

# مروری بر طراحی بهینه نامعین و کاربردهای آن در صنعت هوافضا

جعفر روشنی‌یان<sup>۱</sup>، مسعود ابراهیمی<sup>۲\*</sup> و علی اصغر بطالبلو<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

\* تهران، وفادار شرق، بلوار دانشگاه

roshanian@kntu.ac.ir

هدف از این مقاله معرفی مفهوم طراحی بهینه نامعین یا طراحی بهینه در حضور عدم قطعیت بر مبنای فعالیت‌های تحقیقاتی صورت گرفته در دو دهه اخیر است. بدین منظور پس از بیان مقدمه‌ای در مورد عدم قطعیت‌ها، تعریف عدم قطعیت و روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بیان شده‌اند. پس از آن روش مقابله با عدم قطعیت‌ها در طراحی سنتی تشریح شده است. در ادامه به اهمیت توجه به عدم قطعیت‌ها در طراحی سیستم‌های امروزی پرداخته شده و نمونه‌های مختلفی از مزایای آن در پروژه‌ها و شرکت‌های مختلف بیان می‌شود. قسمت سوم، به معرفی روش‌های تحلیل بازه، منطق فازی و تحلیل احتمالی که در تحلیل عدم قطعیت‌ها کاربرد دارند، اختصاص دارد. در ادامه دو دسته کلی مسائل طراحی نامعین، یعنی مسائل طراحی بهینه مقاوم و طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار می‌گیرند. بخش بعد به معرفی کاربردهای موضوعی روش‌های طراحی نامعین و تحقیقات روز دنیا در این زمینه می‌پردازد. در نهایت چالش‌ها و چشم‌انداز روش‌های طراحی نامعین بیان می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی، طراحی مقاوم، قابلیت اطمینان طراحی

## مقدمه

روش معمول در مهندسی، در نظر گرفتن مقادیر نامی برای همه پارامترها در فرآیند طراحی است، اما در هر سیستم مهندسی واقعی درجه‌ای از عدم قطعیت وجود دارد. بعد از ساخت یک سیستم بر مبنای طراحی انجام شده، خصوصیات و محیط عملکردی آن به دلایل زیادی مطابق با شرایط مطلوب (شرایط در نظر گرفته شده هنگام طراحی) نیست. این دلایل عبارتند از: عدم قطعیت در خصوصیات مواد، عدم قطعیت در شرایط عملکردی یا حتی تصمیم به تغییر بعضی از پارامترها به دلایلی نظیر هزینه. به عنوان مثال به موارد زیر توجه کنید:

- در طراحی آیرودینامیکی بال یک هواپیما عدم قطعیت‌ها در مقادیر ضرایب آیرودینامیکی به دلیل عدم قطعیت در هندسه خارجی و شرایط صافی سطح خارجی بال (ناشی از تکران‌های تولید) به وجود می‌آید.
- استحکام سازه بال به دلیل عدم قطعیت در خصوصیات مکانیکی مواد به کاررفته (مانند چگالی و تنش تسلیم) و همچنین عدم قطعیت هندسه و اتصالات قطعات، دارای عدم قطعیت است.

این مثال نشان‌دهنده این است که روش معمول طراحی معین، معمولاً منجر به طرحی شده که ممکن است، عملکرد آن به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها از حالت نامی خارج شود. این عدول از حالت نامی ممکن است به قدری کوچک باشد، که تنها منجر به از دست دادن یک امتیاز (افزایش مصرف سوخت برای یک هواپیما) شود. اما در بعضی مواقع اثر عدم قطعیت‌ها ممکن است کل عملکرد

۱. استاد

۲. دانشجوی دکتری (نویسنده مخاطب)

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد

عدم دقت‌ها<sup>۴</sup> به شکل علمی مورد بررسی قرار نگرفته بود. در اوایل قرن بیستم میلادی مکانیک آماری به صورت رسمی به عنوان یک شاخه علمی پذیرفته شد. در ابتدا تصور می‌شد که عدم قطعیت با استفاده از تئوری احتمال به دست می‌آید. شصت سال طول کشید تا مشخص شد مفهوم عدم قطعیت عمیق‌تر از آن است که تنها با استفاده از تئوری احتمال قابل حصول باشد. بنابراین مطالعه بر روی ماهیت غیراحتمالی عدم قطعیت و همچنین کاربردهای آن در مهندسی و علوم آغاز شد. در طی سه دهه اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه مدل‌سازی عدم قطعیت انجام شد و تعدادی نرم‌افزار در این زمینه توسعه پیدا کرد [۲].

برای عدم قطعیت‌ها دسته‌بندی‌های بسیار متفاوتی ارائه شده است. در حوزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی عدم قطعیت‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. عدم قطعیت‌های پارامتری<sup>۵</sup> که مربوط به عدم شناخت صحیح از پارامترها می‌شود، مثلاً در یک سیستم کنترلی عدم قطعیت در شرایط اولیه و مرزی، عدم قطعیت در ورودی‌ها و عدم قطعیت در پارامترهایی که در فرآیند محاسباتی تأثیر گذارند نظیر ضرایب تابع تبدیل از جمله عدم قطعیت‌های پارامتری محسوب می‌شوند [۲].

دسته دوم عدم قطعیت‌ها با نام عدم قطعیت‌های فرم مدل<sup>۶</sup>، به سطح صحت مدل مربوط می‌شوند، یعنی اینکه آیا مدل ریاضی ارائه شده کاملاً فیزیک مسئله را در بر می‌گیرد یا نه. از این عدم قطعیت‌ها گاهی به عدم قطعیت غیرپارامتری، عدم قطعیت‌های ساختاری<sup>۷</sup> و دینامیک مدل نشده نام برده می‌شود. در بعضی مراجع به مجموع دو نوع عدم قطعیت ذکر شده، عدم قطعیت مدل‌سازی گفته می‌شود.

تعریف عدم قطعیت‌های پارامتری نسبتاً ساده بوده و معمولاً بسته به نوع کاربرد مطابق شکل (۱) به یکی از سه صورت تابع چگالی احتمال، تابع عضویت یا یک بازه بیان می‌شود. از سوی دیگر مشخص کردن عدم قطعیت‌های مدل بسیار مشکل است و در مراجع کمتر به آن پرداخته شده است [۱].

نمایش بازه برای پارامترهای غیرقطعی وقتی استفاده می‌شود که اطلاعات موجود بسیار خام و اولیه بوده و تنها محدوده بالا و پائین آنها مشخص باشد. تابع چگالی احتمال کامل‌ترین مشخصه برای یک پارامتر غیرقطعی است. تابع تعلق که در روش منطق فازی به کار می‌رود، از منظر جزئیات بین بازه و تابع چگالی احتمال قرار می‌گیرد. مشخصات پارامترهای غیرقطعی می‌تواند با نظر

سیستم را دچار چالش کند (شکست بال به دلیل اثرات آبروالاستیسیته). بدین ترتیب مطالعه و کنترل عدم قطعیت‌ها بسیار اهمیت پیدا می‌کند.

مسئله مهم بعدی، بهینه‌سازی طراحی سیستم در حضور عدم قطعیت‌هاست. در این گونه مسائل، تابع یا توابع هدف مورد نظر بهینه شده و در عین حال سعی می‌شود، اثرات عدم قطعیت‌ها تا حد ممکن کاهش یابد. مثلاً برای مثال فوق میزان افزایش مصرف سوخت حداقل شود و احتمال شکست بال بسیار اندک باشد. مسائل بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت به مراتب پیچیده‌تر از مسئله برررسی اثر عدم قطعیت در یک طرح خاص هستند. بار دیگر به مثال ساده فوق رجوع کنید. با اندکی دقت مطالب زیر به راحتی قابل استنباط است:

- عدم قطعیت در طراحی آیرودینامیکی، منجر به عدم قطعیت در بارگذاری بال می‌شود (از طریق ضرایب آیرودینامیکی).
- عدم قطعیت در طراحی سازه، باعث عدم قطعیت در ضرایب آیرودینامیکی می‌شود (از طریق شرایط نصب و اثرات آبروالاستیسیته).

چنانکه مشاهده می‌شود، عدم قطعیت در صافی سطح بال تنها موضوع آیرودینامیک را در بر نمی‌گیرد. بنابراین در مسائل چند موضوعی، بررسی عدم قطعیت اهمیتی دوچندان پیدا کرده و در عین حال پیچیدگی و هزینه محاسباتی بسیار زیادی است.

