

## پایداری بر اساس فلسفه تغییر حالت

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

۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

۲- دکترای مهندسی شیمی، از دانشگاه شریف

۳- کارشناسی مکانیک، دانشگاه شیراز

\* ranjbarn@shirazu.ac.ir

ارسال: دی ماه ۹۷ پذیرش: بهمن ماه ۹۷

### چکیده

در فلسفه تغییر حالت (فتح)، همه پدیده‌های طبیعت تغییر از حالت مینا به حالت هدف هستند. به کمک منطق ریاضی، استدلال منطقی، و مطالعه طولانی در پدیده‌ها، مبانی فتح به صورت توابع حالت و پدیده شکل گرفته است. این‌ها توابعی صریح، دقیق، و ساده از متغیر حالت و دو ضریب کاربری می‌باشند که برای هر پدیده با استفاده از داده‌های موجود تنظیم می‌گردند. هدف این مقاله بررسی پایداری سازه‌ها به کمک فتح می‌باشد. در پایداری سازه سالم مینا، بار بحرانی هدف، و ضریب لاغری متغیر حالت است. داده‌های موجود در فرهنگ علمی برای تعیین و تنظیم ضرایب مورد استفاده قرار گرفته و مساله پایداری به صورت بسیار ساده و دقیق ارایه شده است. برای تایید کار نتایج فتح با نتایج دیگران مقایسه شده و نتیجه بسیار موفقیت آمیز بوده است. برای اولین بار در تاریخ علم مساله پایداری به صورت معادلاتی بسیار ساده و فوق العاده دقیق ارایه شده است. همه نامرادی‌هایی که بعد از اوایل تا کنون در زمینه پایداری وجود داشته در سایه فتح برای همیشه از بین رفته است.

کلمات کلیدی: پایداری، کمانش، ستون، فتح، فلسفه تغییر حالت.

### ۱- مقدمه

سازه‌های مهندسی تحت اثر نیروهای وارده گاه تعادل خود را از دست داده و خراب می‌شوند. این پدیده در مهندسی تحت عنوان پایداری یا کمانش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هنگام کمانش سازه تعادل فعلی خود را از دست می‌دهد و مسیر حرکت جدیدی را دنبال می‌کند که اغلب به خرابی منجر می‌شود. کمانش میله‌ها اولین بار در حدود ۲۵۰ سال پیش توسط اوایلر [۱] مورد بررسی قرار گرفت. در طول این سال‌ها مطالعات گسترده‌ای در این امر مهم انجام شده است. با این حال مساله به کمال نرسیده و مشکلات عدیده‌ای موجود است. با این‌که کار اوایلر بسیار مبتکرانه بود ولی به دلیل عدم انطباق با آزمایشات سال‌ها مورد استقبال نبود. پس از آن هم فقط به عنوان چهار چوبی برای توضیح پدیده به کار می‌رود. قسمت عمده مدارک علمی موجود برای کنترل خرابی‌ها نتایج حاصل از آزمایش‌های بسیار گرانی است که انجام شده است. از آن‌جا که دامنه کار آبی نتایج آزمایشات به فاصله باریکی از آزمایش‌ها محدود می‌شود، لذا ظهور سازه‌های جدید مستلزم آزمایش‌های جدید است. و این کاری است که با

