

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

عبدالرسول رنجبران^{۱*}، محمد رنجبران^۲، نیکناز نگهدار حقیقت^۳

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

۲-استاد یار 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 تیر های فولادی، استفاده از منحنی طراحی است که در آن ظرفیت بی بعد تیر، روی محور قائم، بر حسب ضریب لاغری، روی محور افقی بیان می شود. آیین نامه های معتبر دنیا هر یک منحنی طراحی مخصوص به خود دارند، که به خاطر تفاوت مبنای تهیه، نتایج با هم تفاوت معنی دار 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)، بنیان گذاری شده است. در این مقاله بر اساس فتح منحنی طراحی ای نو با عنوان منحنی فارسی، به صورت، دقیق، صریح، و بسیار ساده 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 تیر، توابع حالت، توابع پدیده.

۱- مقدمه

یکی از روش های طراحی و آزمون تیر های فولادی، استفاده از منحنی طراحی است. این برای تیر هایی با مشخصات خاص و به صورت معادلاتی که ظرفیت بی بعد تیر را بر حسب ضریب لاغری بی بعد آن (شناسه تیر) بیان می کنند، گسترش یافته و دامنه رفتار تیر از شروع بار گذاری 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 پیش جانی پیشنهادی اوایل با مقداری جابجایی اولیه، بدست آمده انجام می گیرد. استفاده از حل معادله اوایل، به عنوان روش منطقی همخوان با رفتار فیزیکی تیر، 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 می شود، تازه اگر بتوان با استفاده از داده های آزمایشگاهی قابل اطمینان نتایج عملی بدست آورد. با این که تهیه منحنی طراحی تیر 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 دارند [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]. علی الرغم تلاش های انجام یافته در چند دهه گذشته، شناخت رفتار تیر هنوز به کمال نرسیده است. به عنوان مثال ظرفیت یک تیر دوسر ساده فولادی با استفاده از چهار آیین نامه طراحی، کانادا، آمریکا، اروپا، و استرالیا محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است [۱]. ظرفیت های کانادا و آمریکا بسیار زیاد تر از مقدار واقعی است. دلیل این خطا فرض رفتار خاص در محاسبه ظرفیت است، که به وضوح نیاز به تجدید نظر دارند. مبنای آیین نامه های اروپا و استرالیا مبنای علمی موثق تری دارند. پژوهش حاضر کاری در جهت اصلاح این نقص است.

جدول ۱- مقایسه ظرفیت تیر در آیین نامه های مختلف دنیا

No.	Country	Section	$L(ft)$	$F_y(ksi)$	$E_s(ksi)$	$M_p(k.in)$	$M_n(k.in)$	$\sigma(ksi)$
1	Canada	W27×84	15.0	50	29,000	12,200	10,400	49.0
2	America	W27×84	15.0	50	29,000	12,200	9,500	44.6
3	Australia	W27×84	15.0	50	29,000	12,200	7,630	35.8
4	Europe	W27×84	15.0	50	29,000	12,200	7610	35.7

رنجبران و هم کاران پژوهشی شان [۱۲-۲۱] در دوهه گذشته پژوهش های منظم و پایداری روی رفتار سازه ها، تحت اثر عوامل مختلف انجام دادند. کار آن ها به تولد 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 تیر فولادی، ضریب لاغری به عنوان شناسه به کار می رود. علاوه بر آن با استفاده از ظرفیت سه تیر 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 تیر با شاخص رفتاری ای 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 زنده $k_{LS} = k_s - k_D$ برابر سختی ستون منهای سختی عیب k_D ، و نرمی زنده $f_{LS} = f_s + c_s$ برابر نرمی تیر 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 تیر 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، و با نام های تابع مبدا O ، و تابع مقصد D ، و هردو 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 تیر بر حسب مقادیر بی بعد c_N و k_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.

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

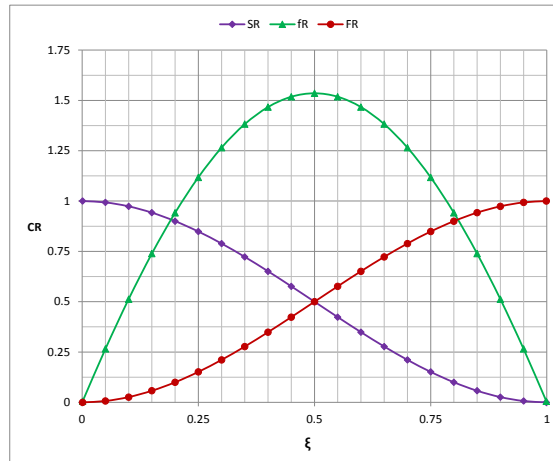
حال با جاگذاری معادله (۱۱) در معادله (۵) توابع پدیده در معادله (۱۲) بر حسب توابع حالت تعریف می شوند.

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

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

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

منحنی تغییرات S_R ، F_R و f_R برای $P=1$ و $Q_M=1$ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مقایسه منحنی های حالت

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 تیر به صورت ضریب لاغری نسبی λ ، که برابر جذر نسبت ظرفیت بیشینه $M_p = ZF_y$ به ظرفیت طبق یک روش انتخابی، که برای تیر برابر تنش خمشی حاصل از کمانش اولیه $M_o = ZF_e$ است، که طبق معادله (۱۵) تعریف می گردد.

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

برای این که بتوان از ظرفیت بر مبنای فتح در محاسبه ظرفیت تیر 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 تیری با ظرفیت کمینه (λ_T, C_T) ، تیر دیگری با ظرفیت $(0.5\lambda_T, C_M)$ و تیرسومی با ظرفیتی غیر از دو مورد قبل (λ_N, C_N) ، را انتخاب و متغیر حالت و سایر متغیرها و ظرفیت نسبی از معادله (۱۶) محاسبه می گردد.

$$C_R = \frac{O^P + C_T Q_M D^P}{O^P + Q_M D^P} \quad Q_M = \frac{1 - C_M}{C_M - C_T} \quad P = \frac{\text{Log}[Q_N / Q_M]}{\text{Log}[D_N / O_N]} \quad \xi = \lambda / \lambda_m \quad (16)$$

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

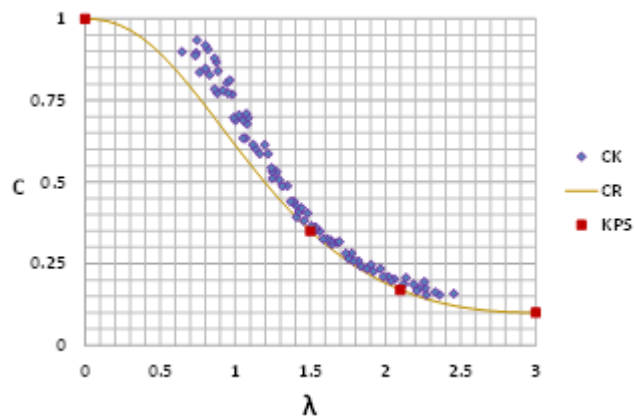
۵- اعتبار سنجی

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.

گسترش مبانی ریاضی نشان می دهد که فتح یک فلسفه جامع است و به اندازه، جنس، هندسه و یا پدیده خاص محدود نمی شود. در نتیجه ستون و تیر از دید فتح با هم تفاوت ندارند. چون منحنی ستون با فتح انطباق دارد و لذا تیر هم باید از آن طبیعت کند. برای گسترش منحنی طراحی تیر در آیین نامه آمریکا فرض می شود که تیر با پیچش جانبی ناپایدار می شود، که فرض منطقی نیست. چون در هنگام ناپایداری همه مودها فعال می شوند، لذا محدود کردن به کماتش جانبی باعث بالا رفتن غیر واقعی ظرفیت شده است. با توجه به موارد فوق، به گشت در داده های قابل اعتماد مربوط به تیر پرداخته شد و از داده های رساله کانکامج [۲۲ و ۲۳] که در شکل ۲ نشان داده شده، سه نقطه کلیدی به شرح معادله (۱۷) استخراج شد. این نقاط کلیدی در گسترش منحنی فتح CR در ادامه مورد استفاده قرار می گیرد. در این قسمت منحنی طراحی ستون آمریکا با منحنی فارسی مقایسه می شود. منحنی طراحی ستون در آیین نامه آمریکا، به صورت نسبت ظرفیت C_A در معادله (۱۸) معرفی شده است.