در این مقاله، بعد از ارائه تاریخچه مختصری از چگونگی ورود مبحث عدم قطعیت به علوم مهندسی، به تعریف عدم قطعیت‌ها و چگونگی مدل‌سازی آنها پرداخته می‌شود. سپس روش‌های مقابله با عدم قطعیت‌ها در طراحی و بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت تشریح می‌شود. در انتها کاربردهای موضوعی بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت و همچنین نمونه‌هایی از بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی در حضور عدم قطعیت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## عدم قطعیت در طراحی

### تعریف و مدل‌سازی

عدم قطعیت پدیده‌ای ناشناخته در دنیای طبیعی و فناوری است. مهندسان به طور مستمر در طراحی‌های خود با عدم قطعیت‌ها مواجه می‌شوند، با این حال تعریف واحدی برای آن وجود ندارد. یک تعریف کلی برای عدم قطعیت عبارت است از: فاصله اطلاعاتی بین آنچه می‌دانیم و آنچه برای تصمیم‌گیری با کم‌ترین ریسک لازم است بدانیم [۱]. تا قبل از شروع قرن بیستم میلادی عدم قطعیت و سایر انواع

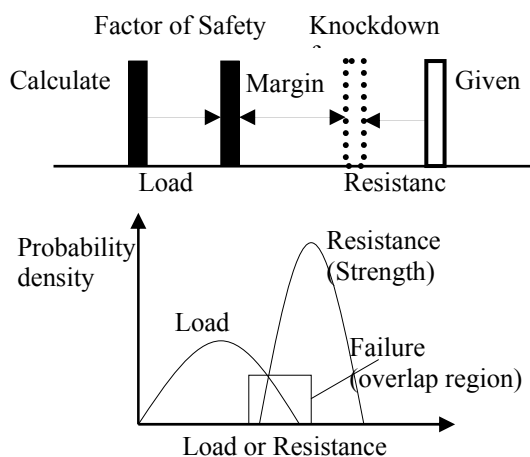
4. Imprecision

5. Parameter

6. Model Form

7. Structural

مسئله بهینه‌سازی کافی است حد مجاز قید مورد نظر را کاهش و مقدار محاسبه شده آن را افزایش داد.



شکل ۲- روش ضریب ایمنی - ضریب خرابی [۱]

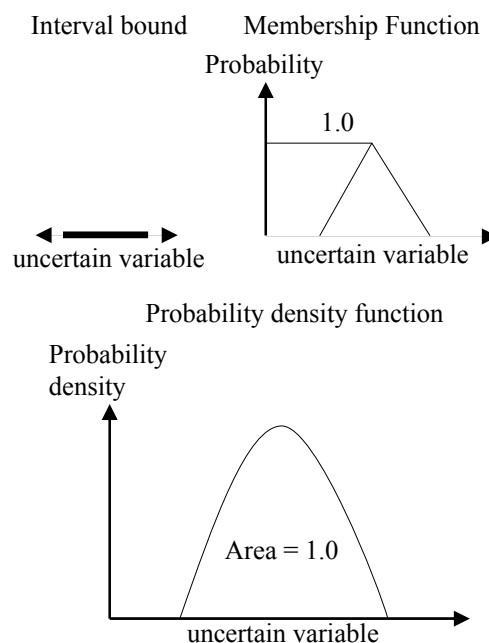
این روش احتساب عدم قطعیت‌ها در طراحی معایب متعددی دارد، که عبارتند از:

۱. مقدار عملی ضریب ایمنی و خرابی با توجه به تجارب گذشته در مورد مواد به کار رفته و مسئله طراحی موجود تعیین می‌شود، بنابراین با افزایش کاربرد مواد و سیستم‌های جدید بدون تجربه کاربرد قبلی، تصمیم‌گیری برای مقدار مناسب این ضرایب مشکل خواهد بود. علاوه بر این در مسائل بهینه‌سازی کلی هیچ معیاری برای انتخاب این ضرایب وجود ندارد.
۲. در فرآیند طراحی بیان شده، اندازه‌گیری مقاومت و قابلیت اطمینان طرح میسر نیست. در نتیجه به هیچ وجه نمی‌توان طرح‌ها را از منظر قابلیت اطمینان و مقاومت در مقابل شاخص بهینگی مقایسه کرد.
۳. با توجه به اینکه اطلاعات قابلیت اطمینان تولید نمی‌شود، بررسی سازگاری قابلیت اطمینان کل وسیله پرنده امکان‌پذیر نیست. حتی ممکن است با دادن جریمه وزنی زیاد، قابلیت اطمینان وسیله تغییری نکند.
۴. استفاده از این روش در مسائل بهینه‌سازی با چند قید ممکن است، فضای امکان‌پذیر طراحی را بسیار محدود کند، در نتیجه طرح ایجاد شده بسیار محافظه‌کارانه خواهد بود.

### اهمیت توجه به عدم قطعیت‌ها در فرآیند طراحی

به شکل (۳) توجه نمایید؛ منحنی سمت چپ هزینه‌های تولید برحسب زمان را برای محصولات شرکت بوئینگ نمایش می‌دهد. بخش اعظم هزینه‌ها مربوط به تست محصول و بازنگری مجدد در طراحی آن است [۳].

کارشناس، داده‌های تجربی، تخمین یا فرایندهای محاسباتی بالادستی به‌دست آید.



شکل ۱- روش‌های مختلف بیان عدم قطعیت [۱]

### مقابله با عدم قطعیت در روش سنتی طراحی

یک راه حل برای مقابله با عدم قطعیت‌ها در نظر گرفتن قیودی محدودتر و شرایط کاری سخت‌تر از آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد، است. این روش به صورت ساده شده در فرآیند طراحی قطعات مکانیکی، بر مبنای ترکیبی از ضریب ایمنی<sup>۸</sup> و ضریب خرابی<sup>۹</sup> (یا ضریب ایمنی به تنهایی) به کار می‌رود. ضریب ایمنی، عددی بزرگ‌تر از یک است که در بار ضرب می‌شود (شرایط کاری سخت‌تر). ضریب خرابی نیز عددی کوچک‌تر از یک است که در استحکام ضرب می‌شود (قیود محدودتر). روش فوق برای حدود ۶ دهه، روشی فراگیر در طراحی سازه‌ها به کار رفته است [۳]. شکل (۲) روش فوق را به شکل شماتیک نمایش می‌دهد. استفاده از این روش در حالی انجام می‌شود که مطابق شکل، احتمال فراتر رفتن بار از مقاومت بسیار اندک است. برای صحت‌گذاری طراحی در این روش بعد از تولید، قطعه تحت بدترین شرایط بارگذاری تست می‌شود.

البته بسط روش فوق به یک مسئله بهینه‌سازی به راحتی امکان‌پذیر است. در واقع شکست در یک مسئله طراحی سازه، معادل نقض یک قید در بهینه‌سازی است. بنابراین برای اعمال این روش در یک

8. Safety factor  
9. Knockdown

نورتروپ گرومن، جنرال الکتریک، بوئینگ و موتورولا اشاره کرد. هزینه صرفه‌جویی شده در این شرکت‌ها مطابق جدول (۱) است [۴].

شکل (۴) هزینه و سود استفاده از روش‌های طراحی در حضور عدم قطعیت را برای شرکت جنرال الکتریک در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۹ نمایش می‌دهد. جدول (۲) نیز چند نمونه از محصولاتی را که در طراحی آنها از روش طراحی نامعین استفاده شده به همراه صرفه ایجاد شده، نشان می‌دهد [۴].