صرف هزینه های زیاد در سراسر جهان ادامه دارد. همه آیین نامه های جهان هر چند سالی بر اساس آزمایشات گران قیمتی که انجام می دهند، دامنه کار برد خود را گسترش می دهند و سعی در جلوگیری از خرابی ها می کنند. همین امر باعث شده تعداد زیادی از کشورها در امور مهندسی خود به کشور های توسعه یافته وابسته شده اند. رنجبران و همکاران پژوهشی شان [۶-۲] در دو دهه اخیر تحقیقات گسترده ای در زمینه پایداری انجام دادند. به دنبال مطالعات بیش از چهل هزار ساعت-فرد، توکل، و امید به حمایت الهی نتایج بسیار مفیدی را بدست آورده اند. یکی از کار های آن ها معرفی فلسفه تغییر حالت (فتح) می باشد. در فتح هر پدیده ای به صورت حرکت از حالت ابتدا (مبداء) به حالت انتها (مقصد) تبدیل می شود. ارتباط بین این دو حالت، توسط توابعی که حاصل مطالعات گسترده محققان واضح فتح است، برقرار می گردد. ساخت فلسفه فتح بر اساس پدیده های طبیعی است، لذا نسبت به فلسفه موجود پشتیبان علم مرسوم دارای کمترین فرض مشکوک است. مثلاً بررسی مکانیک جامدات با فرض دسته بندی خطی و غیر خطی، کشسانی و غیر کشسانی، و غیره انجام انجام می شود. از آن جا که اغلب فرض ها برای ساده و در نتیجه امکان پذیر شدن حل مساله است، و اغلب دلیل محکمی بر انطباق فرض با رفتار واقعی ندارد، لذا نتایج هم همواره مشکل دارند و برای کارایی نیاز مبرم به آزمایش دارند. مثلاً بررسی کمانش بر اساس معادلاتی که اوایلر واضح آن بوده انجام می شود. هزاران رساله، مقاله، و گزارش در اطراف آن گسترش یافته است [۱۰-۷]. با این حال هنوز مبنایی منطقی و دقیق برای محاسبه ظرفیت باربری یک ستون دو سر ساده فولادی وجود ندارد. تولد فتح امید می دهد که حرکت در خط آن به سادگی به نتایج با دقت زیاد منجر می شود. روند گسترش فتح در زیر به اختصار آمده است.

در بررسی سازه های معیوب (ترک دار) یک معادله دیفرانسیل تولید شد که برای حل آن، همانند سازه سالم، تنها نیاز به شرایط مرزی بود [۱]. موفقیت این معادله محققین را بر آن داشت تا در تبدیل آن به معادله عناصر محدود [۱۲، ۱۱] اقدام کنند. مساله با موفقیت همراه نشد، زیرا که روش های مناسب در فرهنگ علمی برای این کار موجود نبودند (روش های موجود کار آن نبودند). ابتدا به صورت آزمایش و خطایی و با محاسبات عددی زیاد [۱۲] و برای تیر هایی با طول های متفاوت و میزان خرابی مختلف ضرایب اصلاحی بدست آمدند. با مطالعه دقیق این ضرایب به صورت توابعی (پدیده) تعریف شدند. توابع پدیده تولد فتح را کلید زدند. بعد ها این توابع با استفاده از منطق ریاضی نیز گسترش یافتند. مثلاً ضریب اصلاحی برای تیری با طول  $L = 0.5$  و نرمی خرابی  $c_s = 1$  به صورت زیر به تابع پایا  $S_R$  تبدیل شد.

$$S_R = 0.11111 = 2/18 = 0.5/(0.5 + 4) = L/(L + 4c_s) = f_s/(f_s + c_s) \quad (1)$$

که در آن نرمی سازه است. به دنبال تولد این تابع و قل دیگر آن یعنی تابع تخریب  $F_R$ ، دو تابع حالت  $O_S$  &  $D_S$  هم تعریف و گسترش یافتند. این توابع امکان بررسی دقیق و ساده پدیده ها را با شیوه جدید، فتح، فراهم ساختند. مطالعه شکل توابع پدیده و مشابهت آن ها با منحنی ظرفیت ستون در آیین نامه طراحی فولاد [۱۳] محققین را به سمت گسترش منحنی های ستون، ظرفیت ستون، بر اساس فتح رهنمون ساخت [۱۴].

هدف از این مقاله گسترش، و صحت سنجی منحنی ظرفیت ستون، پایداری، بر اساس فتح می باشد. این کار با مقدمه و معرفی فتح در بخش یک آغاز شده است. در بخش دو توابع پدیده گسترش و تولد توابع حالت کلید خورده اند. توابع حالت در بخش سوم به صورت توابع ریاضی بر اساس میزان خرابی گسترش داده شدند. بخش چهارم حاوی گسترش منحنی های ظرفیت ستون است. صحت سنجی به صورت مقایسه نتایج با کار دیگران در بخش پنجم و نتایج حاصل از تحقیق در بخش ششم گنجانده شده است. فهرست منابع مورد استفاده در انتهای مقاله آمده است.