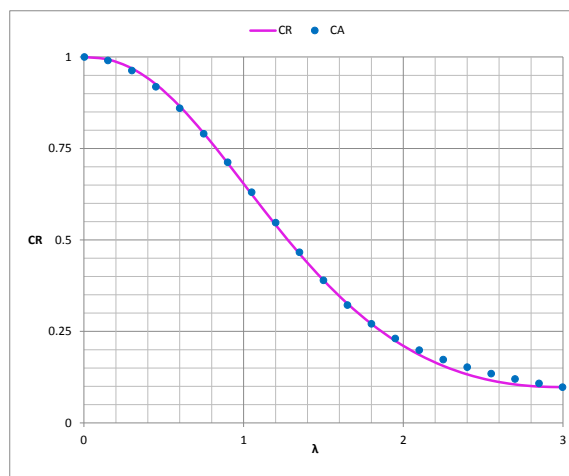
$$(\lambda_T \quad C_T) = (3 \quad 0.1) \quad (0.5\lambda_T \quad C_M) = (1.5 \quad 0.35) \quad (\lambda_N \quad C_N) = (2.1 \quad 0.17) \quad (17)$$

$$C_A = \begin{cases} 0.658\lambda^2 & \lambda \leq 1.5 \\ 0.877/\lambda^2 & \lambda > 1.5 \end{cases} \quad \lambda = \frac{L_e}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \quad (18)$$



شکل ۲- نمایش نقاط کلیدی

ابتدا نسبت ظرفیت آمریکا CA از معادله (۱۸)، محاسبه شده است. سه نقطه کلیدی KPS که از داده های کانکامج استخراج شد بکار رفته و متغیرهای هادی به صورت $C_T = 0.1$ ، $Q_M = 2.6$ و $P = 1.15$ و منحنی ظرفیت CR طبق معادله (۱۶) محاسبه شده است. این دو منحنی در شکل ۳ با هم مقایسه شده اند. انطباق خوب نتایج نشان گر اعتبار منحنی فارسی است. نتیجه این که ظرفیت تیر و ستون با یک منحنی فارسی محاسبه می گردد.



شکل ۳- مقایسه منحنی فارسی با منحنی ستون آیین نامه آمریکا

منحنی طراحی تیر در آیین نامه اروپا، به صورت نسبت ظرفیت C_E در معادله (۱۸) تعریف شده است.

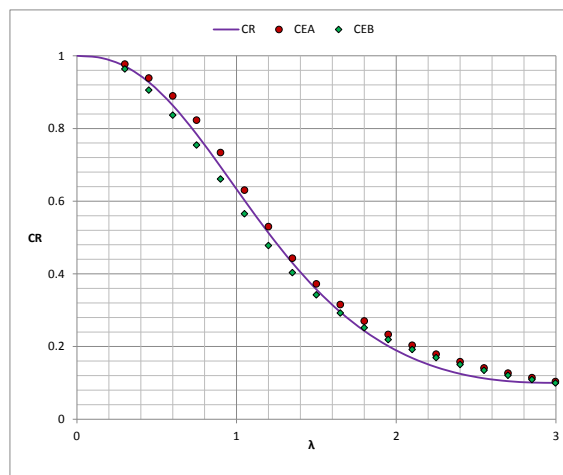
$$C_E = 1 / (\psi + \sqrt{\psi^2 - \lambda^2}) \leq 1 \quad \psi = 0.5(1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2) \quad (19)$$

که در آن پنج مقدار α نظیر پنج منحنی در جدول ۲ تعریف شده است. هر یک از این منحنی ها برای یک مورد مشخص کار بری دارد.

