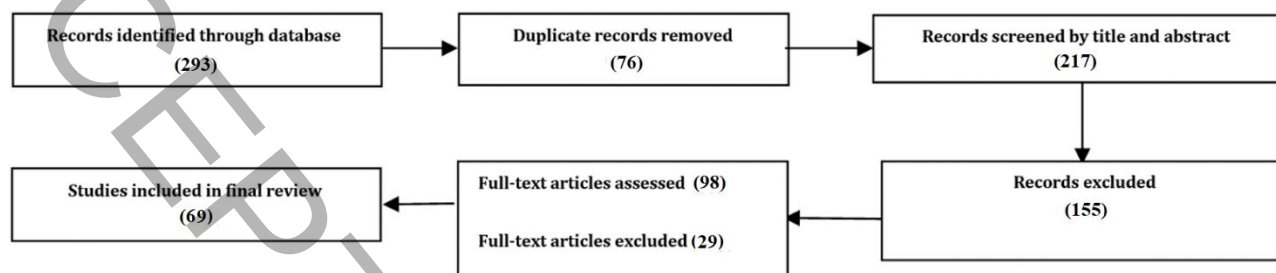
به‌منظور انجام یک مرور نظام‌مند و قابل بازتولید، جستجوی منابع علمی در پایگاه‌های داده انجام شد. بازه زمانی بررسی مقالات از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا مطالعات اولیه و جدید مرتبط با سازه‌های دو/چندپایدار و فناوری‌های ساخت افزایشی پوشش داده شوند. فرآیند جستجو با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌هایی نظیر سازه‌های دوپایدار، سازه‌های چند پایدار، ساخت افزایشی، ساخت با فیلامنت ذوب‌شده، ناپایداری جهشی، تغییرشکل و فرامواد مکانیکی صورت پذیرفت.

معیارهای ورود به مطالعه شامل: (۱) مقالات پژوهشی و مروری منتشرشده در مجلات معتبر، (۲) مطالعات مرتبط با سازه‌های دو/چندپایدار، (۳) پژوهش‌های مرتبط با چاپ سه‌بعدی و برنامه‌ریزی رفتار مکانیکی، و (۴) مطالعات دارای تحلیل مکانیکی، تجربی یا

¹ Stereolithography (SLA)

² Selective Laser Sintering (SLS)

عددی معتبر بود. همچنین منابعی که ارتباط مستقیم با موضوع مقاله نداشتند، فاقد اطلاعات کافی درباره رفتار مکانیکی بودند یا صرفاً بر جنبه‌های مواد بدون تحلیل پایداری تمرکز داشتند، از فرآیند بررسی حذف شدند. پس از حذف مطالعات تکراری و غربالگری عنوان، چکیده و متن کامل مقالات، منابع نهایی انتخاب و بر اساس نوع سازوکار ایجاد چندپایداری، روش ساخت و تحلیل مکانیکی دسته‌بندی شدند. فرآیند انتخاب و غربالگری مقالات بر اساس چارچوب پریسما^۱ انجام شد تا شفافیت و قابلیت بازتولید فرآیند مرور افزایش یابد. این مطالعه از چارچوب پریسما صرفاً به‌عنوان راهنمای شفاف‌سازی فرآیند انتخاب منابع استفاده می‌کند.



شکل ۲: نمودار جریان شناسایی، ارزیابی و انتخاب مقالات مورد استفاده در این مطالعه مروری بر اساس دستورالعمل پریسما

Figure 2. Flow diagram illustrating the identification, screening, eligibility assessment, and selection of articles included in this systematic review, based on the PRISMA guidelines

۲-۱- ارزیابی کیفی مطالعات

به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان نتایج این مرور و ارزیابی استحکام شواهد موجود، کیفیت مطالعات کلیدی حوزه سازه‌های دو/چندپایدار تولیدشده به روش‌های ساخت افزایشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه پژوهش‌های این حوزه طیف متنوعی از مطالعات تجربی، عددی و تحلیلی را شامل می‌شوند، ارزیابی کیفیت بر اساس معیارهای مهندسی و میزان قابلیت استناد و بازتولید نتایج انجام شد.

برای این منظور، پنج معیار شامل: (۱) شفافیت روش ساخت و پارامترهای فرآیند چاپ، (۲) تحلیل مکانیکی و تبیین رفتار پایداری، (۳) اعتبارسنجی تجربی یا عددی، (۴) قابلیت بازتولید نتایج و (۵) ارتباط مستقیم با رفتار دو/چندپایداری در نظر گرفته شد. برای هر معیار، امتیازی بین ۱ تا ۳ اختصاص یافت که به‌ترتیب بیانگر کیفیت ضعیف، متوسط و مناسب است. نتایج این ارزیابی برای تعدادی از مطالعات محوری در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اغلب مطالعات منتخب امتیاز کلی ۱۳ تا ۱۴ از ۱۵ را کسب کرده‌اند که نشان‌دهنده کیفیت روش‌شناختی مناسب آن‌ها است. به‌ویژه مراجع ۲، ۱۴ و ۴۸ به دلیل ارائه هم‌زمان جزئیات فرآیند ساخت، تحلیل مکانیکی مناسب و اعتبارسنجی تجربی، از بالاترین سطح قابلیت استناد برخوردار بودند و سهم مهمی در استخراج روندهای تحلیلی این مقاله داشته‌اند.

^۱ PRISMA

در مقابل، برخی مطالعات از جمله مرجع [۳۱] علی‌رغم ارزشمندی از منظر ایده‌های طراحی و کاربردهای مهندسی، به دلیل محدودیت در گزارش جزئیات روش یا فقدان تحلیل جامع رفتار دو/چندپایداری، امتیاز پایین‌تری دریافت نمودند.

نتایج این ارزیابی در تفسیر یافته‌های مرور و شناسایی خلأهای پژوهشی مورد توجه قرار گرفت تا از اتکای بیش از حد به مطالعات با شواهد تجربی محدود جلوگیری شود. همچنین این فرآیند امکان تفکیک بهتر نتایج حاصل از مطالعات با پشتوانه تحلیلی و تجربی قوی از مطالعات صرفاً مفهومی را فراهم کرد.

جدول شماره ۱: ارزیابی کیفی مطالعات منتخب بر اساس شفافیت روش ساخت، تحلیل مکانیکی، اعتبارسنجی تجربی، قابلیت بازتولید و ارتباط با رفتار دو/چندپایداری

Table 1. Qualitative assessment of the selected studies based on the transparency of the fabrication method, mechanical analysis, experimental validation, reproducibility, and relevance to bistable/multistable behavior.

مرجع	شفافیت روش ساخت	تحلیل مکانیکی	اعتبارسنجی تجربی	قابلیت بازتولید	ارتباط با دو/چندپایداری	امتیاز
[۲]	۳	۳	۲	۳	۳	۱۴
[۱۴]	۲	۳	۳	۳	۳	۱۴
[۲۳]	۳	۲	۳	۲	۳	۱۳
[۳۱]	۲	۲	۲	۲	۲	۱۰
[۴۸]	۳	۳	۲	۳	۳	۱۴

۲-۲- تمایز میان دوپایداری و چندپایداری

اگرچه اصطلاحات دوپایداری و چندپایداری گاهی به صورت کلی برای توصیف سازه‌های دارای بیش از یک حالت تعادل پایدار به کار می‌روند، اما از دیدگاه مکانیکی تفاوت‌های مهمی میان آن‌ها وجود دارد. در سازه‌های دوپایدار، سیستم دارای دو حالت تعادل پایدار است که معمولاً توسط یک سد انرژی از یکدیگر جدا می‌شوند. در مقابل، سازه‌های چندپایدار دارای بیش از دو حالت تعادل پایدار بوده و چشم‌انداز انرژی آن‌ها شامل چندین چاه انرژی و مسیرهای گذار پیچیده‌تر است [۲، ۱۳].

افزایش تعداد حالات پایدار معمولاً موجب افزایش پیچیدگی طراحی، حساسیت به پارامترهای هندسی و فرآیندی و دشوارتر شدن کنترل مسیرهای گذار میان حالات مختلف می‌شود [۲۳]. همچنین در حالی که رفتار سازه‌های دوپایدار اغلب با یک رویداد جهش ناگهانی میان دو مینیمم انرژی توصیف می‌شود، در سازه‌های چندپایدار ممکن است چندین مکانیزم گذار و چندین مسیر تغییر شکل مستقل وجود داشته باشد [۵، ۱۴]. به همین دلیل، اگرچه بسیاری از اصول حاکم بر تحلیل انرژی و پایداری در هر دو گروه مشابه هستند، طراحی و کنترل سازه‌های چندپایدار معمولاً به مدل‌سازی‌های پیچیده‌تر و مدیریت دقیق‌تر تنش‌های پسماند، ناهمسانگردی و ویژگی‌های هندسی نیاز دارد [۹، ۱۳].

از دیدگاه انرژی، سازه‌های دوپایدار دارای دو مینیمم موضعی در تابع انرژی پتانسیل هستند، در حالی که در سازه‌های چندپایدار بیش از دو مینیمم پایدار وجود دارد. در نتیجه، افزایش تعداد حالات پایدار نه تنها موجب پیچیده‌تر شدن چشم‌انداز انرژی می‌شود، بلکه کنترل مسیرهای گذار، حساسیت به پارامترهای ساخت و فرآیند طراحی را نیز دشوارتر می‌کند [۵، ۱۳، ۲۳].

چارچوب انرژی مورد استفاده در این مقاله مبتنی بر مطالعات کلاسیک دوپایداری پوسته‌ها و لمینیت‌های کامپوزیتی ارائه شده است [۳۹، ۲۴]. رفتار دو/چندپایداری در بسیاری از سازه‌های چاپ سه‌بعدی بر پایه وجود چند مینیمم موضعی در تابع انرژی پتانسیل کل سیستم قابل تبیین است [۲۴، ۴۰، ۴۱]. در این چارچوب، حالت تعادل سازه زمانی حاصل می‌شود که مشتق اول انرژی پتانسیل کل نسبت به مختصات تعمیم‌یافته برابر صفر باشد:

$$\frac{d\Pi}{dA} = 0 \quad (1)$$

همچنین شرط پایداری موضعی سازه به مثبت بودن مشتق دوم انرژی پتانسیل وابسته است:

$$\frac{d^2\Pi}{dA^2} > 0 \quad (2)$$

که در آن در سازه‌های دوپایدار، تابع انرژی دارای حداقل دو مینیمم موضعی پایدار است که توسط یک سد انرژی از یکدیگر جدا می‌شوند. عبور سازه از این سد انرژی موجب بروز رفتار جهش ناگهانی و تغییر حالت پایدار می‌شود [۴۰-۴۲]. به‌طور کلی، انرژی پتانسیل کل سیستم را می‌توان به‌صورت مجموع انرژی کرنشی و کار نیروهای خارجی بیان کرد:

$$\Pi = U - W \quad (3)$$

این چارچوب انرژی در بسیاری از مطالعات مربوط به ورق‌های دوپایدار سازه‌های مورفینگ و فراسازه‌های چندپایداری مکانیکی برای تحلیل رفتار چندپایداری مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴، ۴۰، ۴۱]. در بسیاری از پوسته‌ها و سازه‌های دوپایدار، رفتار چندپایداری ناشی از برهم‌کنش غیرخطی میان انرژی‌های خمشی و کششی است [۲۴، ۴۱]. در این سازه‌ها، کوپل شدن میان تغییر شکل‌های خمشی و کرنش‌های غشایی می‌تواند موجب ایجاد چند مینیمم پایدار در چشم‌انداز انرژی شود. هنگامی که انرژی خارجی اعمال شده از سد انرژی میان این مینیمم‌ها عبور کند، پدیده تغییر حالت پایداری رخ داده و سازه به حالت پایدار دیگری منتقل می‌شود. علاوه بر هندسه سازه، تنش‌های پسماند و ناهمسانگردی مکانیکی ناشی از فرآیند چاپ نیز می‌توانند شکل چشم‌انداز انرژی و موقعیت حالات پایدار را تغییر دهند [۴۰، ۴۱]. به همین دلیل، تحلیل رفتار سازه‌های چندپایدار معمولاً نیازمند چارچوب‌های غیرخطی و مدل‌سازی همزمان اثرات هندسی، مکانیکی و فرآیندی است.