## ۲- توابع پدیده

نرمی یک سازه معیوب  $f_{DS}$  بر حسب نرمی سازه سالم  $f_s$  و نرمی عیب  $c_s$  به صورت زیر تعریف می شود.

$$f_{DS} = f_s + c_s \quad (1)$$

به همین ترتیب سختی سازه معیوب  $k_{DS}$  بر حسب سختی سازه سالم  $k_S$  و سختی عیب  $k_D$  در معادله (۲) تعریف شده است .

$$k_{DS} = k_S - k_D \quad (2)$$

واحد بودن حاصل ضرب نرمی و سختی سازه معیوب در معادله (۳) نشان داده می شود.

$$(k_S - k_D)(f_S + c_S) = 1 \quad (3)$$

در این مرحله نرمی و سختی سازه و نرمی عیب معلوم و سختی عیب (برابر کاهش در سختی سازه) مجهول فرض شده و در نتیجه از حل معادله (۳) سختی عیب و سختی سازه معیوب به صورت زیر به دست می آیند.

$$k_{DS} = S_R k_S \quad k_D = F_R k_S \quad (4)$$

که در آن توابع تخریب و پایا به صورت زیر تعریف شده اند.

$$S_R = f_S / (f_S + c_S) \quad F_R = c_S / (f_S + c_S) \quad (5)$$

توجه شود که توابع معرفی شده دقیقاً همان هایی هستند که قبلاً به صورت آزمایش و خطایی تولید شده بودند. با توجه به دامنه بینهایت نرمی سازه  $f_S \in [0 \quad \infty]$  دامنه توابع پدید و نرمی عیب به صورت زیر حاصل می شود.

$$S_R \in [0 \quad 1] \quad F_R \in [0 \quad 1] \quad c_S \in [0 \quad \infty] \quad (6)$$

به منظور آماده سازی برای گسترش بعدی برای مقدار نرمی سازه یک  $f_S = 1$  تابع پایا تابع مبدا  $O_S$ ، تابع تخریب تابع مقصد  $D_S$ ، و نرمی عیب کسر حالت  $R_S$  نامگذاری می شوند. توابع جدید توابع حالت نامیده شده اند. توابع حالت بر حسب کسر حالت در معادله (۷) تعریف می گردند.

$$O_S = 1 / (1 + R_S) \quad D_S = R_S / (1 + R_S) \quad R_S = D_S / O_S \quad (7)$$

دامنه توابع مبدا، مقصد، و کسر حالت به ترتیب برابر دامنه توابع پایا، تخریب، و نرمی عیب در معادله (۶) هستند.

### ۳- توابع حالت

متغیر حالت  $\xi \in [0 \quad 1]$  طوری تعریف شده که مقدار صفر آن برای سازه سالم و مقدار یک آن برای سازه خراب است. با توجه به دامنه تابع هدف شرط انتهایی این تابع بر حسب متغیر حالت به صورت زیر تعریف می شود.

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

که در آن علامت بیشینه و  $\min$  علامت کمینه تابع است. تابع مثلثاتی مناسب با شرایط فوق در معادله (۹) تعریف می شود.

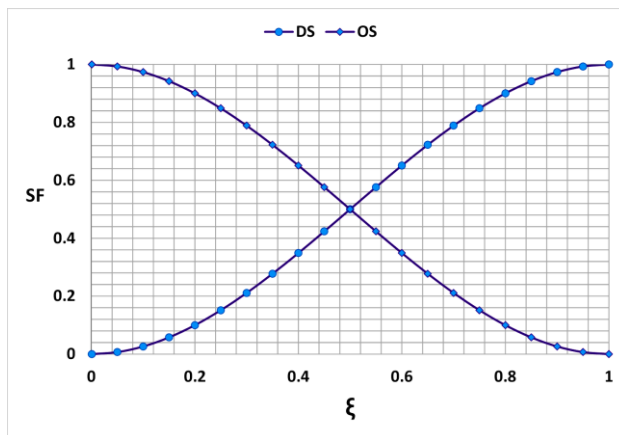
$$O_S(\xi) = (1 + \cos \pi \xi) / 2 \quad (9)$$

به طرق مشابه برای تابع تخریب تابع مثلثاتی زیر تعریف می گردد.

