

## ساخت و تنظیم منحنی طراحی برای ستون فولادی بر اساس فلسفه تغییر حالت

عبدالرسول رنجبران<sup>۱\*</sup>، محمد رنجبران<sup>۲</sup>، جواد مسعودی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار مهندسی راه- ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی پارسیان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه - ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

\* ranjbarn@shirazu.ac.ir, aranjbaran@yahoo.com

ارسال: اسفند ۹۷ پذیرش: فروردین ۹۸

### چکیده

یکی از روش های طراحی و آزمون ستون های فولادی، استفاده از منحنی طراحی است که در آن ظرفیت بی بعد ستون، روی محور قائم، برحسب ضریب لاغری، روی محور افقی بیان می شود. آیین نامه های معتبر دنیا هر یک منحنی طراحی مخصوص به خود دارند. مبنای تهیه این منحنی ها گاه با هم تفاوت دارند. با در نظر گرفتن رفتار سازه ها به صورت گذر از حالت مبداء، به حالت مقصد، روشی نو با عنوان، فلسفه تغییر حالت (فتح)، بیان گذاری شده است. در این مقاله بر اساس فتح منحنی طراحی نو با عنوان منحنی فارسی، به صورت، دقیق، صریح، و بسیار ساده ساخته و ارائه شده، و از طریق علمی و مقایسه با نتایج دیگران، صحت، دقت، و جامعیت آن به تایید رسیده است.

کلمات کلیدی: منحنی طراحی فارسی، فلسفه تغییر حالت، منحنی طراحی ستون، توابع حالت، توابع پدیده.

### ۱- مقدمه

یکی از روش های طراحی و آزمون ستون های فولادی، استفاده از منحنی طراحی است. منحنی طراحی برای ستون هایی با مشخصات خاص، و به صورت معادلاتی که ظرفیت بی بعد ستون را بر حسب ضریب لاغری بی بعد آن (شناسه ستون) بیان می کنند، گسترش یافته و دامنه رفتار ستون از شروع بارگذاری تا شکست کامل آن را در بر می گیرد. ساخت منحنی طراحی، بر اساس معادلاتی که با انطباق منحنی هایی با شکل مفروض بر داده های آزمایشگاهی، و یا از حل معادله کمانش پیشنهادی اویلر با مقداری جابجایی اولیه، بدست آمده انجام می گیرد. استفاده از حل معادله اویلر، به عنوان روش منطقی همخوان با رفتار فیزیکی ستون، خود مستلزم فرض هایی مثل رفتار الاستیک خطی، تغییر شکل اولیه معلوم، تغییر فرم مقطع، و نوع ناپایداری، مثل محلی، جانبی، در هم ریختگی، و پیچشی می باشد. هر یک از این موارد خود هم به سخت شدن حل و هم خاص شدن نتیجه منجر می شود، که این هم خود منوط به این است که بتوان با استفاده از داده های آزمایشگاهی قابل اطمینان نتایج عملی بدست آورد. با این که تهیه منحنی طراحی ستون های فولادی سابقه بیش از صد سال دارد، با این حال، آیین نامه های طراحی در کشور های مختلف جهان، هر یک منحنی های خاص خود را دارند، که گاه یکی با دیگری تفاوت چشم گیر و معنی دار دارد [۱-۶]. علاوه بر آن تهیه و صحت سنجی این منحنی ها از جمله زمینه های پژوهشی بسیار فعال در فرهنگ علمی است [۷-۱۱]. رنجبران و هم

کاران پژوهشی شان [۱۲-۲۱] در دوهه گذشته پژوهش های منظم و پایداری روی رفتار سازه های تحت اثر عوامل مختلف انجام دادند. کار آن ها به توگد و گسترش نگرشی نو، با عنوان فلسفه تغییر حالت (فتح)، در رفتار سازه ها گردید. در فتح، رفتار سازه (دستگاه) به عنوان پدیده، و پدیده به صورت تغییر وضعیت دستگاه از مبداء (آستانه بار گذاری) به مقصد (آستانه شکست) تعریف می شود. بر اساس استدلال منطقی، و ریاضی پایه ارتباط بین مبداء و مقصد با توابعی به نام توابع پدیده بر قرار گردیده است. توابع پدیده بر حسب متغیر حالت (شناسه دستگاه) و سه متغیر هادی، که با انطباق نتایج با نتایج آزمایشگاهی تعیین می شوند، تعریف شده اند. در مورد ستون فولادی، ضریب لاغری به عنوان شناسه به کار می رود. علاوه بر آن با استفاده از ظرفیت سه ستون با ضرایب لاغری متفاوت و معلوم، متغیر های هادی تعیین می شوند. نتیجه معادله ای بسیار ساده و دقیق خواهد بود. لازم به ذکر است که منحنی طراحی بر اساس فتح یک منحنی عمومی است و نسبت به همه منحنی های پیشنهادی در آیین نامه های طراحی در دنیا، هم از نظر مبانی علمی و هم از نظر سادگی و دقت بر تری دارد.

در این مقاله ابتدا مبنای ریاضی فتح، به صورت محاسبه سختی پایا و از دست رفته سازه به صورت مضرب سختی اولیه آن و توابع پدیده گسترش می یابد. در قدم دوم متغیر حالت معرفی شده و توابع حالت بر حسب آن تعریف می شوند. گسترش توابع پدیده بر حسب توابع حالت و متغیر های هادی قدم سوم کار است. در قدم چهارم با مراجعه به نتایج آزمایشگاهی موجود در فرهنگ علمی متغیر های هادی تعیین و منحنی طراحی، با عنوان منحنی فارسی، به صورت ساده، صریح و دقیق ارائه می شود. در مرحله بعد منحنی فارسی با منحنی های موجود در فرهنگ علمی مقایسه و صحت سنجی می شود. نتایج حاصل از تحقیق و فهرست منابع بخش پایانی مقاله را تشکیل می دهد.

## ۲- مبانی ریاضی

هر ستون با شاخص رفتاری به نام سختی  $k_S$ ، که در مبداء دارای مقدار محدود و معین، و در مقصد به صفر می رسد تعریف می شود. در نتیجه وارونه سختی، یعنی نرمی  $f_S$ ، در مبداء دارای مقدار محدود و معین و در مقصد بینهایت است. در هر مرحله از پدیده، سختی پایا  $k_{LS} = k_S - k_D$  برابر سختی ستون منهای سختی عیب  $k_D$ ، و نرمی پایا  $f_{LS} = f_S + c_S$  برابر نرمی ستون بعلاوه نرمی عیب  $c_S$  است، در نتیجه رابطه بین این دو به صورت معادله (۱) بیان می شود.

$$(k_S - k_D)(f_S + c_S) = 1 \quad (1)$$

با حل معادله (۱) برای  $k_D$  بر حسب سایر متغیرها، معادله (۲) حاصل می شود، که در آن  $S_R$  تابع پایا و  $F_R$  تابع تخریب، و هردو با هم توابع پدیده، نامگذاری شده و در معادله (۳) تعریف شده اند.

$$k_{LS} = S_R k_S \quad k_D = F_R k_S \quad (2)$$

$$S_R = f_S / (f_S + c_S) \quad F_R = c_S / (f_S + c_S) \quad (3)$$

در این مرحله نرمی ستون به صورت حاصل ضرب مقدار بی بعد  $f_N$  و بعد دار  $F_S$ ، و نرمی عیب به صورت حاصل ضرب مقدار بی بعد  $c_N$  و بعد دار  $F_S$ ، در معادله (۴) تعریف می شوند.

$$f_S = f_N F_S \quad c_S = c_N F_S \quad (4)$$

با جاگذاری از معادله (۴)، مقادیر بی بعد توابع پدیده در معادله (۵) نشان داده شده است.

$$S_R = f_N / (f_N + c_N) \quad F_R = c_N / (f_N + c_N) \quad (5)$$

## ۳- توابع حالت

توابع پدیده در معادله (۵) برای مقدار واحد  $f_N = 1$  خیاطی، با نام های تابع مبدا  $O$ ، و تابع مقصد  $D$ ، و هر دو با هم به نام توابع حالت و نسبت تابع مقصد به مبدا به نام نسبت حالت  $R$ ، نامگذاری و در معادله (۶) تعریف می شوند.

$$O = 1/(1+R) \quad D = R/(1+R) \quad R = D/O \quad (6)$$

با توجه به معادله (۶) دامنه تغییرات، توابع حالت و نسبت حالت، در معادله (۷) تعریف می گردد.

$$O \in [1 \quad 0] \quad D \in [0 \quad 1] \quad R = O \in [0 \quad \infty] \quad (7)$$

متغیر حالت  $\xi \in [0 \quad 1]$ ، در مبدا برابر صفر  $\xi = 0$ ، و در مقصد برابر یک  $\xi = 1$  تعریف می شود. با توجه به معادله (۷) و تعریف متغیر حالت، توابع حالت به صورت توابعی از متغیر حالت، با مقادیر بیشینه یک  $\max = 1$  و مقادیر کمینه صفر  $\min = 0$ ، به شرح معادله (۸) تعریف می شوند.

$$O = \begin{cases} \max = 1 & @ \xi = 0 \\ \min = 0 & @ \xi = 1 \end{cases} \quad D = \begin{cases} \min = 0 & @ \xi = 0 \\ \max = 1 & @ \xi = 1 \end{cases} \quad (8)$$

با دقت، مطالعه، و آزمون، بهترین توابع حالت دارای شرایط فوق به صورت معادله (۹) تعریف شدند.

$$O = 0.25(3 - 6\xi^2 + 4\xi^3 + \cos \pi\xi) \quad D = 0.25(1 + 6\xi^2 - 4\xi^3 - \cos \pi\xi) \quad (9)$$

همانند معادله (۴) نسبت سختی عیب به سختی ستون بر حسب مقادیر بی بعد  $k_N$  و  $c_N$ ، و مقدار بعد دار آن ها  $K_S$  در معادله (۱۰) تعریف شده اند.

$$c_S/k_S = c_N/k_N \quad c_S = c_N K_S \quad k_S = k_N K_S \quad (10)$$

با توجه به تعریف توابع حالت، کسر  $c_N/k_N$  برابر نسبت حالت است، در نتیجه نرمی بی بعد عیب در معادله (۱۱) تعریف می شود.

$$c_N = k_N R \quad (11)$$

حال با جاگذاری معادله (۱۱) در معادله (۵) توابع پدیده در معادله (۱۲) بر حسب توابع حالت تعریف می شوند.

$$S_R = O/(O + k_N^2 D) \quad F_R = k_N^2 D/(O + k_N^2 D) \quad (12)$$

متغیر هادی  $k_N$ ، فقط برای بعضی شرایط مرزی خاص معلوم بود، و لذا معادله (۱۲) با معرفی دو متغیر هادی  $P$  و  $Q_M$  به شکل نهایی معادله (۱۳) در آمده، که در آن  $f_R$  مشتق توابع پدیده و چگالی توزیع آن دو است.

$$S_R = O^P/(O^P + Q_M D^P) \quad F_R = Q_M D^P/(O^P + Q_M D^P) \quad f_R = PD'(S_R F_R/OD) \quad (13)$$

## ۴- منحنی فارسی

تناسب ظرفیت با سختی، با توجه به معادله (۲) منجر به تساوی نسبت ظرفیت  $C_R$  با تابع پایا در معادله (۱۴) می شود.

$$C_R = C_m/C_S \quad C_m = k_{LS} C_C \quad C_m = k_S C_C \quad C_R = S_R \quad (14)$$

از طرفی در فرهنگ علمی، شناسه ستون به صورت ضریب لاغری نسبی  $\lambda$ ، که برابر جذر نسبت ظرفیت بیشینه به ظرفیت طبق یک روش انتخابی، که برای ستون برابر تنش اوایلر  $F_e$  است، طبق معادله (۱۵) تعریف می گردد.

$$F_{cr} = C_R F_y \quad \lambda = \sqrt{F_y/F_e} \quad F_e = \pi^2 E/(L_e/r)^2 \quad \lambda = (L_e/r) \times \sqrt{F_y/\pi^2 E} \quad (15)$$

برای این که بتوان از ظرفیت بر مبنای فتح در محاسبه ظرفیت ستون استفاده کرد، لازم است که بین متغیر حالت و ضریب لاغری نسبی ارتباط برقرار شود. برای این کار با گشت در فرهنگ علمی، ظرفیت نسبی ستون با ظرفیت کمینه  $(\lambda_T, C_T)$  انتخاب و متغیر حالت از معادله (۱۶) محاسبه می گردد. با داشتن ظرفیت دو ستون دیگر، متغیرهای هادی  $Q_M$  و  $P$  نیز تعیین و در نتیجه نسبت ظرفیت نیز مطابق معادله (۱۶) قابل محاسبه است.

$$C_R = (O^P + C_T Q_M D^P) / (O^P + Q_M D^P) \quad \xi = \lambda / \lambda_m \quad (16)$$

نسبت ظرفیت معرفی شده در معادله (۱۶) به نام منحنی فارسی نامگذاری شده است.

### ۵- اعتبار سنجی

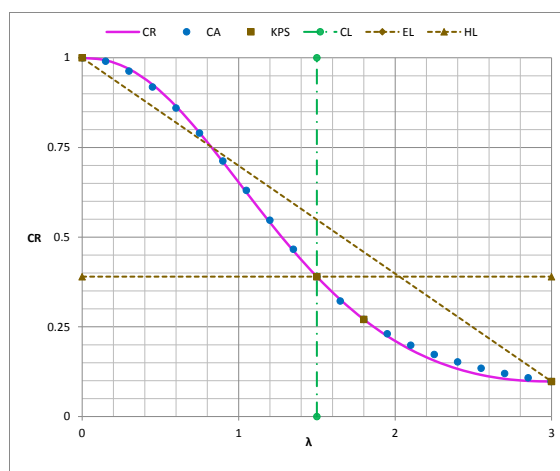
به منظور اعتبار سنجی، در این بخش معادله پیشنهادی برای منحنی فارسی، با منحنی های طراحی آیین نامه های آمریکا، و اروپا، و چند رساله و پایان نامه مقایسه می شود. منحنی طراحی ستون در آیین نامه آمریکا، به صورت نسبت ظرفیت  $C_A$  در معادله (۱۷) معرفی شده است.

$$C_A = \begin{cases} 0.658\lambda^2 & \text{for } \lambda \leq 1.5 \\ 0.877/\lambda^2 & \text{for } \lambda > 1.5 \end{cases} \quad \xi = \lambda / \lambda_m \quad (17)$$

در شکل ۱ نسبت ظرفیت آمریکا  $C_A$  از معادله (۱۷)، با نسبت ظرفیت فارسی  $CR$  از معادله (۱۶) برای  $C_T = 0.1$ ،  $Q_M = 2.5$  و  $P = 1.3$  مقایسه شده است. انطباق خوب نتایج نشان دهنده اعتبار منحنی فارسی است. منحنی طراحی ستون در آیین نامه اروپا، به صورت نسبت ظرفیت  $C_E$  در معادله (۱۸) تعریف شده است.

$$C_E = 1 / (\psi + \sqrt{\psi^2 - \lambda^2}) \leq 1 \quad \psi = 0.5(1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2) \quad (18)$$

که در آن پنج مقدار  $\alpha$  نظیر پنج منحنی در جدول ۱ تعریف شده است. هر یک از این منحنی ها برای یک مورد مشخص کار بری دارد.



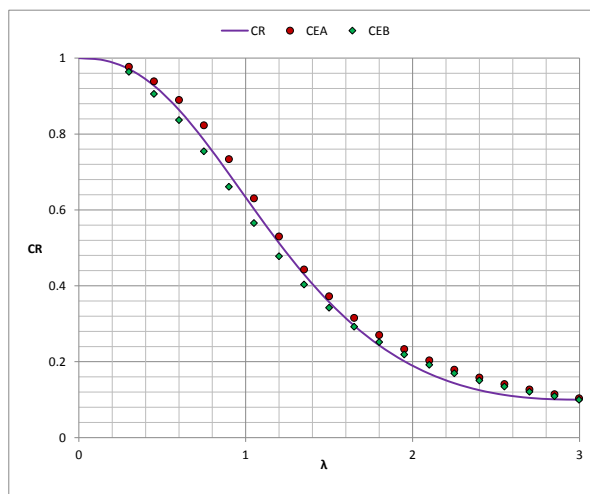
شکل ۱- مقایسه منحنی فارسی با منحنی آیین نامه آمریکا

جدول ۱

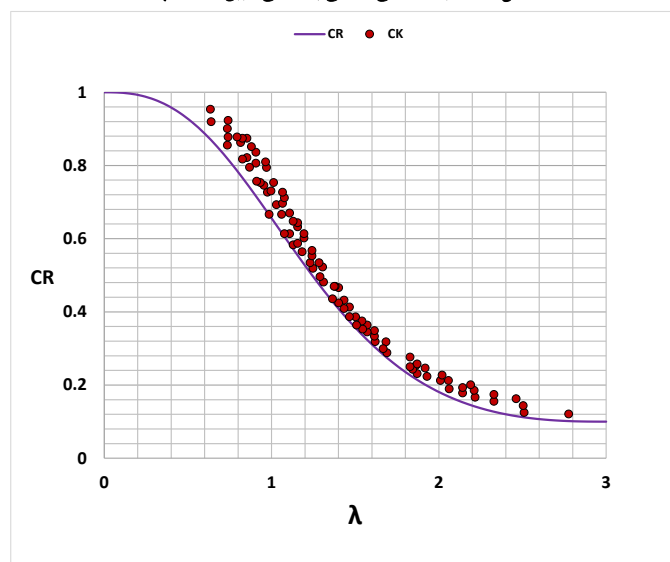
$a_0$	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	منحنی کمانش
0.13	0.21	0.34	0.49	0.76	ضریب ناخالصی $\alpha$

نسبت های ظرفیت اروپای  $CEA$  و  $CEB$  برای  $a$  و  $b$  از جدول ۱ با نسبت ظرفیت فارسی  $CR$  از معادله (۱۶) برای  $C_T = 0.1$ ،  $Q_M = 2.5$  و  $P = 1.3$  در شکل ۲ مقایسه شده است. کانکامچ و همکاران [۲۲-۲۳] پایداری تیرهای ساخته شده از فولاد

سرد نورد، در درجه حرارت بالا، را مورد بررسی قرار داده اند. نمونه ای از کار آنها، با نتایج حاصل از فتح، در شکل ۳ با هم مقایسه شده اند. هم خوانی نتایج کار آبی فتح در ستون های سرد نورد، آن هم در درجه حرارت بالا، که در فرهنگ علمی معمول نیاز به توجه خاص و محاسبات پیچیده و طولانی دارد را نشان می دهد.



شکل ۲- مقایسه منحنی فارسی با منحنی آیین نامه اروپا



شکل ۳- مقایسه منحنی فارسی با منحنی فولاد سرد نورد در درجه حرارت بالا

## ۶- نتیجه گیری

از پژوهش انجام شده در این مقاله نتایج زیر حاصل می گردد. مبانی علمی فتح درست و منطقی و منطبق بر روند طبیعی پدیده هاست. منحنی فارسی برای محاسبه ظرفیت نهایی ستون ارائه شد، که برای ستون ها، از هر جنس، اندازه، شکل مقطع، درجه حرارت، و غیره معتبر است. منحنی فارسی با منحنی های مشابه در آیین نامه های معتبر دنیا، و نتایج حاصل از محاسبات عددی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه و اعتبار آن تایید شد. در انتها منحنی فارسی به عنوان منحنی، جامع برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی همه ستون ها و در هر جای دنیا، پیشنهاد می شود.

## ۷- مراجع

1. Galambos T. V., Surovek A. E. (2008). Structural stability of steel: concepts and applications for structural engineers. John Wiley & Sons, Inc., 2008.

2. Canadian Standards Association. 2004. S16-01 Limit state design of steel structures. Toronto, Canadian Standards Association.
3. AISC, 2005. Specification for structural steel buildings. Chicago, American Institute of Steel Construction.
4. Australian Standard 2004. Steel structures. AS4100. Standards Australia. North Sydney, Australia.
5. European Standard prEN 1993-1-1. 2004 Eurocode 3: Design of steel structures. European Committee of Standardisation, Brussels, Belgium.
6. Li Z. 2018. Reliability-based design optimization of non-linear beam columns. PhD Dissertation, the Virginia Polytechnic Institute and State University.
7. Li Z., Patil M., Yu X. 2017. Ultimate strength of steel beam-columns under axial compression. Proc IMech Part M: J Engineering for the Maritime Environment 1-16.
8. Jonsson J., Stan T. C. 2017. European column buckling curves and finite element modelling including high strength steel. Journal of Constructional Steel Research, 128, 136-151.
9. Farsi M. 2014. Localized and cellular buckling in stiffened plates. PhD Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
10. Chen Y. 2003. Ultimate strength analysis of stiffened panels using a beam-column method. PhD Dissertation, the Virginia Polytechnic Institute and State University.
11. Taras A. (2010). Contribution to the development of consistent stability design rules for steel members. PhD thesis, Graz University of Technology, Austria, 2010.
12. Ranjbaran, A., Hashemi, S., Ghaffarian, A.R. (2008), A new approach for buckling and vibration analysis of cracked column. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 21(3), 225-230.
13. Ranjbaran, A., (2010), Analysis of cracked members the governing equations and exact solutions. Iranian Journal of Science & Engineering, Transactions B: Engineering. 34(B4), 407-417.
14. Ranjbaran, A., Shokrzadeh, A.R., Khosravi, S. (2011), A new finite element analysis of free axial vibration of cracked bars. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. 27(10), 1611-1621.
15. Ranjbaran, A., Rousta, H., Ranjbaran, Mo., Ranjbaran, Ma., (2013) Dynamic stability of cracked columns; the stiffness reduction method. Scientia Iranica, 20(1), 57-64.
16. Ranjbaran, A., Rousta, H. (2013) "Interaction diagram for dynamic stability by Laplace transform." NED University Journal of Research 10(1), 31-38.
17. Ranjbaran, A., Rousta, H., Ranjbaran, M.O., Ranjbaran, M.A., Hashemi, M., Moravej, M.T. (2013) A necessary modification for the finite element analysis of cracked members detection, construction, and justification. Archive of Applied Mechanics, 83(7), 1087-1096.
18. Ranjbaran, A., Rousta, H. (2013) Finite element analysis of cracked beams innovative weak form equations. NED University Journal of Research 10(1), 39-46.
19. Ranjbaran, A., and Ranjbaran, M., (2014) New finite-element formulation for buckling analysis of cracked structures. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 140(5), 04014014(1-10).
20. Ranjbaran, A., Ranjbaran, M., (2017) State based damage mechanics. NED University Journal of Research 14(1), 13-26.
21. Ranjbaran, A., Ranjbaran, M., (2017) State-base buckling analysis of beam-like structures. Archive of Applied Mechanics, 87(9), 1555-1565. DOI 10.1007/s00419-017-1273-6.
22. Kankanamge N. D., Mahandran M. (2012). Behavior and design of cold-formed steel beams subjected to lateral-torsional buckling. Thin Walled Structures, 2012; 51(1): 25-28.
23. Kankanamge N. D. (2010). Structural behavior and design of cold-formed steel beams at elevated temperatures. PhD, thesis, Queensland University of Technology, 2010.