

منحنی شکنندگی و فلسفه تغییر حالت^۱

عبدالرسول رنجبران^{۱*}، عارف بهاروند^۲، محمد رنجبران^۳، فاطمه رنجبران^۴

۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

۳- دکترای مهندسی شیمی دانشگاه شریف

۴- دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

* ranjbarn@shirazu.ac.ir

ارسال: اسفند ماه ۹۷ پذیرش: خرداد ماه ۹۸

چکیده

زلزله و سایر عوامل طبیعی و مصنوعی سازه ها را مورد تهدید قرار می دهند. بررسی خطر پذیری از راه تهیه منحنی شکنندگی، که احتمال گذشتن سازه از یک سطح خطر معین را نشان می دهد، انجام می شود. نظر به اهمیت موضوع، در چند دهه گذشته تلاش های زیادی در تهیه هر چه بهتر و مطمئن تر منحنی شکنندگی در جهان انجام شده و با قوت هر چه بیشتر در حال انجام است. بهترین روش ساخت این منحنی، توسط نرم افزار هایی انجام می شود که در آن صد ها هزار نمودار شتاب زلزله، طبیعی و مصنوعی، و تحلیل غیر خطی بکار گرفته می شود. علی الرغم همه تلاش ها منحنی حاصل با عدم قطعیت روبرو است. تلاش های نویسندگان حاضر و همراهان پژوهشی آنان در دو دهه گذشته منجر به تولد فلسفه تغییر حالت شد، که در آن هر پدیده به صورت تغییر حالت سازه از وضعیت سالم (مبداء) به وضعیت شکست (مقصد) گردید. بر مبنای استدلال منطقی، و منطق ریاضی، توابع پدیده تولید شدند که تغییر وضعیت را انجام می دهند. توابع پدیده یکی به نام تابع پایا و دیگری به نام تابع تخریب نامیده شدند. توابع پدیده سپس برای پدیده خاص با نام منحنی فارسی، یکی به نام ظرفیت یا اعتماد، و دیگری به نام شکنندگی یا احتمال خیاطی شدند. منحنی فارسی نمایش دهنده عام برای ظرفیت (اعتماد) و خرابی (احتمال) پدیده هاست. در این مقاله به دنبال ارائه مبانی کار، نشان داده می شود که منحنی فارسی (شکنندگی) همان منحنی شکنندگی مرسوم، و خصوصیت سازه است. در انتها منحنی فارسی با مفاهیم مربوطه به عنوان جانشین برای منحنی شکنندگی مرسوم پیشنهاد شده، که هم دقیق است و هم در مقایسه با منحنی مرسوم بدون هزینه است.

کلید واژه: فلسفه تغییر حالت، منحنی فارسی، منحنی شکنندگی، زلزله، سازه.

¹ Fragility curve and the state based philosophy

زلزله، انفجار و عوامل طبیعی دیگر، سلامت سازه ها، مثل ساختمان های عمومی، پل ها، پوشش نیروگاه های اتمی و غیره را تهدید می کنند. به منظور اعتماد، و اطمینان از سلامت سازه های موجود، منحنی هایی به نام منحنی شکنندگی، که احتمال گذشتن وضعیت سازه از یک سطح خطر معین را نشان می دهد، برای سازه تهیه می گردد. مثلاً شرکت های بیمه، مبلغ هزینه های بیمه سازه را بر اساس این منحنی تعیین می کنند. جاهایی که احتمال خطر زیاد باشد، مبلغ بیمه را بالا می برند. نظر به اهمیت موضوع، مساله تهیه منحنی شکنندگی، در سراسر جهان، در چند دهه گذشته از جمله زمینه های فعال پژوهشی بوده و هست [۱-۷]. روش های متنوعی برای ساخت منحنی شکنندگی گسترش یافته است. با توجه به وجود روش های مختلف، بالا رفتن و دستیابی ارزان به توان محاسباتی رایانه ها، و اهمیت موضوع، نرم افزار هایی تهیه و در دسترس قرار گرفته است [۸]. این نرم افزار ها می توانند سازه را تحت اثر صد ها هزار عامل تهدید قرار داده و منحنی شکنندگی برای سازه مورد نظر را با دقت ممکن بسازند. علی الرغم پیشرفت های چشمگیر، در روش های محاسبه، توان محاسباتی، و سایر عوامل موثر در کار، مساله پایان نیافته، و هنوز بعد از بیش نیم قرن تلاش، مساله ساخت منحنی شکنندگی، و روش های محاسبه آن به صورت مساله داغ پژوهشی در جهان باقی مانده است. وقتی سازه تحت اثر زلزله ای با محتوی فرکانسی مشخص قرار می گیرد، فرکانس های نزدیک به فرکانس های طبیعی سازه، به علت تشدید، باعث مقداری خرابی در سازه و تغییر جرم و یا تغییر سختی آن می گردد. در نتیجه فرکانس سازه عوض شده و ارتباط بین زلزله و سازه کمرنگ می شود. به همین علت است که نشان داده شده که حتی وقتی هزاران هزار نمودار شتاب زمانی زلزله، توسط نرم افزار، مورد استفاده قرار گرفته و یک منحنی شکنندگی تهیه می شود، باز منحنی دارای عدم قطعیت است [۹ و ۱۰]. علت دیگر وجود عدم قطعیت انتخاب منحنی لوگ نرمال به عنوان منحنی احتمال است که چون دلیل موثقی بر صحت انتخاب آن نیست، به عدم قطعیت منحنی می افزاید [۱۱]. همین قطع ارتباط بین عامل تهدید و رفتار سازه عامل عدم قطعیت است، و گرنه در اغلب مسایل علمی تعداد انگشت شمار داده مورد اعتماد برای ارائه نتایج مورد اعتماد کافی است. مثلاً ظرفیت نمونه های آزمایش بتن، با متوسط گیری از تعداد محدودی نمونه و خطای معین مورد اعتماد قرار می گیرد. نویسندگان حاضر و همکاران پژوهشی آنها، در دو دهه گذشته، دست به کار شده و تحقیقات گسترده ای را انجام دادند و با صرف بیش از ۶۰ هزار فرد-ساعت، مساله پایداری و شکست سازه ها را مورد بررسی دقیق قرار دادند [۱۲-۲۵]. حاصل کار آن ها منجر به تولد، فلسفه تغییر حالت (فتح) شد، که در آن هر پدیده به صورت تغییر وضعیت دستگاه از حالت سالم (مبداء) به حالت شکست (مقصد) در نظر گرفته می شود. در سایه استدلال منطقی، و منطق ریاضی، توابعی به نام توابع پدیده و توابع حالت، گسترش داده شده که در تغییر وضعیت دستگاه به کار گرفته می شود. تا این مرحله کار صر فابا به صورت منطقی و ریاضی و بدون وابستگی به پدیده خاص انجام گردید. توابع تولید شده به منظور آسان نمودن استفاده در پدیده های خاص در منحنی فارسی گنجانده شده است. منحنی فارسی که به صورت ترکیبی از توابع حالت و سه ضریب هادی، خیاطی شده است. سه دسته منحنی فارسی تولید شدند، و یکی با نام ظرفیت یا اعتماد، و دیگری بانام شکنندگی یا احتمال، و مشتق آنها به نام منحنی چگالی توزیع، معرفی شدند. ضرایب هادی با استفاده از داده های قابل اعتماد، که معمولاً از نتایج آزمایش ها استخراج می شوند، قابل محاسبه اند. گر چه معادلات شکل غیر خطی دارند، ولی به علت ویژگی و زیبایی ذاتی توابع، ضرایب هادی به صورت زیبا، آسان، و دقیق محاسبه می گردند. زیبایی کار به حدی است که اگر کار حاضر انقلاب علمی نامیده شود چیزی به گزاف نیست [۱۷-۱۹].

در این مقاله پس از معرفی فتح و مرور بر تحقیقات زمینه در بخش اول، در بخش های بعد ابتدا به گسترش مبانی، معادلات، و توابع پرداخته شده، و سپس، ارتباط بین فتح و منحنی شکنندگی بیان می گردد. راست آزمایی از طریق مقایسه نتایج با کار دیگران انجام شده، و بحث و نتیجه گیری به دنبال خواهد آمد. فهرست منابع مورد استفاده بخش پایانی مقاله را تشکیل می دهد.

۲- مبانی منطقی و ریاضی فلسفه تغییر حالت

هر دستگاه با شناسه ای رفتاری به نام سختی شناخته می شود که در مبداء دارای مقدار محدود k_S و در مقصد برابر صفر است. در هر مرحله از تغییر، سختی دستگاه به اندازه سختی تغییر k_C کم می شود. معکوس سختی دستگاه برابر نرمی است که در مبداء دارای مقدار محدود f_S و در مقصد بینهایت است. در هر مرحله از عیب، به اندازه نرمی تغییر c_S به نرمی دستگاه افزوده می گردد. رابطه بین نرمی و سختی سازه تغییر کرده در معادله (۱) نشان داده شده است.