$$D_S(\xi) = (1 - \cos \pi \xi) / 2 \quad (10)$$

توابع مبدا  $O_S$  و تابع هدف  $DS$  بر حسب متغیر حالت در شکل ۱- نشان داده شده اند. با استفاده از معادله های (۹) و (۱۰) کسر حالت به شکل زیر در می آید.

$$R_S(\xi) = (1 - \cos \pi \xi) / (1 + \cos \pi \xi) \quad (11)$$



شکل ۱-توابع حالت

سختی و نرمی سازه و سختی و نرمی عیب به صورت حاصل ضرب مقادیر بعد دار و بی بعد در زیر تعریف می شوند.

$$f_S = f_N F_S \quad k_S = k_N K_S \quad c_S = c_N F_S \quad k_D = c_N K_S \quad (12)$$

با توجه به نسبت قسمت چهارم و دوم معادله (۱۲) و تعریف کسر حالت معادله زیر حاصل می شود.

$$c_N = k_N R_S(\xi) \quad (13)$$

با استفاده از معادله (۱۳) شکل کلی توابع پدیده به شکل زیر در می آید.

$$S_R = O_S / (O_S + k_N^2 D_S) \quad F_R = k_N^2 D_S / (O_S + k_N^2 D_S) \quad (14)$$

#### ۴- منحنی ظرفیت ستون

کسر ظرفیت ستون  $C(\lambda)$  به صورت تابع ضریب لاغری  $\lambda$  و بر حسب ظرفیت فعلی (عضو)  $C_m(\lambda)$  و حد اکثر ظرفیت (مقطع)  $C_S$  به صورت زیر تعریف می شود.

$$C(\lambda) = C_m(\lambda) / C_S \quad (15)$$

ظرفیت متناسب با سختی است. در نتیجه معادله (۱۵) به صورت زیر نوشته می شود.

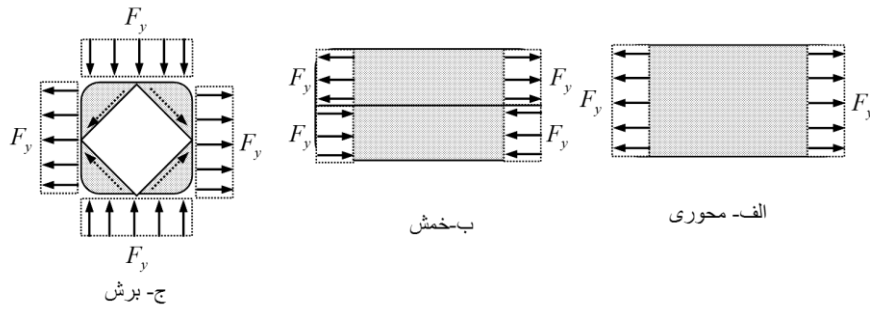
$$C(\lambda) = k_{DS} / k_S \quad (16)$$

با استفاده از قسمت اول معادله (۴) و درج آن در معادله (۱۶) کسر ظرفیت به صورت زیر بیان می شود.

$$C(\lambda) = S_R(\xi, k_N) \quad (17)$$

در شرایط ظرفیت نهایی توزیع تنش تحت اثر نیروی محوری، خمشی، و برشی در شکل ۲- نشان داده شده است. در این شکل همه حالات به نوعی محوری هستند. از آن جا که برای حالت محوری  $k_N = 1$  است در نتیجه در حالت نهایی هم  $k_N = 1$  است. با استفاده از این برداشت معادله (۱۷) به صورت ساده زیر در می آید.