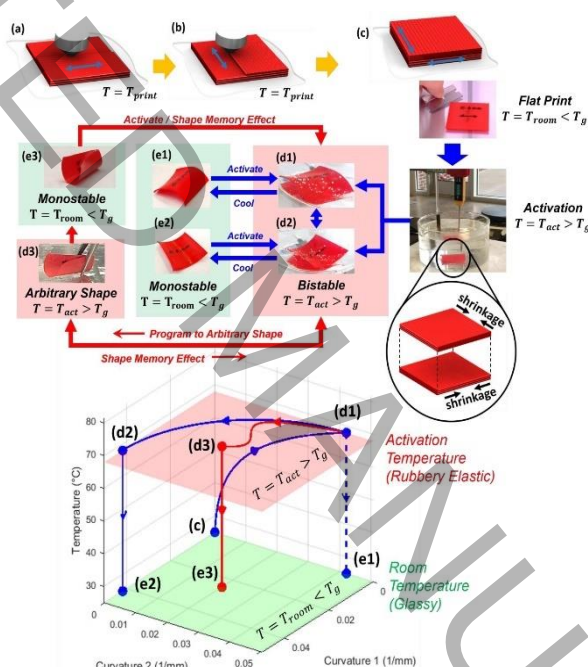
۳- ایجاد دوپایداری به وسیله چاپ سه‌بعدی

پیشرفت فناوری چاپ سه‌بعدی طی سال‌های اخیر، امکان ایجاد و بررسی سازه‌هایی با رفتارهای مکانیکی پیچیده و نو از جمله دوپایداری را فراهم کرده است. این فناوری با قابلیت کنترل دقیق پارامترهای فرآیند (مانند دما، جهت چاپ، و نرخ اکستروژن) و امکان استفاده از مواد متنوع نظیر پلیمرها، فلزات و کامپوزیت‌ها، به بستری مناسب برای تولید سازه‌های دوپایدار تبدیل شده است [۲]. چاپ سه‌بعدی نه‌تنها باعث کاهش ضایعات مواد می‌شود، بلکه امکان کدگذاری تنش‌های پسماند و پیش‌کرنش‌ها را در درون ساختار فراهم می‌آورد؛ ویژگی‌ای که در روش‌های سنتی ساخت به‌سختی قابل دستیابی است. در میان روش‌های مختلف چاپ سه‌بعدی، فرآیند ساخت با فیلامنت مذاب، به دلیل سادگی، هزینه پایین، و کنترل‌پذیری بالا، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تولید سازه‌های دوپایدار است. در این روش، فیلامنت‌های پلیمری پس از ذوب‌شدن از نازل، لایه‌به‌لایه روی بستر رسوب داده می‌شوند و در طول فرآیند سردشدن،

میدان‌های تنش پسماند حرارتی و مکانیکی درون ماده تثبیت می‌شوند. این تنش‌های پسماند می‌توانند در طراحی سازه‌هایی با رفتارهای دوپایدار نقش کلیدی داشته باشند [۴۲، ۴۳]. این بخش به اصول ایجاد دوپایداری و چند پایداری به کمک چاپ سه بعدی می‌پردازد که به چهار زیربخش تقسیم بندی و تشریح می‌شوند.

۳-۱- تنش‌های پسماند حرارتی

استفاده از تنش‌های پسماند حرارتی ابتدا در دوپایداری‌های حرارتی کامپوزیتی ناهمسانگرد معرفی شد [۴۱، ۴۴، ۴۵]. تنش‌های پسماند حرارتی در چاپ سه بعدی یکی از عوامل مؤثر در ایجاد دوپایداری‌ها و چندپایداری‌ها هستند. در حالی که در بیشتر کاربردها این تنش‌ها به عنوان عامل منفی در نظر گرفته می‌شوند (زیرا موجب اعوجاج یا حرکت ناخواسته می‌شوند)، در ساخت سازه‌های دوپایدار می‌توان از آن‌ها به صورت هدفمند برای القای جهش ناگهانی استفاده کرد. پلیمرهای حافظه‌دار می‌توانند هم شکل و هم خواص مکانیکی خود را در پاسخ به محرک‌های خارجی ناشی از وجود نواحی سخت و نرم، جدا از فاز تغییر دهند [۱۳، ۴۶]. این ویژگی به کمک پلیمرهای حافظه شکلی امکان پذیر است.



شکل ۳: ساختار دوپایدار قابل تعویض با چاپ سه بعدی به روش ساخت با فیلامنت مذاب و فیلامنت پلی لاکتیک اسید، با استفاده از نمودار

ترمو مکانیکی [۱۳]

Figure 3. Reconfigurable bistable structure fabricated by three-dimensional printing using FFF with PLA filament, based on the thermomechanical diagram [13].

ون‌مانن و همکاران [۲۳] نشان دادند که در چاپ سه بعدی ساخت با فیلامنت مذاب با پلی لاکتیک اسید^۱ کنترل جهت اکستروژن و نرخ سرمایش می‌تواند باعث ایجاد انقباض جهت‌دار در دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای^۲ شود. به دلیل قابلیت‌های حافظه شکلی پلی لاکتیک اسید می‌توان در چاپ ورق‌های مسطح با بهینه‌سازی تنظیمات چاپگر و با کنترل جهت اکستروژن، انقباض را هنگامی که دما تا محدوده دمای انتقال شیشه‌ای بالا می‌رود در جهت اکستروژن کنترل کرد و براین اساس، می‌توان این ورق‌ها را برای انجام تغییر شکل

¹ Polylactic Acid(PLA)

² Glass Transition Temperature, (T_g)

متوالی برنامه‌ریزی کرد. این انقباض موجب تغییر شکل ناگهانی و قابل برگشت (دوپایدار) در سازه‌های چاپ‌شده می‌گردد. همچنین کارل‌جین‌آنگ و همکاران [۱۳] همانطور که در شکل ۳ می‌بینید با طراحی دولایه‌های متقارن با تنش‌های پسماند مخالف، موفق به ساخت سازه‌های دوپایدار حرارتی شدند که در دماهای مختلف بین دو حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهند. ایشان نمونه‌های پوسته‌ای دوپایدار را با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی ساخت با فیلامنت مذاب و ماده پلی لاکتیک اسید به‌منظور بهره‌گیری از رفتار حافظه‌شکلی این پلیمر ساختند. فرآیند ساخت بر پایه یک معماری دولایه بود که در آن دو گروه لایه‌ها در جهت‌های عمود بر هم اکستروژد شده و یک پیکربندی [۰/۹۰] را تشکیل دادند. این الگو موجب ایجاد میدان‌های تنش پسماند حرارتی در دو راستای متقاطع گردید. در هنگام اکستروژن، زنجیره‌های پلیمری در راستای چاپ کشیده شده و با سرد شدن به حالت کشیده منجمد می‌شود و تنش باقیمانده در ساختار ذخیره می‌گردد. پس از جداسازی نمونه از بستر چاپ، فعال‌سازی حرارتی از طریق غوطه‌وری در حمام آب‌گرم با دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای پلی لاکتیک اسید (حدود ۶۵ درجه سلسیوس) انجام شد. در این شرایط، افزایش تحرک زنجیره‌ها موجب انقباض هر لایه در راستای چاپ و ایجاد نیروهای متقابل شده که نهایتاً دوپایداری حرارتی و امکان تغییر حالت بین دو حالت پایدار را فراهم می‌نماید. با سرد شدن نمونه تا دمای اتاق، ماده مجدداً صلب شده و ساختار به‌صورت تک‌پایدار تثبیت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترل الگوی دمایی و مسیر اکستروژن می‌تواند با تبدیل انرژی حرارتی به انرژی کشسان ذخیره شده به‌عنوان ابزار طراحی برای تولید سازه‌های دوپایدار با قابلیت فعال‌سازی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

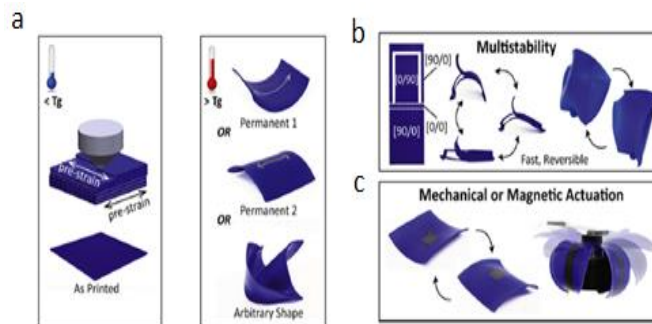
با مقایسه مطالعات مبتنی بر تنش‌های پسماند حرارتی می‌توان نتیجه گرفت که این رویکرد برای سازه‌های سبک و نازک، به‌ویژه در کاربردهای مورفینگ و رباتیک نرم، بسیار مؤثر است؛ زیرا بدون نیاز به مونتاژ یا عملگر خارجی، امکان ایجاد دوپایداری فراهم می‌شود. با این حال، وابستگی شدید رفتار سازه به دمای انتقال شیشه‌ای ماده و شرایط محیطی، استفاده از این روش را در کاربردهای صنعتی با تغییرات دمایی گسترده محدود می‌کند. همچنین کنترل دقیق نرخ سرمایش و یکنواختی میدان حرارتی همچنان یکی از چالش‌های اصلی این رویکرد محسوب می‌شود.

۲-۳- لایه کشیده شده (پیش کرنش)

این روش نیز همانند روش قبل ابتدا در دوپایداری‌های کامپوزیتی با کشیدن الیاف ایجاد گردید [۴۷، ۴۸]. استفاده از لایه‌های پیش‌کرنش‌یافته روشی مؤثر برای ایجاد دو یا چند حالت پایدار در سازه‌های چاپ‌شده است. به‌جای تلاش برای حذف تنش‌های پسماند، می‌توان از آن‌ها برای کدگذاری کرنش‌های جهت‌دار در ساختار بهره گرفت [۴۷، ۴۸]. رابلی و همکاران [۴۷] با چاپ یک ورق پلی لاکتیک اسید متشکل از لایه‌هایی با جهت چاپ متعام (X و Y) نشان دادند که این ناهمسانگردی در جهت‌گیری لایه‌ها منجر به ایجاد شکل زینی^۱ در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود و سازه می‌تواند بین دو حالت پایدار جابجا گردد. همانگونه که مشاهده می‌شود شکل ۴-ا، شماتیکی از ساختار چاپ شده و رفتار آن را در ساختارهای چاپی نشان می‌دهد. شکل ۴-ب، ایده خود را برای ساختارهای چندپایدار گسترش داده و دولایه‌های چاپ شده سه‌بعدی نیز روی یک گیره اعمال گردید و نهایتاً در شکل ۴-ج تحت تحریک مکانیکی یا مغناطیسی عمل می‌کند.

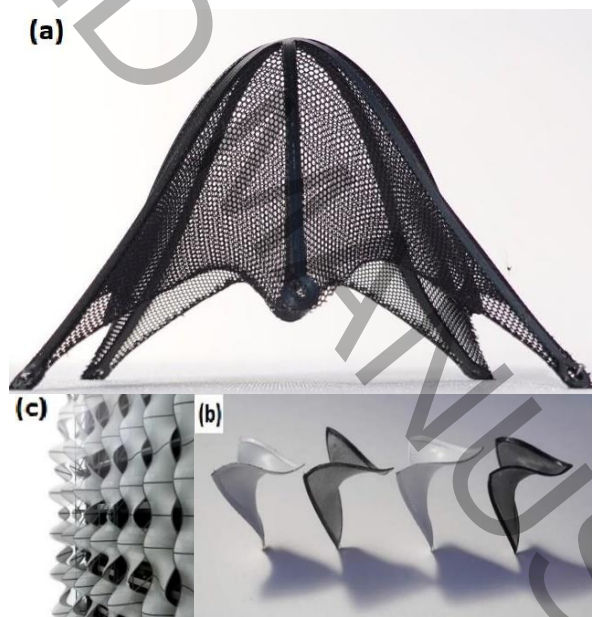
علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند که افزودن تحریکات خارجی (مکانیکی یا مغناطیسی) می‌تواند منجر به ایجاد چندپایداری گردد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که نسبت پیش‌کرنش بین لایه‌ها و توزیع ضخامت، دو پارامتر کلیدی در کنترل رفتار دوپایدار هستند. اختلاف کرنش میان لایه‌ها موجب افزایش انرژی ذخیره شده و پایداری حالت دوم می‌شود، اما در صورت تجاوز از مقدار بحرانی، پایداری از بین می‌رود.