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

سختی تغییر و سختی دستگاه تغییر کرده $k_{CS} = k_S - k_C$ در معادله (۲)، با حل معادله (۱) برای k_C برحسب عوامل دیگر، بدست آمده است.

$$k_{CS} = S_R k_S \quad k_C = F_R k_S \quad (2)$$

که در آن F_R تابع تغییر و S_R تابع پایا است که در معادله (۳) تعریف شده اند. مجموعه دو تابع، توابع پدیده نامیده شدند.

$$S_R = \frac{f_S}{f_S + c_S} \quad F_R = \frac{c_S}{f_S + c_S} \quad (3)$$

نرمی دستگاه بر حسب مقدار بی بعد f_N و مقدار بعد دار F_S و نرمی تغییر بر حسب مقدار بی بعد c_N و مقدار بعد دار F_S در معادله (۴) آمده است. با جا گذاری معادله (۴) در معادله (۳) توابع پدیده به صورت بی بعد مندرج در معادله (۵) در می آید:

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

$$S_R = \frac{f_N}{f_N + c_N} \quad F_R = \frac{c_N}{f_N + c_N} \quad (5)$$

به منظور توسعه بعدی، توابع پدیده به صورت زیر برای مقدار $f_N = 1$ خیاطی و با اسم توابع حالت نامگذاری شده اند. تابع پایا به تابع مبداء O ، تابع تغییر به تابع مقصد D ، و تابع نرمی تغییر به نسبت حالت R تبدیل شده اند. حاصل در معادله (۶) نمایش داده شده است.

$$O = \frac{1}{1+R} \quad D = \frac{R}{1+R} \quad (6)$$

با توجه به تعریف توابع حالت، حدود تغییرات آن ها در معادله (۷) نشان داده شده است.

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

شاخص عیب که در مبداء صفر و در مقصد یک تعریف شده است، با متغیر حالت $\xi \in [0 \quad 1]$ ، نشان داده شده است. در نتیجه توابع حالت به صورت توابعی از متغیر حالت با مقادیر مرزی، و به صورت معادله (۸) در می آید، که در آن \max علامت بیشینه و \min علامت کمینه است. بدنبال مطالعه و بررسی ممتد، توابع مناسب به صورت معادله (۹) حاصل شده است. توجه داشته باشید که این توابع متوسط یک تابع به صورت چند جمله ای و یک تابع به صورت مثلثاتی است.

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

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

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

سختی دستگاه بر حسب مقدار بی بعد k_N و مقدار بعد دار K_S و مقدار سختی تغییر بر حسب مقدار بی بعد c_N و مقدار بعد دار K_S تعریف و در معادله (۱۰) درج شده است. نسبت این دو، با توجه به تعریف، برابر نسبت حالت قرار داده و در نتیجه نرمی تغییر به صورت مضربی از نسبت حالت تعریف و در معادله (۱۱) نشان داده شده است.

$$k_S = k_N K_S \quad k_C = c_N K_S \quad (10)$$

$$k_C/k_S = c_N/k_N \quad c_N = k_N R \quad (11)$$

با جاگذاری معادله (۱۱) در معادله (۵)، شکل عمومی توابع پدیده به صورت معادله (۱۲) حاصل می گردد.

$$S_R = \frac{O}{O + k_N^2 D} \quad F_R = \frac{k_N^2 D}{O + k_N^2 D} \quad (12)$$

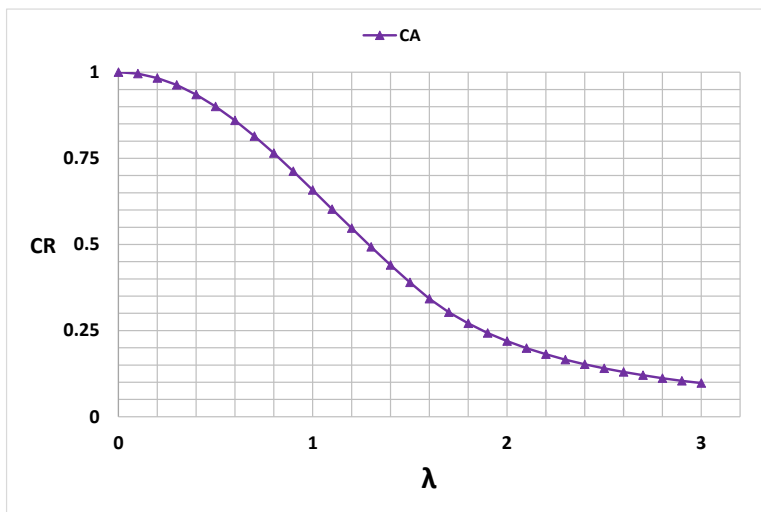
نظر به این که ضریب k_N فقط برای دستگاه های خاص قابل محاسبه است، لذا معادله به صورت عام در معادله (۱۳) نشان داده می شود که در آن ضرایب Q_M و P ضرایب هادی هستند که با استفاده از داده های معتبر و به طریقی که در بخش های بعد توضیح داده می شود، تعیین می گردند.