$$C(\lambda) = O_R(\xi) \quad (18)$$



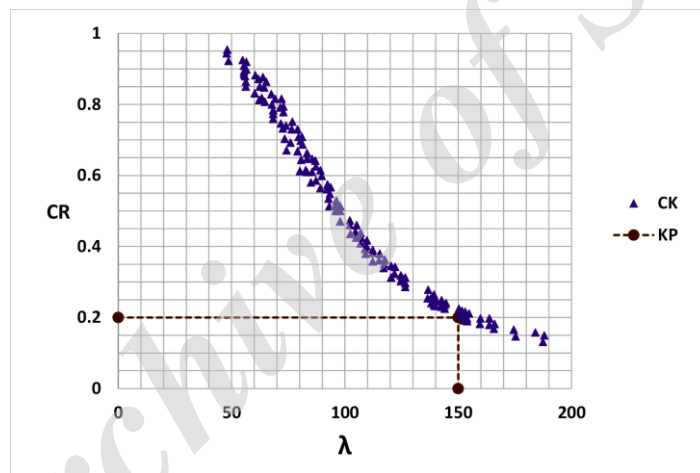
شکل ۲- توزیع تنش در آستانه تخریب

برای کامل کردن کار باید متغیر حالت به ضریب لاغری ربط داده شود. برای این کار یکی از نتایج کانکانامیج [۱۵] در شکل ۳- نشان داده شده است. با استفاده از این شکل و شکل های مشابه یک نقطه کلیدی کشف شد که در آن نسبت ظرفیت نظیر ضریب لاغری ۱۵۰ برابر ۰/۲ است. با محدود کردن کسر ظرفیت بین این نقطه و نقطه شروع رابطه زیر حاصل می شود.

$$\xi = \lambda/150 \quad (19)$$

و بالاخره ظرفیت ستون به صورت معادله (۲۰) در می آید.

$$C(\lambda) = 0.60 + 0.4 \cos \pi \xi \quad (20)$$



شکل ۳- نقاط کلیدی

معادله (۲۰) رابطه کلی برای محاسبه ظرفیت ستون و یا معادله منحنی ستون می باشد. نحوه گسترش نشان می دهد که به اندازه، جنس، و شرایط دیگر ربط ندارد و همه ستون ها را شامل می شود. شرایطی مثل جنس، تغییر درجه حرارت، تغییر شکل اولیه، وجود سوراخ، و غیره را باید در ظرفیت مقطع  $C_s$  وارد نمود. برای نشان دادن صحت و دقت کار در بخش بعد نتایج با نتایج دیگران مقایسه شده است.

### ۵- صحت سنجی

در این بخش منحنی ستون پیشنهادی در مثال های زیر با نتایج دیگران مقایسه شده است.

**مثال - ۱:** در این مثال منحنی ستون مندرج در آیین نامه فولاد آمریکا [۱۳] با معادله (۲۰) مقایسه می شود.

**حل:** ظرفیت محوری ستون در آیین نامه فولاد آمریکا به شکل کسر ظرفیت به صورت زیر بیان شده است.

$$C_A(\lambda) = \begin{cases} 0.658^{F_y/F_e} & \text{for } \lambda \leq 4.71\sqrt{E/F_y} \\ 0.877F_e/F_y & \text{for } \lambda > 4.71\sqrt{E/F_y} \end{cases} \quad (21)$$

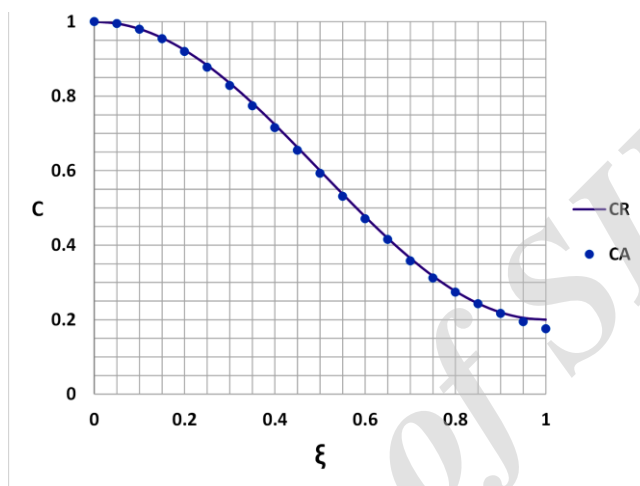
که در آن  $F_y$  تنش خمیری،  $E$  مدول الاستیسیته، و  $F_e$  نیروی اوایلر است که در زیر تعریف شده است.

$$F_e = \pi^2 E / \lambda^2 \quad (22)$$

معادله (۲۱) با استفاده از معادله (۱۹) ساده و به صورت زیر در آمده است.