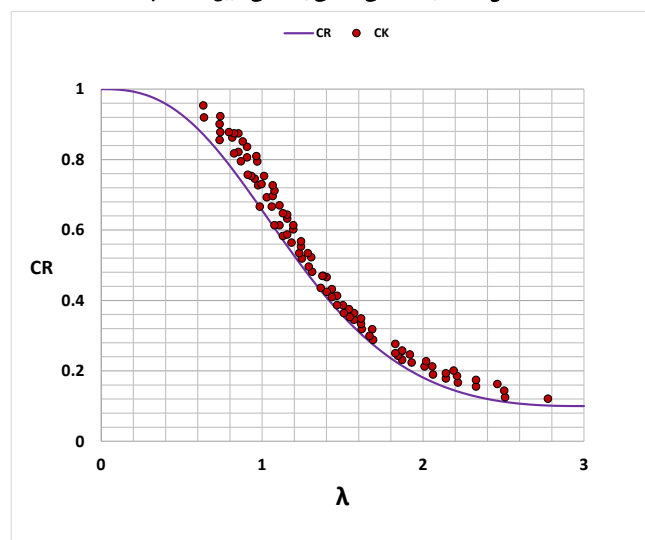
جدول ۲

a_0	a	b	c	d	منحنی کمانش
0.13	0.21	0.34	0.49	0.76	ضریب ناخالصی α

نسبت های ظرفیت اروپای CEA و CEB برای a و b از جدول ۲ با نسبت ظرفیت فارسی CR از معادله (۱۶) برای $C_T = 0.1$ ، $Q_M = 2.5$ ، $P = 1.3$ در شکل ۴ مقایسه شده است. کانکامج 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 ۵ با هم مقایسه شده اند. هم خوانی نتایج کار آبی فتح در تیر 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 ۴- مقایسه منحنی فارسی با منحنی آیین نامه اروپا



شکل ۵- 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 تیر ارائه شد، که برای تیرها، 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 آزمایش گاهی مقایسه و اعتبار آن تایید شد. در انتها منحنی فارسی به عنوان منحنی، جامع برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی همه تیرها و در هر جای دنیا، پیشنهاد می شود.

۷- مراجع

- Galambos T. V., Surovek A. E. (2008). Structural stability of steel: concepts and applications for structural engineers. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- Canadian Standards Association. 2004. S16-01 Limit state design of steel structures. Toronto, Canadian Standards Association.
- AISC, 2005. Specification for structural steel buildings. Chicago, American Institute of Steel Construction.
- Australian Standard 2004. Steel structures. AS4100. Standards Australia. North Sydney, Australia.
- European Standard prEN 1993-1-1. 2004 Eurocode 3: Design of steel structures. European Committee of Standardisation, Brussels, Belgium.
- Li Z. 2018. Reliability-based design optimization of non-linear beam columns. PhD Dissertation, the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- 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.
- 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.
- Farsi M. 2014. Localized and cellular buckling in stiffened plates. PhD Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Chen Y. 2003. Ultimate strength analysis of stiffened panels using a beam-column method. PhD Dissertation, the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Taras A. (2010). Contribution to the development of consistent stability design rules for steel members. PhD thesis, Graz University of Technology, Austria, 2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ranjbaran, A., Rousta, H., Ranjbaran, Mo., Ranjbaran, Ma., (2013) Dynamic stability of cracked columns; the stiffness reduction method. Scientia Iranica, 20(1), 57-64.
- Ranjbaran, A., Rousta, H. (2013) "Interaction diagram for dynamic stability by Laplace transform." NED University Journal of Research 10(1), 31-38.
- 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., Roustaa, 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.