$$S_R = \frac{O^P}{O^P + Q_M D^P} \quad F_R = \frac{Q_M D^P}{O^P + Q_M D^P} \quad (13)$$

تا این مرحله مبانی بنیادین فتح، بر مبنای منطقی، منطق ریاضی و بدون فرض خاص تولید شد. در بخش بعد از این مبانی استفاده شده و فتح برای بررسی پدیده های خاص خیاطی می شود.

۳- منحنی فارسی

شاید با منحنی فرانسوی، که برای ترسیم شکل هایی تولید شده که رسم آن ها به کمک وسایل مرسوم ممکن نیست، آشنا باشید. دقت در گسترش مبانی فتح نشان می دهد که این می تواند همان نقش منحنی فرانسوی را، منتها در تحلیل پدیده های بی که اغلب با روش های سنتی دارای عدم قطعیت قابل توجه اند، در دنیای علم داشته باشد. با توجه به این که عمده گسترش فتح در خطه فارس انجام شده نام "منحنی فارسی" برای آن انتخاب شد. مبانی فتح به نحوی که در این بخش شرح داده می شود به صورتی زیبا در قالب سه معادله تجمیع و با نام منحنی فارسی نام گذاری شده است.



شکل ۱- منحنی ظرفیت ستون فولادی در آیین نامه آمریکا

نتایج بررسی پدیده‌ها در شاخه‌های مختلف علم (علمی)، مثل شکل ۱، به صورت منحنی‌های دارای دو محور نشان داده می‌شود، که محور قائم نمایش دهنده رفتار پدیده، که بین صفر و یک قابل تنظیم است، و محور افقی متغیر شناسه پدیده است که معمولاً محدودیت ندارد. مثلاً در شکل ۱ محور قائم ظرفیت باربری ستون در آیین نامه آمریکا C_A و محوری افقی ضریب لاغری نسبی λ ، به عنوان شناسه ستون، می‌باشد. در فتح نیز محور قائم بین صفر و یک است و می‌تواند مستقیماً با علمی مقایسه شود. به منظور انطباق محور افقی فتح با محور افقی علمی، نقطه انتهایی $T(\lambda_T, C_T)$ و نقطه ابتدا $O(\lambda_0, 1)$ ، برای شناسه انتخاب و به عنوان مقصد و مبدا فتح منظور می‌شود. معادله (۱۴) این هماهنگی را نشان می‌دهد.

$$\xi = (\lambda - \lambda_0) / (\lambda_T - \lambda_0) \quad (14)$$

حال اگر علاوه بر نقطه انتها $T(\lambda_T, C_T)$ و نقطه ابتدا $O(\lambda_0, 1)$ ، یک نقطه در وسط $M(0.5(\lambda_T - \lambda_0), C_M)$ و یک نقطه میانی بین سه نقطه پیشین $N(\lambda_N, C_N)$ ، به عنوان نقاط کلیدی، انتخاب شود، محور قائم فتح C_R نظیر علمی، که از نقاط کلیدی می‌گذرد، در معادله (۱۵) نشان داده شده است، که در آن متغیرهای هادی در معادله (۱۶) محاسبه شده‌اند. سادگی محاسبات از ویژگی‌های فتح است.

$$C_R = \frac{O^P + C_T Q_M D^P}{O^P + Q_M D^P} \quad (15)$$

$$Q_M = \frac{1 - C_M}{C_M - C_T} \quad Q_N = \frac{1 - C_N}{C_N - C_T} \quad P = \frac{\text{Log}(Q_N / Q_M)}{\text{Log}(D(\xi_N) / O(\xi_N))} \quad (16)$$

قل دیگر منحنی C_R ، منحنی شکنندگی E_R است، که در معادله (۱۷) بر حسب ظرفیت، و یا به طور مستقل در معادله (۱۸)، تعریف شده است. محاسبه منحنی شکنندگی می‌تواند بر حسب منحنی ظرفیت و از معادله (۱۷) بدست آید، و یا مستقیماً با استفاده از انتخاب نقاط کلیدی، مثل ظرفیت، تعیین شود. در حالت دوم، متغیرهای کلیدی برای این تابع با استفاده از مختصات نقاط کلیدی و مطابق معادله (۱۹) تعیین می‌گردند. نقاط کلیدی، که از داده‌های معتبر انتخاب می‌شوند، عبارتند از نقطه شروع $O(\lambda_0, 0)$ ، نقطه انتها $T(\lambda_T, E_T)$ ، نقطه وسط $M(0.5(\lambda_T - \lambda_0), E_M)$ ، و نقطه میانی $N(\lambda_N, E_N)$.

$$E_R + C_R = 1 \quad (17)$$

$$E_R = \frac{E_T Q_M D^P}{O^P + Q_M D^P} \quad (18)$$

$$Q_M = \frac{E_M}{E_T - E_M} \quad Q_N = \frac{E_N}{E_T - E_N} \quad P = \frac{\text{Log}(Q_N / Q_M)}{\text{Log}(D(\xi_N) / O(\xi_N))} \quad (19)$$

سومین منحنی که بیشتر در محاسبات آماری مطرح است، منحنی چگالی f_R است که در معادله (۲۰) آمده است که در آن دو ابروی بالای راست، علامت مشتق نسبت به متغیر حالت ξ است. رابطه بین این منحنی و منحنی‌های قبل در معادله (۲۱) گنجانده شده است.

$$f_R = PD^{(1)} S_R F_R / DO \quad (20)$$

$$C_R^{(1)} = -f_R \quad E_R^{(1)} = +f_R \quad (21)$$

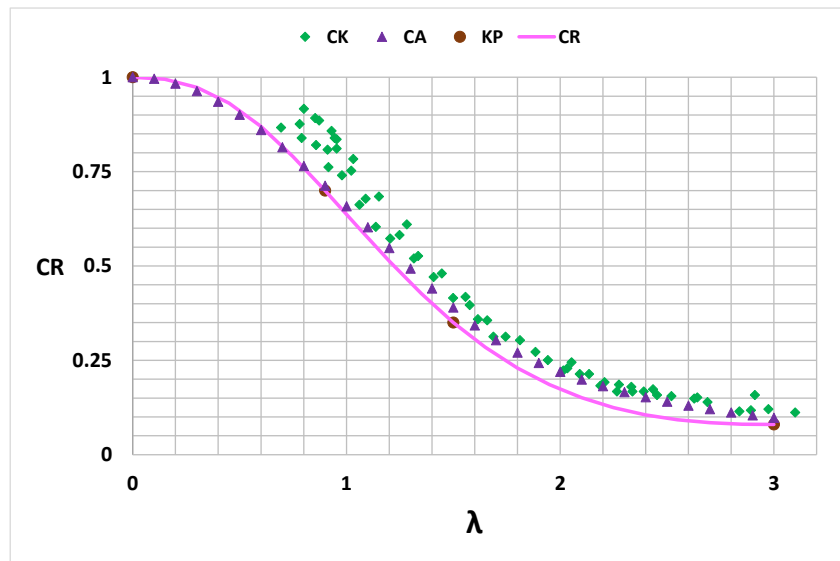
در این جا گسترش و تکمیل مبانی فتح و ساخت منحنی فارسی به پایان می‌رسد. در بخش بعد کاربرد آن در منحنی شکنندگی مرسوم برای مطالعه اعتماد پذیری به نمایش گذاشته می‌شود.

۴- محاسبه متغیر های کلیدی با استفاده از ظرفیت باربری اعضای فولادی

در بخش های قبل نشان داده شد که منحنی فارسی نشان دهنده عام ظرفیت و یا شکنندگی است، و برای تکمیل، وجود مختصات سه نقطه کلیدی قابل اعتماد ظرفیت و یا شکنندگی عام، بر گرفته از نتایج آزمایشگاهی و غیره، کافی است. یکی از منابع موثق در دسترس، ظرفیت باربری ستون های فولادی است، که در صد سال گذشته آزمایش های زیادی روی آن ها انجام شده، و رفتار آن ها با دقت بالایی شناخته شده است، و لذا برای تعیین نقاط کلیدی از آنها استفاده می شود. لازم به ذکر است که مبانی فتح نشان داده که پدیده شکست (تغییر)، پدیده ای عام است، و در نتیجه استفاده از داده های تغییر یک پدیده، برای استفاده در سایر پدیده ها منطقی است. در ادامه ظرفیت تیر های ساخته شده از فولاد سرد نورد CK [۲۶]، که به منظور نشان دادن عام بودن فتح اضافه شده، و ظرفیت ستون های فولادی مطابق آیین نامه فولاد آمریکا CA [۲۷] در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی نقاط کلیدی انتخاب، متغیر های هادی محاسبه، و معادله منحنی فارسی پیشنهادی در معادله (۲۲) نمایش داده شده است. منحنی فارسی CR در شکل ۲ با داده ها مقایسه شده است. قضاوت به عهده شماست.