$$C_A(\xi) = \begin{cases} 0.658^5 \xi^2 & \text{for } \xi \leq 0.6 \\ 0.877/5 \xi^2 & \text{for } \xi > 0.6 \end{cases} \quad (23)$$

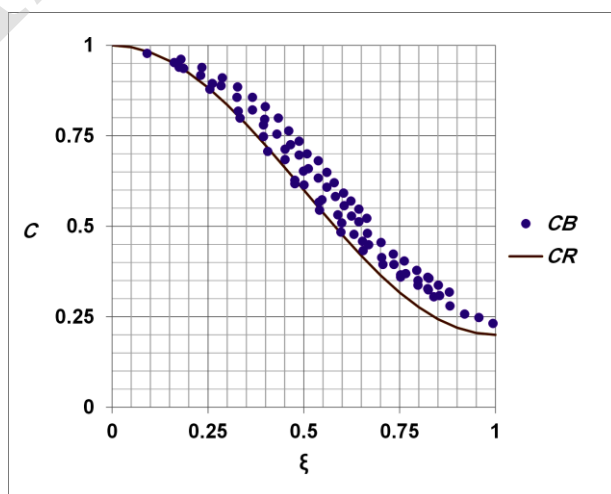
کسر ظرفیت آمریکایی  $CA$  در شکل ۴- با کسر ظرفیت بر مبنای فتح  $CR$  مقایسه شده است. همخوانی عالی نشان دهنده صحت کار است.



شکل ۴- مقایسه کسر ستون فتح با آیین نامه آمریکا

**مثال ۲-** بتینا بداری [۱۶] روش طراحی جدیدی برای مسایل مربوط به پایداری تیر و تیر- ستون های فولادی ارائه نموده است. در این مثال یکی از نتایج او با نتایج فتح مقایسه شده است.

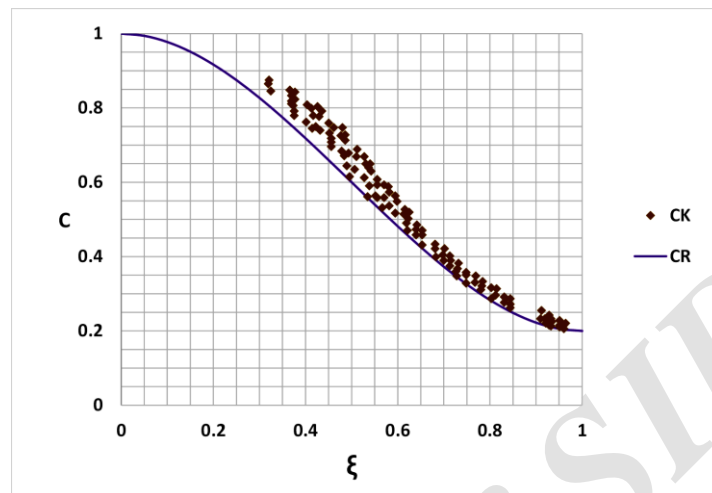
**حل:** بداری تعداد ۱۱۲۰ تیر ساخته شده از فولاد گرم نورد را به کمک نرم افزار آباکوس تحلیل عددی نموده است. نتایج تحلیل عددی در اصلاح روش آرتون-پری به کار گرفته شده است. او حاصل این کار خود را در شکل ۵- رساله دکتری گزارش نموده است. نتایج وی  $CB$  در شکل ۵- با نتایج فتح (معادله (۲۰))  $CR$  مقایسه گردیده است. انطباق عالی نتایج به عنوان تاییدی بر صحت کار است.



شکل ۵- مقایسه ظرفیت کمانش تیر های سرد نورد

**مثال ۳-** کانکانامج [۱۵] در رساله دکتری خود تیرهای سرد نورد در درجه حرارت زیاد را مورد مطالعه قرار داده است. در این مثال یکی از نتایج او با نتیجه فتح مقایسه می شود.

**حل:** وی تعدادی تیر سرد نورد را که فبلا مورد آزمایش قرار داده بود، برای چند ناخالصی به کمک روش عناصر محدود تحلیل عددی نموده است. ظرفیت نهایی تیرها در شکل ۶، ۱۷ رساله با نتایج آیین نامه استرالیا مقایسه نموده است. داده های کانکانامج  $CK$  و فتح  $CR$  در شکل ۶- با هم مقایسه گردیده اند. در این مثال نیز همخوانی بسیار عالی است.