^۱ Saddle-shape



شکل ۴: (a) رفتار شکل‌گیری ساختار دولایه چاپ شده سه‌بعدی را نشان می‌دهد که زیر دمای انتقال شیشه‌ای صاف بوده و در بالای دمای انتقال شیشه‌ای می‌توان دوپایداری را فعال کرد. (b) دوپایداری را می‌توان با طراحی مناسب به چندپایداری گسترش داد. (c) ساختار دولایه و طراحی گیره با استفاده از آهن و رشته‌های پلی لاکتیک اسید، که گیره توسط یک آهنربا فعال می‌شود [۴۸].

Figure 4. (a) Formation behavior of the 3D-printed bilayer structure, which remains flat below the glass transition temperature (T_g) and exhibits bistability when activated above T_g . (b) Bistability can be extended to multistability through appropriate structural design. (c) Bilayer structure and clip design fabricated using iron and PLA filaments, with the clip actuated by a magnet [48].



شکل ۵: (a) نمونه چاپ شده بر روی توری کشیده شده با حالت دوپایدار گنبدی شکل. (b) نمونه‌های دوپایدار چاپ شده روی توری کشیده شده. (c) نمونه چندپایداری ایجاد شده قابل نصب در نمای ساختمان به منظور کنترل شدت تابش نور خورشید در ساختمان [۳۲]

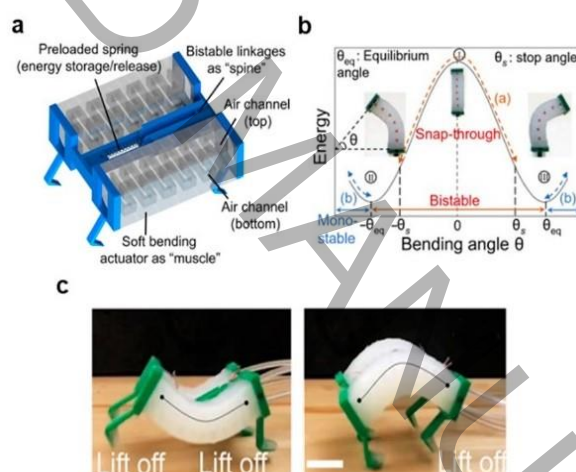
Figure 5. (a) A 3D-printed sample on a stretched mesh exhibiting a dome-shaped bistable configuration. (b) Bistable samples printed on a stretched mesh. (c) A multistable structure developed for installation on building façades to control the intensity of solar radiation entering the building [32].

پوقوسیان و همکارانش [۳۲] با هدف بررسی فیزیکی و پتانسیل معماری فراسازه‌های قابل برنامه‌ریزی اقدام به چاپ بر روی توری‌های کشیده شده نمودند. به این صورت که مطابق شکل ۵-a، ایشان بوسیله روش ساخت با فیلامنت مذاب اقدام به چاپ بر روی این توری‌ها نموده و پس از چاپ، یک سلول دو/چندپایدار ایجاد نمودند. شکل ۵-b، چند نمونه از سلول‌های چندپایدار حاصل از آن را نشان می‌دهد

که با در کنار هم قرار گرفتن این سلول‌ها، سازه‌های چندپایداری ایجاد و با برنامه‌ریزی چندپایداری‌ها توانستند همانگونه که در شکل ۵-۲، مشاهده می‌شود در نمای ساختمان‌های شیشه‌ای بمنظور تنظیم نور و کنترل گرمای حاصل از تابش نور خورشید در داخل ساختمان استفاده نمایند. اما این روش فعلاً در مرحله تحقیقاتی بوده و با استانداردهای انرژی و نمای امروزی به صورت کامل مطابقت ندارد اما نشان می‌دهد چگونه یک فرآیند جدید می‌تواند ظاهر و نمای ساختمان‌ها و نهایتاً شهرها را در آینده تغییر دهد.

تانگ و همکاران [۴۹] با الهام از ستون فقرات پستانداران، مطابق شکل ۶، یک مکانیزم دوپایدار خمشی نرم هیبریدی را توسعه دادند. این مکانیزم از ترکیب فنرهای پیش‌کشیده و محرک‌های پنوماتیکی چاپ‌شده تشکیل شده و قادر است با صرف انرژی بسیار کم، تغییر شکل‌های سریع و برگشت‌پذیر انجام دهد که به‌عنوان ستون فقرات یک ربات نرم استفاده شده و عملکردی مشابه حرکت تاخت یوزپلنگ را شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان داد که ربات‌های دارای مکانیزم دوپایدار تا ۲٫۵ برابر سریع‌تر حرکت کرده و انرژی ورودی کمتری نسبت به ربات‌های تک‌پایدار نیاز دارند. این پژوهش به‌خوبی نشان داد که کنترل شکل ستون فقرات در سازه‌های چندپایدار، می‌تواند نسبت انرژی ذخیره‌شده به جرم را به‌شدت افزایش دهد. اما نکته مهم در این مدل از سازه‌های دو/چندپایدار محدودیت‌های است که در حین تولید بدلیل ایجاد پیش‌کشش ماده کشسان و پرینت بر روی آن بوجود می‌آید.

تحلیل مطالعات فوق نشان می‌دهد که روش مبتنی بر پیش‌کرنش، در مقایسه با تنش‌های پسماند حرارتی، قابلیت برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای تعداد و موقعیت حالات پایدار فراهم می‌کند. با این وجود، این روش به کنترل دقیق نسبت پیش‌کرنش و توزیع ضخامت لایه‌ها وابسته است و افزایش بیش از حد اختلاف کرنش می‌تواند منجر به از بین رفتن پایداری یا بروز کمانش ناخواسته شود. بنابراین، تعیین محدوده بهینه پیش‌کرنش یکی از موضوعات کلیدی برای توسعه مدل‌های طراحی قابل اعتماد است.



شکل ۶: (a) شماتیک یک محرک خمشی نرم هیبریدی دوپایدار. (b) نمودار انرژی محرک دوپایدار محوری فنر پیش‌کشیده. (c) خزنده الهام گرفته از طبیعت با تحریک ستون فقرات ساخته [۲، ۴۹].

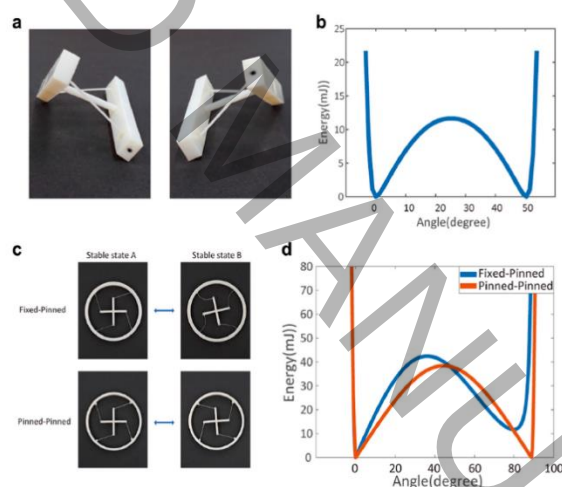
Figure 6. (a) Schematic of a hybrid bistable soft bending actuator. (b) Energy diagram of the pre-stretched spring-based axial bistable actuator. (c) A nature-inspired crawler fabricated using a spine-like actuation mechanism [2, 49].

۳-۳- مکانیزم دوپایدار

در سازه‌های حاصل از چاپ سه‌بعدی، ایجاد مکانیزم‌های دوپایدار از طریق هندسه‌های تطبیقی و اتصالات قابل تغییر (مانند پین یا توپ) امکان‌پذیر است [۴۲، ۵۰]. جئونگ و همکاران [۵۱] با چاپ سازه‌هایی به وسیله دستگاه پلی‌جت، نشان دادند که می‌توان سازه‌های دارای مفاصل چرخشی را بدون نیاز به مونتاژ و بصورت یکجا چاپ کرد که این سازه‌ها دارای دو حالت تعادلی پایدار می‌باشند. شکل ۷-۱، دو حالت پایدار ساخته شده را نشان می‌دهد. ساختار دوپایدار پیچشی بوده و دو حالت پایدار شکل یکسانی دارند، که با چرخش به هر طرف پایداری دیگر ایجاد می‌شود. شکل ۷-۲، نمودار انرژی کلی را نشان می‌دهد در این شکل انرژی برحسب زاویه چرخش شکل

۷-a نمایش داده شده است. در این منحنی دو چاله یا دو حداقل انرژی وجود دارد که نشان دهنده دو حالت پایدار هستند و وضعیت ناپایدار در بین این دو حالت پایدار به شکل برآمدگی می باشد. تحلیل انرژی این ساختارها نشان داد که تقارن یا عدم تقارن در نمودار انرژی تابعی از شرایط مرزی و پارامترهای هندسی است. با تنظیم پارامترهای مواد (مانند مدول یانگ یا ضخامت تیرها) می توان ارتفاع سد انرژی و نیروی مورد نیاز برای انتقال بین حالات پایدار را کنترل کرد. بنابراین، طراحی مکانیزم های دوپایدار چاپ شده می تواند به عنوان ابزار تنظیم پاسخ مکانیکی در سیستم های چندپایدار به کار رود. آنها همچنین با استفاده از اتصالات پین، ساختارهای دوپایدار چرخشی (شکل ۷-c) با دو شرایط مرزی متفاوت ساختند. که نمودارهای آبی و قرمز در شکل ۷-d نشان دهنده شرایط مرزی متفاوت است. در این تصویر نمودار آبی مربوط به تصویر بالا در شکل ۷-c، نمودار قرمز مربوط به تصویر پایین در شکل ۷-c بوده و این تفاوت مربوط به نوع اتصال می باشد. پس همانند شکل ۷-c و شکل ۷-d می توان نمودار انرژی کلی ساختار دوپایدار را تنظیم کرد و برای تنظیم پاسخ مکانیکی سازه های چاپی استفاده نمود. با تنظیم پارامترهای ساختاری [۵۲] یا مواد اولیه، امکان کنترل ارتفاع منحنی (یعنی انرژی آستانه برای یک شکل) وجود دارد. با تغییر شیب منحنی (نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل)، و مقدار اولیه جابجایی، می توان برای ایجاد تغییر شکل با اتصال سازه های دوپایدار و ایجاد اجزای چندپایدار، استفاده شود. اما شاید مهمترین نقطه ضعف این روش این است که استفاده طولانی مدت از سازه های دو/چندپایدار حاصل از این روش سبب شکست یا پارگی اتصالات شود.

در مجموع، روش های مبتنی بر مکانیزم های هندسی از نظر قابلیت پیش بینی رفتار و امکان تنظیم منحنی انرژی نسبت به سایر رویکردها مزیت دارند و برای طراحی عملگرها و مفاصل بازپیکربندی پذیر مناسب تر هستند [۵۳]. با این حال، پیچیدگی تحلیل انرژی، حساسیت به شرایط مرزی و احتمال فرسایش یا شکست اتصالات در چرخه های بارگذاری طولانی مدت، از محدودیت های مهم این روش به شمار می رود.



شکل ۷: (a) دو حالت پایدار از یک ساختار دوپایدار با چاپ سه بعدی با اتصالات توپ. (b) نمودار انرژی شبیه سازی شده ساختار دوپایدار در حال پیچش. (c) دو حالت پایدار از یک ساختار دوپایدار چرخشی چاپ سه بعدی که با پین متصل شده است. (d) نمودار انرژی ساختار دوپایدار چرخشی با شرایط مرزی متفاوت [۵۱، ۲]

Figure 7. (a) Two stable states of a 3D-printed bistable structure with ball-and-socket joints. (b) Simulated energy diagram of the bistable structure under twisting. (c) Two stable states of a 3D-printed rotational bistable structure connected by a pin. (d) Energy diagram of the rotational bistable structure under different boundary conditions [2, 51]

با عنایت به اینکه دوپایدارها ابتدا در کامپوزیت‌ها با الیاف پیوسته کشف و توسعه داده شد. مسعودی در پایان نامه خود [۲۰] ابتدا دستگاه پرینتر سه‌بعدی ساخت با فیلامنت مذاب را به یک دستگاه جانمایی خودکار الیاف^۱ تبدیل نمود تا بتواند الیاف ممتد را با زاویه‌های مختلف روی سطح قرار دهد پس از تبدیل دستگاه، مشکلات فرآیند ساخت شامل کنترل کشش الیاف، نرخ تغذیه، دما و کیفیت چسبندگی را بررسی و اصلاح نمود. سپس با وارد کردن الیاف شیشه در ماده پلیمری پروپیلن و جانمایی آن در رشته ساخت افزایشی توانست یک رشته تقویت شده کامپوزیتی (پلیمر - شیشه) به طور پیوسته چاپ کند. در مرحله بعد ایشان با رشته‌های تقویت شده یک تک لایه کامپوزیتی تک جهته چاپ کرد. با این نوآوری توانست چند لایه نامتقارن با زاویه دلخواه ایجاد و طبق طرح آزمایش همانند شکل ۸ اقدام به تولید مقطع بال دوپایدار با هندسه پایدار اولیه غیر استوانه‌ای نماید تا اثر زاویه الیاف بررسی و پس از دستیابی به دوپایداری مورد نظر، رفتار دوپایداری بررسی شود. شعاع حالت پایدار اول و دوم برای هر نمونه اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان دادند که زاویه قرارگیری الیاف، ضخامت نسبی لایه‌ها و نسبت حجمی الیاف، تأثیر چشمگیری بر نیروی انتقال، گشتاور تغییر حالت، و شعاع پایداری دارند. البته در این میان زاویه قرارگیری الیاف بیشترین تأثیر را دارد. افزایش ضخامت لایه مرکزی در زاویه صفر درجه باعث افزایش سفتی و نیروی لازم برای تغییر حالت می‌شود، اما در صورت افزایش بیش از حد، خاصیت دوپایداری از بین می‌رود. بنابراین، برای طراحی بهینه، لازم است توازن میان سختی خمشی و انرژی ذخیره‌شده در لایه‌های مورب رعایت شود.