$$O(0 \ 1) \ N(0.6 \ 0.86) \ M(1.5 \ 0.4) \ T(3 \ 0.10) \quad (22)$$

$$Q_M = 2.00 \quad P = 1.0 \quad C_R = (1 - 0.8D)/(1 + D)$$



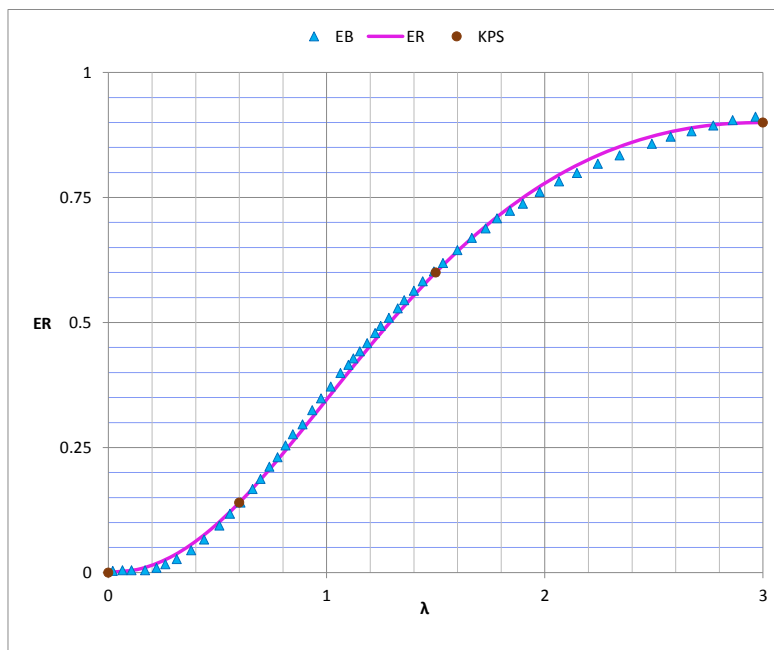
شکل ۲- انتخاب نقاط کلیدی

۵- تهیه منحنی شکنندگی

زلزله به سازه ها خسارت وارد می کند. به منظور پیش بینی و برنامه ریزی برای کم کردن خسارت ها، برای سازه منحنی ای به نام منحنی شکنندگی تهیه می شود، که در آن محور افقی نمایش دهنده عامل تغییر حالت مثلاً شتاب بیشینه زلزله، و محور قائم آن احتمال گذشتن از یک سطح خطر مشخص است. روال مرسوم برای این کار این است که، سازه تحت اثر هزاران شتاب نگاشت زلزله قرار گرفته، حالات گذشتن از سطح خطر تعیین شده، و سپس با فرض یک منحنی احتمال ترجیحی، عموماً لوگ نرمال، داده های بدست آمده به منحنی احتمال شکنندگی تبدیل می شود. روش های بسیاری در چند دهه گذشته برای این کار پیشنهاد شده است. علی الرغم بکارگیری تعداد زیاد شتاب نگاشت ها، منحنی های حاصل دارای عدم قطعیت بسیار است، در نتیجه تهیه منحنی های شکنندگی در صدر محاسبات مرتبط با زلزله قرار دارد. با وجود رایانه ها امکان سریع محاسبات فراهم

شده، در نتیجه در دهه گذشته نرم افزار هایی تهیه شده که منحنی های شکنندگی را از روی نتایج میلیون ها محاسبه تاریخیچه زمانی تحت اثر زلزله بدست می آورند. در شکل ۳، EB یکی از این منحنی هاست که بر اساس میلیون ها شتاب نگاشت تهیه شده است [۸]. با این حال نشان داده شده [۱۰] که این منحنی هم دارای عدم قطعیت است. قسمتی از دست آوردهای نویسندگان حاضر در مورد منحنی شکنندگی بدنبال می آید. منحنی دوم فارسی E_R ، که سختی از دست رفته را نشان می دهد، همان منحنی شکنندگی است. در واقع وقتی زلزله به سازه وارد می شود در آن خسارت قطعی وارد می کند که E_R نمایش دهنده آن است، منتها در روش های مرسوم چون شروع کار با استفاده از منحنی های احتمال بوده، لذا شکنندگی به صورت احتمال مطرح شده است. نقاط کلیدی، متغیر های هادی، و معادله منحنی فارسی پیشنهادی در معادله (۲۳) نمایش داده شده است. منحنی فارسی E_R در شکل ۳ با داده ها مقایسه شده است.

$$\begin{aligned} O(0 \ 0) \quad N(0.6 \ 0.14) \quad M(1.5 \ 0.60) \quad T(3 \ 0.90) \\ Q_M = 2.00 \quad P = 1.0 \quad E_R = (1.80D)/(1 + D) \end{aligned} \quad (23)$$



شکل ۳- مقایسه منحنی شکنندگی مرسوم با منحنی فارسی

همخوانی خوب نتایج مبین صحت فتح است. اندک تفاوت موجود، بین نتایج فتح و مرسوم، یکی به این علت است که در روش مرسوم منحنی ها از بین نقاط می گذرد، و دیگری حاصل وجود عدم قطعیت در روش های مرسوم است. در حالی که در فتح با هوشیاری محل منحنی طوری انتخاب می شود که عدم قطعیت را حذف کند. به همین علت است که محل منحنی فارسی در ظرفیت زیر داده ها، و در شکنندگی بالای داده ها انتخاب شده است. در این مثال صرفه جویی هزاران برابری همراه با دقت و سهولت مشاهده می شود. با توجه به دقت و منطق پشتیبان فتح، منحنی شکنندگی پیشنهادی (منحنی عام شکنندگی که در معادله (۲۳) تعریف شده است)، به جای منحنی شکنندگی مرسوم توصیه می شود. توجه داشته باشید که در منحنی شکنندگی فارسی محور افقی ضریب لاغری نسبی سازه است. نظیر یک ضریب لاغری روی محور افقی، محور قائم E_R نشان دهنده کسر سختی از دست رفته است، یعنی کسر E_R ظرفیت سازه تحت تاثیر عامل تهدید موثر نیست، و در نتیجه هر چه مقدار E_R بیشتر باشد، بازده سازه در مقابل تهدید کمتر است. به این ترتیب

منحنی شکنندگی پیشنهادی نه تنها ساده، دقیق، و قابل اعتماد است، بلکه ویژگی عام دارد و برای همه تهدید ها، مثل زلزله، سیل، انفجار و غیره می تواند بکار رود.

۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر خلاصه می شود. بر پایه استدلال منطقی، و منطق ریاضی، توابع حالت، و توابع پدیده تولید شدند، و برای کار بری در مورد پدیده های خاص در قالب منحنی فارسی گنجانده شدند. توابع تولید شده به عنوان مبنای، فلسفه تغییر حالت (فتح) معرفی شدند. در فتح هر پدیده به عنوان تغییر وضعیت دستگاه از حالت مبداء به حالت مقصد در نظر گرفته می شود. مبنای فتح ویژگی عام دارد و برای تغییر حالت همه پدیده ها می تواند بکار رود. در این مقاله فتح، برای تولید منحنی شکنندگی، که احتمال گذشتن وضعیت دستگاه از یک سطح خطر، فرو ریزش را نشان می دهد، بکار گرفته شد. با استفاده از ویژگی فتح نشان داده شد که منحنی عام شکنندگی، که تغییر حالت عام دستگاه ها را نشان می دهد، می تواند به جای منحنی شکنندگی مرسوم، بکار گرفته شده و هزینه ها را هزاران هزار برابر کاهش داده و تقریباً به صفر می رساند. منحنی شکنندگی پیشنهادی، با برداشت جدید، برای بررسی خرابی دستگاه در برابر همه تهدید ها، مثل زلزله، سیل، انفجار، و غیره، به طور موثر توصیه می شود. طبق روال معمول، نتایج کار با نتایج موجود در فرهنگ علمی مقایسه و مورد تایید قرار گرفت.

۷- مراجع

1. Singhal A., Kiremidjian AS. (1997). A method for earthquake motion-damage relationships with application to reinforced concrete frames. NCEER report, NCEER-97-0008, State University of New York, at Buffalo, USA.
2. Erberik, MA., and Elnashai, AS. (2004). Fragility analysis of flat-slab structures. *Engineering Structures*, 2004; 26: 937-948.
3. Jeong, SH., Mwafy, AM., Elnashai AS. (2012). Probabilistic seismic performance assessment of code-compliant multi-story RC buildings. *Engineering Structures*. 2012; 34: 527-537.
4. Moharrami, H., and Amini, MA. (2014). Seismic vulnerability assessment of process towers using fragility curves. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2014; 23(8): 593-603.
5. Argyroudis S., Tsinidis G., Gatti F., Ptilakis K. (2014). Seismic fragility curves of shallow tunnels considering SSI and aging effects. 2nd Eastern European Tunneling Conference , Tunneling in a Challenging Environment, 28 September to 01 October 2014, Attens, Greec.
6. Avsar, A. (2015). Fragility based seismic vulnerability assessment of ordinary highway bridges in Turkey. PhD Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, 2015.
7. Mavrouli O., Fotopolou S., Ptilakis K., Zuccaro G., Corominas J., and 6 more. (2014) Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2014; 73(2): 265-289.
8. Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Irevolino, I., and Vamvastikos, A. (2017). SPO2FRAG: software for seismic fragility assessment based on static pushover. *Bull Earthquake Eng.* 15: 4399-4425.
9. Ugurhan, B., Baker, JW., and Deierlein GG. (2014). Uncertainty estimation in seismic collapse assessment of modern reinforced concrete moment frame buildings. *Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK, 2014.
10. Lallemand D. and Kiremidjian, A. (2017). Accounting for uncertainty in earthquake fragility curves. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago Chile.
11. Sudret B., Mai G., Konakli K. (2017). Assessment of the lognormality assumption of seismic fragility curves using non-parametric representations. Pp. 1-34. *Risk, Safety and Uncertainty Quantification Stefano-Francini-Platz 5, CH-8093 Zurich.*

12. Ranjbaran A, and Rousta H. (2013). Finite element analysis of cracked beams innovative weak form equations. NED University Journal of Research, 2013; 10(1): 39-46.
13. Ranjbaran A, Rousta H, Ranjbaran Mo, Ranjbaran Ma, Hashemi M, and Moravej MT. (2013). A necessary modification for the finite element analysis of cracked members: detection, construction, and justification. Arch. Appl. Mech. 2013; 83:1087-1096.
14. Ranjbaran A., and Ranjbaran M. (2014). New finite-element formulation for buckling analysis of cracked structures. J. Eng. Mech., 2014; 140(5): 04014014(1-10), ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000734.
15. Ranjbaran A., Ranjbaran M. (2016). State functions the milestone of fracture, Archive of Applied Mechanics, 2016; 86: 1311-1324. DOI 10.1007/s00419-015-1115-3.
16. Ranjbaran A, and Ranjbaran M. (2017). State-based buckling analysis of beam-like structures. Archive of Applied Mechanics, 2017; 87: 1555-1565. DOI 10.1007/s00419-017-1273-6.
17. Ranjbaran A., Ranjbaran M., and Ranjbaran F. (2019). State based fracture mechanics. Journal of Science and Engineering Elites. 1397; 3(6): 79-87. (In Persian).
18. Ranjbaran A., Ranjbaran M., and Ranjbaran F. (2019). State based stability analysis. Journal of Science and Engineering Elites. 1397; 3(6): 106-113. (In Persian).
19. Ranjbaran A., Ranjbaran M., and Ranjbaran F. (2019). Dynamic stability analysis of structures: new perspective. Journal of Science and Engineering Elites. 1397; 3(6): 114-121. (In Persian).
20. Ranjbaran A., Ranjbaran M., Ranjbaran F., Negahdar Haghighat N., Masoudi M. J. (2019). Persian curves: the other milestone for science. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 31-39. (In Persian).
21. Ranjbaran A., Ranjbaran M., Masoudi M. J. (2019). Construction and management of steel column design curve by the state based philosophy. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 53-58. (In Persian).
22. Ranjbaran A., Ranjbaran M., Negahdar Haghighat N. (2019). Construction and management of steel beam design curve by the state based philosophy. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 65-72. (In Persian).
23. Ranjbaran A., Ranjbaran M., Ranjbaran F. (2019). A universal design code for steel members. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 80-88. (In Persian).
24. Ranjbaran A., Baharvand A., Ranjbaran M., Ranjbaran F. (2019). A universal probability curve. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 100-110. (In Persian).
25. Ranjbaran A., Ranjbaran M., Ranjbaran F. (2019). A universal method for analysis of infectious diseases. Journal of Science and Engineering Elites. 1398; 4(1): 124-132. (In Persian).
26. Kankanamge N. D. (2010). Structural behavior and design of cold-formed steel beams at elevated temperatures. [PhD, thesis](#), Queensland University of Technology, 2010.
27. AISC, (2005). Specification for structural steel buildings. Chicago, American Institute of Steel Construction.