مفهوم ایمنی[1] در مهندسی

امیر پیمان زندی

(فوق‌لیسانس راه وساختمان‌از دانشکده‌فنی دانشگاه تهران)

چکیده:

نظریه قابلیت اعتماد[2] شاخه‌ای از تئوری عمومی احتمالات است که‌طی ۳۰ سال اخیر به تدریج جای‌خودرا در علوم مهندسی باز کرده است .این نظریه چارچوبی منطقی است‌که‌با به حساب آوردن وتجزیه وتحلیل عدم قطعیتهای ناشی از طبیعت آماری مسائل مهندسی به‌کمک روشهای ریاضی ، امکان ارزیابی ایمنی واقعی یک سیستم را فراهم می‌سازد . در این مقاله سعی‌شده است که‌بامعرفی‌مبانی این نظریه ،مقایسه‌ای‌بین مفاهیم‌ضریب ایمنی وقابلیت اعتماد به عمل آید . اگرچه نظریه جنبه کلی دارد ، برای به دست‌آوردن میزان ایمنی هر سیستمی که تابع فرآیندهای احتمالی باشد می‌توان آن را به کار بست ، ولی به علت آنکه اصطلاحات ومثالها حداقل در چشم گروهی از خوانندگان آشناتر باشد ، سعی شده است مسائل در حوزهٔ مهندسی عمران مطرح شوند .حوزه‌ای‌که به سبب سابقه طولانی تر مهندسان آن در برداشتهای یقین اندیشانه[3] ، و تنوع مسائل مورد بررسیش، دیرتراز دیگر رشته‌های مهندسی براستفاده ازمزایای مفاهیم احتمال اندیشانه[4] گردن نهاده است .

مفهوم ایمنی در مهندسی

(بانگرشی به مفاهیم متداول درمهندسی عمران)

از : امیر پیمان زندی

فهرست عناوین:

۱ ــ مقدمه

۲ ــ احتمال خرابی

۳ ــ تئوری قابلیت اعتماد

۴ ــ رابطه ایمنی بازمان

۵ ــ بالابردن ایمنی سیستمها

۶ ــ نتیجه گیری

ــ فهرست منابع

1- Safety

2- Reliability

3- Deterministic

4- Probabilistic.

۱ ـ مقدمه :

انسان در درون خویش ودر پیرامون خود همواره در جستجوی ایمنی واطمینان بوده است . ایمنی قبل از آنکه شاخصی برای چیزهایی که با آن سروکار داریم باشد ، احساس وملکه‌ای روانی درخود ماست . به عبارت دیگر قابلیت اعتماد مرحله‌ای از شناخت ما نسبت به چیزهاست و در ماهیت آن چیزها تغییری به وجود نمی‌آورد .

در کار مهندسی ، علی رغم استفاده بسیاری که از مدلهای ساده شده ومفاهیم تقریبی به عمل می‌آید ، تمایل بسیاری وجود دارد که نتایج به‌دست آمده به‌عنوان دستاوردهای قطعی ودقیق علمی مطرح شوند . علوم مهندسی از یک نظرگاه کلی ، خود شاخه‌ای از فیزیک کاربردی است . علم دقیقی که مفاهیم احتمال اندیشانه ، دیری است در بسیاری از زوایای آن راه خود را گشوده اند .

همین تمایل تاریخی به قطعی انگاشتن نتیجه گیریها ، وازطرف دیگر دل نگرانی ازتقریبیها و عدم قطعیتهایی که مهندس عینا " با آنها سروکار دارد ، وعملا " نمی‌تواند آنها را نادیده انگارد ، موجب به‌کارگیری مفهوم ضرایب ایمنی[1] شده است .

همه مهندسان باابهامات واشکالاتی که عبارت "ضریب ایمنی" رااحاطه کرده است آشنایی دارند . اندیشهٔ اصلی ساده وبسیار مفیداست ، نسبت مقدار قابل حصول یک کمیت به مقدار محاسبه شده ، ویا در بعضی مواقع اندازه‌گیری شدهٔ همان کمیت را ضریب ایمنی نام داده‌اند . هرچه این ضریب بزرگتر باشد ، با آسایش خاطر بیشتری می‌توان قضاوت کرد که مقدار کمیت مورد نظر از حد تعیین شده برای آن تجاوز نخواهد کرد .

مقدار قابل حصول یا ظرفیت[2] را با C ومقدار محاسبه شده یا نیاز[3] را با D نمایش می‌دهیم . بنابراین ضریب ایمنی از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$FS = \frac{C}{D} \qquad (1)$$

یکی از زمینه های رایج استفاده از ضرایب ایمنی در مهندسی ساختمان ، مورد تنشهای داخلی یک عضو سازه‌ای است . فرض می‌شود با دستیابی به ضرایب ایمنی که به مقدار کافی ازواحد بیشتر باشند ، می‌توان احتمال تجاوز تنشهای واقعی از تنشهای محاسبه شده ، واحتمال وقوع خرابی را در تنشهایی پائین تراز تنش مجاز[4] ، منتفی ساخت .

در محاسبات بدون ضریب ایمنی همیشه احتمال آن وجود دارد که به علت فرضیاتی که در مدل کردن و محاسبه به‌کار گرفته شده ، یا بارهایی که احیانا " به حساب نیامده‌اند ، تنشهای واقعی ازمقادیر محاسبه شده بیشتر شوند ، یا به‌علت ناسالم بودن مصالح یا عواملی که در انتخاب تنش مجاز مدنظر نبوده‌اند ، تنش مجاز واقعی از مقدار انتخاب شده کمتر باشد .

اگر مهندس ، دستورالعمل دقیقی برای تعیین مقدار قابل حصول کمیت موردنظر (ظرفیت) ، تعریف وبرآورد مقدار لازم برای کمیت مورد نظر (نیاز) و انجام محاسبات ، در دست داشته باشد ، وقدم به قدم مطابق آن رفتارکند ، ضریب ایمنی که به‌این نحو محاسبه می‌شود ، هیچ ابهامی در برندارد . اگرچه بعدا " ملاحظه خواهید کرد که این عدد نیز به خودی خود اطلاع کمی درباره احتمال واقعو خرابی در اختیار می‌گذارد . ولی در محاسبات مهندسی خصوصا " شاخه‌های پرابهام ترآن مانند مهندسی ژئوتکنیک ، چه در انتخاب ظرفیت ، و چه در تعیین نیازنه گامهایی که باید برداشت کاملا " مشخص شده‌اند ونه همهٔ طراحان به روشی هماهنگ عمل می‌کنند . برای مثال در تعیین مقاومت یک شیروانی خاکی معمولا "تعدادی آزمایش برروی خاک محل انجام گرفته ، نتایج آن در اختیار طراح گذارده می‌شود . بعضی از مهندسان از مقاومتهای اندازه‌گیری شده ، میانگین می‌گیرند در صورتی که بقیه محافظه کارانه ترین مقدار اندازه‌گیری شده را انتخاب می‌کنند . به‌علاوه یک مهندس ممکن است برای کارهای مختلف روشهای متفاوتی در پیش گیرد . بنابراین یک شیروانی خاکی که برای لغزش آن ضریب اطمینان ۱/۵ گزارش شده ، ممکن است در واقع دارای حاشیه ایمنی* ۵ کوچکی باشد ، در صورتی که شیروانی دیگری با همین ضریب

1- Safety Factor
2- Capacity
3- Demand
4- Allowable Stress
5- Safety Margin

* مفهوم حاشیه ایمنی در ذیل رابطه ۲ بیان شده است .

اطمینان می‌تواند دربرابر خرابی کاملا "ایمن باشد[مرجع ۳]

شاخه‌ای از تئوری احتمالات ، به نام "نظریه قابلیت اعتماد[1]" چارچوبی متین‌ومنطقی برای به حساب آوردن موارد عدم قطعیت در ظرفیت ونیاز ، در اختیار می‌گذارد .

نظریه قابلیت اعتماد همچنین چشم‌انداز اختیـــار روشی سیستماتیک رادر انتخاب ضریب ایمنی مناسب برای دسته‌ای از موارد استفاده خاص فراهم آورده است .

قابلیت‌اعتماد مقیاسی است‌که‌با آن می‌توان توانایی هر قسمت ویا کل یک وسیله ، مصنوع ، و یا سیستم را ، برای کارکردن بدون از کار افتادن ، در تحت شرایطی که برای آن در نظر گرفته شده با این مقیاس سنجید

یکی از بهترین تعریفهایی که برای قابلیت اعتماد داده شده چنین است : " قابلیت اعتماد ، احتمال عملکرد با کفایت یک سیستم ، درتحت شرایط کاری از پیش تعیین شده ، و برای مدت زمانی معین است " .*

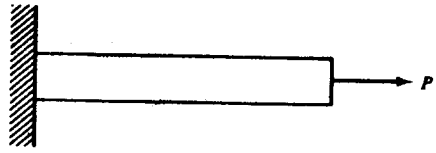
همین تعریف مشخص می‌کند که‌قابلیت اعتماد همیشه معرف نوعی احتمال است‌که بین عملکرد سیستم ، با آنچه در عمل از آن انتظار می‌رود ، نوعی ارتباط برقرار می‌سازد . در مورد یک‌ساختمان عظیم‌فولادی‌این‌ارتباط مسائل کوچکی‌مانند زنجیره های‌کوتاه جوش ، ناشاقولیهای جزئی ، و خورندگی محیط را نیز در برمی‌گیرد . هر مصنوع یا قسمتی ازآن را کـه بااین مقیاس ایمن ارزیابی‌شود ، می‌توان گفت که‌خوب ساخته شده است .

از آنجاکه‌قابلیت‌اعتماد یک مفهوم احتمال اندیشانه است ، محاسبهٔ آن نیز محتاج روشهای آماری ** و ریاضیات کاربردی است . ولی در همین‌جاباید اشاره کردکه روشهای ریاضی رانباید به کلی جانشین استدلال منطقی ساخت . یک برخوردآماری‌کور ،بدون‌توجه به‌آنچه عقل سالم حکم می‌کند ، به‌نتیجه‌گیریهای نادرستی منجر می‌شود که ظاهرا " براساس روشهای صحیح ، واطلاعات بی‌نقص بنا شده‌اند .

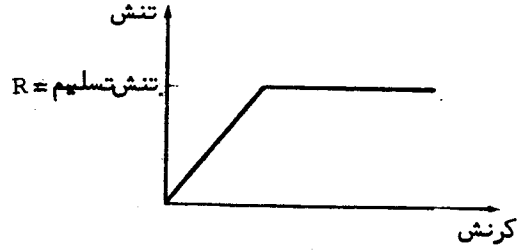
قبل ازپرداخت به مبانی‌نظریه قابلیت اعتمادلازم است‌که‌بامفهوم احتمال خرابی ، شکست ،یا از کارافتادن ، و ارتباط‌آن با ضریب ایمنی آشنا شویم .

۲ ــ احتمال خرابی[2] †

چنانکه در بخش قبل ملاحظه کردید از کار افتادن ، یاخرابی جزء تعریف‌قابلیت اعتماد است ، همین دلیل‌تعریف دقیق ضوابط وشرایط خرابی ، اولین گام از هر نوع تحلیلی به منظور تعیین قابلیت اعتماد است .



سطح‌مقطع $A=I$
(الف)



(ب)

شکل ۱ ــ مثال فرضی

1- Reliability Theory

2- Probability of Failure

* این تعریف‌ازموسسه‌ملی هوافضایی امریکا (NASA) است .

** برای‌استفاده‌بهتراز مطالب بخشهای بعدی آشنایی مقدماتی با تئوری احتمالات و آمار ریاضی لازم به‌نظر می‌رسد . مرجع شماره ۶ برای کسب این آشنایی‌جهت مهندسان عمران بسیار مناسب است . از کتابهای عمومی بسیاری که در زمینه آمار و احتمالات وجود دارند به فارسی جلد اول کتاب آمار تالیف توماس اچ دوناکات و رافلدجی دوناکات‌ترجمه دکتـــر محمد رضا مشکانی‌را می‌توان توصیه کرد .

† واژه Failure که در اینجاخرابی‌ترجمه شده است ، مبین هروضعیتی است‌که به هنگام وقوع آن طرح بتواند مقاصدی راکه از آن انتظار می‌رود برآورده سازد . "کارافت" برگردان دیگری برای این واژه است .

برای شروع بحث درمورداحتمال خرابی، موردخاصی را در نظر می‌گیریم برای مثال عضو سازه‌ای شکل ۱ تحت بارگذاری‌تصادفی قرار گرفته‌است. میانگین[1] وانحراف معیار[2] بارمعلوم و به ترتیب مساوی $\bar{P}$ و σ_P می‌باشند. بارواردہ موجب ایجاد تنشی می‌شود که اگر مقطع عضو دارای مقدار قطعی (غیر احتمالی) A باشدبامتغیری تصادفی[3] مانند S بیان می‌شود، که میانگین آن $\bar{S}=\frac{\bar{P}}{A}$ و انحراف معیار آن $\sigma_S=\frac{\sigma_P}{A}$ است.

فرض کنید که منحنی رفتار (تنش تغییر شکل نسبی) مصالح تشکیل دهندهٔ عضو مانندشکل ۱ ــ ب وتنش تسلیم مصالح، متغیری‌تصادفی مانند R دارای میانگین و انحراف‌معیار معلوم $\bar{R}$ و σ_R باشد. اگر دراینجاواژه خرابی را، که در حالت کلی به معنی نقصان و کاستی امکان انجام وظیفه، یا عدم توانایی دربرآورده ساختن انتظار از طرح است، به تجاوزتنش ناشی از بارواردہ، نسبت به تنش تسلیم مصالح تعبیر کنیم، خرابی وقتی رخ خواهد دادکه:

$$S \geqslant R$$

اگر متغییر تصادفی F را به شکل زیر تعریف کنیم:

$$F \equiv R - S \qquad (۲)$$

خرابی موقعی‌رخ‌خواهد داد که F کوچکتر یا مساوی صفر باشد. متغییر تصادفی F را حاشیه ایمنی نامیده اند[مرجع ۲].

حالت‌خاصی‌را در نظر بگیرید که R و S دارای توابع توزیع چگالی‌احتمال‌هنجار و مستقل[4] از یکدیگر باشند. بسیاری از متغییرهای‌اندازه گیری شده در علوم مهندسی دارای تابع توزیع احتمال‌هنجار ـ ناقوسی شکل‌اند، وفرض استقلال R و S نیز دراکثر موارد به واقعیت نزدیک است درآن صورت توابع زیر معرف توزیع چگالی احتمال متغیرهای بالا خواهند بود.

$$p(s) = \frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\bar{S}}{\sigma_S}\right)^2\right\} \qquad (۳)$$

و

$$p(r) = \frac{1}{\sigma_R\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-\bar{R}}{\sigma_R}\right)^2\right\} \qquad (۴)$$

متغیرتصادفی F هم دارای تابع توزیع چگالی‌هنجار خواهدبود زیراترکیب خطی‌ازدو متغیر تصادفی هنجار است. از نوشتن روابط ریاضی می‌توان نتیجه گرفت.

$$\bar{F} = \bar{R} - \bar{S} \qquad (۵)$$

و

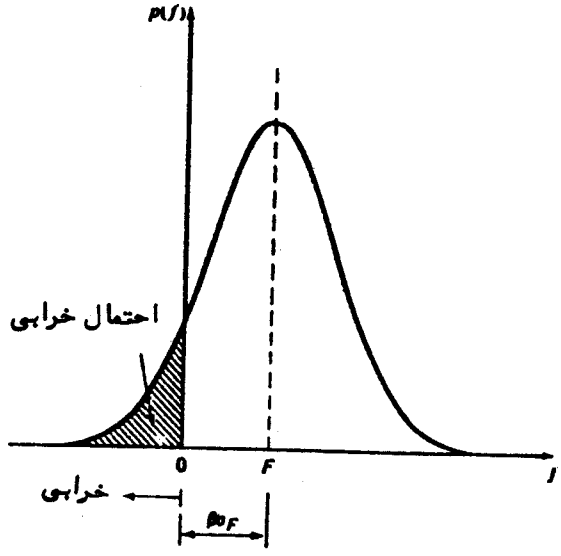
$$\sigma_F^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \qquad (۶)$$

بنابراین‌تابع توزیع چگالی‌احتمال F به این صورت‌بیان‌می‌شود

$$p(f) = \frac{1}{\sigma_F\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{f-\bar{F}}{\sigma_F}\right)^2\right\} \qquad (۷)$$

همان‌طورکه در شکل ۲ به نمایش درآمده، چون خرابی زمانی اتفاق می‌افتدکه F کوچکتر یامساوی صفر باشد، احتمال‌خرابی را می‌توان به‌این صورت بیان کرد [مرجع ۲]:

$$P_f = Pr\left[F \leqslant 0\right] = \int_{-\infty}^{0} p(f)\, df \qquad (۸)$$



شکل ۲ ــ احتمال خرابی

1- Mean
2- Standard Deviation
3- Random Variable
4- Normal Density Distribution Function

شکل ۳ مقادیر محاسبه شده احتمال خرابی را برای ترکیبهای مختلف ضرایب پراکندگی [1] و ضرایب ایمنی مرکزی [2] مختلف ، بهدست میدهد . ضریب پراکندگی متغییرهای S و R به ترتیب برابرند .

با

$$\rho_S = \frac{\sigma_S}{\bar{S}} \quad , \quad \rho_R = \frac{\sigma_R}{\bar{R}}$$

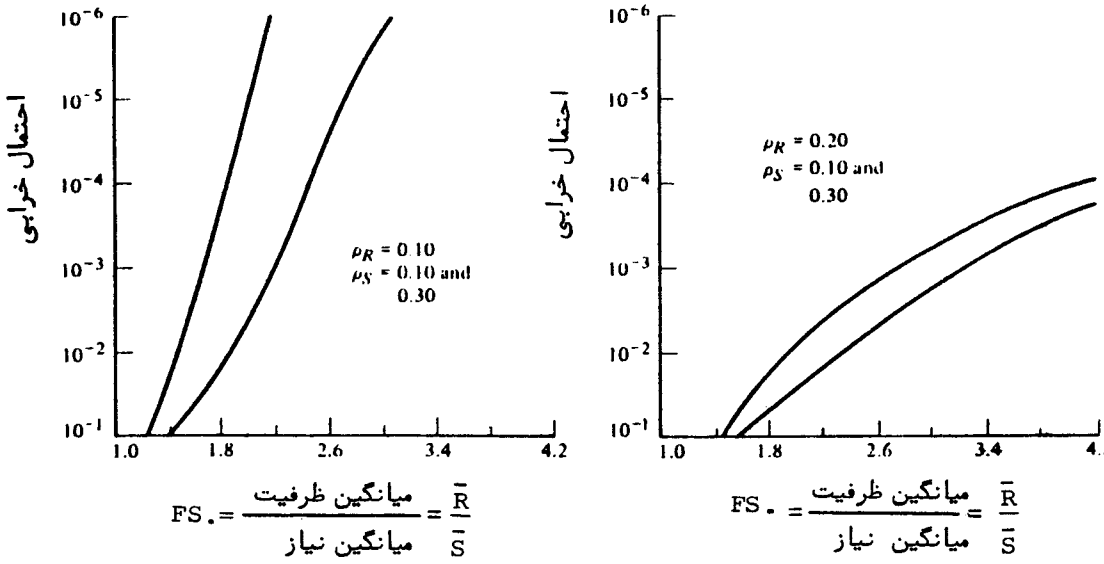
ضریب ایمنی مرکزی نسبت میانگین های ظرفیت و نیاز است و دراینجا به صورت $\frac{\bar{R}}{\bar{S}}$ (میانگین مقاومت مصالح به میانگین تنشهای وارده)بیان شده است . در حالت کلی :

$$FS_o = \frac{\bar{C}}{\bar{D}} \qquad (۹)$$

درشکل ۳ مشاهده می شود که ۰/۱ اختلاف درضرایب پراکندگی ،با یک ضریب ایمنی مرکزی ثابت چه اثر تعیین کننده ای برروی احتمال خرابی خواهد گذاشت به طور مثال احتمال خرابی به ازای ضریب ایمنی ۲/۲ می تواند بین 10^{-6} و 10^{-2} متغیر باشد که اولی برای کارهای مهندسی . احتمالی بسیار دور ، و دومی احتمالی بسیار نزدیک است .

برای روشن تر شدن ارتباط میان احتمال خرابی و ضریب ایمنی ، شکل ۴ الف راکه نمایش دهنده منحنی های توزیع چگالی احتمال برای ظرفیت ونیاز واقعی است ملاحظه کنید . اگر مقدار نیاز واقعی x باشداحتمال آن وجوددارد(و این احتمال با سطح ها شور خورده به نمایش درآمده است) که ظرفیت واقعی از نیاز کمتر باشد ، ویا به عبارتی خرابی رخ دهد ، در همین جا این نکته قابل تذکر است که اگر مقدار محاسباتی تغییرهای تصادفی C و D را محتمل ترین مقدار آنها در نظر بگیریم ، چنانکه در شکل نیز مشخص است ضریب ایمنی مرکزی ،عددی در حدود ۲/۸ می شود که مقدار عددی نسبتا " بالائی است. اگر C و D از یکدیگر مستقل باشند سهم وقوع D را درفاصله x و x + dx در احتمال خرابی می توان به شکل زیر بیان کرد .

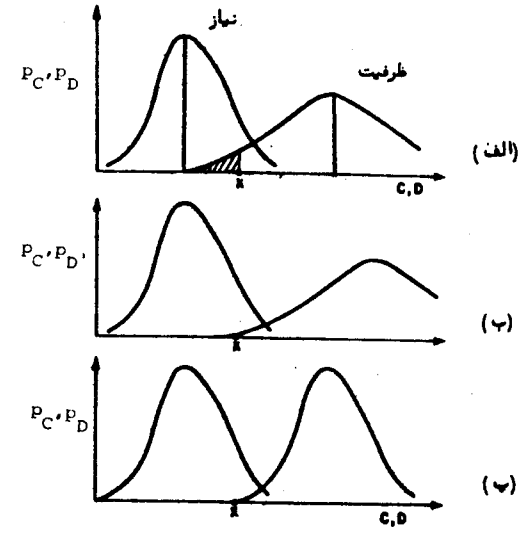
$$Pr[x \leq D \leq x+dx] \cdot Pr[C<x] = P_D(x) \cdot Pr[C<x] \qquad (۱۰)$$



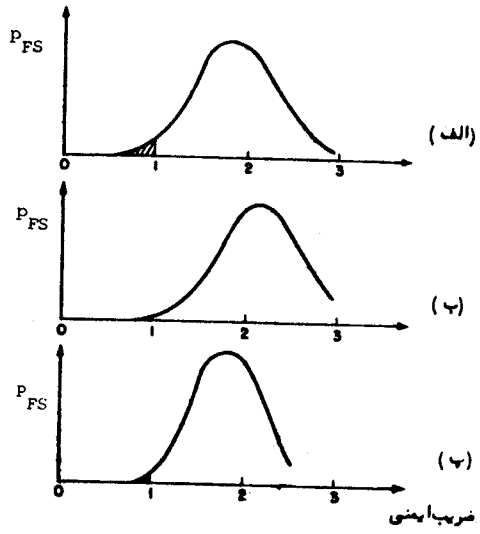
شکل ۳ ــ احتمال خرابی برای توابع R و S هنجار [مرجع ۲]

1- Coefficient of Variation

2- Central Safety Factor



شکل ۴ـ الف)رویهم افتادگی منحنی های توزیع احتمال ظرفیت ونیازب) کاهش احتمال خرابی بوسیله ازدیاد اختلاف در میانگین ها .پ) کاهش احتمال خرابی بوسیله کاهش عدم قطعیت در ظرفیت [مرجع ۱]



شکل ۵ـالف)منحنی توزیع چگالی احتمال ضریب ایمنی ب) کاهش احتمال خرابی بوسیله ازدیاد اختلاف در میانگین ها .پ)کاهش احتمال خرابی بوسیله کاهش عدم قطعیت در ظرفیت . [مرجع ۱]

باانتگرال گیری روی تمام مقادیر ممکن برای نیاز ، احتمال کل خرابی ، P_f به دست می‌آید .

$$P_f = \int f_D(x) \cdot Pr\left[C < x\right] dx \qquad (11)$$

عبارت اول زیر انتگرال تابع توزیع چگالی احتمال نیاز [1] ، و دومین عبارت تابع توزیع تجمعی ظرفیت [2] است . بنابراین P_f با مقدار رویهم افتادگی منحنیهای توزیع نیاز و ظرفیت ، متناسب است . (ولی مساوی سطح این رویهم افتادگی نیست) . هر عملی که این رویهم افتادگی را کاهش دهد باعث پایین رفتن احتمال خرابی می‌شود . به‌طور مثال ازدیاد فاصله بین میانگین دو منحنی توزیع که همان بالا بردن ضریب ایمنی مرکزی است ، ویا کاهش پراکندگی در هر دو ویا یکی از توابع توزیع ، که معادل به کار گیری مصالح کنترل شده و روشهای دقیق تعیین وبحساب آوردن بارها است ، احتمال خرابی را کاهش می‌دهد .

شکلهای ۴ ــ ب و ۴ ــ پ تاثیر اعمال فوق بنمایش می‌گذارد .

اطلاعاتی را که بدین‌طریق از منحنیهای توزیع ظرفیت ونیاز به دست می‌آید می‌توان برای دست یافتن به منحنی توزیع ضرایب ایمنی واقعی مانند شکل ۵ الف به کار برد . دراین حالت احتمال خرابی یا P_f ، مساوی سطح زیرین قسمتی از این منحنی توزیع جدید است ، که در سمت چپ FS=1 قرار دارد . با این نحوه نمایش به خوبی درمی‌یابیم که باازدیاد ضریب ایمنی مرکزی ، (شکل ۵ ــ ب) و یا کاهش پراکندگی در منحنی توزیع ظرفیت (شکل ۵ ــ پ) احتمال خرابی تاچه حد کاهش خواهد یافت . در این مرحله سوالی مطرح می‌شود که پاسخ به آن ممکن است بسیاری از پیش فرضهای ما را درهم بریزد . سوال این است که ، آیا ضریب ایمنی کوچکتر یا مساوی ۱ به مفهوم حتمی بودن خرابی است ؟ با مفاهیمی که در این بخش با آنها آشنا شدیم باید اول به این پرسش پاسخ داد که این ضریب ایمنی چگونه به دست آمده است ؟ آیا

1- Probability Density Distribution Function for Demand

2- Cumulative Distribution Function of Capacity

میانگین ظرفیت برمیانگین نیاز تقسیم شده است ویا درجهت محافظه کاری حد پایین ظرفیت برحد بالای نیاز تقسیم شده است ؟ به طورکلی می‌توان‌گفت که ضریب ایمنی کمتر از واحد لزوما" به معنی خرابی نیست . چه بسا با وجود کوچک بودن ضریب ایمنی ،احتمال خرابی در حد قابل قبولی باقی‌بماند . تنهاحکم کلی‌که می‌توان صادر کرد این است که ضریب ایمنی به‌هرطریق که به‌دست آمده باشد ، کاهش آن باعث افزایش احتمال خرابی می‌شود . باتحلیل احتمال خرابی به روشی که قبلا" ذکر شد ،وامکان‌قبول خطرهای حساب شده[1] در بسیاری از کارهای‌مهندسی خصوصا" آنها که جنبهٔ موقت دارند ، یک بررسی اقتصادی ممکن است استفاده از ضرایب ایمنی کوچکتر از واحدرا توجیه کند .

جهت گیری کلی که امروزه در مهندسی به چشم می‌خورد ، سعی در متناسب ساختن احتمال خرابی قسمتهای مختلف یک‌طرح است.به طور مثال در طراحی یک ساختمان ، طراح‌باتکیه‌برتجربیات‌گذشته ای که‌باانواع‌مصالح و سیستمهای ساختمانی‌وبارهای وارد برساختمان وجوددارد ، تلاش می‌کند با انتخاب ضرایب ایمنی مختلف برای هریک از عوامل فوق ، احتمال خرابی اجزای مختلف را ، بادرنظر داشتن عدم قطعیتهای ذاتی موجود در این اجزا ،به یکدیگر نزدیک کند . این نظر از لحاظ ایستایی ساختمان موجه ، و از حیث اقتصادی‌راه‌حلی‌نزدیک به‌بهینه است .برای این منظور به‌طور مثال در طراحی پی ، ضریب ایمنی ۳ در طراحی اعضای اسکلت فولادی ساختمان ،ضریب ایمنی ۱/۷ ، و در طراحی اتصالات‌اسکلت ،ضریب ایمنی ۲به کارگرفته می‌شود تا احتمال خرابی تمام این‌اجزاء تقریبا" مساوی شود .

تعمیم مفهومی را که دراین مثال مطرح شد ، درآیین نامه های جدید ساختمانی به شکل ضرایب ایمنی جزیی[2] در طراحی به روش حالتهای حدی[3] ، و ضرایب بار چند گانه در طراحی به روش ضرایب بار[4] ، می‌توان ملاحظه کرد*.

۳ ــ تئوری قابلیت اعتماد

اگر متغیرهای تصادفی ظرفیت و نیاز هردو از توزیع هنجارتبعیت کنند انتگرال رابطه ۱۱ رامی‌توان معادل رابطه زیر دانست(P_f همان احتمال خرابی است) .

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \qquad (۱۲)$$

که

$$\beta = \frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}} \qquad (۱۳)$$

که در رابطه فوق $\bar{C}$ و $\bar{D}$ مساوی میانگین ظرفیت و نیاز بوده ، σ_C و σ_D انحراف معیار این دو متغیر تصادفی‌اند . ϕ ، معرف تابع توزیع تجمعی هنجار استاندارد (تابع توزیع تجمعی متغیری بامیانگین صفر وانحراف معیار واحد).است که‌مقادیر آن را می‌توان از جدول شماره ۱ به دست آورد . متغیر β را معمولا" شاخص قابلیت اعتماد[5] می‌نامند . اگر ظرفیت و نیاز هردو توزیعی به صورت لوگ هنجار[6] داشته باشند رابطه ۱۲ باز صادق است ولی مقدار β به‌شکل زیر بیان می‌شود .

$$\beta = \frac{\operatorname{Ln}\left[\frac{\bar{C}}{\bar{D}}\sqrt{\frac{1+\rho_D^2}{1+\rho_C^2}}\right]}{\sqrt{\operatorname{Ln}(1+\rho_D^2)(1+\rho_C^2)}} \qquad (۱۴)$$

که ρ_C و ρ_D به‌ترتیب ضرایب پراکندگی ظرفیت ونیازند . در عمل ، هرچند که ظرفیت و نیاز دارای توزیع لوگ هنجار باشند ،به شرط اینکه $\beta > ۲/۵$ باشد و ρ_C و ρ_D چندان بزرگ نباشند ،

---

* هرکدام ازاین عبارات مبنای یکی‌از فلسفه های طراحی سازه است ، که امروزه در مورد انواع مصالح و ساختمانها به کار گرفته می‌شوند . برای آشنایی بیشتر با این‌فلسفه‌هامی‌توان‌به کتابهای طراحی سازه مراجعه کرد .

1- Calculated Risk
2- Partial Safety Factors
3- Limit State Design Method
4- Load Factor Design Method
5- Reliability Index
6- Log-Normal

با استفاده ازروابط ۱۲ و ۱۳ می‌توان به تخمینهای خیلی‌خوبی‌برای P_f دست یافت. برای مقادیر β در این‌حدود، P_f به تابع‌توزیع زیاد حساس نیست. بنابراین شاخص‌قابلیت اعتماد، β، پارامترومعیارکارآمدی‌برای مشخص ساختن میزان ایمنی است.

تذکراین‌نکته‌ضرورت داردکه برای مقادیر بزرگ β، P_f کاملا" به شکـــل دقیق توزیع، حساس است.

اگر چه مشخص ساختن مقادیر قابل قبول P_f و β خارج از حدود صلاحیت این متن است، ولی شاید از نظـــر اطلاع بدنباشد که به مقادیر نمونه ای که‌معمولا" در مهندسی عمران قابل قبول اند اشاره‌ای کنیم [مرجع ۲]:

برای خرابی‌ازنظرمقاومت (کسیختگی):

$$P_f = 10^{-4} \quad , \beta \simeq 3.5$$

برای خرابی ازنظر قابلیت بهره‌برداری:

$$P_f = 10^{-2} \quad , \beta \simeq 2.0$$

β	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7703	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
1.6	0.94520	0.94630	0.94738	0.94845	0.94950	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449
1.7	0.95543	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.96080	0.96164	0.96246	0.96327
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670
2.0	0.97725									
2.1	0.98214									
2.2	0.98610									
2.3	0.98928									
2.4	0.99180									
2.5	0.99379									
3.0	0.99865									
3.5	0.999767									
4.0	0.9999683									
4.5	0.9999966									
5.0	0.99999971									
5.5	0.999999981									

(شاخص قابلیت اعتماد)

β	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20	5.61	6.00	6.36	6.71
P_f	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}

(احتمال خرابی)

جدول شماره ۱ : مقادیر تابع توزیع تجمعی احتمال (Φ) ، برای مقادیر مختلف β [مرجع ۲]

حال که احتمال خرابی راشناختیم وروش محاسبه‌آن را در دوحالت‌خاص دیدیم‌تذکراین نکته ضروری است که در حالت کلی، تمام متغیرها دارای توابع توزیع هنجار یا لوگ هنجارنیستند* لذا باید به روشی کلی جهت محاسبه احتمال خرابی دست یافت.

دررابطه۱۱ دیدیم که احتمال خرابی در حالت‌کلی با انتگرال زیر بیان می‌شود.

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} p_D(x) \cdot P_C(x)\, dx \qquad (۱۵)$$

همین رابطه رامی‌توان به شکل زیر بیان کرد

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} p_C(x) \left[1 - P_D(x)\right] dx \qquad (۱۶)$$

که در روابط فوق:

$p_D(X)$ = تابع توزیع چگالی احتمال نیاز

$P_D(X)$ = تابع توزیع تجمعی نیاز

$p_C(X)$ = تابع توزیع چگالی احتمال ظرفیت

$P_C(X)$ = تابع توزیع تجمعی ظرفیت

با انتگرال گیری عددی از روابط ۱۵ و ۱۶ به کمک ماشین‌های حسابگر الکترونیک می‌توان‌با تقریب خوب احتمال خرابی را برای متغیرهایی با هر نوع تابع توزیع احتمال، به دست آورد.

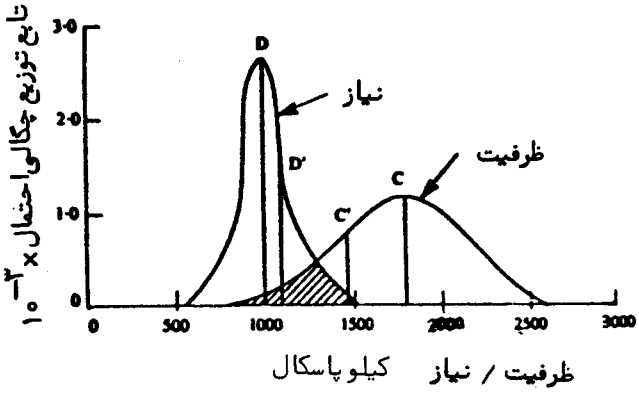
روشن است‌که احتمال عملکرد ایمن، که با R یا P_S نمایش داده می‌شود، مساوی یک منهای احتمال خرابی است.

$$R = P_S = 1 - P_f \qquad (۱۷)$$

به احتمال عملکرد ایمن، قابلیت اعتماد[1] اطلاق می‌شود.

مثال ۱

ضریب ایمنی مرکزی، متعارف، واحتمال خرابی مدل به نمایش درآمده در شکل ۶ را اگر پارامترهای توزیع هنجار آن $\bar{C}=1750, \sigma_C=300$ و $\bar{D}=1100, \sigma_D=150$ کیلوپاسکال باشند، محاسبه کنید. مقادیر محافظه کارانه D,C به‌ترتیب $\bar{D}=1100, \bar{C}=1450$ کیلوپاسکال‌اند [مرجع ۴].



شکل ۶ ــ مدل ظرفیت ــ نیاز (مثال ۱)

حل:

$$FS_o = \frac{\bar{C}}{\bar{D}} = \frac{1750}{1000} = 1.75 \quad \text{(ضریب ایمنی مرکزی)}$$

$$FS = \frac{C'}{D'} = \frac{1450}{1100} \simeq 1.32 \quad \text{(ضریب ایمنی متعارف)}$$

با استفاده از رابطه ۱۳ شاخص قابلیت اعتماد را بدست می‌آوریم:

$$\beta = \frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}} = \frac{1750-1000}{\sqrt{300^2+150^2}} = 2.23$$

از جدول شماره ۱ داریم:

$$R = \phi(2.23) = 0.987 = 98.7\%$$

مقدار بالا قابلیت اعتماد مدل است

$$P_f = 1 - 0.987 = 0.013$$

به‌عبارت دیگر احتمال خرابی P_f برابر ۱/۳ درصداست.

---

*کتاب مرجع شماره [۶] معرفی نسبتا" کاملی از توابع توزیع احتمال متداول در مهندسی عمران به عمل آورده‌است.

1- Reliability

چنانکه خود می‌توانید از این بحث نتیجه گیری کنید برای به دست‌آوردن قابلیت اعتماد لازم است مراحل زیرطی شود [مرجع ۱]:

الف) مرزبندی روشن بین ضوابط موفقیت و خرابی طرح مورد نظر.

ب) انتخاب یک مدل قطعی که متغیر اصلی را به‌ضابطه موفقیت یا خرابی مربوط سازد.

ج) تشخیص عدم قطعیتها در متغیر اصلی.

د) به‌دست آوردن توابع توزیع احتمال و گشتاورهای آماری متغیر اصلی.

وقتی که مراحل فوق پشت سرگذاشته شد، می‌توان به تحلیلهای لازم برای به‌دست‌آوردن قابلیت اعتماد پرداخت.

مثال ۲

میانگین بارورد بریک پی (نیاز) مساوی ۵۰ تن و انحراف معیار آن یک تن است. مقادیر محاسبه شده برای ظرفیت براساس مقاومت برشی زهکش نشده برحسب تن از داده های زیر به دست می‌آید.

95.0,93.7,100.0,95.3,99.4,94.6,7,100.1

975,94.4,95.3,97.4,100.1,99.2,98.6,95.6

91.4, 97.8, 98.8, 91.2

ضرایب ایمنی مرکزی واحتمال خرابی پی‌را با فرض بهترین تابع توزیع احتمال برای ظرفیت به دست آورید.

حل:

به کمک داده‌های فوق هیستوگرام تغییرات ظرفیت، و منحنی توزیع چگالی احتمال آن را ترسیم می‌کنیم.

تابع توزیع احتمال به سبب تمایل منحنی به یک سمت لوگ هنجار به‌نظر می‌رسد. این تخمین را می‌توان به روشهای آماری تحقیق کرد، ولی در اینجا با همین فرض به ادامه حل مثال می‌پردازیم:

$$\bar{C} = 96.5 \text{ ton}^* \quad , \quad \sigma_C = 2.7 \text{ ton}^*$$

(ضریب ایمنی مرکزی)

$$FS_o = \frac{\bar{C}}{\bar{D}} = \frac{96.5}{50} = 1.93$$

(ضرایب پراکندگی)

$$\rho_D = \frac{\sigma_D}{\bar{D}} = \frac{1}{50} = 0.020$$

$$\rho_C = \frac{\sigma_D}{\bar{C}} = \frac{2.7}{96.5} = 0.028$$

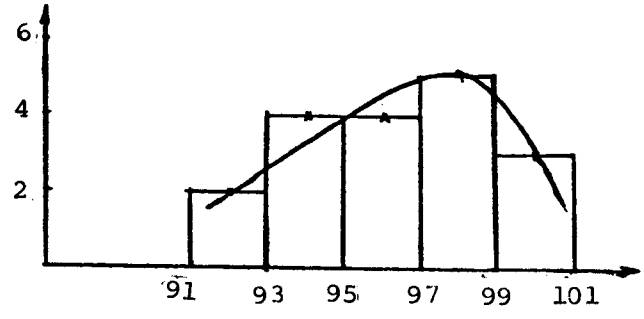
شاخص قابلیت اعتماد را با استفاده از رابطه شماره ۱۴ محاسبه می‌کنیم.

$$\beta = \frac{\text{Ln}\left[\frac{96.5}{50}\sqrt{\frac{1+0.02^2}{1+0.028^2}}\right]}{\sqrt{\text{Ln}(1+0.02^2)(1+0.028^2)}} = 1.91 < 2.5$$

(درحدودی است که با تقریب خوب می‌توان از جداول توزیع هنجار استفاده کرد)

با استفاده از جدول شماره ۱ خواهیم داشت:

$$R = \phi\ (1.91) = 0.97193$$



شکل ۷ ــ نمایش ترسیمی اطلاعات مثال ۲

* اغلب ماشین های حساب مهندسی شاخصهای آماری مانند میانگین وانحراف معیار را مستقیما" به وسیلهٔ برنامه های داخلی خود محاسبه می‌کنند، که در حل این مثال از چنین ماشین حسابی استفاده شده است.

مقداربالا قابلیت‌اعتماد مدل است بنابراین‌احتمال خرابی برابر است با :

$$P_f = 1- 0.97193 = 2.8\%$$

۴ ــ رابطه ایمنی بازمان :

با تعریفی که‌دربخش اول این مقاله‌ازقابلیت اعتماد به‌عمل آمد ، ملاحظه می‌شود که قید زمان جزئی از تعریف قابلیت اعتماد است . اگربخواهیم به این مفهوم کیفی جنبهٔ کمی دهیم ، می‌توان گفت : "احتمال آنکه سیستمی که زمان خرابی آن T است (T خود متغیر است) بتواند عملکرد مطلوب خودرادرشرایط محیطی معین تازمان t همچنان حفظ کند ،قابلیت‌اعتمادآن سیستم نام دارد . " به عبارت ریاضی

$$R(t) = Pr\ (T > t) \qquad (۱۸)$$

در این تعریف فرض شده است که سیستم در زمان t=0 خوب کار می‌کرده‌است ، علاوه‌براین واضح است که هیچ سیستمی‌نمی‌تواند تا ابد دچار خرابی نشود . به عبارت دیگر

$$R(o) = 1 \quad , \quad R(\infty) = 0 \qquad (۱۹)$$

تابع R(t) بین دوحدفوق‌نمی‌تواند سیرصعودی داشته باشد . لذا R(t) دربهترین‌حالت‌خودثابت ، وعموما" نزولی است . می‌توان اثبات کردکه‌احتمال‌عملکردایمن یک سیستم درفاصله زمانی t_2, t_1با عبارت زیر بیان می‌شود :

$$R_{t_2-t_1} = 1- R(t_1) + R(t_2) \qquad (۲۰)$$

عبارت بالا قابلیت اعتماد سیستم در فاصله زمانی t_2, t_1 نیست زیرا که‌ممکن است ،قبل‌از زمان t_1 خرابی اتفاق افتاده باشد متغیر $R_{t_2-t_1}$ در حقیقت تنها یک احتمال پیشاپیش[1] است که سیستم در فاصله زمانی مشخص از کار نیفتد ، که با احتمال مطلق عملکرد ایمن سیستم در فاصله زمانی t_2, t_1 که همان قابلیت اعتماد $R(t_2)$ است ، دارای مفهوم مشترک نیست [مرجع ۵].

در یک جمعیت آماری که از اعضای مشابه تشکیل یافته‌است به‌کمک‌تعریف قابلیت اعتماد به‌صورت تابعی نزولی از زمان ،می‌توان‌تعداد موارد خرابی را برحسب زمان به‌صورت یک منحنی به‌نمایش درآورد .اگر آهنگ خرابی لحظه‌ای[2] را با $\lambda(t)$ نشان دهیم ،که‌بیانگر احتمال خرابی یک وسیله در لحظه‌ای مشخص از عمر خود است ، آنگاه می‌توان اثبات کرد :

$$\lambda(t) = - \frac{1}{R(t)} \quad \frac{dR(t)}{dt} \qquad (۲۱)$$

می‌دانیم که $\frac{dR(t)}{dt}$ بیانگر شیب منحنی قابلیت اعتماد در زمان t است . رابطهٔ شماره ۲۱ را می‌توان به شکل زیر نوشت :

$$\lambda(t)\,dt = - \frac{dR(t)}{R(t)} \qquad (۲۱م)$$

حال اگر از دوطرف‌تساوی بین زمانهای o و t انتگرال گیری کنیم ، خواهیم داشت :

$$\ln R(t) = - \int_o^t \lambda(t)\ dt \qquad (۲۲)$$

بنابراین

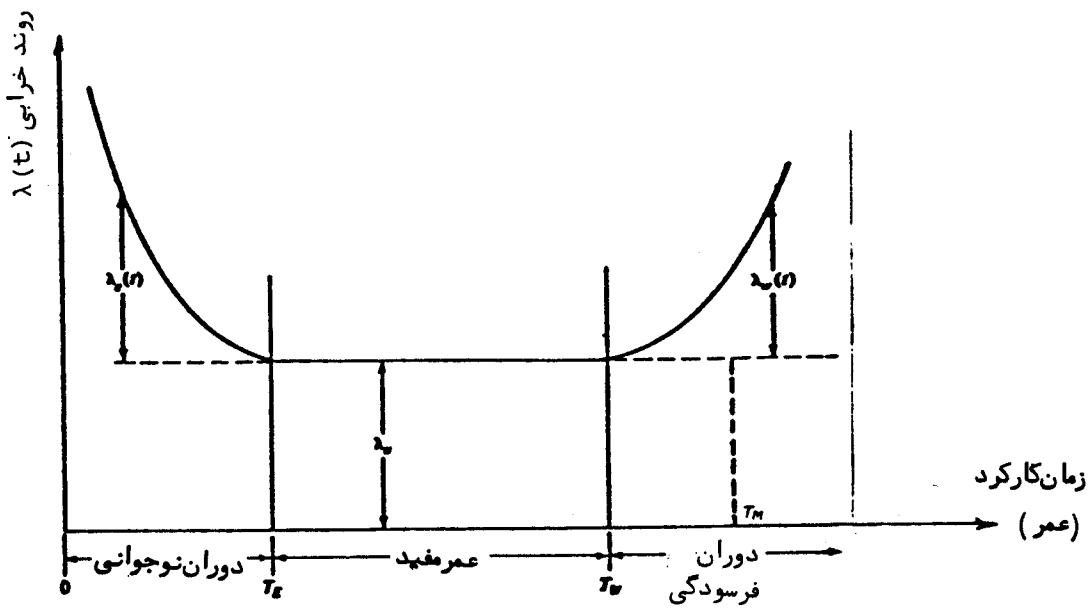
$$R(t) = \exp\left[- \int_o^t \lambda(t)\ dt\right] \qquad (۲۳)$$

اگر آهنگ خرابیها[3] یکنواخت و مستقل از زمان باشدآنگاه :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \qquad (۲۴)$$

در دنباله‌این بخش‌کاربرد عملی‌رابطه بالا را در مواقع بسیار پراهمیتی که آهنگ خرابیها مستقل از زمان است مشاهده خواهید کرد .

1- A Priori
2- Instantaneous Failure Rate
3- Failure Rate



شکل ۸ ــ منحنی آهنگ خرابیها برحسب عمر سیستم (شماتیک) [۵]

یک نمونه بزرگ از موارد همسان را در نظر بگیرید که در زمان T=0 تحت بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

بنابراین متغیر T بیانگر عمر بهره برداری از هر نمونه است. شکل ۸، آهنگ خرابیهای لحظه‌ای را برحسب زمان T به‌نمایش درآورده است.

چنانکه در شکل ملاحظه می‌شود، جمعیت مورد بررسی در دورهٔ اول عمر، آهنگ خرابی بالایی از خود به نمایش می‌گذارد. این روند به سرعت روبه کاهش می‌رود تا در زمان T_E حدوداً "ثابت می‌شود. دورهٔ زمانی 0، T_E را دوره نوجوانی[1] ویا دوره ظهور معایب[2] می‌نامند. خرابیها در این دوره اغلب به علت طراحی غلط ویا ضعف در ساخت بروز می‌کنند. در زمان T_E به علت اینکه تمام عناصر معیوب دچار خرابی شده‌اند، تثبیت آهنگ خرابیها مشاهده می‌شود. به‌این دورهٔ زمانی از عملکرد سیستم، "عمر مفید"[3] اطلاق می‌شود، زیرا که بهترین بهره‌برداری را از سیستم در طی این دوره می‌توان به انجام رساند. خرابیهایی که در طی دوره بروز می‌کنند طبیعتی اتفاقی، غیر مترقبه، وفاجعه آمیز دارند.

این خرابیها را به هیچ‌وجه نمی‌توان از قبل پیش‌بینی کرد.

وقتی که سیستم به عمر T_W رسید بالا رفتن میزان خرابیها دوباره مشاهده می‌شود. این خرابیها نتیجه فرسودگی اجزاء سیستم ونزدیک‌شدن آن به عمر تعیین شدهٔ خود است. از اکثریت نمونه ها که تا این مرحله جان سالم به دربرده‌اند نیمی در فاصله زمانی نسبتاً کوتاه T_W و T_M دچار خرابی می‌شوند، که T_M زمان متوسط فرسودگی[4] ویا "عمر متوسط"[5] جمعیت مورد نظر است.

برای مثال یک راه اصلی به طول ۳۰۰ کیلو متر را در نظر بگیرید. اگر هر کیلو متر از راه را یک نمونه فرض کنیم، تعداد ۳۰۰ نمونه برای مطالعه در اختیار داریم. تجربه نشان می‌دهد که عمر متوسط یک روسازی که خوب ساخته شده باشد در حدود ۱۵ سال است. اینیه راه مانند پلها، آبروها و دیوارهای حائل برای عمر متوسط طولانی تری طراحی می‌شوند. اما تقریباً همیشه در یکی دو سال اولی که راه زیر بار ترافیک و شرایط جوی گوناگون قرار می‌گیرد، خرابیهای زیادی در

1- Early Life Period
2- Debugging Period
3- Useful Life
4- Mean Wear-out Life
5- Mean Life

کیلومترهای مختلف آن بروز می‌کند . بسیاری از نقاط روسازی دچار ترکهای شدید ، چاله وآب بردگی می‌شود . بعضی از پایه‌های‌پلها آبشسته می‌شوند و برخی آبروها سرریز می‌کنند . دلیل این خرابیها ، خطاهای طراحی ، استفاده از مصالح پایین تراز استاندارد ، ویا روشهای اجرائی نادرست درنقاط مختلف راه است .تعمیر وبازسازی این مناطق ، آهنگ خرابیها راتاحد قابل ملاحظه‌ای پایین‌می‌آورد به طوری که با استفاده ازروشهای ادواری نگهداری راه،تاسالها می‌توان از آن‌بهترین بهره برداری‌را به عمل آورد . تنهاپس از گذشت عمر مفیدی در حدود ۱۰ سال است که دو باره میزان خرابیها افزایش می‌یابد و تعمیرات اساسی ویا بهسازی راه را ایجاب می‌کند .

یک بررسی همه جانبهٔ قابلیت اعتماد باید تمام دوره‌های سه‌گانه سیستم را در نظر داشته باشد . ولی درمورد سیستمهای‌نسبتا "قابل اعتماد*"، دوره‌ظهور معایب‌را می‌توان تا حد مطلوب کاهش داد ویا حتی به صفر رسانید . این عمل با به کار گیری روشهای صحیح و شناخته شده طراحی ،ساخت دقیق همراه‌باکنترل ، ومونتاژ صحیح ، قابل انجام است . استفاده از روشهای موثرعیب یابی در هر یک‌از مراحل فوق ودست‌آخرآزمایش‌سیستم درتحت‌شرایط مشابه بابهره‌برداری ، لازمه‌هرنوع برنامه‌ای از این‌نوع است . چنین سیستمی اگر بهره‌برداری‌درست‌ازآن به عمل‌آید ، در طی دوران عمر مفید خود دچار بروز فرسودگی نخواهد شد .

بررسی ایمنی دوران فرسودگی ، خصوصا "برای سیستمهایی که دارای عمر طولانی‌اند ، ضرورت کامل دارد . این بررسیها به تنظیم برنامه های نگهداری[1] و جلوگیری از تاثیرپدیده‌فرسودگی‌درهنگام بهره برداری ، که گاه‌خسارتهای فراوان در بردارد کمک می‌کنند .

درمهندسی‌عمران ،اغلب‌باسیستمهایی سروکارداریم که‌عمر مفید آنها در مقایسه‌با مصنوعات دیگر بسیار بالاست . باوجوداهمیت مسئله‌بررسی ایمنی در دوران فرسودگی دراین رشته از مهندسی (شاید برخلاف رشته‌های دیگر مهندسی) انجام‌این‌گونه بررسیهاکاری‌کاملا " تخصصی است ، ومهندسان طراح به‌طورروزمره‌با آن سروکارندارند . تنظیم روشهای تعمیر بهسازی ، ونگهداری[1] در دوران فرسودگی و انجام‌ارزیابیهای ادواری از ساختمانها پلها ،سدها وکانالهای قدیمی کاری‌است که تنهاگروهی ازمهندسان با تجربه ، که درمورد نوع خاصی ازمصالح یا‌اینیه تخصص دارند ، به‌صورت کارشناسی به آن می‌پردازند .

عمر مفید دوره‌ای‌است که در طی آن آهنگ خرابیها ثابت باقی می‌ماند (شکل ۸) . در این دوره رابطه شماره ۲۴ صدق می‌کند .

$$R(t) = e^{-\lambda t} \qquad (۲۴)$$

اگر زمان متوسط‌تا اولین خرابی[2] یک سیستم را با $\bar{T}$ نشان دهیم می‌توان اثبات کرد [مرجع ۵] :

$$\bar{T}=MTTF=-\int_o^\infty t\,\frac{dR(t)}{dt}\,dt \qquad (۲۵)$$

با انتگرال گیری جزء به جزء از عبارت بالا و قرار دادن $R(o)=1, R(\infty)=0$ در عبارت‌به‌دست‌آمده‌می‌توان نوشت :

$$\bar{T}=\int_o^\infty R(t)\,dt=\int_o^\infty \left\{\exp\left[-\int_o^t \lambda(\tau)\,d\tau\right]\right\} dt \qquad (۲۶)$$

در طی عمر مفید ، رابطه بالا به صورت زیر در می‌آید :

$$\bar{T}= MTTF = \int_o^\infty e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda} \qquad (۲۷)$$

چنانکه‌مشاهده‌می‌شود‌دردورهٔ‌عمر مفید ، احتساب فاکتورهای ایمنی ، بسیار ساده‌تر از بقیه دوره‌های عمر سیستم است .در اینجا اهمیت جداکردن دورانهای نوجوانی و فرسودگی ، از محاسبات ایمنی در طی عمر مفید مشخص می‌شود . به‌همین دلیل‌است که‌درطی‌بخش قبل تئوری قابلیت اعتماد به‌صورت مستقل از زمان معرفی شد .

به‌طورکلی‌می‌توان‌گفت که‌درجه ایمنی سیستمهاتابعی از زمان‌است ،ولی‌همیشه‌مقطعی از زمان وجود دارد که‌احتمال

---

* سیستمهای‌قابل اعتماد را می‌توان سیستمهایی دانست که نسبت به پارامترهای موثر در عملکرد آن شناخت و کنترل بهتری وجود دارد . این‌تعریف مشخصا " از هر جهت نسبی است .

1- Maintenance

2- Mean Time to Failure

خرابی وقابلیت اعتماد در طی این مدت ثابت است.به طور مثال‌دلیلی وجود ندارد که قابلیت اعتمادساختمانی مسکونی که ۳ سال ازعمرآن می‌گذرد ویاپلی‌بتنی که ۶ سال از آن بهره‌برداری شده است ، از روز اول کمتر باشد (گرچه ممکن است قابلیت‌اعتماد پل یا ساختمان ازاول پایین بوده باشد) . این مقطع زمانی عمر مفید نام دارد .

آیین نامه‌های طراحی نیز اغلب عمر مفید را حوزه تجزیه وتحلیلهای قابلیت‌اعتماد قرار داده اند.در منطق این آیین‌نامه ها ، بادستورالعملهای اجرائی‌وکنترل کیفی می‌توان از خرابیهای زودهنگام جلوگیری به عمل‌آورد . همچنین با تدابیرفنی‌وتوجه‌به‌قسمتهایی‌از طرح که‌بالقوه‌امکان خرابیهای زنجیره‌ای‌درآنهاوجوددارد ،می‌توان‌فرارسیدن‌زمان فرسودگی را به‌تعویق انداخت وعمرمفید حداقلی راتضمین کرد . به‌این ترتیب بررسیهای‌قابلیت‌اعتماد ،در طول این عمر مفید کافی به نظر می‌رسد .

بنابراین ، عدم اشارهٔ صریح آیین‌نامه‌های طراحی به مسئله‌زمان ،به‌عنوان عاملی‌موثر در ایمنی سیستم ، نباید ما رااز فرضهای به عمل‌آمده در تهیه این مدارک ، و سازگاری این فرضهابا مفهوم ایمنی مطرح شده در این آئین نامه ها غافل کند .

۵ ـ بالا بردن ایمنی سیستمها :

زمانی که‌مشخصات‌عوامل موثر در ایمنی یک‌سیستم و همبستگی بین آنها شناخته شد ، وظیفهٔ بعدی مهندسی که با تجزیه وتحلیل ایمنی سروکار دارد ، پیدا کردن بهترین روش برای بالابردن قابلیت‌اعتماداست . مهمترین روشهای عمومی افزایش قابلیت اعتماد را می‌توان به‌ترتیب زیر برشمرد :

۱ ـ کاهش پیچیدگی‌سیستم‌تامیزانی که‌هنوز کارآیی قابل انتظار خودرا حفظ‌کند . اجزاء غیر ضروری وترکیبات پیچیدهٔ نالازم ، تنها امکان خرابی را افزایش می‌دهد .

۲ ـ بالابردن قابلیت اعتماد قسمتهای تشکیل‌دهنده سیستم

۳ ـ استفاده از "یدکهای موازی[1]" که‌سیستم را قادر می‌سازد در صورت از کار افتادن جزئی از آن ، وظیفهٔ جزء از کارافتاده را بر دوش قسمتهای دیگر بگذارد و به عملکرد خود ادامه دهد .

۴ ـ استفاده از "یدکهای منتظر[2]" که بکارگیری مکرر اجزا در یک سیستم امکان‌آن را فراهم می‌آورند تا با از کارافتادن یک جزء یدکی آن وارد عمل شود و کار سیستم بدون‌وقفه ادامه یابد .

۵ ـ "نگهداری تعمیری[3]" ، که جایگزین ساختن اجزاء ازکارافتاده به وسیله عامل نگهداری کننده است ، و ضرورتا " بلافاصله انجام نمی‌گیرد .

۶ ـ "نگهداری پیشگیرانه ادواری[4]" ، که طی‌آن قسمتهایی‌از سیستم‌که درمعرض خرابیهای بیشتری قرا ردارند حتی اگر درزمان بازبینی ادواری سالم باشند ، به عنوان پیشگیری تعویض می‌شوند .

برای تضمین ایمنی می‌توان‌از ترکیبی بین روشهای فوق استفاده کرد . برای مثال تعمیر یدکهای موازی از کار افتاده ، هنگامی که سیستم باتکیه به اجزاء دیگر به کار خود ادامه‌می‌دهد ،ایمنی‌را بسیارافزایش خواهدداد .این راه‌حل ، ترکیبی از روشهای ۳ و ۵ است .

به‌کارگیری روشهای ۱ و ۲ ، بسته به سطح تکنولوژی ، با محدودیتهایی‌روبه روست . چهار روش دیگر دراغلب‌موارد اجازه می‌دهند که ایمنی سیستم را تا حدود زیادی بالابریم ولی این روشهانیز دراثر محدودیتهایی مانند وزن ، حجم ، و قیمت همیشه کارآیی ندارند . وظیفه مهندس‌آن است که با توجه‌به‌تمام محدودیتهای وزنی ،حجمی ،هزینه ای و غیره ایمنی طرح را به بیشینه ممکن برساند ، ویا برعکس، برای رسیدن به یک تراز ایمنی مشخص وزن ، حجم ، یا هزینه را کمینه کند .

در طراحی همیشه ممکن است حالتی پیش‌آید که اجزاءطرح به‌صورت سری[5] درآیند . در این صورت با خرابی یک جزء ، دیگر اجزاء نیز به‌صورت زنجیره‌ای از کار می‌افتند . بنابراین قابلیت اعتماد یک سری کوچکتر از قابلیت اعتماد ضعیف ترین جزء آن است .اگرقابلیت اعتماد سیستم را با R_s نمایش دهیم :

$$R_s = R_1 R_2 \ldots\ldots\ldots R_n = \prod_{1}^{n} R_i \qquad ۲۸$$

1- Parallel Redundancy

2- Standby Redundancy

3- Repair Maintenance

4- Priodic Preventive Maintenance

5- Series

$R_1, R_2, \ldots, R_n$ قابلیت اعتماد اجزاء سیستم اند .

درسیستمی که چند عضو به‌طور همزمان انجام‌وظیفه مشترکی‌رابه عهده دارند ، قابلیت اعتماد به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد .دراین سیستمهاکه سیستم موازی[2] نامیده می‌شوند ،باید چندین جزء از کار بیفتد تا کار سیستم متوقف شود . اگر قابلیت اعتماد یک سیستم موازی را با R_p نمایش دهیم آنگاه :

$$R_p = 1 - \prod_{1}^{n} (1 - R_i) \qquad (۲۹)$$

R_i ، قابلیت اعتماد هریک‌از اجزاء سیستم است .

در مورد قسمتهایی که عملکرد ایمن آنها در کارکرد سیستم از اهمیت زیادی برخورداراست ، ودر ضمن تعمیر یا جایگزینی آنها مشکل ویا غیر ممکن است به کارگیری اجزاء موازی می‌تواند بسیار مفید واقع شود . برای مثال در مورد پیزومترهایی[2] که در بدنهٔ یک سد خاکی کارگذارده می‌شوند تافشارهای‌تراوشی‌راپس‌از پرشدن ثبت کنند ، همیشه احتمال خرابی دستگاهی که در زیر خروارها خاک مدفون‌شده است ، وجوددارد . به‌علت اطلاعات بسیار مفیدی که این دستگاهها در اختیار می‌گذارد ، ایمنی آنهااز اهمیت زیادی برخوردار است . در این مورد به کارگیری ۳ دستگاه موازی با قابلیت اعتماد ۸۰ درصد بهتر از یک دستگاه باقابلیت اعتماد ۹۹ درصد است (جدول ۲) . استفاده از دستگاههای باقابلیت اعتماد پایین ،به‌معنی‌بی‌دقتی در ساخت ونصب‌آنها نیست ، چه استفاده از دستگاهی باقابلیت اعتماد خیلی بالا ممکن است ازنظرفنی ویا اقتصادی امکان پذیر نباشد . جدول‌شماره ۲ اثر تکرار اجزاء موازی را برروی ایمنی به نمایش می‌گذارد . قابلیت‌اعتماد یک جزء تکرار شده ۸۰و۹۰ و ۹۵ و ۹۹ درصد درنظر گرفته شده است .

۶ ــ نتیجه گیری

طی این مقاله به طرز ساده با مفاهیم احتمال‌خرابی و ضریب ایمنی آشنا شدیم ، منشاء بسیاری از پیچیدگیهاآن است که‌مهندسان‌سعی دارند بین این دومفهوم ارتباط برقرار کنند و یکی را از دیگری به دست آورند . این کار در اصل اشتباه است ، زیرا که عبارت احتمال خرابی دربردارنده مفهوم‌استفاده از احتمالات در مهندسی است ، در صورتی‌که عبارت ضریب ایمنی حتی‌اگر ظاهرا" به وسیله مقادیر آماری تبیین شده باشد ، در اصل یک مقدار قطعی است و محصول نقطه نظر تعیین اندیشانه در مهندسی است .

ولی‌چنانکه‌قبلا "نیز مطرح شد یکی از موارد استفاده مهم تئوریهایی‌که‌در این مقاله بیان شده‌اند دستیابی‌به‌روشی سیستماتیک‌برای تعیین ضرایب ایمنی مناسب ، برای یک رشته مسائل‌مشابه است . استفاده ازتئوری قابلیت اعتماد درتعیین ضرایب‌ایمنی ،مغایرتی با مطالب کلی که در باره عدم ارتباط صریح بین ضرایب ایمنی واحتمال خرابی بیان شده ندارد . باید توجه داشت ، که در تعیین ضرایب ایمنی با استفاده از تئوری قابلیت اعتماد ، همیشه‌حالت‌خیلی خاصی را که توابع توزیع احتمال ظرفیت ونیاز ، مشخص باشند و پراکندگی آنها نیز کاملا" معلوم باشد در نظر می‌گیریم . در این حالت است که ، با ایجاد تغییرات عددی در پارامترهای موثر به وسیلهٔ ماشینهای‌حساب قابل برنامه ریزی یا حسابگرهای الکترونیک ،

دفعات تکرار	1	2	3	4
قابلیت اعتماد (%)	80	96.0	99.2	99.84
	90	99.0	99.9	99.99
	75	99.75	99.975	99.999
	99	99.99	99.9999	-

جدول شماره ۲ ــ اثر تکرار های موازی برروی قابلیت اعتماد

1- Parallel Systems

2- Piesometers

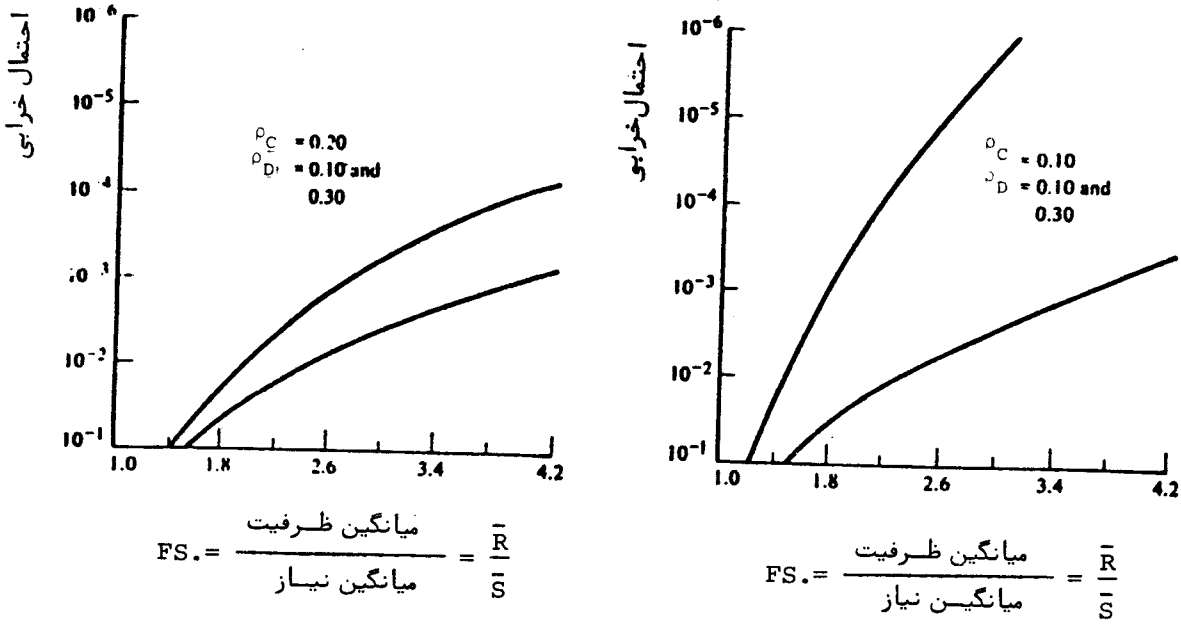
امکان برقراری ارتباط بین مقادیر عددی ضریب ایمنی و احتمال خرابی به‌وجود می‌آید. شکل ۹، نتیجه برقراری چنین ارتباطی را در موردی که تابع ظرفیت هنجار است و تابع نیاز از قانون کرانه حدی نوع II تبعیت می‌کند برای ضرایب پراکندگی مشخصی، به نمایش گذارده است. چنین منحنیهایی برای آیین‌نامه نویسان، مهندسان بی‌تجربه که غالبا" درانتخاب ضریب ایمنی شم کافی ندارند، ودر مواقعی که طرحهای نو و بدون سابقه تجربی کافی مطرح می‌شوند از اهمیت بسیار زیادی بر خوردار است. نمونه دیگری از همین منحنیها برای مواقعی که ظرفیت و نیاز هر دو هنجار باشند در شکل ۳ به نمایش درآمده بود.

قبل از خاتمهٔ بحث لازم است به‌این نکته اشاره کنیم که، برای به دست‌آوردن مفهوم آماری مفیدی از ایمنی طرح، مهندس باید قبلا "تعریف روشنی از آنچه خرابی نامیده می‌شود، دردست داشته باشد. در طول بحث چنانکه شایسته این مطالب بود به‌آن پرداخته نشد، ولی ارائه تعریف دقیق و، روشنی از خرابی برای بارگذاریهای مختلف، موارد استفاده های خاص شرایط جوی گوناگون ومسائلی با طبیعتهای متفاوت، یکی از مشکل ترین مراحل تعیین قابلیت اعتماد می باشد ومستلزم تلاشها وبرنامه ریزیهای فراوان است. به‌هرحال تنها کسی که معلومات کافی وبصیرت لازم را برای ارائه چنین تعاریفی دراختیار دارد، عنصر کلیدی به نام مهندس باتجربه است. حتی بسیاری از ضوابطی که همه روزه درکار، مورد استفاده قرار می‌گیرند و تثبیت شده به نظر می‌رسند در حقیقت تعاریفی نارسا هستند ودارای مرزهای مخدوش اند. برای مثال، لایهٔ اساس یک راه را اگر $I_p^{(1)}$ آن از ۵ بیشتر باشد محکوم به خرابی می‌دانند، ولی مقادیر کمتر از ۵ قابل قبول اند. این تعریف از خرابی، یک مرزبندی قرار دادی است که به هیچ‌وجه قابل توجیه نیست.

باید توجه داشت که مقادیر عددی به دست‌آمده از یک تحلیل قابلیت اعتماد نمی‌تواند از مدل قطعی زیر بنای آن، وپارامترهای آماری که از مجموعه اطلاعات به دست‌آمده است، دقت بهتری داشته باشد.

مسائل مهندسی کلا" دررابطه‌باتحلیل قابلیت اعتماد به یک طیف تقسیم می‌شوند. در یک طرف طیف مسائلی قرار دارند که تجربه عملی کافی، وضرایب ایمنی متناسب، که کارآیی آنها بکرات به‌اثبات رسیده، از قبل موجوداند. تحلیل قابلیت اعتماد دراین حالات اطلاعات اضافی چندانی به دست نمی‌دهد.

مسئله طرح سازه های فلزی متداول تحت بارهای



شکل ۹ ــ احتمال خرابی ــ ضریب ایمنی (ظرفیت هنجار ــ نیاز، کرانه حدی نوع II) [مرجع ۲]

(۱) شاخص خمیری (Plasticity Index)

عادی در این رده قرار می‌گیرد .

در طرف دیگر طیف ، مسائلی قرار دارند که تجربه مستقیم در مورد آنها بسیار کم است ، علاوه براین ، عوامل ناشناخته بسیاری نیز در مسئله دخیل‌اند وتردید برروشهای محاسباتی سایه افکنده است . در این گونه مسائل ، دستیابی به قابلیت اعتماد واقعی بسیار مشکل است ، واحتمال‌خرابی بالاست . مسئله پایداری شیروانیهای خاکی در رسهای نرم‌از این گروه مسائل است .کاربرد تئوریهای‌قابلیت اعتماد دراین موارد به شدت محدود می‌شود .

با این حال ، بین این دو حالت حدی مسائلی قرار دارند که تئوری قابلیت اعتماد درمورد آنها بالقوه دارای کاربرد زیادی‌است . دراین‌گونه مسائل ، رفتار عوامل موثر در طرح بادقت خوبی مشخص شده‌اند ولی اطلاعات تجربی‌کافی از طرحهای مشابه قبلی در دسترس نیست طرح شیروانیهای خاکی در مناطقی که چنین ابنیه‌ای سابقه قبلی ندارند ، ولی خواص خاک از طریق آزمایش به دقت قابل دستیابی است ، از این قبیل مسائل است . دراین مورد می‌توان با تحلیل قابلیت اعتماد ، ضریب ایمنی متناسب وهماهنگ با موارد مشابه ، برای طراحی تعیین کرد .

به هرحال‌حتی‌اگرنتایج‌عددی‌به‌دست‌آمده‌ازتحلیل قابلیت‌اعتمادیک‌سیستم ،موردتردیدقرار گیرند،صرف انجام چنین تحلیلی‌وفرمول بندیهای دقیق ومفصلی که لازمه‌آن است‌به‌درک‌تاثیرهریک‌ازعوامل درایمنی کل وبه‌دست آوردن تصویری روشن ترازاحتمال خرابی کمک شایانی خواهد کرد .

فهرست منابع :

1) Whitman, Robert V., "Evaluating Calculated Risk In Geotechnical Engineering", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 110 No.2 FEB. 1984, P.P.145-183.

2) Hart, Gary C., " Uncertainity Analysis , Loads, and Safety In Structural Engineering",Prentice-Hall, 1982, P.P.104-134.

3) Magnan, Jean P. "Les methodes Statistiques et Probabilistes en mécanique des sols", Bulletin de liaison, de l'ecole nationale des Ponts et Chaussées, Decembre 1982, P.P. 131-136.

4) Lee, I.K., et. al "Geotechnical Engineering", Pitman Publishing Inc., 1983, P.P. 84-89.

5) Smith, O.S. "Introduction to Reliability in Design",Mc Graw-Hill Book Co., Inc., 1976.

6) Benjamin, J.R., and Cornell, C.A., "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers", Mc Graw-Hill Book Co., Inc., N.Y. 1970.