شکل ۸: حالت‌های مختلف چند پایداری با استفاده از روش فیلامنت تقویت شده [۲۰]

Figure 8. Different multistable configurations achieved using the reinforced filament method [20].

بنابر آنچه در این بخش گفته شد، یکی از پایه‌ای‌ترین روش‌ها در ایجاد چندپایداری، طراحی مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر است [۱، ۲] که قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی کشسان را دارند. با تنظیم سختی، ضخامت، و هندسه‌ی اجزاء، می‌توان تعداد و پایداری حالات مختلف را کنترل کرد [۱، ۶]. در مکانیزم‌های ناپایدار، جهش ناگهانی میان دو حالت تعادلی، هسته‌ی اصلی رفتار چندپایدار را تشکیل می‌دهد [۳، ۶]. تحلیل‌های اخیر نشان می‌دهد که طراحی این مکانیزم‌ها بر مبنای انرژی پتانسیل کل می‌تواند پیش‌بینی دقیقی از محل و عمق چاه‌های انرژی فراهم کند. در نتیجه، برای دستیابی به چندپایداری، باید شرایط مرزی و مسیر بارگذاری به گونه‌ای تنظیم شوند که اختلاف انرژی بین حالات مجاور کمتر از آستانه‌ی تخریب الاستیک باشد. بنابراین چاپ سه‌بعدی این امکان را فراهم می‌کند که دوپایداری به‌صورت کنترل‌شده و طراحی‌شده در ساختار، کدگذاری شود. به‌کارگیری هم‌زمان تنش پسماند، پیش‌کرنش، طراحی هندسی

¹ Automated Fiber Placement (AFP)

و ترکیب مواد، فرصت جدیدی برای ایجاد سازه‌های چندپایدار با رفتار قابل برنامه‌ریزی فراهم کرده است. تحلیل‌های موجود نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هم‌زمان این عوامل، کلید دستیابی به سازه‌های چندپایدار با قابلیت تغییر پیکربندی در مقیاس‌های مختلف است. و جدول شماره ۲ مقایسه‌ای بین روش‌های گفته شده است. عموماً تحقیقات پیشین، تمرکز خود را بر اثبات وجود چند حالت پایدار گذاشته‌اند، بدون اینکه روابط تحلیلی میان پارامترهای هندسی و انرژی ذخیره‌شده را استخراج کنند. در طراحی‌های آتی لازم است از مدل‌سازی اجزای محدود^۱ به‌صورت پارامتریک برای تعیین محدوده‌ی پایداری استفاده شود.

به‌منظور مقایسه رویکردهای مختلف ایجاد دو/چندپایداری با روش ساخت با فیلامنت مذاب، جدول ۲ بر اساس شاخص‌هایی شامل پیچیدگی ساخت، مقیاس‌پذیری، قابلیت برنامه‌ریزی رفتاری، ظرفیت تحمل بار، مزایا، محدودیت‌ها و حوزه‌های کاربرد تدوین شده است. از آنجا که بسیاری از مطالعات موجود از مواد، هندسه‌ها و شرایط آزمایش متفاوتی استفاده کرده‌اند، داده‌های کمی قابل مقایسه برای همه شاخص‌ها در دسترس نیست. بنابراین، مقایسه ارائه‌شده ماهیتی کیفی-تحلیلی داشته و بر مبنای روندهای گزارش‌شده در مطالعات مرجع انجام شده است.

روش مبتنی بر فیلامنت‌های تقویت‌شده، اگرچه پیچیدگی ساخت و هزینه بیشتری نسبت به روش‌های مبتنی بر پلیمر خالص دارد، اما تنها رویکردی است که امکان دستیابی هم‌زمان به دوپایداری و ظرفیت تحمل بار بالا را فراهم می‌کند. این ویژگی آن را برای کاربردهای سازه‌ای نظیر بال‌های مورفینگ و اجزای باربر هوافضایی مناسب می‌سازد. در مقابل، نیاز به تجهیزات تخصصی جانمایی خودکار الیاف و کنترل دقیق کشش و جهت‌گیری الیاف، مانع اصلی تجاری‌سازی گسترده این روش است.

جدول شماره ۲: مقایسه کیفی فرآیندهای ساخت افزایشی مورد استفاده در ایجاد سازه‌های دو/چندپایدار بر اساس شاخص‌های ساخت، رفتار

مکانیکی و کاربردهای مهندسی

Table 2. Qualitative comparison of additive manufacturing processes used to create bistable/multistable structures based on fabrication characteristics, mechanical behavior, and engineering applications

روش	انرژی تحریک	نوع تحریک	مقیاس‌پذیری	پیچیدگی ساخت	کاربردهای رایج	مزایای کلیدی	محدودیت‌ها
تنش‌های پسماند حرارتی	متوسط	نیازمند کنترل دقیق دما	زیاد به‌ویژه FFF	کم تا متوسط	فعال‌سازی حرارتی، اورینگامی	قابلیت برنامه‌ریزی بدون نیاز به مونتاژ، هزینه پائین	حساس به شرایط محیطی؛ وابسته به دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)
لایه‌های پیش‌کرنش‌یافته	می‌تواند زیاد باشد	طراحی مبتنی بر هندسه	متوسط	متوسط	استنت‌ها، سازه‌های بازشونده	قابلیت برنامه‌ریزی دقیق حالت پایدار؛ فعال‌سازی حرارتی/مکانیکی	نیازمند کنترل دقیق کرنش؛ خطر از دست رفتن پایداری در کرنش‌های بالا
مکانیزم‌های هندسی	متوسط تا زیاد	قابل طراحی از پیش	متوسط	متوسط تا زیاد	اتصالات، سطوح با شکل متغیر	انتقال نیروی قابل پیش‌بینی، منحنی انرژی قابل تنظیم	نیازمند طراحی هندسی دقیق؛ مستلزم تحلیل پیچیده انرژی
روش فیلامنت تقویت‌شده	متوسط تا زیاد	متوسط وابسته به AFP و جهت‌گیری الیاف	کم تا متوسط	زیاد	اجزای سازه‌ای، بال‌های کامپوزیتی	افزایش ظرفیت تحمل بار و قابلیت تنظیم سختی	نیازمند تجهیزات پیشرفته؛ دارای کسر حجمی محدود الیاف

¹ Finite Element Modeling (FEM)

به منظور مقایسه مستقیم چهار رویکرد اصلی ایجاد دو/چندپایداری در ساخت افزایشی، جدول ۳ بر اساس معیارهای عملکردی و طراحی شامل مکانیزم ایجاد پایداری، قابلیت برنامه‌ریزی، ظرفیت تحمل بار، حساسیت به پارامترهای فرآیند، پیچیدگی ساخت و مناسب‌ترین حوزه کاربرد تدوین شده است. این مقایسه امکان ارزیابی نقاط قوت و محدودیت‌های نسبی هر روش را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که انتخاب رویکرد مناسب به نوع کاربرد، سطح بارگذاری و میزان کنترل مورد نیاز بر رفتار سازه وابسته است.

جدول ۳- مقایسه تحلیلی چهار رویکرد اصلی ایجاد دو/چندپایداری در ساخت افزایشی

Table 3. Analytical comparison of the four main approaches for achieving bistability/multistability in additive manufacturing

کاربردهای رایج	پیچیدگی ساخت	ظرفیت تحمل بار	قابلیت برنامه‌ریزی	مکانیزم اصلی ایجاد پایداری	رویکرد
رباتیک نرم، سازه‌های سبک‌وزن تغییر شکل پذیر	پایین	پایین تا متوسط	متوسط	انقباض جهت‌دار ناشی از سرد شدن و تنش‌های حرارتی محبوس شده	تنش‌های پسماند حرارتی
سازه‌های بازشونده، استنت‌ها، اجزای تطبیق پذیر	متوسط	متوسط	بالا	ناهماهنگی کرنش ذخیره شده بین لایه‌ها	لایه‌های پیش کرنش یافته
اتصالات بازپیکربندی پذیر، محرك‌ها، فراسازه‌های مکانیکی	بالا	متوسط تا بالا	بالا	چاه‌های انرژی ایجاد شده توسط هندسه و قیود	مکانیزم‌های هندسی
بال‌های تغییر شکل پذیر، اجزای سازه‌ای هوافضا	بالا	بالا	بالا	ناهماهنگی ناشی از جهت‌گیری الیاف و کوپل شدگی خمش-کشش	روش فیلامنت تقویت شده

مقایسه جدول ۳ نشان می‌دهد که هر یک از رویکردهای ایجاد دو/چندپایداری دارای ناحیه کاربرد و مزیت عملکردی متفاوتی هستند. روش مبتنی بر تنش‌های پسماند حرارتی ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین رویکرد محسوب می‌شود، اما رفتار آن به دما و شرایط محیطی حساس است و ظرفیت تحمل بار محدودی دارد. در مقابل، روش لایه‌های پیش کرنش یافته امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر موقعیت و تعداد حالات پایدار را فراهم می‌کند، هرچند کنترل نسبت پیش کرنش و توزیع ضخامت لایه‌ها در آن ضروری است. روش‌های مبتنی بر مکانیزم‌های هندسی از نظر قابلیت پیش‌بینی رفتار و تنظیم منحنی انرژی نسبت به دو روش قبلی برتری دارند و برای طراحی مفصل بازپیکربندی پذیر و فراسازه‌های مکانیکی مناسب‌تر هستند، اما تحلیل انرژی و طراحی هندسی آن‌ها پیچیده‌تر است. در نهایت، روش فیلامنت‌های تقویت شده بیشترین ظرفیت تحمل بار و سختی قابل تنظیم را ارائه می‌دهد و تنها رویکردی است که می‌تواند هم‌زمان دوپایداری و عملکرد سازه‌ای را تأمین کند، اگرچه نیازمند تجهیزات تخصصی و کنترل دقیق جهت‌گیری الیاف است.

۳-۵- ارزیابی تطبیقی و شکاف‌های پژوهشی

بر اساس مقایسه مستقیم مطالعات می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب روش ایجاد دو/چندپایداری باید بر اساس سه معیار اصلی انجام شود: (۱) سطح بارگذاری مورد انتظار، (۲) میزان نیاز به برنامه‌ریزی دقیق حالات پایدار، و (۳) محدودیت‌های ساخت و هزینه. برای سامانه‌های سبک و کم‌مصرف، رویکردهای حرارتی و پیش کرنش مناسب‌تر هستند؛ در حالی که برای سازه‌های بازپیکربندی پذیر با نیاز به کنترل دقیق پاسخ مکانیکی، مکانیزم‌های هندسی گزینه مطلوب‌تری محسوب می‌شوند. همچنین در کاربردهای هوافضا و سازه‌های باربر، استفاده از فیلامنت‌های تقویت شده به دلیل امکان تنظیم ناهمسانگردی و افزایش ظرفیت تحمل بار، چشم‌انداز صنعتی روشن‌تری

دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که هیچ روش واحدی به‌عنوان راه‌حل برتر مطلق وجود ندارد و توسعه رویکردهای هیبریدی که مزایای چند روش را به‌صورت هم‌زمان ترکیب کنند، می‌تواند مسیر آینده پژوهش در این حوزه باشد.