جدول ۱- استفاده از روش‌های طراحی نامعین در شرکت‌های معتبر امریکایی و هزینه صرفه‌جویی شده [۴]

- Fighter wing --- REDUCED WEIGHT BY 15% (Northrop-Grumman)
- Bird strike on aircraft engine --- SAVED LIVES (Lockheed-Martin)
- Aircraft cooling duct fabrication --- SAVED \$500K (P&W)
- Space Shuttle docking module --- REDUCED TESTING COST FROM \$500K TO \$50K (Boeing-Rockwell)
- PE-based Design for Six Sigma --- MOTOROLA SAVED \$11B and GE ON THE WAY TO SAVE \$8B



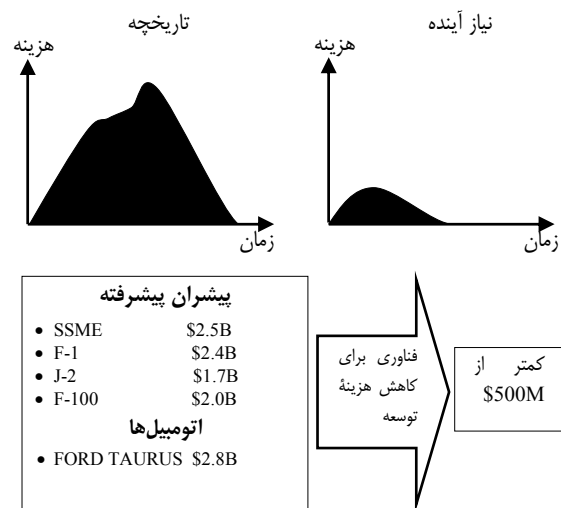
شکل ۴- هزینه و سود شرکت جنرال الکتریک به دلیل استفاده از روش‌های طراحی در حضور عدم قطعیت [۴]

بعد از مطرح شدن بحث طراحی نامعین، مجامع علمی تخصصی زیادی، تحقیق بر روی این روش‌ها را به صورت جدی دنبال کردند و در طول ۵ سال بیش از ۵۰ پروژه تحقیقاتی در این زمینه انجام شد. از جمله این مجامع می‌توان به ASCE, ASME, AIAA و SAE<sup>۱۰</sup> اشاره کرد [۴].

جدول ۲- چند نمونه از محصولات که در طراحی آنها روش‌های طراحی نامعین به کار رفته است [۴]

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| EELV Cryogenic Upper Stage Design | NRA 8-12 8" Tank Redesin |
| ۲۰ درصد کاهش در وزن کل            | ۱۷٪ کاهش در وزن تانک     |

محققان به این نتیجه رسیدند که عامل اصلی کاهش قابلیت اطمینان و شکست مأموریت‌ها عدم قطعیت‌ها هستند و لازم است تمهیداتی برای کاهش و تخفیف اثر آنها اندیشیده شود. مهندسان شرکت بوئینگ معتقدند می‌توان با مد نظر قرار دادن عدم قطعیت‌ها نمودار هزینه- زمان را به صورت نمودار سمت راست در آورد [۳].



شکل ۳- نمودار هزینه‌ها بر حسب زمان در شرکت بوئینگ [۳]

ساده‌ترین روش برای کاهش نیاز به اصلاح طرح و هزینه‌های شکست، کاهش عدم قطعیت‌های اعمالی به سیستم است. این مسئله نیازمند مطالعه گسترده راجع به شرایط محیطی (مثلاً مدل اتمسفر یا جاذبه محلی) و همچنین بالابردن سطح فناوری تولید است. هر دو مورد ذکر شده مستلزم صرف هزینه‌های کلان و در اکثر مواقع غیر قابل توجیه است.

مطالعه آماری نشان داد که حدود ۴۰ درصد از خرابی‌ها به دلیل عدم توجه به عدم قطعیت‌ها در فاز طراحی بوده و مابقی مربوط به سایر عوامل نظیر تولید، محیط عملکردی و ... است. به همین دلیل راه حل دوم، یعنی جایگزینی روش‌های طراحی معین با روش‌های طراحی نامعین (روش‌های طراحی که طراحی را با احتساب عدم قطعیت‌ها انجام می‌دهند)، مطرح شد.

استفاده از روش‌های طراحی نامعین باعث کاهش هزینه‌های کلی طراحی، تولید، عملیات و تعمیر-نگهداری، کاهش زمان ارائه محصول به بازار و اطمینان از انجام مأموریت می‌شود. استفاده از روش‌های طراحی نامعین در ایالات متحده باعث میلیاردها دلار صرفه‌جویی شده است. مثلاً در نیروی هوایی چندین میلیون دلار صرفه‌جویی به دلیل استفاده از روش‌های طراحی نامعین در محصولات گزارش شده است. از جمله شرکت‌های امریکایی که این روش‌ها را در طراحی پیاده‌سازی کرده‌اند می‌توان به لاکهیدمارتین،

10. American Society of Civil Engineering  
11. Society of Advanced Mobility Engineering

به شدت پیچیده و غیرخطی هستند، از ذکر جزئیات بیشتر در مورد روش فازی اجتناب می‌شود [۵].

### روش تحلیل احتمالی

به طور کلی به روش‌های تحلیل عدم قطعیت که از تابع چگالی احتمال استفاده می‌کنند، روش‌های احتمالی گفته می‌شود. بر روی این روش‌ها کارهای تحقیقاتی بسیاری انجام شده است. در این روش‌ها عدم قطعیت پارامترها به صورت تابع چگالی احتمال تعریف شده و پس از آن با استفاده از شبیه‌سازی، مقدار نامی و همچنین تابع چگالی احتمال برای خروجی‌ها محاسبه می‌شود. این کار با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱۳</sup> یا نمونه‌برداری‌های تصادفی انجام می‌شود. به همین دلیل در بعضی از مراجع به آنها روش‌های شبیه‌سازی یا نمونه‌برداری<sup>۱۴</sup> نیز گفته می‌شود [۶].

روش مونت کارلو در سال ۱۹۴۰ را یولام<sup>۱۵</sup> و ون نیومن<sup>۱۶</sup> توسعه داد و اولین بار در سال ۱۹۴۹، در مقاله‌ای توسط یولام و متروپلیس<sup>۱۷</sup> به کار رفت. برخلاف بسیاری از روش‌های احتمالی این روش به اطلاعات کمی در مورد آمار و احتمالات نیازمند است و ساده‌ترین آنها است. در صورتی که تعداد شبیه‌سازی‌ها به مقدار کافی زیاد باشد (از نظر تئوریک بی‌نهایت) آنگاه جواب‌های حاصل از روش مونت کارلو کاملاً دقیق هستند. به همین دلیل از این روش در مراجع به عنوان استاندارد طلایی برای ارزیابی سایر روش‌ها نام برده می‌شود. از آنجاکه در مسائل طراحی با زمان اجرای قابل توجه، انجام شبیه‌سازی به تعداد بسیار زیاد (مثلاً برای تخمین احتمال نقض قید  $0/0001$  و ده متغیر طراحی حدود یک میلیون اجرا نیاز است) عملاً امکان‌پذیر نیست، محققان به فکر ایجاد روش‌هایی برای کاهش زمان محاسبات افتادند [۶].

با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌ها به طور مستقل از یکدیگر انجام می‌شود، یک راه حل ساده برای کاهش زمان محاسبات استفاده از پردازش موازی است. هر چند این روش باعث کاهش زمان طراحی می‌شود، لیکن هزینه محاسبات تغییری نکرده و علاوه بر این صرف هزینه‌هایی برای تأمین سخت‌افزارهای مربوطه لازم است. راه حل دیگر برای کاهش هزینه و زمان محاسبات استفاده از روش‌های موسوم به کاهنده واریانس<sup>۱۸</sup> است. این روش‌ها با تعداد کمتری شبیه‌سازی نسبت به روش مونت کارلو به دقت‌های مشابهی برای تابع چگالی احتمال خروجی‌های سیستم می‌رسند (شکل ۵).

### تحلیل عدم قطعیت

هدف از تحلیل عدم قطعیت، مشخص کردن عدم قطعیت در عملکرد سیستم با داشتن اطلاعاتی از عدم قطعیت در پارامترهای ورودی سیستم با استفاده از روش‌های تجربی یا محاسباتی است. روش‌های مختلفی برای تخمین عدم قطعیت در عملکرد با توجه به پارامترهای غیرقطعی ورودی وجود دارد، این روش‌ها به نوع تعریف عدم قطعیت بستگی دارد.

### روش تحلیل بازه

در روش تحلیل بازه پارامترهای دارای عدم قطعیت هر بار با حد بالایی و حد پایینی به کار رفته و وضعیت خروجی مشاهده می‌شود. چنانچه خروجی سیستم از محدوده مجاز فراتر رود، سعی می‌شود با اعمال برخی تصحیحات در طرح، این مشکل برطرف شود. این روش در مسائل با ابعاد کم کاربرد دارد، لیکن به کار بردن آن در مسائل با پارامترهای غیرقطعی متوسط و زیاد عملاً امکان‌پذیر نیست. به علاوه نتایج حاصل شده تا حدودی محافظه‌کارانه بوده و همبستگی بین مقادیر عدم قطعیت در آن لحاظ نمی‌شود. برای حل مشکل اخیر، روش جستجوی بدترین وضعیت<sup>۱۲</sup> به کار می‌رود [۱].

در روش جستجوی بدترین وضعیت، ترکیبات مختلف عدم قطعیت به کار رفته و خروجی مشاهده می‌شود. بعد از آن طراحی برای بدترین وضعیت ناشی از ترکیب‌های مختلف عدم قطعیت‌ها مورد بازنگری قرار می‌گیرد. در این صورت می‌توان تا حدود زیادی مطمئن بود که طراحی در مابقی شرایط، عملکردی دور از انتظار ندارد. هزینه محاسباتی این روش چندین برابر روش تحلیل بازه معمولی است.

### روش منطق فازی

هنگامی که عدم قطعیت پارامترها با تابع تعلق مشخص شود، منطق فازی برای مشخص کردن عدم قطعیت خروجی سیستم به کار می‌رود. منطق فازی با استفاده از اطلاعات یا دانش غیردقیق، غیرکامل و غیرقابل اطمینان، رفتار تقریبی سیستم با چنین مدل‌هایی را استنتاج می‌کند. امروزه، منطق فازی کاربردهای گسترده‌ای در کنترل، تولید، تشخیص الگو و حتی تجارت پیدا کرده است [۵].

منطق فازی به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و کاربرد، بسیار جذاب است و هنگامی که در مسائل نه چندان پیچیده مدل‌های دقیقی از فیزیک سیستم در دست نباشد، مفید است. تقریباً تمام کاربردهایی که تاکنون از این روش در زمینه بهینه‌سازی گزارش شده مربوط به انواع عدم قطعیت در مسائل بهینه‌سازی خطی است. از آنجاکه اغلب مسائل طراحی

13. Monte Carlo

14. Sampling

15. Stan Ulam

16. John Von Neumann

17. Metropolis

18. Variance Reduction Techniques

12. Worst-Case

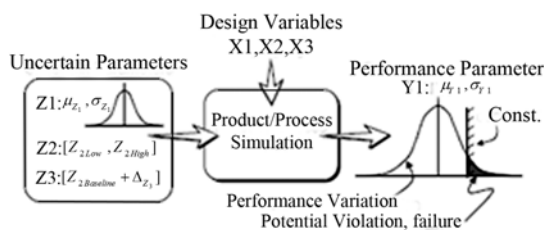
فاجعه‌آمیز باشد، کاربرد مهندسی ندارد. برای اتفاقاتی با تواتر زیاد و با خطرات کم، طراحی مقاوم به کار می‌رود؛ در صورتی که برای اتفاقات فاجعه‌آمیز و تواتر کم، طراحی با قابلیت اطمینان بالا مورد نیاز است. به عنوان مثال یک هواپیما از نظر آیرودینامیکی باید طراحی مقاوم داشته باشد، زیرا در هر پروازی شرایط متفاوت را تجربه می‌کند و نبود چنین طراحی ممکن است باعث افزایش هزینه پرواز شود. لیکن چنانچه یک جزء سازه‌ای از هواپیما قابلیت اطمینان کافی نداشته باشد سرنوشت مسافران با مخاطره جدی روبه‌روست [۷].

شکل (۶) مفهوم قابلیت اطمینان را در مقابل مقاوم بودن از منظر تابع چگالی احتمال نشان می‌دهد. مطابق این شکل طراحی مقاوم با عدم قطعیت‌های نزدیک به میانگین تابع چگالی احتمال سر و کار دارد. در صورتی که قابلیت اطمینان به دنباله توزیع وابسته است [۷].

### بهینه‌سازی مقاوم

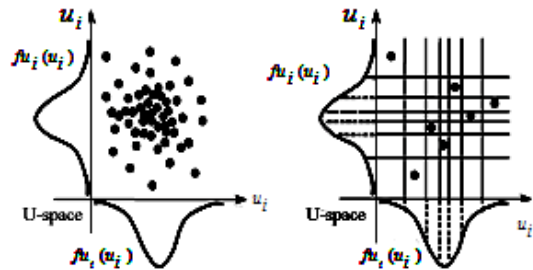
به شکل (۷) دقت فرمایید. در بعضی از مواقع طرح سمت راست با آنکه شاخص بهینگی بدتری دارد، نسبت به طرح سمت چپ ارجحیت دارد. بنابراین طراح سعی می‌کند یک مسئله بهینه‌سازی تعریف کند که واریانس تابع هدف را نیز می‌نیمد [۸].

نکته قابل ذکر اینکه برآورد واریانس تابع هدف، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، نیاز به اجرای بسیار زیادی از برنامه دارد. روش دیگری به نام تاگوچی<sup>۲۴</sup> بر مبنای تئوری طراحی آزمایش از مدت‌ها پیش در مهندسی صنایع برای کنترل کیفیت استفاده شده است. در این روش تعداد اجرای مورد نیاز نسبتاً کم است. روش تاگوچی در دو دهه اخیر بعد از مطرح شدن موضوع طراحی نامعین، کاربردهای زیادی در شاخه‌های دیگر مهندسی نظیر هوافضا پیدا کرده است. در روش طراحی مقاوم تاگوچی متغیرها به سه دسته فاکتورهای کنترل<sup>۲۵</sup>، فاکتورهای اغتشاش<sup>۲۶</sup> و پاسخ<sup>۲۷</sup> تقسیم شده و ترکیبی از فاکتورها انتخاب می‌شود، که منجر به کم‌ترین حساسیت در پاسخ‌ها شود [۹].



شکل ۶- تفاوت مسائل طراحی مقاوم و طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان از منظر تابع چگالی احتمال [۷]

هر چند این روش‌ها زمان محاسبات را کاهش می‌دهند، ولی سادگی روش مونت کارلو را ندارند.



شکل ۵- مقایسه تعداد اجراها در روش مونت کارلو و روش‌های کاهنده واریانس [۱۷]

روش‌های کاهنده واریانس به جای استفاده از نمونه‌برداری تصادفی معمولی از منطقه‌ای خاصی برای نمونه‌برداری استفاده می‌کنند. این روش‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند، که عبارتند از: نمونه‌برداری شبه مونت کارلو<sup>۱۹</sup>، نمونه‌برداری لایه‌ای<sup>۲۰</sup> و نمونه‌برداری اهمیت-تطبیقی<sup>۲۱</sup> [۶].

### طراحی و بهینه‌سازی با احتساب عدم قطعیت

طراحی با احتساب عدم قطعیت، نواقص فرآیندهای مرسوم طراحی را بر طرف می‌کنند. به خصوص که مقدار قابلیت اطمینان و مقاوم بودن در حین فرآیند طراحی قابل حصولند. این اطلاعات به طراح اجازه می‌دهد مصالحه خوبی بین عملکرد و قابلیت اطمینان برقرار کند، بدون اینکه نیاز به طراحی مجدد باشد. در کل مزایای این روش‌ها عبارتند از [۷]:

۱. کاهش زمان، هزینه و ریسک طراحی، تولید، عملیات و پشتیبانی
  ۲. افزایش کارایی با اطمینان از برآورده شدن نیازمندی‌ها
  ۳. داشتن عملکردی مقاوم‌تر نسبت به عدم قطعیت‌ها
- دو شاخه اصلی از مسائل طراحی با احتساب عدم قطعیت عبارتند از: مسائل طراحی مقاوم<sup>۲۲</sup> و مسائل طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان<sup>۲۳</sup>. مسئله طراحی مقاوم، مسئله‌ای است که در آن سعی می‌شود شاخص عملکرد نسبت به تغییرات در پارامترهای غیر قطعی، حساس نباشد. در مسائل بر مبنای قابلیت اطمینان، تلاش طراح بر این است که احتمال نقض قیود از یک مقدار مطلوب کمتر باشد. با این حال نمایش ریاضی این دو مسئله تقریباً یکسان است [۷].

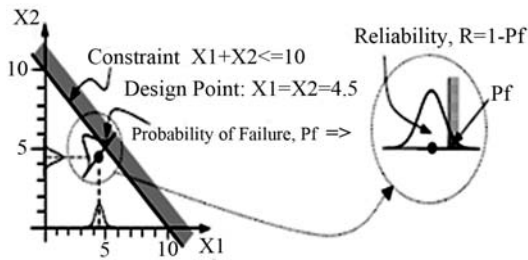
دو فاکتور اصلی برای نوع کاربرد مسائل طراحی نامعین مطرح است، تواتر اتفاقات و اهمیت آنها. سیستمی که هر روز دچار سوانح

24. Taguchi  
25. Control Factor  
26. Noise Factor  
27. Response

19. Quasi-Monte Carlo Sampling  
20. Stratified Sampling  
21. Adaptive-Importance Sampling  
22. Robust  
23. Reliability-Base

در طراحی سیستم‌های مهندسی مشاهده کرد که از آن جمله می‌توان به قیود حرارتی، تنش، کرنش، مأموریت و ... اشاره کرد. به طور معمول ناحیه غیرقابل قبول به صورت  $g(x) \leq 0$  تعریف می‌شود. به صورت ریاضی احتمال نقض قید یا شکست به صورت معادله (۱) بیان می‌شود. که در آن تابع چگالی احتمال توأم  $x$  بوده و انتگرال گیری در سراسر ناحیه غیرقابل قبول انجام می‌شود.

$$P_F = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad (1)$$



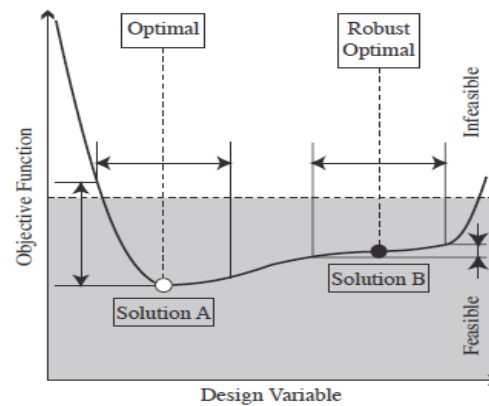
شکل ۹- نمایش مفهوم قابلیت اطمینان قیود [۱۰]

در بسیاری از کاربردهای مهندسی حل معادله فوق، هزینه محاسباتی بسیار زیادی را می‌طلبد. بعضی از مشکلات برآورد این معادله عبارتند از [۱۰]:

۱. ابعاد زیاد فضای طراحی، که انتگرال گیری را بسیار سخت می‌کند.
۲. محاسبات مرز ناحیه،  $g(x)=0$  که بسیار پیچیده است.
۳. کمبود اطلاعات راجع به تابع چگالی احتمال توأم

به دلیل این پیچیده‌گی‌ها، برآورد دقیق احتمال شکست برای بسیاری از سیستم‌های با توابع چگالی احتمال دلخواه از عدم قطعیت‌ها ممکن نیست. به این دلیل روش‌های عددی کارآمدی برای محاسبه تقریبی احتمال نقض قیود نیاز است، که تحقیقاتی زیادی بر روی آنها انجام شده و همچنان در حال انجام است. دو روش اصلی در این زمینه روش قابلیت اطمینان مرتبه اول<sup>۳۲</sup> و دوم<sup>۳۳</sup> هستند. ایده اصلی این روش‌ها را اولین بار در سال ۱۹۷۰، آقای کورنل<sup>۳۴</sup> مطرح کرد. در واقع این روش‌ها تقریب مرتبه اول و دوم تابع  $g$  را در معادله (۱) جایگزین می‌کنند. این روش‌ها از چهار گام محاسباتی اصلی تشکیل شده‌اند. این چهار گام عبارتند از:

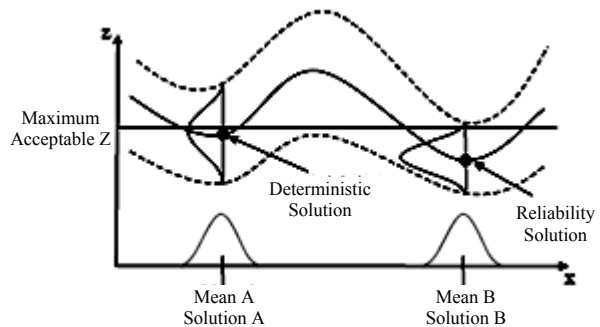
۱. تبدیل فضای طراحی به فضای نرمال استاندارد
۲. پیدا کردن محتمل‌ترین نقطه شکست<sup>۳۵</sup> با استفاده از بهینه‌سازی
۳. تقریب تابع قید بر روی محتمل‌ترین نقطه



شکل ۷- مقایسه بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم [۸]

### بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اطمینان

روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اطمینان بر این اصل استوارند که فضای طراحی به دو ناحیه تقسیم می‌شود: موفقیت<sup>۲۸</sup> و شکست<sup>۲۹</sup>. هدف از بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اطمینان این است که طرح به اندازه‌ای از ناحیه شکست فاصله داشته باشد، که احتمال شکست به مقدار قابل قبولی کوچک باشد (شکل ۸). کاربرد اصطلاح شکست به این دلیل است که نخستین بار مفاهیم قابلیت اطمینان در طراحی سازه شکل گرفت. اصطلاح موفقیت در مقابل شکست به کار می‌رود. البته در علم بهینه‌سازی معادل این اصطلاحات به صورت فضای امکان‌پذیر<sup>۳۰</sup> و امکانی ناپذیر (یا فضای قابل قبول و غیرقابل قبول) به کار می‌رود.



شکل ۸- مقایسه طراحی معین در مقابل طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان [۷]

تابع حالت حدی<sup>۳۱</sup> مشخص‌کننده مرز بین ناحیه قابل قبول و غیرقابل قبول است. در علم بهینه‌سازی برای این تابع اصطلاح قید به کار برده می‌شود (شکل ۹). مثال‌های فراوانی از قیود را می‌توان

32. First Order Reliability Method (FORM)  
33. Second Order Reliability Method (SORM)  
34. Cornell  
35. Most Probable Point (Mpp) Of Failure

28. Success  
29. Failure  
30. Feasible  
31. Limit State Function

بعد از کار آقای فادالی و نشان دادن پتانسیل روش‌های طراحی نامعین، تحقیقات بسیار دیگری در این زمینه انجام شد. برای مشاهده نمونه‌هایی برجسته از تحقیقات اخیر به مراجع [۱۳-۱۵] رجوع شود.

### کنترل

علم کنترل را می‌توان پیش‌تاز در ارائه مفهوم طراحی مقاوم نامید. نایکوئیست<sup>۴۰</sup>، بود<sup>۴۱</sup> و اوانس<sup>۴۲</sup> از اوایل دهه ۳۰ بحث مقاومت پایداری در مقابل اغتشاشات را در سیستم‌های یک ورودی- یک خروجی مطرح کردند. این مفاهیم امروزه نیز با کمیاتی نظیر حاشیه بهره و حاشیه فاز بیان می‌شوند. این مفاهیم در سال ۱۹۷۷ با ارائه روش مقدار منفرد<sup>۴۳</sup> توسط سافانو<sup>۴۴</sup> برای سیستم‌های چند ورودی چند خروجی تعمیم یافتند. کارهای دوپلی در سال‌های ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ منجر به ارائه روش  $\mu$  شد. دو روش اخیر برای عدم قطعیت‌های محدود در حوزه فرکانس استفاده می‌شدند که طبیعت عدم قطعیت‌ها را به خوبی نشان نمی‌داد.

استنجل<sup>۴۵</sup>، لین<sup>۴۶</sup> و جانکینز<sup>۴۷</sup> در دهه هشتاد بحث تحلیل پایداری سیستم‌های فیدبک را با استفاده از تابع چگالی احتمال برای پارامترهای غیرقطعی تحت عنوان احتمال پایداری<sup>۴۸</sup> مطرح کردند. استنجل در سال ۱۹۹۱ از روش مونت کارلو برای بررسی احتمال پایداری یک سیستم مرتبه دو مطابق شکل (۱۱) استفاده کرد. در این شکل ناحیه ۱ نشان‌دهنده تراکم بیشتر مقادیر ویژه و ناحیه ۳ مربوط به تراکم کمتر است. اسپنسر<sup>۴۹</sup> در سال ۱۹۹۴ از روش‌های FORM و SORM برای تحلیل احتمال پایداری استفاده کرد. روش  $\mu$  در سال ۱۹۹۴ برای طراحی کنترلر هواپیمای جنگنده اف-۱۴ به کار رفت. روش دیگری با نام  $H_{\infty}$  در سال ۱۹۹۳ توسط موسر<sup>۵۰</sup> ارائه شد. در سال ۲۰۰۰، هام<sup>۵۱</sup> و جانسون<sup>۵۲</sup> کنترل مقاوم فازی را مطرح کردند.

از اوایل دهه نود به بعد صدها عنوان مقاله و دهها عنوان کتاب راجع به روش‌های کنترلی با احتساب عدم قطعیت‌ها نوشته شده است [۱۶، ۱۷].

- 40. Nyquist
- 41. Bode
- 42. Evans
- 43. Singular Value
- 44. Safonov
- 45. Stengel
- 46. Lim
- 47. Junkins
- 48. Probability Of Stability
- 49. Spencer
- 50. Moser
- 51. Ham
- 52. Johnson

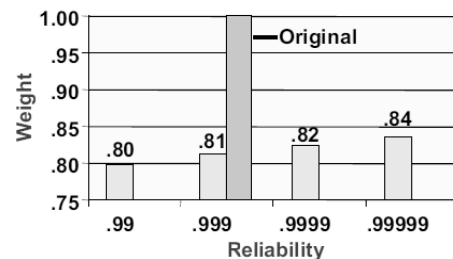
۴. محاسبه احتمال نقض قیود روش مرتبه دوم دقیق‌تر است، لیکن به دلیل محاسبه مشتقات مرتبه دوم هزینه محاسبات آن بیشتر است. روش دیگری نیز با نام مقدار میانگین مرتبه اول<sup>۳۶</sup> وجود دارد که در آن به جای تقریب قید در MPP از تقریب در نقطه میانگین استفاده می‌شود. این روش به محاسبات کمتری نسبت به دو روش قبلی نیاز دارد، لیکن برای مسائل با قیود غیرخطی و توزیع‌های غیرنرمال عدم قطعیت، جواب‌های آن غیردقیق است [۱۱].

### کاربردهای موضوعی

#### سازه

چنانکه اشاره شد، روش ضریب اطمینان از حدود سال ۱۹۶۰ در طراحی سازه مورد استفاده قرار گرفته و هم‌اکنون نیز در اغلب صنایع به کار می‌رود. هر چند بحث طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان از سال ۱۹۷۰ مطرح شد، لیکن به دلیل هزینه محاسباتی تا سال ۱۹۹۰ چندان جدی به آن پرداخته نشد. در سال ۱۹۹۱ یک بسته نرم‌افزاری در ناسا تولید شد<sup>۳۷</sup> که عدم قطعیت‌ها را در طراحی کامپوزیت مورد توجه قرار می‌داد. در سال ۲۰۰۰ روش فازی برای طراحی یک پوسته کامپوزیتی همراه با عدم قطعیت بارگذاری به کار رفت.

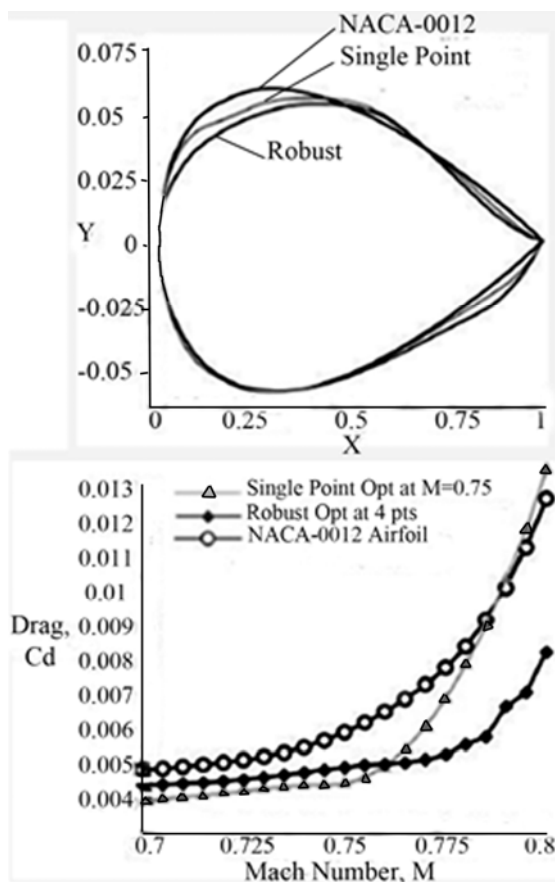
اولین کاربرد عملی روش‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان در سال ۱۹۹۹ را آقای فادالی<sup>۳۸</sup> و سیوز<sup>۳۹</sup> گزارش کرده است. در این کاربرد قطعه متصل‌کننده دو پانل مربوط به سازه هواپیما که موجود بود، با استفاده از مفاهیم جدید بازنگری شد. هدف از این بازنگری کاهش وزن به طوری بود که قابلیت اطمینان مورد نظر نیز برآورده شود. نتایج این تحقیق در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. در واقع با کاهش ۱۹ درصدی وزن تغییر محسوس در قابلیت اطمینان اتفاق نمی‌افتد. به علاوه با کمی افزایش وزن، افزایش چشمگیری در قابلیت اطمینان ایجاد می‌شود [۱۲].



شکل ۱۰- کاهش وزن سازه با قید قابلیت اطمینان [۱۲]

- 36. Mean Value First Order
- 37. IPACS (Integrated Probabilistic Assessment of Composite Structures)
- 38. Fadale
- 39. Sues





شکل ۱۲- مقایسه نتایج بهینه‌سازی بال از روش معین و مقاوم [۱۸]

جدول ۳- قابلیت اطمینان موتور در دماهای مختلف [۱۹]

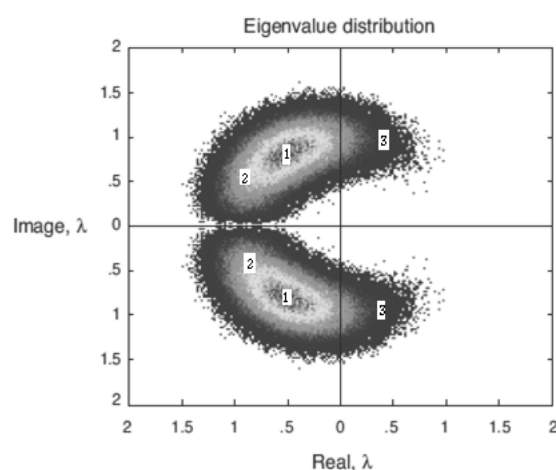
| Performance parameter        | Estimated probability of failure |            |            |
|------------------------------|----------------------------------|------------|------------|
|                              | 60°C                             | 20°C       | -35°C      |
| Total impulse                | 0.000070                         | 0.001109   | 0.026693   |
| Maximum acceleration         | 0.011369                         | 0.000007   | $<10^{-6}$ |
| Arming acceleration duration | $<10^{-6}$                       | $<10^{-6}$ | $<10^{-6}$ |
| Launch acceleration          | $<10^{-6}$                       | $<10^{-6}$ | 0.000211   |
| Casing failure               | 0.000003                         | $<10^{-6}$ | $<10^{-6}$ |
| Total probability of failure | 0.011439                         | 0.001116   | 0.026773   |
| Reliability                  | 0.988561                         | 0.998884   | 0.973227   |

### سایر حوزه‌ها

طراحی نامعین در موضوعات دیگر نظیر طراحی مسیر و طراحی مأموریت‌های فضایی نیز به کاررفته که نمونه‌هایی از آن در مراجع [۲۰-۲۱] موجود است.

### بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی نامعین

یک دسته مهم از مسائل پیچیده امروزی و آینده، مسائل بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی هستند. اولین بار آقای سیوز، بحث بهینه‌سازی



شکل ۱۱- تحلیل احتمال پایداری، ناحیه یک تراکم بیشتر و ناحیه سه تراکم کمتر مقادیر ویژه [۱]

### آیرودینامیک

در سال ۱۹۶۹ برای اولین بار آقای ایزنهارت<sup>۵۳</sup> مسئله ریسک استفاده از نتایج به دست آمده از روش‌های محاسباتی و تجربی آیرودینامیک را مطرح کرد، اما تا سال ۱۹۹۰ به شکل جدی به آن پرداخته نشد. در این سال ولر<sup>۵۴</sup> یک فرآیند سه مرحله‌ای جهت کاهش ریسک داده‌های تجربی و محاسباتی آیرودینامیکی مطرح کرد.

اولین کاربرد روش‌های طراحی بر مبنای عدم قطعیت در سال ۲۰۰۲ است. در این سال آقای پاچولا<sup>۵۵</sup> یک ایرفویل استاندارد ناسا را مطابق با شکل (۱۲) با دو روش بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم، بهینه کرد. بعد از آن کاربردهای دیگری برای طراحی بال گزارش شده است [۱۸].

### پیشران

اولین کاربرد روش‌های طراحی نامعین در حوزه موضوع پیشران در سال ۲۰۰۹ را آقایان بزکایا<sup>۵۶</sup> و متین<sup>۵۷</sup> انجام داد. در این تحقیق قابلیت اطمینان طراحی مفهومی یک موتور سوخت جامد، با استفاده از روش سطح پاسخ و مونت کارلو بهبود داده شد. در پژوهش انجام شده شانزده متغیر با عدم قطعیت به همراه پنج قید در نظر گرفته شده بود. نتایج این تحقیق مطابق جدول (۳) است [۱۹].

53. Eisenhard  
54. Wheeler  
55. Padula  
56. Bozakia  
57. Metin

آقای سان<sup>۶۴</sup> نیز در همان سال طراحی بهینه چندموضوعی نامعین یک سیستم حفاظت گرمایی را انجام داد [۳۰]. در سال ۲۰۰۸، بحث استفاده از متغیرهای گسسته در طراحی بهینه چندموضوعی نامعین مطرح شد [۳۱].

روشنی‌یان و همکاران پس از بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی یک ماهواره بر سوخت جامد دو مرحله‌ای، قابلیت اطمینان طراحی مفهومی انجام شده را با استفاده از روش مونت کارلو بررسی کردند. پس از آن قابلیت اطمینان طراحی با اعمال تغییراتی در متغیرهای طراحی بهبود یافت [۳۲-۳۴].

به دلیل مزیت‌های فراوان استفاده از بهینه‌سازی نامعین در طراحی چندموضوعی، پرفسور توماس زنگ، طی سخنرانی در مرکز تحقیقاتی ناسا لانگلی، یکی از محورهای تحقیقاتی آتی در حوزه MDO راه استفاده از طراحی نامعین می‌داند [۳۵]. به علاوه در سال ۲۰۰۶ در همایش امریکایی- اروپایی MDO (که با حضور بیش از ۷۰ شرکت و مؤسسه تحقیقاتی فعال در زمینه MDO و نمایندگان دولت‌ها همراه با صاحب‌نظران این حوزه برگزار شد) استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نامعین به عنوان یکی از زمینه‌های توسعه MDO مطرح شده است [۳۶].

در سال‌های اخیر تحقیقاتی برای استفاده از روش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی نامعین در سایر صنایع نظیر صنایع الکترونیک، ساختمان‌سازی، کشتی‌سازی و زیردریایی انجام شده است [۳۷-۴۱].

### نتیجه‌گیری

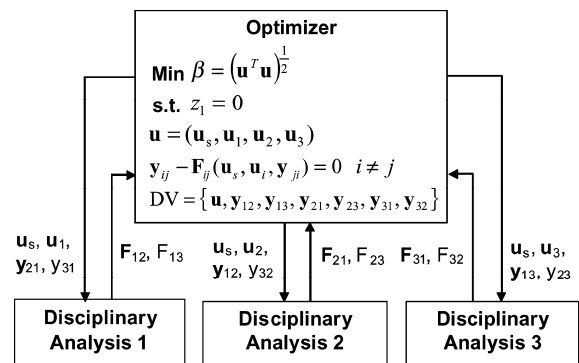
روش‌های بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی نامعین، آخرین دستاورد محققان در زمینه طراحی سیستم‌های پیچیده مهندسی نظیر سیستم‌های هوافضایی است. این روش‌ها مزایای متعددی دارند. شاخص‌ترین این مزیت‌ها عبارت است از:

- کاهش هزینه دوره عمر شامل هزینه طراحی، تولید، عملیات، پشتیبانی، بیمه و ...
  - شناسایی گلوگاه‌های تکنولوژیک و سرمایه‌گذاری بر روی آنها
  - دادن اطمینان خاطر به مشتری برای استفاده از محصولات
- به‌رغم مزایای پیش‌گفته، کاربردهای عملی روش‌های طراحی نامعین هنوز به شکل جدی مورد توجه قرار نگرفته است. موانع اساسی به‌کارگیری روش‌های طراحی بر مبنای عدم قطعیت به‌ویژه در طراحی وسایل هوافضایی که پیچیدگی‌های زیادی دارند، عبارتند از:
- صنایع با روش‌های مرسوم طراحی احساس راحتی بیشتری دارند زیرا به آنها عادت کرده‌اند و در مقابل تغییر آنها

چندموضوعی اتفاقی را در سال ۱۹۹۵ مطرح کرد [۲۲]. آقای جیو<sup>۵۸</sup> این مقوله را در سال ۱۹۹۸ مجدداً مطرح کرد، ایشان در سال ۱۹۹۹ حل یک مسئله چندموضوعی را از نظر مقاومت از روش بدترین وضعیت بهبود داد [۲۳]. به دنبال آن در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ مقالاتی در زمینه مسئله چند موضوعی مقاوم را دیو<sup>۵۹</sup>، کخ<sup>۶۰</sup> و مارویس<sup>۶۱</sup> منتشر کردند [۲۴، ۲۵].

سیوز در سال ۲۰۰۰، بحث قابلیت اطمینان در طراحی چندموضوعی را مطرح کرد [۲۶]. با توجه به ماهیت پیچیده موضوع و هزینه محاسباتی بالا، مقالات تا این زمان تنها بر افزایش مقاومت یا قابلیت اطمینان بر روی نقطه طراحی فعلی تأکید داشتند. اغلب این تحقیقات نیز در چارچوب همه در یکی انجام می‌شد.

در سال ۲۰۰۲، آکاروال<sup>۶۲</sup> بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی بر مبنای قابلیت اطمینان را با استفاده از جایگزینی تابع اصلی با یک سطح پاسخ و کخ با یک کریگینگ مدل انجام دادند [۲۷]. دیو در سال ۲۰۰۵، یک چارچوب مشارکتی مطابق شکل (۱۳) جهت تحلیل قابلیت اطمینان یک مسئله چند موضوعی را ارائه کرد [۲۸].



شکل ۱۳- چارچوب مشارکتی طراحی چندموضوعی برای پیدا کردن محتمل‌ترین نقطه شکست [۲۸]

در سال ۲۰۰۶، آقای لیشو<sup>۶۳</sup> بهینه‌سازی مقاوم یک ماهواره بر چند مرحله‌ای را انجام داد. این کار در چارچوب همه در یکی انجام شده است. در این تحقیق از روش ژنتیک الگوریتم برای بهینه‌سازی استفاده شده است. به علاوه مدل‌های به‌کاررفته بسیار ساده هستند. مثلاً برای مسیر شبیه‌سازی روابط دو درجه آزادی، ایرودینامیک روابط تجربی ساده، وزن روابط آماری و پیش‌رانش روابط تحلیلی ساده، استفاده شده است [۲۹].

58. Gu  
59. Du  
60. Koch  
61. Marvis  
62. Agarwal  
63. Linshu

64. Sun

- in *Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 198, Issue. 1, 2008, pp. 14–27.
- [12] Fadale, T., and Sues, R. H., “Reliability-Based Analysis and Optimal Design of an Integral Airframe Structure Lap Joint”, *40<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, 1999, pp. 99-1604.
- [13] Lonn, D., Fyllingen, O. and Nilssona, L., “An Approach to Robust Optimization of Impact Problems Using Random Samples and Meta-Modelling”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, Issue 6, 2009, pp. 1–12.
- [14] Song, S., Lu, Z. and Qiao, H., “Subset Simulation for Structural Reliability Sensitivity Analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, Issue 2, 2009, pp 658–665.
- [15] Samson, S., Reneke, J. A. and Wiecek, M. M., “A Review of Different Perspectives on Uncertainty And Risk and An Alternative Modeling Paradigm”, *Reliability Engineering And System Safety* Vol. 94, Issue 2, 2009, pp. 558– 567.
- [16] Kim, T. H., Maruta, I. and Sugie, T., “Robust Pid Controller Tuning Based On The Constrained Particle Swarm Optimization”, *Automatica*, Vol. 44, Issue 4, 2008, pp. 1104 – 1110.
- [17] Michael, J. G., *Robust Control Systems*, Wiley, 2006.
- [18] Huyes, L., Airfoil Shape Optimization Under Uncertainty, Presented in NASA Longley Research Center, NASA/Cp-211050, 2001.
- [19] Bozkaya, K., Akok, M., “Reliability Improvement of a Solid Rocket Motor Design in Early Phase”, *Journal of Space Craft and Rocket*, Vol. 45, No. 4, 2009, pp.654-664.
- [20] Croisard, N., Kemble, M., Vasile, M. and Radice, G., “Preliminary Space Mission Design Under Uncertainty”, *Acta Astronautica*, Vol. 66, Issues 5-6, 2009.
- [21] Jiang Z., Ordóñez R., “On-Line Robust Trajectory Generation On Approach And Landing for Reusable Launch Vehicles”, *Automatica*, Vol. 45, Issue 7, 2009, pp. 1668\_1678.
- [22] DU, X. and Chen, W., “Collaborative Reliability Analysis under the Framework of Multidisciplinary Systems Design”, *Optimization and Engineering*, Vol. 6, No. 1, 2005, pp. 63–84.
- [23] Gu, X, Ranaud, J, Batill, S, Brach, R. and Budhiraja, A., “Worst Casepropagated Uncertainty of Multidisciplinary Systems in Robust Design Optimization”, *Struct Multidisciplin Optim*, Vol. 20, No. 3, 2000, pp. 190–213.
- [24] Koch, P. N., Wujek, B., and Golovidov, O., “A Multi-Stage, Parallel Implementation of Probabilistic Design Optimization in an MDO Framework,” *8<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, CA.*, Paper No. AIAA-4805, 2000.
- [25] Marvis, D. N. and Delaurentis, D. A., “Uncertainty Modeling and Management in Multidisciplinary Analysis and Synthesis”, *Presented at the 38<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, January 10-13, 2000.

- مقاومت می‌کنند. به همین دلیل به غیر از چند شرکت آمریکایی ذکر شده، تاکنون شرکتی در این زمینه سرمایه‌گذاری نکرده است.
- مزایای طراحی بر مبنای عدم قطعیت به خوبی برای صنایع روشن نیست.
- روش‌های طراحی بر مبنای عدم قطعیت فعلی بسیار پیچیده و دارای هزینه محاسباتی بسیار بیشتری نسبت به روش‌های معین هستند.
- دروس دانشگاهی برای آموزش مهندسان و محققان در زمینه روش‌های طراحی نامعین وجود ندارد.
- کتب منتشرشده حاوی مطالبی در مورد بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی معین و نامعین بسیار ناچیز است.

## مراجع

- [1] Zang, A., Hemsch, T. and Etal, J., *Needs and Opportunities for Uncertainty-Based Multidisciplinary Design Methods for Aerospace Vehicles*, NASA/Tm-2002.
- [2] Noor, A. K., *Nondeterministic Approaches*, Presented in NASA Longley Research Center, Nasa/Cp-211050, 2001.
- [3] Thaker, B. H., Errors and Uncertainties in Probabilistic Engineering Analysis, Presented in NASA Longley Research Center, NASA/Cp-211050,2001.
- [4] Singhal, S. N., Summary of Nda Activities of Professional Societies, Presented in NASA Longley Research Center, NASA/Cp-211050, 2001.
- [5] Buckley, J. J. and Jowers, L. J., *Monte Carlo Methods in Fuzzy Optimization*, Springer, 2008.
- [6] Zentner, J., A Design Space Exploration Process for Large Scale Multi-Objective Computer Simulations, (PhD Thesis), Georgia Tech., 2006.
- [7] Crespol, G., Optimization of Systems with Uncertainty: Initial developments for Performance, Robustness and Reliability Based Designs, NASA/Cr-211952, 2002.
- [8] Choi, H. J., A Robust Design Method for Model and Propagated Uncertainty, (PhD Thesis), School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, December 2005.
- [9] Phadke, M. S., *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, 1989.
- [10] Benanzer, T. W., Grandhi, R. V. and Krol, W. P., “Reliability-Based Optimization of Design Variance to Identify Critical Tolerances”, *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, 2009, pp. 305–311,
- [11] Lee, I., Choi, K. K. and Gorsich, D., “Inverse Analysis Method Using Mpp-Based Dimension Reduction for Reliability-Based Design Optimization of Nonlinear and Multi-Dimensional Systems”, *Computer Methods*

- [33] Roshanian, J. and Ebrahimi, M., "Reliability Modification in Multidisciplinary Design Optimization of a Solid Propellant Launch Vehicle", *IAC*, 2010.
- [34] Weck, O., Agte, J. and Sobieszczanski, J., "State-of-the-Art and Future Trends in Multidisciplinary Design Optimization", *48<sup>th</sup> Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 23 - 26 April 2007.
- [35] Zang, T. A., Optimizing the Design & Integration of The 21<sup>st</sup> Century System, *Presented In NASA Longley Research Center*, 2005.
- [36] Good, N. A., Multi-Objective Design Optimization Considering Uncertainty in a Multi-Disciplinary Ship Synthesis Model, (M. Sc. Thesis), Virginia, 2006.
- [37] Smith, N., "Probabilistic Design of Multidisciplinary Systems", (PhD Thesis), in Civil Engineering Nashville, Tennessee, May, 2007.
- [38] Thunnissen, D. P., Propagating and Mitigating Uncertainty in The Design of Complex Multidisciplinary Systems, (PhD Thesis), California Institute of Technology, 2005.
- [39] Martin, J. D., "A Methodology for Evaluating System-Level Uncertainty in the Conceptual Design of Complex Multidisciplinary Systems", (PhD Thesis), *In Mechanical Engineering, Pennsylvania State University*, 2005.
- [40] Benanzer, T., "System Design of Undersea Vehicles With Multiple Sources if Uncertainty", (PhD Thesis), *Wright State University*, 2008.
- [41] Laudati, R. P., "Utility Design for Reliability Optimization with Six Sigma Tools", *19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution Vienna*, 2007.
- [26] Sues, R. and Cesare, M., "An Innovative Framework for Reliability-Base MDO", *Presented at the 41<sup>st</sup> AIAA Structures/ Structural Dynamics and Materials Conferece and Exhibit*, Non-Deterministic Approaches Forum, 2000.
- [27] Koch, P. N., Wujek, B., and Golovidov, O., "Facilitating Probabilistic Multidisciplinary Design Optimization Using Kriging Approximation Models", *9<sup>th</sup> Aiaa/Issmo Symposium On Multidisciplinary Analysis And Optimization, Atlanta, Georgia*, 2002.
- [28] Akhtar, A. and Linshu, H., "An Efficient Evolutionary Multi-Objective Approach for Robust Design of Multi-Stage Space Launch Vehicle", *11<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, Virginia*, 2006.
- [29] Sun, J. and Zhang, G., "Multi-Disciplinary Design Optimization under Uncertainty for Thermal Protection System Applications", *11<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, Virginia*, 2006.
- [30] Hassan, R. and Crossley, W., "Spacecraft Reliability-Based Design Optimization Under Uncertainty Including Discrete Variables", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 45, No. 2, 2008, pp. 394-405.
- [31] Roshanian, J., Jodei, J. and Ebrahimi, M., "Multidisciplinary Design Optimization of a Small Solid Propellant Launch Vehicle Using System Sensitivity Analysis", *Structural and Multidisciplinary Optimization Journal*, Vol. 38, No. 1, Springer, 2009, pp. 93-100.
- [32] Roshanian, J., Ebrahimi, M. and Farmani, M., "Multidisciplinary Design of a Small Satellite Launch Vehicle Using Particle Swarm Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization Journal*, Vol.44, No. 6, Springer, 2011, pp. 773-784.