شکل ۶- صحت سنجی فتح برای تیر های سرد نورد

#### ۶- نتیجه گیری

از این تحقیق نتایج زیر حاصل شده است.

۱. مبانی فلسفه تغییر حالت، فتح، گسترش داده شده است. در فتح هر پدیده به صورت حرکت از مبداء به مقصد تعریف می شود. ارتباط بین این حالت ها توسط توابع پدیده بر قرار می شود. برای این کار ابتدا توابع حالت به صورت توابع صریح متغیر حالت گسترش یافته و سپس از روی آن ها توابع پدیده تکمیل شده اند.
  ۲. در محاسبه ظرفیت نهایی تیر و ستون ها وضعیت سالم سازه حالت مبداء و وضعیت تخریب آن به عنوان مقصد تعیین شده است. متغیر حالت با تنظیم ضریب لاغری تعریف می شود. با استفاده از داده های موجود در فرهنگ علمی ضرایب توابع پدیده تعیین و سپس معادله ظرفیت به صورت تابعی مثلثاتی ساده و صریح از متغیر حالت معرفی شده است.
- با استفاده از چند مثال معادله ظرفیت پیشنهادی با منحنی ستون آیین نامه آمریکا، آیین نامه استرالیا، و چند نتیجه محاسبه عددی مقایسه و صحت و دقت فتح به تایید رسیده است.

1. Euler, L.(1759) "Sur la force des colomns." Mem. Acad. R. Sci. Belle Lett. 13, pp. 309-318.
2. Ranjbaran, A. (2010) "Analysis of cracked members: the governing equations and exact solutions", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, 34(B4), pp. 407-417.
3. Ranjbaran, A., Rousta, H., Ranjbaran, M., Ranjbaran, M. (2013) "Dynamic stability of cracked columns; the stiffness reduction method", Scientia Iranica A, 20(1), pp. 57-64.
4. Ranjbaran, A., (2012) "The dynamic stability analysis: application to beam-like structures," Lap Lambert Academic Publishing, Germany.
5. Ranjbaran, A., Rousta, H., (2013) "Interaction diagram for dynamic stability by Laplace Transform", Ned University Journal of Research, Structural Mechanics X (1), pp. 31-38.
6. Ranjbaran, A., Hashemi, M., Behnamianfar, F., (2015) "Dynamic stability analysis of functionally graded material beams", Ned University Journal of Research, XII(3), pp. 95-106.
7. Pi, Y.L., Trahair, N.S. (1997) "Lateral distortional buckling of hollow flange beams.", J. Struct. Eng. ASCE 123, pp. 695-702.
8. Kesti, J., (2000) "Local and distortional buckling of perforated steel wall studs. ", PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Finland.
9. Anapayan, T., (2010) "Flexural behavior and design of hollow flange steel beams.", PhD thesis, School of Urban Developments, Queensland University of Technology, Australia.
10. Du, Y., (2016) "Lateral torsional buckling of wooden beam system.", MSc. thesis, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada.
11. Ranjbaran, A., Ranjbaran, M. (2014) "New finite element formulation for buckling analysis of cracked structures." J. Eng. Mech. 140 (5), pp. 04014014 (1-10).
12. Ranjbaran, A., Rousta, H. (2013) "Finite element analysis of cracked beams: innovative weak form equation." Ned. Univ. J. Res. 11(1), pp.39-46.
13. AISC. (1999) "Load and resistance factor design specification, for structural steel building." American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago.
14. Ranjbaran, A., Ranjbaran, M. (2014) "State-based buckling analysis of beam-like structures." Arch. Appl. Mech. 87(9), pp. 1555-1565.
15. Kankanamge, N. D., (2010) "Behavior and design of cold-formed steel beams at elevated temperature. ", PhD thesis, School of Urban Developments, Queensland University of Technology, Australia.
16. Badar, B. (2016) "New design method for the stability problems of steel beams and Beam-columns.", PhD thesis, Department of Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics.