18th International Power System Conference

۱۸ کنفرانس بین‌المللی برق

98-F-PTL-771

آنالیز اعتمادپذیری در برج‌های خطوط انتقال نیرو

مژده جمشیدی - شهرام اردبیلی اصل

mjamshidi@nri.ac.ir - sardabili@nri.ac.ir

پژوهشگاه نیرو- گروه سازه‌های انتقال و توزیع

ایران

واژه‌های کلیدی : قابلیت اعتماد، شاخص اعتمادپذیری، شبیه‌سازی، تابع حالت حدی، احتمال شکست

چکیده

در حین فرآیند طراحی، ساخت، اجرا و عملکرد یک سازه،عدم قطعیتهای بسیاری وجود دارد.با این حال مهندسین باید طرحهای خود را به گونه ای توسعه دهند که اطمینان کافی در ضمن توجه به مسائل اقتصادی حاصل شود.آنالیز اعتماد پذیری سازه ها یکی از معتبرترین راه حلها برای ارزیابی احتمالاتی رفتار سازه است. در این روش مدلهای احتمالاتی مناسبی به هر یک از متغیرهای موجود در مسئله نسبت داده می‌شود و هدف از این نوع آنالیز کمیت گذاری ایمنی سازه است .

در این مقاله روشهای مختلف آنالیز قابلیت اعتماد سازه‌ها معرفی شده و مزایا و معایب هر یک برشمرده شده است. با توجه به اهمیت سازه های خطوط در بخش انتقال پیشنهاد می‌شود اعتمادپذیری برجهای انتقال نیروی موجود در صنعت برق بررسی وارزیابی شود.

۱- مقدمه

در فرآیند طراحی، ساخت، اجرا و در طول عمر سازه با نااطمینانهای متعددی مواجه هستیم، تمام اجزاء این فرآیند درگیر نااطمینانیهای مختلفی هستند که به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند.

۱- دلایل طبیعی

۲- دلایل انسانی

دلایل طبیعی به علت غیر قابل پیش بینی بودن بارهایی مانند باراد، زمین لرزه، برف، یخ، فشار آب و بار زنده می‌باشند. علت دیگر این نااطمینانیهای طبیعی، رفتار مکانیکی موادی است که در ساخت سازه از آنها استفاده می‌شود. دلایل انسانی شامل انحرافات عمدی و غیر عمدی از طرح بهینه می‌باشد. از جمله میتوان به تقریبها، خطاهای محاسباتی و کمبود دانش فنی اشاره نمود.

به دلیل وجود این عدم قطعیتها، بارها و مقاومتها، مقادیر تصادفی هستند بنابراین مهندسین همواره به

Archive of SID

www.SID.ir

دنبال راههای مختلفی برای برخورد با این مسئله بوده‌اند. این فعالیتها به سه دوره عمده تقسیم می‌شوند:

– دوره اول ، استفاده از مفهوم ضرائب ایمنی

– دوره دوم ، استفاده از ضرائب جزئی بار و مقاومت

– دوره سوم ، استفاده از آنالیز قابلیت اعتماد سازه‌ها

۲- تعریف اعتمادپذیری

همانگونه که پیش‌تر بیان شد در طراحی یک سازه نیروهای نامتعین نقش اساسی دارند، بنابراین هیچ‌گاه، اطمینان مطلق قابل دسترسی نیست. لذا سازه‌ها باید بگونه‌ای طراحی شوند که احتمال شکست در آنها مشخص باشد. باید متذکر شد که واژه شکست لزوماً به معنی فروریختن نبوده، بلکه بدین معنی است که سازه به منظور تامین هدف طرح، قابل بهره‌برداری نیست.

طراحی بر اساس اعتمادپذیری سازه، در واقع برآورده ساختن هدف طرح برای دوره طراحی مشخصی است.

چند سوال اساسی در این بحث مطرح است :

۱- چگونه میتوان امنیت یک سازه را اندازه‌گیری کرد؟

امنیت سازه با پارامترهایی مانند اعتمادپذیری و یا احتمال شکست تعیین می‌شود.

۲- تا چه اندازه امنیت برای سازه کافی است؟

همانگونه که قبلاً ذکر شد، طرح یک سازه امن بصورت مطلق غیر ممکن است. هر سازه یک احتمال شکست غیر صفر دارد، همواره میتوان سازه‌ای طراحی نمود که احتمال شکست در آن کاهش یابد ولیکن افزایش امنیت بیش از سطح بهینه معین، همیشه اقتصادی نیست، این سطح امنیت بهینه باید مشخص گردد.

۳- چگونه یک طراح به سطح امنیت بهینه دست می‌یابد.

زمانیکه سطح امنیت بهینه تعیین شود، دستیابی به اعتمادپذیری مورد نظر از طریق توسعه آئین نامه‌های طراحی بر پایه احتمالات تحقق می‌یابد. EPRI ، ACSE و IEC توصیه‌نامه‌هایی برای طراحی بر پایه اعتمادپذیری (RBD)[1] ارائه نموده‌اند.

موضوع بسیار مهم نشان دادن میزان اعتمادپذیری یک سازه بصورت عددی است که قابل مقایسه با معیارهای از پیش تعیین شده باشد. عموماً برای نشان داده اعتمادپذیری سازه از یک شاخص اعتمادپذیری (Relibility Index) استفاده می‌نمائیم. این شاخص به منظور مقایسه اعتمادپذیری سازه‌های مختلف و یا طرح یک سازه برای یک شاخص معین براحتی قابل استفاده است.

مسائل اقتصادی نقش تعیین کننده‌ای در تصمیم‌گیری برای پذیرش یک طرح دارند و لیکن مطمئناً یک سازه با قیمت تمام شده پائین‌تر را بدون توجه به بحث اعتمادپذیری، نمیتوان به عنوان طرح برتر انتخاب نمود.

زمانی دو سازه با یک کاربرد معین از نظر اقتصادی قابل مقایسه هستند که شاخص اعتمادپذیری برابر داشته باشند. حد قابل قبول شاخص اعتمادپذیری یک سازه را آئین نامه‌ها و سیاست‌گذاریهای کارفرما برای طراح مشخص می‌نماید.

با توجه به اینکه تا کنون توجهی به بحث اعتمادپذیری در مورد سازه‌های خطوط انتقال نیرو نشده است. لازم است دکلهای مورد استفاده در خطوط انتقال از این زاویه مورد بررسی قرار گیرند.

۳- تاریخچه

اولین آئین نامه شناخته شده برای ساختمان در مزوپتامیا استفاده شده است. این آئین نامه توسط

[1] Relibility Based Design

www.SID.ir

Archive of SID

حمورابی پادشاه بابل (وفات در سال ۱۷۵۰ پیش از میلاد) تهیه شد.

اولین فرمول ریاضی امنیت سازه را نیز میتوان به Wirezbick (1936), Streletzki(1947), Mayer(1926) نسبت داد. آنها بیان کردند که پارامترهای بار و مقاومت متغیرهای تصادفی هستند و بنابراین برای هر سازه یک احتمال خرابی وجود دارد. کاربرد عملی آنالیز اعتمادپذیری توسط کارهای بنیادین Lind و Cornell در اواخر دهه 1960 و اوایل دهه 1970 امکان‌پذیر شد.

Lind و Hasofer یک مشخصه از شاخص اعتمادپذیری را در سال 1974 فرموله کردند. روش عددی کارآمد برای محاسبه این شاخص در سال 1978 توسط Rackwitz و Fiessler فرموله شد.

در اواخر دهه 1970 روش اعتمادپذیری به رشد کامل رسید و هم‌اکنون برای کاربردهای عملی در دسترس است.

این روش برای اولین بار در تدوین آئین نامه‌های جدید مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- حالات حدی

قبل از شروع آنالیز اعتمادپذیری سازه باید مشخص کنیم که واژه‌های اطمینان و اعتمادپذیری چگونه تعریف می‌شوند. ابتدا به توضیح حالت حدی می‌پردازیم.

یک حالت حدی مرز بین عملکرد مطلوب و نامطلوب سازه است. این مرز غالباً بصورت ریاضی توسط یک تابع حالت حدی یا تابع وضعیت بیان می‌شود.

در آنالیز اعتمادپذیری سازه سه نوع حالت حدی مورد توجه است.

۱- حالت حدی نهایی (ULS_S) که عموماً مربوط به فقدان ظرفیت باربری است. مانند تشکیل مفصل پلاستیک بتن در فشار، کمانش جان و فقدان پایداری کلی.

۲- حالت حدی سرویس دهی (SLS_S)، مربوط به تخریب تدریجی، آسایش استفاه کننده یا هزینه نگهداری است. این عوامل ممکن است بصورت مستقیم به یکپارچگی سازه مربوط نباشند. مانند تغییرمکان اضافی، ارتعاش اضافی، تغییر شکل دائمی و ترک خوردگی

۳- حالت حدی خستگی (FLS_S) : مربوط به فقدان مقاومت تحت بارهای متناوب است. یک جزء سازه‌ای ممکن است تحت اثر بارهای متناوب در سطحی پایین‌تر از بار نهایی شکست پیدا کند. در تحلیل خستگی، هم بزرگی و هم فرکانس بار از اهمیت برخوردار هستند.

۵- احتمال شکست

اگر Q برابر بار موثر و R برابر با مقاومت یا ظرفیت، باشد تابع حالت حدی یا تابع وضعیت بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$g(R,Q) = R - Q$$

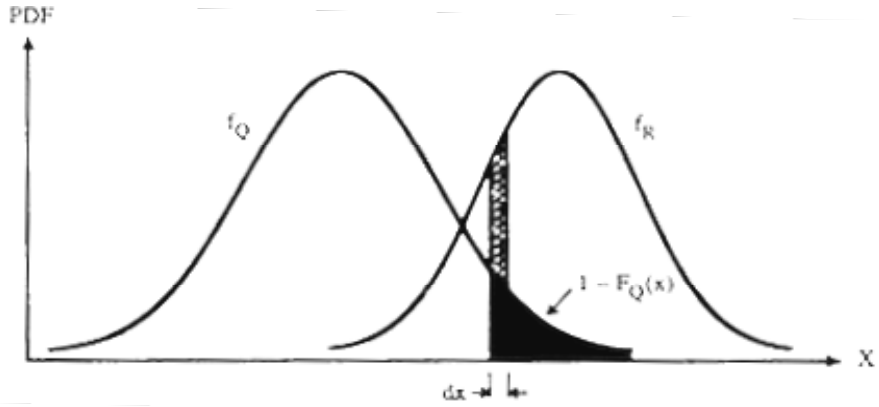
احتمال شکست با توجه به PDF متغیرهای تصادفی R و Q همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده بدست می‌آید.

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty}\left[1 - F_Q(r_i)\right] f_R(r_i)\,dr_i$$
$$= 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} F_Q(r_i) f_R(r_i)\,dr_i$$

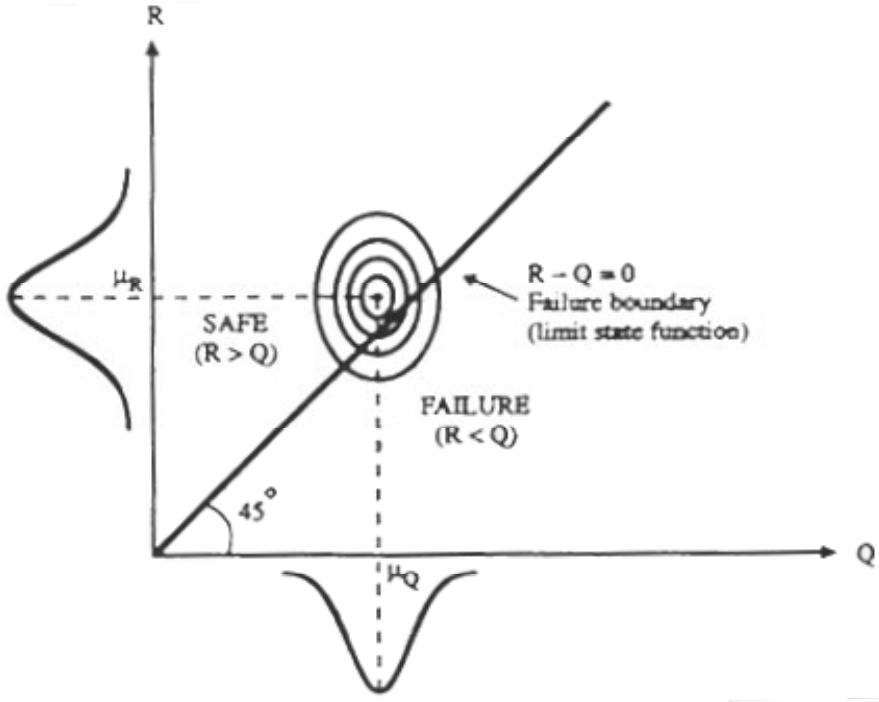
و یا

$$P_F = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(q_i) f_Q(q_i)\,dq_i$$

Archive of SID
www.SID.ir



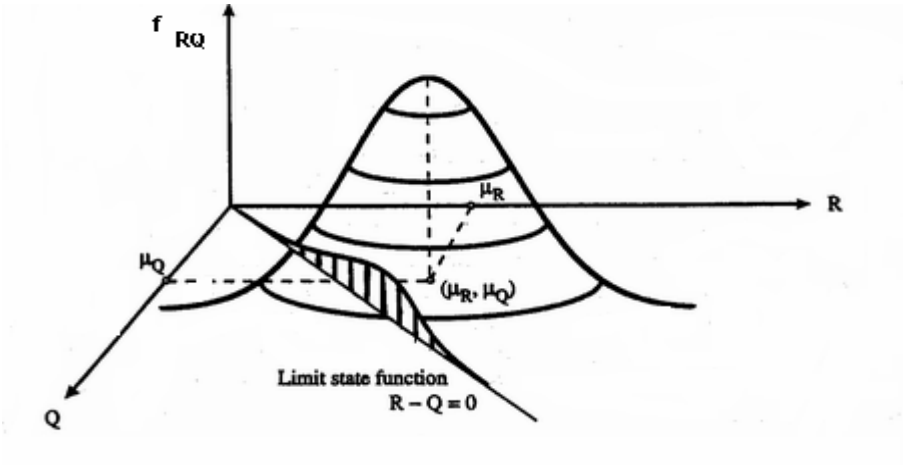
شکل (۱) : PDF بار Q و مقاومت R



شکل (۲) : حوزه اطمینان و شکست در یک فضای دو بعدی

حوزه اطمینان وحوزه شکست در یک فضای دو بعدی مانند شکل (۲) می‌باشد. چونR و Q هر دو متغیرهای تصادفی هستند میتوانیم یک تابع چگالی توام $f_{RQ}(r,q)$ همانند شکل ۳ تعریف کنیم. احتمال شکست با انتگرال گیری از تابع چگالی توام بر روی حوزه شکست بدست می‌آید..

www.SID.ir



شکل (۳) : نمایش سه بعدی f_{RQ}

محاسبه این احتمال عموماً مشکل است بنابراین از روشهای تقریبی برای حل انتگرال استفاده می‌شود. مهمترین این روشها عبارتند از :

۱- انتگرال گیری در فضای n بعدی x به روش شبیه سازی (Simulation).

۲- انتقال فضای X به یک فضای نرمال U (که در آن u_i ها مستقل و نرمال هستند) و تقریب تابع حالت حدی به یک تابع حالت حدی خطی. این راه حل به نام روش قابلیت اعتماد مرتبه اول FORM شناخته می‌شود (First order Reliability Method).

در راه حل اول بدون هیچ تقریبی برای تابع حالت حدی یا تابع چگالی احتمال، شبیه سازی انجام شده و در حقیقت انتگرال گیری بصورت تقریبی انجام می‌شود. از مهمترین مزایای این روش عدم محدودیت در نوع و شکل تابع چگالی احتمال و تابع حالت حدی است.

در راه حل دوم انتگرال گیری بصورت دقیق انجام گرفته و تابع حالت حدی و تابع چگالی احتمال تقریب زده می‌شوند.

۶- شبیه سازی مونت کارلو

در این روش ابتدا مقادیری برای متغیرهای تصادفی موجود در معادله حالت حدی پس از برآورد توزیع آنها تولید شده و سپس برای شبیه سازی مقدار تابع حالت حدی بکار می‌روند و در نهایت احتمال شکست $P[g(R,Q)] \langle 0$ محاسبه می‌شود.

$$P_f = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I[g(R,Q)\langle 0]$$

N تعداد کل شبیه سازی و [] تابع شاخص[۲] است، اگر رابطه داخل کروشه [] برقرار باشد مقدار آن یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

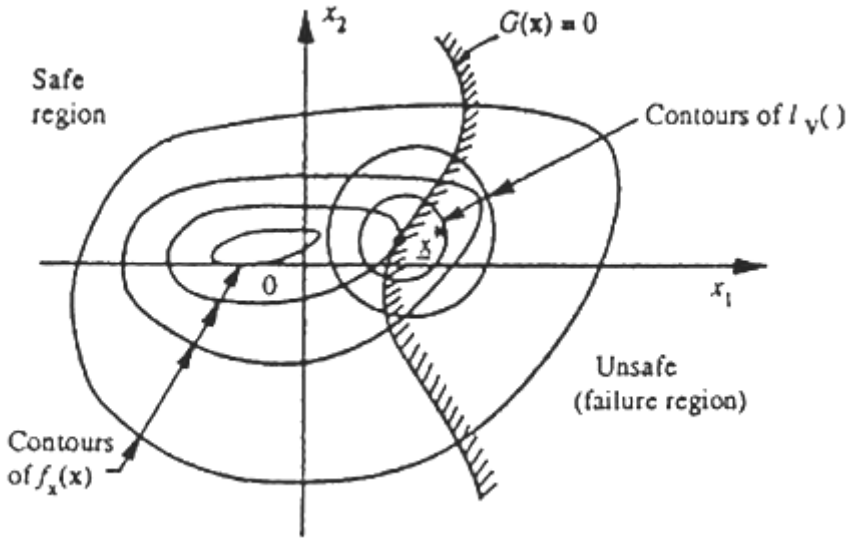
این روش عموماً با نام Crude monte carlo شناخته می‌شود. مشکل اصلی این روش نیاز به تکرار زیاد است.

بنابراین از روشهایی استفاده می‌شود که واریانس نمونه‌گیری را کاهش دهیم از جمله تئوری Importance Sampling . در این روش تعداد نمونه‌های لازم به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در Importance Sampling ابتدا نقطه‌ای بر روی تابع حالت حدی انتخاب کرده (x*) و سپس تابع چگالی احتمال یا یک تابع چگالی احتمال نرمال L_V که مرکز آن x* است تعریف می‌کنیم. نمونه‌گیری در این فضای جدید صورت می‌گیرد شکل (۴) این روش را بصورت شماتیک نشان میدهد.

[2] Index Function

Archive of SID
www.SID.ir



شکل (۴) : روش importance sampling

۷- روش FOSM

Hasofer and lind (1970) شاخص اعتمادپذیری β را تحت عنوان کوتاهترین فاصله از مرکز فضای متغیرهای استاندارد شده (Z_R, Z_Q) تا تابع حدی $g(Z_R, Z_Q) = 0$ تعریف کرده‌اند. شکل۵، β را وقتی تابع حالت حدی خطی است نشان میدهد. بصورت ریاضی داریم :

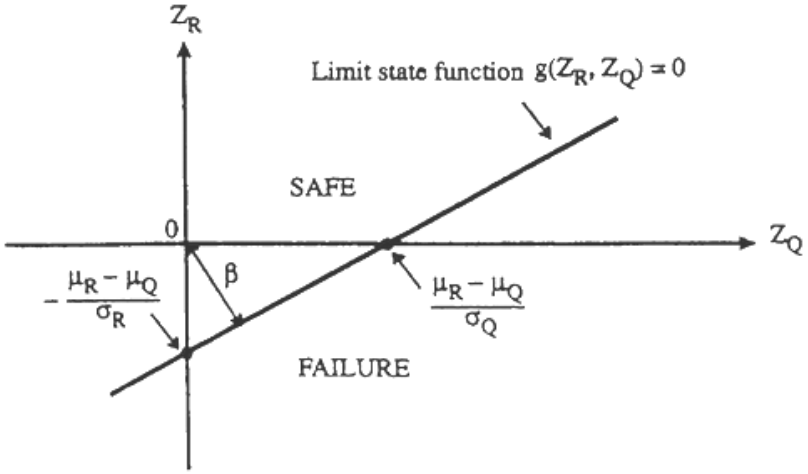
$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

اگر Rو Q ناهمبسته باشند. β عکس ضریب واریاسیون است. اگرR و Q نرمال باشند:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F)$$

یا

$$P_F = \Phi(-\beta)$$



شکل (۵) : شاخص اعتمادپذیری برای تابع حالت حدی خطی

www.SID.ir

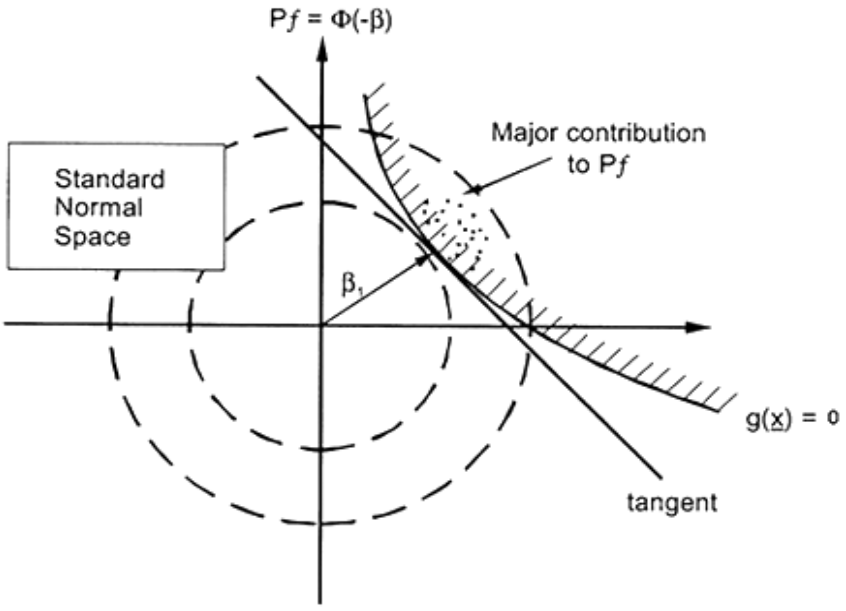
جدول (۱) رابطه شاخص اعتمادپذیری و احتمال شکست را نشان میدهد.

جدول (۱) : رابطه P_f و β

P_f	β
10^{-1}	1.28
10^{-2}	2.33
10^{-3}	3.09
10^{-4}	3.71
10^{-5}	4.26
10^{-6}	4.75
10^{-7}	5.19
10^{-8}	5.02
10^{-9}	5.99

اگر تابع حالت حدی غیر خطی باشد با خطی کردن آن به کمک بسط تیلور در نقطه‌ای به نام نقطه طرح (بر روی g=0) میتوان یک جواب تقریبی بدست آورد .

برای بدست آوردن نقطه طرح که کمترین فاصله را تا مبدا فضای متغیرهای استاندارد شده دارد باید از روش تکرار استفاده نمائیم. شکل (۶) نقطه طرح و شاخص اعتماد پذیری برای تابع حالت حدی غیر خطی را نشان میدهد. از مهمترین مزایای این روش عدم نیاز به شناخت توزیع متغیرهای تصادفی را میتوان نام برد.



شکل (۶) : شاخص اعتمادپذیری برای تابع حالت حدی غیر خطی

۸- طرح یک مثال

به منظور مقایسه بهتر روشهای ذکر شده به طرح یک مثال می‌پردازیم.

اگر فرض کنیم مجموع بارهای وارد بر یک عضو سازه از توزیع نرمال $N(10,1.25)$ و مقاومت عضو از توزیع نرمال $N(13,1.25)$ پیروی کرده، R و Q مستقل باشند، مطلوبست محاسبه احتمال شکست و شاخص اعتمادپذیری.

(برای روشهای مختلف برنامه کامپیوتری تهیه شده است که در حل مثال از این برنامه‌ها استفاده می‌کنیم)

www.SID.ir

۱- روش Crude monte carlo

با استفاده از این روش مقدار β و P_f را برای تعداد نمونه‌های مختلف (N) محاسبه می‌نمائیم. این مقادیر در جدول (۲) نشان داده شده‌اند

۲-. روش Importance Sampling

نقطه x^* بر روی تابع حالت حدی به مختصات (11.23 و 11.23) بدست می‌آید.

با انتقال مرکز تابع چگالی احتمال R و Q به این نقطه و نمونه‌گیری نتایج نشان داده شده در جدول ۳ بدست می آید

.جدول (۲) : نتایج روش Crude monte carlo در آنالیز اعتمادپذیری مثال ذکر شده

شاخص اعتمادپذیری (β)	احتمال شکست (P_f)	تعداد نمونه‌ها (N)
1.75	0.04	100
1.75	0.04	200
1.68	0.046	500
1.59	0.056	1000
1.57	0.0584	5000
1.535	0.0624	10000
1.535	0.0624	20000

جدول (۳) : نتایج روش Importance Sampling

شاخص اعتمادپذیری (β)	احتمال شکست (P_f)	تعداد نمونه‌ها (N)
1.565	0.05994	100
1.565	0.05992	200
1.56	0.05990	500
1.535	0.06287	1000
1.535	0.06239	5000

۳- روش FOSM

در این مسئله چون تابع حالت حدی خطی بوده و توزیع متغیرها نیز نرمال است، بنابراین نیازی به تقریب نیست و β بصورت دقیق محاسبه می‌شود.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} = \frac{13-10}{\sqrt{1.5^2 + 1.25^2}} = 1.535$$

$$P_f = \Phi(-\beta) = 0.06239$$

حال با داشتن مقدار دقیق P_f درصد خطاهای محاسبات را در دو روش .Importance S و .Crude M.C بدست می‌آوریم. با توجه به جدول فوق به وضوح دیده می‌شود که استفاده از روش .Importance S سبب کاهش چشمگیر تعداد نمونه‌های لازم می‌شود.

در صورتیکه تابع حالت حدی غیر خطی باشد تقریبهایی نیز در روش FOSM وارد می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۳) : میزان درصد خطای محاسبات در مثال حل شده

تعدادنمونه (N)	100	200	500	1000	5000	10000	20000
روش Importance Sampling	36%	36%	26%	10%	6%	0	0
روش Crude monte carlo	3.9%	3.9%	4%	0.8%	0	-	-

۹- نتیجه گیری و پیشنهاد

همانگونه که قبلاً ذکر شد ایمنی مطلق در سازه‌ها قابل دسترسی نیست بنابراین همواره مجبور به پذیرش مقداری ریسک برای یک سازه هستیم. لازم به ذکر است که میزان ریسک قابل پذیرش با توجه به مسائل فرهنگی، اجتماعی و سیاست گذاریهای بلند مدت هر جامعه متفاوت است و از یک الگوی مشخص برای تمام جوامع نمیتوان استفاده نمود. مقدار ریسک قابل پذیرش را دولتمردان به طراح دیکته می‌کنند و طراح با داشتن این عدد، با استفاده از روشهای مبتنی بر قابلیت اعتماد سازه طرح بهینه را معرفی می‌نماید. با توجه به تنوع دکلهای مورد استفاده در خطوط انتقال نیرو و لحاظ داشتن این نکته که درصد بالایی از هزینه احداث یک خط انتقال مربوط به برجهای آن خط می‌باشد، لزوم ارزیابی اعتمادپذیری برجهای خطوط انتقال نیرو به منظور رسیدن به یک طرح بهینه مشخص می‌گردد. لذا پیشنهاد می‌شود برجهای خطوط انتقال با یکی از روشهای ذکر شده در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته و از این پس در طراحی آنها از روشهای مبتنی بر اعتمادپذیری استفاده شود.

در مورد سازه‌های موجود نیز میتوان به کمک این روش شاخص اعتمادپذیری را برآورده کرده و برای جایگزینی اعضاء، تقویت برج و یا تعویض برج تصمیم‌گیری نمود.

فهرست مراجع

[1] Nowak A.S. and Collins K.R., Reliability of Structures, Singapore, Mc Graw.Hill co, 2000.

[2] Melchers R.E., Structural Reliability Analysis and Prediction, Second Edition, England, John Wiley & Sons Ltd, 1999.

[3] Ang A.H.S. and Tang W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, New York, John Wiley & Sons Ltd, 1975.

[4] Corus UK Limited,Methods Applications and Software for Structural Reliability Assessment, Report No SL/WEM/R/M 8663/5/01/C ,2001.

[5] Ditlevsen O.and Madsen H.O., Structural Reliability Methods, England, John Wiley & Sons Ltd, 1996.

[۶] معرف زاده محمد رضا، مروری بر قالبهای ارزیابی ایمنی سازه‌ها، دانشگاه امام حسین، دانشکده فنی و مهندسی

[7] Wierzbicki W., safety of structures as a probabilistic Problem, Warsaw, Poland, 1936.

[8] Streletzki N.S. , statistical Basis for Evaluation of the Structural Safety Factor, Stroizdat, Moscow, 1947.

[9] Mayer M., Die Sicherheit der Bauwerke, Berlin, Springer-Verleg, 1926.

[10] Hasofer A.M. and lind N. , Exact and Invarinat Second-Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics vol 100, no EM1 , PP. 111-121,1974.

Archive of SID

www.SID.ir