با وجود پیشرفت قابل توجه در ساخت افزایشی سازه‌های دو/چندپایدار، هنوز چندین شکاف پژوهشی مهم وجود دارد. از جمله این موارد می‌توان به پیش‌بینی دقیق تعداد و موقعیت حالات پایدار، مدل‌سازی چندفیزیکی تکامل تنش‌های پسماند در حین فرآیند چاپ، ارزیابی دوام بلندمدت تحت شرایط خزش و بارگذاری چرخه‌ای، و اعتبارسنجی تجربی سازه‌های چندماده‌ای و مواد تابعی اشاره کرد. همچنین نبود روش‌های استاندارد برای ارزیابی عملکرد و مقایسه مستقیم رویکردهای مختلف طراحی، از موانع اصلی توسعه صنعتی این سازه‌ها محسوب می‌شود.

۴- مروری بر شبیه‌سازی‌های عددی سازه‌های دو/چندپایدار

شبیه‌سازی عددی نقش مهمی در تحلیل رفتار دو/چندپایدار، پیش‌بینی مسیرهای گذار بین حالات پایدار و ارزیابی حساسیت سازه به پارامترهای طراحی ایفا می‌کند. در اغلب پژوهش‌ها، از تحلیل غیرخطی هندسی با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ برای مدل‌سازی پدیده جهش ناگهانی استفاده شده است [۵۴-۵۶]. شکل ۹ به کمک نرم افزار آباکوس^۱ شبیه‌سازی یک سازه کامپوزیتی را نشان می‌دهد که در حالت ۹-a با استفاده از تغییرات حرارتی و در حالت ۹-b با اعمال بار عمل مورفینگ را نشان می‌دهد که براساس آن می‌توان تعداد حالت پایدار و انرژی لازم جهت تغییر پایداری را بررسی و پیش‌بینی کرد [۵۴].

در این راستا، سان و همکاران [۵۴] یک مدل نیمه‌تحلیلی مرتبه بالا به همراه شبیه‌سازی عددی برای سازه‌های کامپوزیتی پلیمری دوپایدار ارائه کردند که قادر است مسیرهای تعادل پایدار و ناپایدار، تغییرات انرژی پتانسیل و رفتار جهش ناگهانی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب مدل‌سازی تحلیلی و شبیه‌سازی عددی می‌تواند ابزار مؤثری برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های دوپایدار و ارزیابی حساسیت آن‌ها نسبت به پارامترهای هندسی و مادی باشد. علاوه بر این، ژيو و همکاران [۵۷] با ترکیب آزمایش ارتعاشی و شبیه‌سازی عددی غیرخطی نشان دادند که شرایط مرزی و پارامترهای تحریک دینامیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع جهش ناگهانی و پاسخ ارتعاشی صفحات کامپوزیتی دوپایدار دارند. نتایج آن‌ها اهمیت اعتبارسنجی تجربی مدل‌های عددی را در تحلیل رفتار دینامیکی این سازه‌ها برجسته می‌کند.

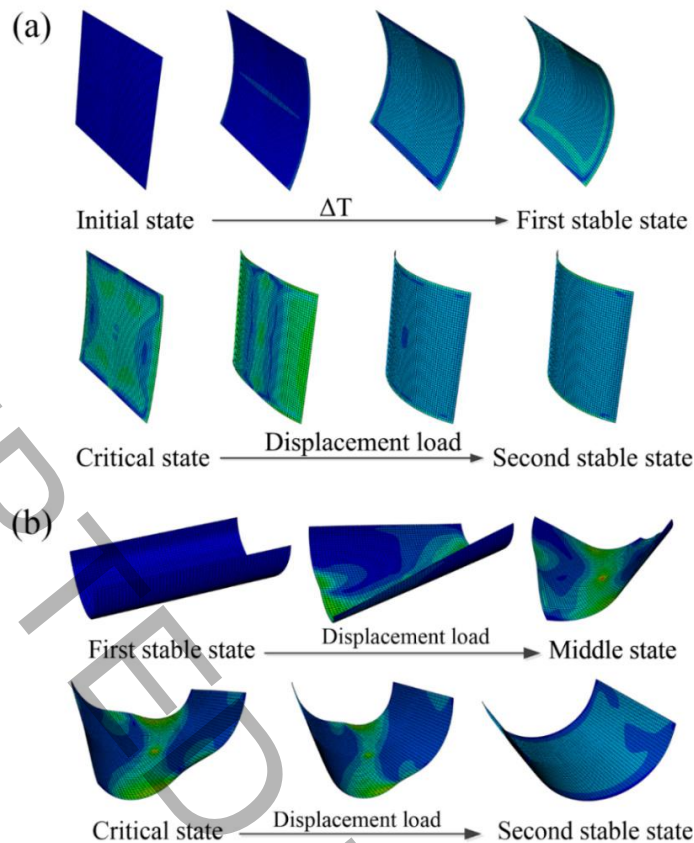
در فرآیند چاپ سه‌بعدی ساخت با فیلامنت مذاب، مدل‌سازی ترمومکانیکی برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند، اعوجاج قطعه و اثر پارامترهای فرآیند اهمیت ویژه‌ای دارد. علیزاد و همکاران [۵۸] نشان دادند که پارامترهایی مانند دمای نازل، دمای بستر و سرعت چاپ تأثیر مستقیمی بر توزیع تنش و کیفیت نهایی قطعه دارند. بنابراین، ترکیب تحلیل غیرخطی سازه‌ای با مدل‌سازی ترمومکانیکی فرآیند چاپ می‌تواند چارچوب جامعی برای طراحی سازه‌های دو/چندپایدار چاپ‌شده فراهم کند.

در میان نرم‌افزارهای مورد استفاده، آباکوس و انسیس^۲ بیشترین کاربرد را داشته‌اند. در آباکوس، المان‌های پوسته‌ای^۳ به دلیل کارایی مناسب در تحلیل صفحات و پوسته‌های نازک، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش ریکس برای ردیابی نقاط ناپایداری و عبور از مسیرهای تعادل ناپایدار به کار رفته است [۵۷]. در برخی مطالعات، تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند چاپ ساخت با فیلامنت مذاب به‌صورت بار حرارتی معادل یا کرنش اولیه در مدل اعمال شده‌اند تا اثر انقباض ناهمسانگرد لایه‌ها شبیه‌سازی شود [۵۹].

^۱ Abaqus

^۲ ANSYS

^۳ Shell Elements



شکل ۹: شبیه سازی فرآیند مورفینگ ساختارهای کامپوزیت پلیمری دوپایدار [۵۴]

Figure 9. Simulation of the morphing process of bistable polymer composite structures [54]

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌های عددی در پیش‌بینی شکل حالات پایدار، مقدار نیروی بحرانی گذار و روند تغییر انرژی پتانسیل عملکرد مناسبی دارند. به عنوان مثال، هایر و دونو با استفاده از تحلیل غیرخطی پوسته‌ای نشان دادند که مدل‌های اجزای محدود قادر به پیش‌بینی رفتار دوپایدار صفحات کامپوزیتی با دقت قابل قبول هستند [۵۵]. همچنین از شبیه‌سازی عددی می‌توان برای تحلیل پاسخ دینامیکی پوسته‌های چندپایدار و بررسی اثر شرایط مرزی بر رفتار جهش ناگهانی استفاده کردند [۵۶].

جدول ۴- خلاصه رویکردهای عددی رایج در شبیه‌سازی سازه‌های دو/چندپایدار

Table 4. Summary of common numerical approaches for simulating bistable/multistable structures

نرم افزار	نوع تحلیل	المان رایج	قابلیت اصلی
آباکوس	غیرخطی هندسی + روش ریکس	پوسته	ردیابی مسیرهای تعادل ناپایدار و بررسی پاسخ فروجهش
انیمپس	تحلیل غیرخطی استاتیکی	پوسته / جامد	تحلیل کمانش و پایداری
کومسول	چندفیزیکی	جامد	کوپل‌شدگی ترمومکانیکی
ال اس داینا	دینامیکی صریح	پوسته / جامد	تحلیل ضربه و جذب انرژی

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، دقت مدل‌ها به نحوه اعمال تنش‌های پسماند، شرایط مرزی و خواص ناهمسانگرد ماده وابسته است. در بسیاری از پژوهش‌ها، اعتبارسنجی تجربی برای اطمینان از صحت مدل‌های عددی انجام شده و اختلاف بین نتایج عددی و

آزمایشگاهی معمولاً در محدوده قابل قبول گزارش شده است [۶۰]. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های چندفیزیکی برای شبیه‌سازی هم‌زمان فرآیند چاپ، انتقال حرارت، تکامل تنش‌های پسماند و پاسخ مکانیکی سازه مورد توجه قرار گرفته است که در جدول ۴ یک خلاصه‌ای از رویکردهای عددی رایج در شبیه‌سازی سازه‌های دو/چندپایدار در استفاده از نرم‌افزارهای موجود ارائه شده است. با این حال، شبیه‌سازی هم‌زمان فرآیند چاپ ساخت با فیلامنت مذاب، رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها و پاسخ غیرخطی سازه همچنان یکی از چالش‌های مهم در تحلیل سازه‌های دو/چندپایدار محسوب می‌شود [۵۹، ۶۱]. توسعه مدل‌های داده‌محور و ترکیب روش‌های اجزای محدود با الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی رفتار این سازه‌ها را در آینده بهبود بخشد [۶۱، ۶۲].

۵- تأثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد سازه‌های دو/چند پایدار چاپ سه بعدی:

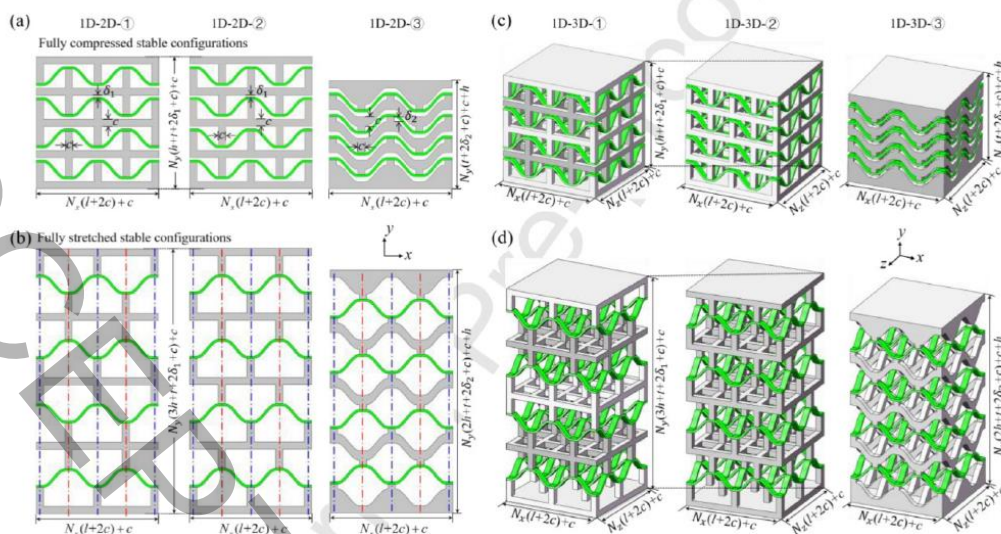
طراحی سازه‌های دو/چندپایدار حساسیت بالایی به پارامترهای مختلف دارد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد سازه عبارتند از:

هندسه و توپولوژی: شکل و نحوه چیدمان سلول‌های واحد در یک سازه چندپایدار رفتار چندپایداری آن را تعیین می‌کند. تغییر در انحنای، نسبت ابعادی و موقعیت لولاها به طور قابل توجهی تعداد پایداری و حالات تعادل را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷، ۲۴].

خواص مواد: ضریب پواسون [۶۳]، مدول الاستیک، و استحکام تسلیم بر نحوه تغییر شکل و گذار بین حالات پایدار تأثیر می‌گذارند. مواد نرم انتقالات راحت‌تر را ممکن می‌سازند، در حالی که مواد سخت‌تر، پایداری و ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهند [۵، ۱۵]. هانگ یانگ و لی ما [۱۵] یک روش مونتاژ جدید، با قابلیت فشرده‌سازی را پیشنهاد کردند که بخش‌های گیره‌دار دوپایدار را به چارچوب‌های حمایتی سفت و سخت به صورت کمان متصل می‌کند تا به طور کامل به مکانیسم متقارن دو/چند پایدار با چند ماده دست یابد. شکل ۱۰ سازه مکانیکی چند پایدار یک‌بعدی به سه‌بعدی با قابلیت پیکربندی مجدد با شکل بزرگ و قوی و نسبت پواسون صفر را نشان می‌دهد که تغییر شکل برگشت پذیر انجام می‌شود.

شرایط مرزی و بارگذاری: نحوه تکیه‌گاه گذاری و بارگذاری یک سازه بر چندپایداری آن اثرگذار است. طراحی مناسب شرایط مرزی می‌تواند پایداری را بهبود بخشد، در حالی که بارگذاری نامناسب ممکن است منجر به خرابی زودهنگام یا انتقالات ناخواسته شود [۱۲، ۲۰]. بینگ ژیان و همکاران [۲۹] رویکرد طراحی پیشنهادی با هدف تبدیل مسائل سه‌بعدی پیچیده به مسائل مسطح دو بعدی پیاده کردند. این تکنیک قادر می‌باشد با ترکیب حالت دو عملکردی، سپس حالت را به ویژگی‌های اوریگامی عناصر مکانیکی تبدیل کند. لذا به طور هم‌زمان، مدل ساختاری را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کرد. بنابراین امکان چاپ سه‌بعدی مواد معمولی و هوشمند [۳۴] وجود دارد. با محرک مناسب، این مواد پاسخگو می‌توانند تا شوند و کل ساختار را به طور خودکار تنظیم مجدد کرد که برای این منظور چهار مرحله اصلی طراحی، تخصیص لولا مکانیکی، مدل هندسی و شبیه‌سازی رفتار مورد نیاز است.

تأثیر ناهمسانگردی در افزایش چند پایداری: در ورق‌ها و پوسته‌های کامپوزیتی ناهمسانگردی یکی از بنیادی‌ترین عوامل در ایجاد و تقویت دو/چندپایداری است، زیرا اختلاف رفتار مکانیکی در راستاهای اصلی لایه‌ها موجب شکل‌گیری توزیع متفاوتی از سختی خمشی و کرنش می‌شود که نهایتاً به ظهور چندین حالت تعادل پایدار منجر می‌شود. در لمینیت‌های ناهمسانگرد، وجود کوپلینگ خمشی-کششی ناشی از ماتریس B باعث می‌شود خم‌شدگی در یک راستا، کرنش یا گشتاورهایی در راستای دیگر ایجاد کند و این برهم‌کنش، امکان شکل‌گیری چند مینیمم مستقل در منحنی انرژی پتانسیل سازه را فراهم می‌کند [۲۴، ۵۴، ۶۴، ۶۵]. افزون بر آن، اختلاف ضرایب انبساط حرارتی در لایه‌های با زاویه‌های متفاوت سبب ایجاد تنش‌های پسماند و انحنای خودبه‌خودی می‌شود که هایلر [۳۹] در تحقیقات کلاسیک خود به‌عنوان یکی از نخستین سازوکارهای ایجاد دوپایداری معرفی کرده است.



شکل ۱۰: ساختار یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی چند پایدار. (a) حالت کاملاً فشرده شده. (b) حالت کاملاً کشیده شده با پیکر بندی مجدد.

(c) حالت سه بعدی کاملاً فشرده شده و (d) حالت سه بعدی کاملاً کشیده شده [۱۵]

Figure 10. One-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional multistable structures: (a) fully compressed state; (b) fully stretched state with reconfiguration; (c) fully compressed three-dimensional state; and (d) fully stretched three-dimensional state [15].

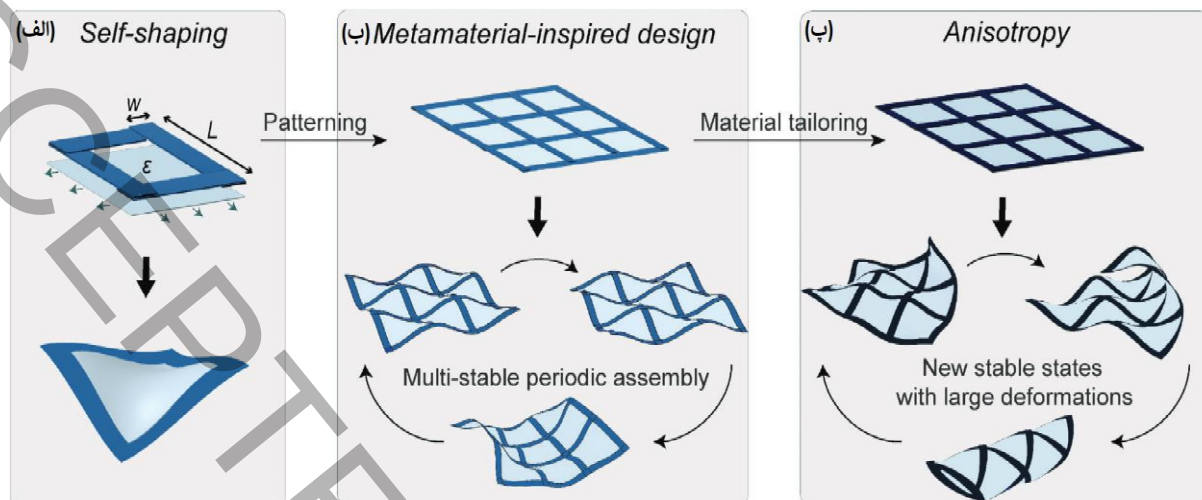
در سال های اخیر، مفهوم ماده فعال برنامه پذیر^۱ به عنوان نسل جدیدی از مواد هوشمند مطرح شده است. یو و همکاران [۶۶] نشان دادند که با کنترل برهم کنش های مکانیکی، حرارتی و اطلاعاتی در مقیاس های مختلف، می توان رفتار جمعی، خودآرایی و تغییر شکل سازه ها را به صورت برنامه ریزی شده طراحی کرد. این رویکرد می تواند زمینه ساز توسعه سازه های دو/چند پایدار بازپیکربندی پذیر، سامانه های خودتنظیم و متامتریال های فعال با قابلیت پاسخ دهی تطبیقی باشد.

تفاوت در سختی خمشی در راستاهای اصلی نیز موجب ایجاد شکل های پایدار متعدد در صفحات و پوسته ها می شود، به ویژه در پوسته های پادمتقارن و نوارهای کامپوزیتی دوپایدار [۶۵، ۲۵]. همچنین طراحی های نوین مبتنی بر تغییر مسیر الیاف، که ناهمسانگردی موضعی را افزایش می دهند، امکان کنترل تعداد و موقعیت مینیمم های انرژی را فراهم کرده و رفتار چندپایدار را تقویت می کنند [۴۰]. این مجموعه از اثرات سبب می شود سازه های کامپوزیتی ناهمسانگرد بتوانند با تحریک های کوچک، تغییر شکل های بزرگ تجربه کرده و در حالت های پایدار متعدد بدون نیاز به انرژی خارجی باقی بمانند [۶۶].

گیادا ریسو و همکاران [۱۴] ثابت کردند چندپایداری به شدت به ناهمسانگردی نوارها، گره خورده است. و اشکال سه بعدی را می توان با استفاده از محرک های پنوماتیکی به یک سازه سفارشی با تغییر شکل های بزرگ تبدیل کرد. ایشان برای ایجاد حرکت توانستند از حرکت کرم الهام بگیرند. به این صورت که در شکل ۱۱-a، مونتاژ دوبعدی یک سلول واحد و پیکربندی با کمترین انرژی آن مشاهده می شود و در شکل ۱۱-b، ترکیب تناوبی سلول های واحد منجر به طراحی یک فراسازه می شود. این فراسازه ها انواع جدیدی از حالات پایدار را از خود نشان می دهند. در شکل ۱۱-c، تعداد شکل های پایدار سه بعدی با تنظیم ماده ی قاب افزایش می یابد. نوارهای کامپوزیتی با ناهمسانگردی بسیار بالا منجر به ایجاد حالات پایدار اضافی شده و امکان تغییر شکل های بزرگ را فراهم می کنند. چین وشیا [۴۳] نشان دادند ساختارهای چندپایدار با یک ماده همسانگرد فقط در یک محدوده با ضخامت بسیار محدود رفتار چندپایداری سازه را نشان می دهد اما مواد کامپوزیت، که می تواند به صورت بسیار ناهمسانگرد طراحی شود، کاندیدهای ایده آل برای ترکیب چندپایداری با تغییر

¹ Programmable Active Matter

شکل بزرگ هستند. علاوه بر این، با کامپوزیت‌ها می‌توان رفتار چندپایداری را با انتخاب یک چیدمان که دارای کوپلینگ خمشی باشد افزایش داد. همچنین رفتار چندپایدار با ناهمسانگردی بالا را می‌توان با چاپگر سه بعدی نیز برآورده کرد.



شکل ۱۱: طراحی سازه چندپایدار با بازپیکربندی‌پذیری بسیار. (الف) مونتاژ دو بعدی یک سلول واحد و پیکربندی کمترین انرژی آن. (ب) ترکیب سلول‌های واحد منجر به ایجاد سازه چندپایدار. (پ) نوارهای کامپوزیتی بسیار ناهمسانگرد منجر به شکل‌های پایدار اضافی می‌شوند [۱۴]

Figure 11. Design of a highly reconfigurable multistable structure: (a) two-dimensional assembly of a unit cell and its minimum-energy configuration; (b) combination of unit cells resulting in a multistable structure; and (c) highly anisotropic composite strips producing additional stable configurations [14].

در ورق‌های تولیدشده با روش چاپ سه‌بعدی ساخت با فیلامنت مذاب، ناهمسانگردی ساختاری ناشی از جهت‌گیری مسیرهای اکستروژن، دمای چاپ و چیدمان لایه‌ها بسیار برجسته‌تر از کامپوزیت‌های سنتی است و همین ویژگی نقش مهمی در ایجاد چندپایداری ایفا می‌کند. تفاوت در سختی خمشی، مقاومت و انقباض حرارتی بین راستای اکستروژن و راستای عمود بر آن، موجب شکل‌گیری میدان کرنش غیریکپارچه و در نتیجه ایجاد چند حالت پایدار در سازه می‌شود. مشابه سازوکار گزارش‌شده توسط هابر در لمینیت‌های ناهمسانگرد [۴۶]. در فرآیند ساخت با فیلامنت مذاب، سرد شدن سریع لایه‌های تازه‌چاپ‌شده، اختلاف تنش حرارتی میان لایه‌ها و انحنای اولیه و رفتار چندپایدار را تقویت می‌کند و پدیده‌ای که مشابه اصول چندپایداری کلاسیک در پوسته‌های کامپوزیتی تحلیل‌شده، مشاهده می‌شود [۴۸، ۲۳]. افزون بر این، تغییر زاویه رستر مانند [۴۵/۴۵-]، الگوی پرشدگی و چیدمان لایه‌ها می‌تواند منحنی انرژی پتانسیل را دستخوش تغییرات بنیادین کرده و تعداد مینیمم‌های انرژی را مشابه رفتار گزارش‌شده در لمینیت‌های با الیاف منحنی در ساختارهای چندپایدار [۴۰] کنترل کند. در نتیجه، ورق‌های چاپ‌شده با ساخت با فیلامنت مذاب قادرند تحت تحریک‌های کوچک مکانیکی یا حرارتی، رفتار جهش‌ناگهانی از خود نشان دهند و در شکل‌های متعدد بدون نیاز به انرژی خارجی پایدار بمانند، که این ویژگی برای ساخت سازه‌های چندپایدار و عملگرهای نرم بسیار ارزشمند است [۶۶].

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پارامترهای فرآیند چاپ ساخت با فیلامنت مذاب تأثیر مستقیمی بر تنش‌های پسماند، ناهمسانگردی مکانیکی و رفتار دو/چندپایداری دارند. برای نمونه، در مطالعه [۱۰] پارامترهای فرآیند چاپ در بازه دمای نازل ۲۴۰-۲۰۰ سیلیسیوس، سرعت چاپ ۳۰-۷۰ میلی‌متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۰.۳، ۰.۱-۰ میلی‌متر بررسی شد و نتایج نشان داد تغییر این پارامترها می‌تواند موجب تغییر محسوس در کیفیت اتصال بین لایه‌ای و خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده شود. همچنین در پژوهش [۲۳] نشان داده شد که با برنامه‌ریزی مسیر چاپ و جهت‌گیری رشته‌ها می‌توان رفتار تغییر شکل سازه‌های چاپ‌شده را کنترل کرد. در مطالعه [۱۳]

از توزیع تنش اولیه برای تنظیم رفتار دوپایداری پوسته‌های چاپی استفاده شد، در حالی که پژوهش [۱۴] نشان داد ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری چاپ نقش مهمی در تغییر شکل برگشت‌پذیر و تعداد حالات پایدار ایفا می‌کند. علاوه بر این، تغییر سرعت چاپ و سایر پارامترهای فرآیند ساخت با فیلامنت مذاب می‌تواند موجب تغییر کیفیت ساخت و پراکندگی پاسخ مکانیکی در قطعات چاپ‌شده شود [۵۲، ۵۸].

اگرچه رفتارهای وابسته به زمان نظیر خزش و خستگی می‌توانند نقش مهمی در عملکرد بلندمدت سازه‌های دو/چندپایدار داشته باشند، اما مطالعات موجود در این زمینه هنوز محدود هستند و بیشتر پژوهش‌های منتشرشده بر رفتار اولیه جهش ناگهانی، تغییر شکل برنامه‌پذیر و پاسخ کوتاه‌مدت سازه‌ها تمرکز داشته‌اند [۱۳، ۲۳، ۶۴]. به‌ویژه در سازه‌های چاپ‌شده به روش ساخت با فیلامنت مذاب، رفتار وابسته به زمان تحت تأثیر ویسکوالاستیسیته پلیمرها، کیفیت اتصال بین لایه‌ای و تنش‌های پسماند قرار می‌گیرد [۹، ۱۰].

برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که پس از چرخه‌های مکرر بارگذاری، کاهش تدریجی نیروی جهش ناگهانی و تغییر جزئی در موقعیت حالات پایدار قابل مشاهده است [۱۴، ۴۸]. اگرچه داده‌های کمی جامع درباره عمر خستگی و نرخ خزش هنوز محدود باقی مانده‌اند این محدودیت عمدتاً ناشی از نوظهور بودن سازه‌های چندپایدار چاپ سه‌بعدی و زمان‌بر بودن آزمون‌های بلندمدت خزش و خستگی است. از این‌رو، ارزیابی رفتار وابسته به زمان و دوام چرخه‌ای این سازه‌ها همچنان به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم پژوهشی آینده مطرح می‌شود.

۶- جمع‌بندی و چشم‌انداز آینده

سازه‌های دو/چندپایدار ایجادشده با چاپ سه‌بعدی، نسل نوینی از سازه‌های هوشمند را شکل داده‌اند که می‌توانند بدون مصرف مداوم انرژی میان حالت‌های پایدار جابه‌جا شوند [۶۷-۶۹]. مرور مطالعات نشان می‌دهد که منشأ اصلی چندپایداری بیشتر از نوع ماده به طراحی هندسه، ناهمسانگردی، کنترل توزیع تنش و مهندسی انرژی پتانسیل وابسته است. با تنظیم شکل، انحنا، جهت‌گیری لایه‌ها و الگوهای اکستروژن، مسیرهای انتقال بین حالت‌های پایدار قابل برنامه‌ریزی و به‌صورت هدفمند، مهندسی می‌شوند. از دیدگاه انتقادی، مقایسه روش‌های مختلف ایجاد دو/چندپایداری نشان می‌دهد که هیچ رویکردی به‌تنهایی قادر به تأمین هم‌زمان سادگی ساخت، برنامه‌پذیری دقیق، ظرفیت تحمل بار بالا و مقیاس‌پذیری صنعتی نیست. روش‌های مبتنی بر تنش‌های پسماند و پیش‌کرنش برای سامانه‌های سبک و کم‌مصرف مناسب‌تر هستند، در حالی که مکانیزم‌های هندسی امکان کنترل دقیق‌تر منحنی انرژی را فراهم می‌کنند و رویکرد فیلامنت‌های تقویت‌شده بیشترین ظرفیت تحمل بار و پتانسیل کاربرد در سازه‌های هوافضایی را ارائه می‌دهد.

با وجود پیشرفت‌های اخیر، چالش‌هایی همچون نبود مدل‌های طراحی پیش‌بینی‌پذیر، خستگی و استراحت تنش در مواد چاپ شده [۱۴، ۴۸]، وابستگی شدید رفتار مکانیکی به پارامترهای چاپ [۱۵، ۵۲] و نبود معیارهای استاندارد برای مقایسه سازه‌ها [۲، ۱۹] همچنان پابرجاست. همچنین رفتار وابسته به زمان، شامل خزش و دوام چرخه‌ای، هنوز به‌طور محدود مورد مطالعه قرار گرفته و داده‌های کمی جامعی درباره عمر خستگی سازه‌های دو/چندپایدار چاپ سه‌بعدی در دسترس نیست. در مقابل، فرصت‌های تحقیقاتی قابل توجهی در زمینه چاپ چندماده‌ای، چاپ چهاربعدی مبتنی بر مواد پاسخ‌گو، متامتریال‌های بازپیکربندی‌پذیر و طراحی داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین وجود دارد. ترکیب این فناوری‌ها با مدل‌های چندفیزیکی می‌تواند امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر رفتار سازه، کنترل تطبیقی سختی و شکل، و توسعه سازه‌های هوشمند با قابلیت پاسخ‌گویی فعال را فراهم کند [۶۲، ۶۷].

مسیرهای آینده پژوهش باید شامل توسعه مدل‌های چندفیزیکی، بهینه‌سازی داده‌محور، استفاده از مواد چندمنظوره و یکپارچه‌سازی با روش‌های کنترل تطبیقی باشد. ادغام سازه‌های چندپایدار با هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و روش‌های ساخت ترکیبی می‌تواند راه را برای نسل جدید سازه‌های خود پیکربندی‌شونده و قابل‌اعتماد در مقیاس صنعتی هموار کند. در چشم‌انداز بلندمدت، سازه‌ها و

فراساهای چندپایدار می‌توانند هسته‌ی اصلی نسل جدید مواد و سازه‌های هوشمند باشند. سامانه‌هایی که ضمن ذخیره‌ی انرژی، قابلیت تغییر شکل و عملکرد بر اساس شرایط محیطی را دارند و پلی میان علم مواد، مکانیک و هوش مصنوعی ایجاد می‌کنند.

فناوری‌های نوظهور در این حوزه شامل چاپ چندماده‌ای، چاپ چهاربعدی مبتنی بر پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک، ماتریال‌های مکانیکی بازپیکربندی‌پذیر، و طراحی داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین و بهینه‌سازی توپولوژی هستند. این رویکردها امکان برنامه‌ریزی دقیق تغییر شکل، کنترل تطبیقی سختی، و بازپیکربندی خودکار سازه را فراهم می‌کنند و انتظار می‌رود در نسل آینده سازه‌های مورفینگ هوافضایی، سامانه‌های رباتیک نرم و تجهیزات پزشکی هوشمند نقش کلیدی ایفا کنند.

علاوه بر این، اگرچه مطالعات متعددی بر طراحی سازه‌های مورفینگ و برنامه‌ریزی رفتار تغییرشکل متمرکز بوده‌اند [۱۳، ۲۳]، انتقال این فناوری‌ها به مقیاس صنعتی و شرایط بارگذاری واقعی هنوز با محدودیت‌هایی همراه است [۱۶، ۱۷]. ادغام سازه‌های چندپایدار با هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و روش‌های ساخت ترکیبی می‌تواند راه را برای نسل جدید سازه‌های خودپیکربندی‌شونده و قابل‌اعتماد در کاربردهای مهندسی هموار کند. در چشم‌انداز بلندمدت، سازه‌ها و فراساهای چندپایدار می‌توانند هسته اصلی نسل جدید مواد و سازه‌های هوشمند باشند؛ سامانه‌هایی که ضمن ذخیره انرژی، قابلیت تغییر شکل و عملکرد تطبیقی بر اساس شرایط محیطی را داشته و پلی میان علم مواد، مکانیک و هوش مصنوعی ایجاد می‌کنند.

۷- نتیجه‌گیری

مرور حاضر نشان می‌دهد که چاپ سه‌بعدی، به‌ویژه فناوری ساخت با فیلامنت مذاب، به ابزاری قدرتمند برای ایجاد سازه‌های دو/چندپایدار با قابلیت برنامه‌ریزی هندسی و مکانیکی تبدیل شده است. چهار سازوکار اصلی تنش‌های پسماند حرارتی، پیش‌کرنش، طراحی هندسی و تقویت فیلامنتی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری چاه‌های انرژی و تعداد حالت‌های پایدار ایفا می‌کنند.

نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که ناهمسانگردی لایه‌ها و الگوهای اکستروژن، مهم‌ترین عامل کنترل انرژی پتانسیل و مسیرهای گذار بین حالت‌ها محسوب می‌شود. چاپ سه‌بعدی این امکان را فراهم کرده که بدون مونتاژ و تنها با کنترل پارامترهای چاپ، رفتارهای پیچیده‌ای مانند جهش الاستیکی، تغییر شکل ناگهانی و پایداری چندگانه ایجاد شود. در مجموع، این مقاله نشان می‌دهد که ترکیب طراحی هندسی هوشمند، کنترل پارامترهای چاپ و استفاده از مواد پیشرفته می‌تواند نسل جدیدی از سازه‌های هوشمند با قابلیت تغییر شکل کنترل‌شده را فراهم سازد. این دستاورد، مسیر توسعه کاربردهای آینده در رباتیک نرم، مهندسی پزشکی، هوافضا و سامانه‌های سازگار شونده را هموار می‌کند.

تأییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت گردیده است و محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافع با اشخاص و سازمان‌ها ندارد.

فهرست علائم

A	متغیر تغییر شکل، m
U	انرژی کرنشی ذخیره شده، J
W	کار انجام شده توسط بارهای خارجی، J
Π	انرژی پتانسیل کل، J

- [1] M. Shahryarifard, M. Golzar, G. Tibert, Modeling Bistable Behaviors in Exposure of Thermo-Viscoelastic Conditions by Link-Spring-Dashpot Structures, *Modares Mechanical Engineering*, 21(9) (2021) 589–600.
- [2] H. Y. Jeong, S. C. An, Y. Lim, M. J. jen, N.Kim, Y. C. Jun, 3D and 4D printing of multistable structures, *Applied Sciences*, 10(20) (2020) 7254.
- [3] S. Daynes, P. M. Weaver, K. Potter, Aeroelastic study of bistable composite airfoils, *Journal of aircraft*, 46(6) (2009) 2169–2174.
- [4] M. Shahryarifard, M. Golzar, G. Tibert, Toward thermal stimulation of shape memory polymer composite bistable tape springs, *Smart Materials and Structures*, 30(2) (2021) 025030.
- [5] T. Chen, J. Mueller, K. Shea, Design and fabrication of a bistable unit actuator with multi-material additive manufacturing, *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference (2016)* 2060–2076.
- [6] A. F. Arrieta, O. Bilgen, M. I. Friswell, P. Hagedorn, Passive load alleviation bi-stable morphing concept, *AIP advances*, 2(3) (2012) 032118.
- [7] J. A. Faber, A. F. Arrieta, A.R. Studart, Bioinspired spring origami, *Science*, 359(6382) (2018) 1386–1391.
- [8] S.Waitukaitis, R. Menaut, B. G. Chen, M. Hecke, Origami multistability: from single vertices to metasheets, *Physical review letters*, 114(5) (2015) 055503.
- [9] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, R. C. Advincula, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Additive manufacturing*, 20 (2018) 44–67.
- [10] W. Rajhi, A. B. M. Ali, D. J. Jasim, O. Mehrabi, L. B. Said, M. Moradi, Mathematical and statistical analysis of fused filament fabrication parameters for thermoplastic polyurethane parts via response surface methodology, *Mathematics*, 12(19) (2024) 3146.
- [11] I. K. Kuder, A. F. Arrieta, M. Rist, P. Ermanni, Aeroelastic response of a selectively compliant morphing aerofoil featuring integrated variable stiffness bi-stable laminates, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(14) (2016) 1949–1966.
- [12] A. F. Arrieta, I. K. Kuder, T. Waeber, P. Ermanni, Variable stiffness characteristics of embeddable multi-stable composites, *Composites Science and Technology*, 97 (2014) 12–18.
- [13] K. J. Ang, K. S. Riley, J. Faber, A. F. Arrieta, Switchable bistability in 3D printed shells with bio-inspired architectures and spatially distributed pre-stress. in *ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, (2018), V002T08A012.
- [14] G. Risso, M. Sakovsky, P. Ermanni, A Highly Multi-Stable meta-structure via anisotropy for large and reversible shape transformation, *Advanced Science*, 9 (26) (2022) 2202740.
- [15] H. Yang, L. Ma, 1D and 2D snapping mechanical metamaterials with cylindrical topology, *International Journal of Solids and Structures*, 204 (2020) 220–232.
- [16] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Progress in Materials Science*, 94 (2018) 114–173.
- [17] J. U. Surjadi, L. Guo, H. Du, X. Li, X. Xiong, N. X. Fang, Y. Lu, Mechanical metamaterials and their engineering applications, *Advanced Engineering Materials*, 21(3) (2019) 1800864.
- [18] J. Qiu, J.H. Lang, and A.H. Slocum, A curved-beam bistable mechanism, *Journal of microelectromechanical systems*, 13(2) (2004) 137–146.
- [19] S. A. Emam, D. J. Inman, A review on bistable composite laminates for morphing and energy harvesting, *Applied Mechanics Reviews*, 67(6) (2015) 060803.
- [20] A. Masoudi, Investigation of the effect of layup parameters on the properties of bistable composite, M. S. thesis, Tarbiat Modares University, 2018 (in persian).
- [21] J. L. Silverberg, S. H. Na, A. A. Evans, B. Liu, T. C. Hull, C. D. Santangelo, R. J. Lang, R. C. Hayward, Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom, *Nature materials*, 14(4) (2015) 389–393.
- [22] P. Fetchko, J. Sellers, G. Spanjers, M. Scherbarth, J. Winters, R. Barrett, M. Lake, P. Keller, Deployment optimization of a boom for FalconSAT-3 using elastic memory composite material, *18th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, (2004), SSC04-VIII-4.
- [23] T. Van Manen, S. Janbaz, A. A. Zadpoor, Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers, *Materials horizons*, 4(6) (2017) 1064–1069.
- [24] E. Kebabdz, S. Guest, S. Pellegrino, Bistable prestressed shell structures, *International Journal of Solids and Structures*, 41(11-12) (2004) 2801–2820.
- [25] T. J. Wallin, J. Pikul, R. F. Shepherd, 3D printing of soft robotic systems: SOFT ROBOTICS, *Nature Reviews Materials*, 3(6) (2018) 84–100.
- [26] H. Peng, P. F. Pai, Acoustic metamaterial plates for elastic wave absorption and structural vibration suppression, *International Journal of Mechanical Sciences*, 89 (2014) 350–361.

- [27] B. S. Institution, Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary, BS EN ISO/ASTM 52900:2022, British Standards Institution, (2022).
- [28] X. N. Liu, G. K. Hu, G. L. Huang, C. T. Sun, An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus, *Applied physics letters*, 98(25) (2011) 251907.
- [29] B. Jian, F. Jian, F. Demoly, Y. Zhang, S. Gomes, An origami-based design approach to self-reconfigurable structures using 4D printing technology, *Procedia CIRP*, 84 (2019) 159–164.
- [30] M. Bodaghi, A. Damanpack, W. H. Liao, Self-expanding/shrinking structures by 4D printing, *Smart Materials and Structures*, 25(10) (2016) 105034.
- [31] B. Gorissen, D. Melancon, N. Vasios, K. Bertoldi, Inflatable soft jumper inspired by shell snapping, *Science Robotics*, 5(42) (2020) 1967.
- [32] T. Liddell, I. Flore, M. Fontana, N. Romanova, M. B. Zamani, N. Antonenko, H. Poghosyan, Tension-actuated textiles for architectural applications, *Proceedings of the TensiNet Symposium 2019* (2019) 465–475.
- [33] T. A. Schaedler, W.B. Carter, Architected cellular materials, *Annual Review of Materials Research*, 46(1) (2016) 187–210.
- [34] E. T. Filipov, T. Tachi, G. H. Paulino, Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(40) (2015) 12321–12326.
- [35] J. T. B. Overvelde, T. Kloek, J. J. A. D'haen, K. Bertoldi, Amplifying the response of soft actuators by harnessing snap-through instabilities, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(35) (2015) 10863–10868.
- [36] M. Ansari, M. Golzar, M. Baghani, M. Abbasishirsavar, M. Taghavimehr, Force recovery evaluation of thermo-induced shape-memory polymer stent: Material, process and thermo-viscoelastic characterization, *Smart Materials and structures*, 28(9) (2019) 095022.
- [37] M. Ansari, M. Golzar, M. Baghani, M. Solimani, Shape memory characterization of poly (ϵ -caprolactone)(PCL)/polyurethane (PU) in combined torsion-tension loading with potential applications in cardiovascular stent, *Polymer Testing*, 68 (2018) 424–432.
- [38] S. Janbaz, F. S. L. Bobbert, M. J. Mirzaali, A. A. Zadpoor, Ultra-programmable buckling-driven soft cellular mechanisms, *Materials Horizons*, 6(6) (2019) 1138–1147.
- [39] M. W. Hyer, Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates, *Journal of composite materials*, 15(2) (1981) 175–194.
- [40] A. Haldar, R. M. J. Groh, E. Jansen, P. M. Weaver, R. Rolfes, An efficient semi-analytical framework to tailor snap-through loads in bistable variable stiffness laminates, *International Journal of Solids and Structures*, 195 (2020) 91–107.
- [41] M. Cantera, J. M. Romera, I. Adarrago, F. Mujika, Modelling and testing of the snap-through process of bi-stable cross-ply composites, *Composite Structures*, 120 (2015) 41–52.
- [42] H. Hussein, M. I. Younis, Analytical study of the snap-through and bistability of beams with arbitrarily initial shape, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 12(4) (2020) 041001.
- [43] T. Chen, K. Shea, An autonomous programmable actuator and shape reconfigurable structures using bistability and shape memory polymers, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(2) (2018) 91–101.
- [44] S. Mostafavi, Analytical and experimental investigation of thermal deformation of corrugated composite laminates, Ph.D. dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, (2015) (in persian).
- [45] S. Mostafavi, M. Golzar, A. Alibeiglou, On the thermally induced multistability of connected curved composite plates, *Composite Structures*, 139 (2016) 210–219.
- [46] H. Jinlian, Shape memory polymers and textiles, Elsevier, (2007).
- [47] E. G. Loukaides, R.W. Lewis, C. R. Bowen, Additive manufacture of multistable structures, *Smart Materials and Structures*, 28(2) (2019) 02LT02.
- [48] K. S. Riley, K. J. Ang, K. A. Martin, W. K. Chan, J. A. Faber, A. F. Arrieta, Encoding multiple permanent shapes in 3D printed structures, *Materials & Design*, 194 (2020) 108888.
- [49] Y. Tang, Y. Chi, J. Sun, T. Huang, O. H. Maghsoudi, A. Spence, J. Zhao, H. Su, J. Yin, Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots, *Science advances*, 6(19) (2020) eaaz6912.
- [50] G. Chen, Y. Gou, A. Zhang, Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism, *Journal of Mechanical Design*, 133(8) (2011) 081007.
- [51] H. Y. Jeong, S. C. An, I. C. Seo, E. Lee, S. Ha, N. Kim, Y. C. Jun, 3D printing of twisting and rotational bistable structures with tuning elements, *Scientific reports*, 9(1) (2019) 324.
- [52] M. Moradi, O. Mehrabi, F. A. Rasoul, A. A. Mattie, F. Schaber, R. Khandan, Enhancing 3D printing copper-PLA composite fabrication via fused deposition modeling through statistical process parameter study, *Micromachines*, 15(9) (2024) 1082.
- [53] R. Xu, C. Chen, J. Sun, Y. He, X. Li, M. H. Lu, Y. Chen, The design, manufacture and application of multistable mechanical metamaterials-a state-of-the-art review, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(4) (2023) 042013.

- [54] M. Sun, W. Gao, Z. Zhang, H. Shen, Y. Zhou, H. Wu, S. Jiang, A unified high-order semianalytical model and numerical simulation for bistable polymer composite structures, *Polymers*, 14(4) (2022) 818.
- [55] M. L. Dano, M. W. Hyer, Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates, *International journal of solids and structures*, 35(17) (1998) 2101–2120.
- [56] S. Davey, R. Das, W. J. Cantwell, S. Kalyanasundaram, Forming studies of carbon fibre composite sheets in dome forming processes, *Composite Structures*, 97 (2013) 310–316.
- [57] X. Guo, W. Zhang, Y. Zhang, Experimental and numerical investigations on nonlinear snap-through vibrations of an asymmetrically composite laminated bistable thin plate simply supported at four corners, *Engineering Structures*, 296 (2023) 116926.
- [58] H. Alzyod, P. Ficzer, Optimizing fused filament fabrication process parameters for quality enhancement of PA12 parts using numerical modeling and Taguchi method, *Heliyon*, 9(3) (2023) 14445.
- [59] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher, Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3) (2016) 467–481.
- [60] T. W. Liu, J. B. Bai, H. T. Xi, N. Fantuzzi, A curved bistable composite slit tube for deployable membrane structures, *Composites Communications*, 41 (2023) 101648.
- [61] W. Z. Wu, P. Geng, J. Zhao, Y. Zhang, D. W. Rosen, H. B. Zhang, Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing, *Materials Research Innovations*, 18(sup5) (2014) S5–12–S5–16.
- [62] N. A. Alderete, N. Pathak, H. D. Espinosa, Machine learning assisted design of shape-programmable 3D kirigami metamaterials, *npj Computational Materials*, 8(1) (2022) 191.
- [63] H. Yang, L. Ma, Multi-stable mechanical metamaterials with shape-reconfiguration and zero Poisson's ratio, *Materials & Design*, 152 (2018) 181–190.
- [64] H. Yu, Y. Fu, X. Zhang, L. Chen, D. Qi, J. Shi, W. Wang, Programmable active matter across scales, *Programmable Materials*, 1 (2023) 1–29.
- [65] A. Brinkmeyer, S. Pellegrino, P. M. Weaver, M. Santer, Effects of viscoelasticity on the deployment of bistable tape springs, *The 19th International Conference on Composite Materials*, 2013.
- [66] S. Uest, E. Kebabdz, S. Pellegrino, A zero-stiffness elastic shell structure, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 6(1) (2011) 203–212.
- [67] Z. Lyu, J. Wang, Y. Chen, 4D printing: interdisciplinary integration of smart materials structural design and new functionality, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3) (2023) 032011.
- [68] A. Zolfagharian, F. Demoly, M. Lakhi, B. Rolfe, M. Bodaghi, Bistable mechanisms 3D printing for mechanically programmable vibration control, *Advanced Engineering Materials*, 28(9) (2026) e202402233.
- [69] M. Mohammadi, A. Z. Kouzani, M. Bodaghi, A. Zolfagharian, 3D-printed programmable bistable mechanisms for customized wearable devices in tremor attenuation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 168 (2025) 107006.

A Review of Methods and Principles for Creating Bistability Using 3D Printing

Zehtabnajafi. D, Golzar. M¹

Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Bistable and multistable structures have attracted significant attention in recent years because of their ability to maintain multiple stable equilibrium states without continuous external energy input. These characteristics make them promising candidates for the design of adaptive, programmable, and intelligent structures. The rapid development of additive manufacturing technologies, particularly Fused Filament Fabrication, has created new opportunities for realizing such structures by enabling precise control of material anisotropy, thermal residual stresses, pre-strain, and structural geometry. This review presents a systematic overview of the fundamental principles and methods used to achieve bistability and multistability through 3D printing. The reviewed approaches include the controlled use of thermal residual stresses, pre-strained layers, geometry-driven bistable mechanisms, bio-inspired architectures, origami and kirigami based concepts, as well as reinforced and composite filaments. The literature demonstrates that by tailoring extrusion paths, layer orientations, thermal history, and material distribution, the potential energy landscape of printed structures can be effectively engineered, enabling control over the number and stability of equilibrium states. These capabilities have led to applications in soft robotics, deployable aerospace systems, biomedical devices, energy harvesting technologies, and adaptive metamaterials. Finally, key research challenges are discussed, including the prediction of stable equilibrium states, the dependence of mechanical performance on printing parameters, time-dependent material effects such as creep and fatigue, and the lack of comprehensive analytical design frameworks. Future research directions toward the development of next-generation programmable multistable structures enabled by additive manufacturing are also outlined.

KEYWORDS

Bistable, 3D Printing, Multistable, Residual Stress, Anisotropy

¹ Corresponding Author (Email: m.golzar@modares.ac.ir)