دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

مکانیک شکست

- چرا مکانیک شکست؟؟؟

بررسی علل شکست در قطعات نشان می‌دهد طراحی اولیه بر اساس مبنای روش‌های کلاسیک صحیح است، ولی به علت وجود عوامل شکست، نظیر عیوب و ریزترک‌های اولیه و عیوبی که یا هنگام کار در قطعات به وجود آمده‌اند؛ قطعه دچار شکست می‌شود (پایه‌گذاری مکانیک شکست).

- مکانیک شکست یکی از علوم مهندسی که پدیده شکست قطعات را تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی بررسی می‌کند.

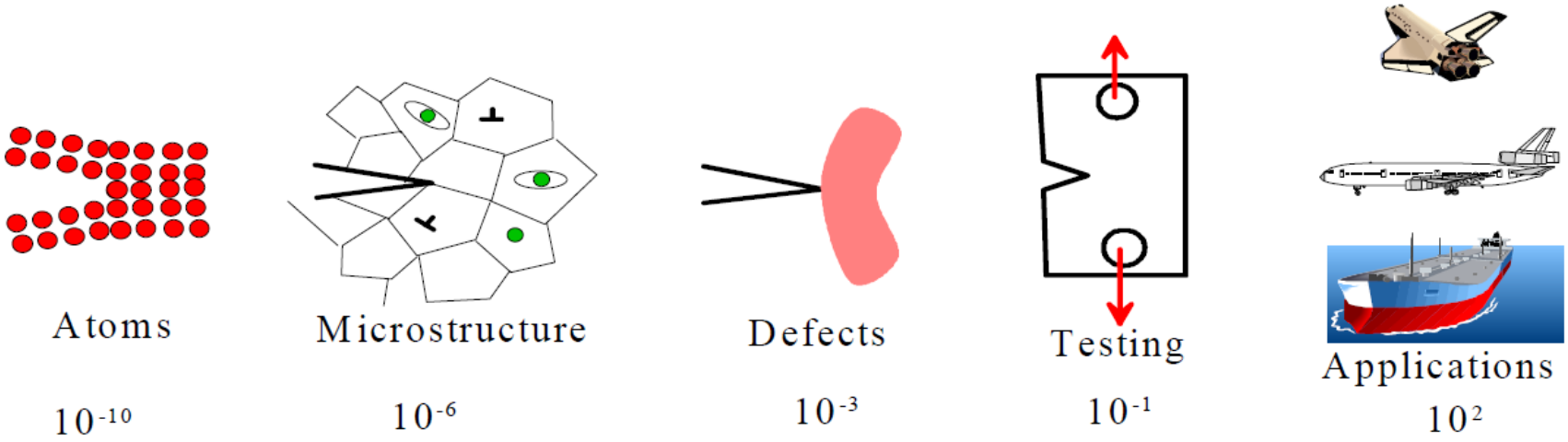
- مکانیک شکست به تجزیه و تحلیل سازه‌ها بر مبنای وجود معیوب به ویژه ترک در قطعات می‌پردازد.

مقدمه‌ای بر مکانیک شکست

- مکانیک شکست پاسخ سئوالات زیر را می‌دهد:

- مقاومت باقیمانده در یک قطعه تابع اندازه ترک چه اندازه است؟
- هنگام کار قطعات، طول ترک مجاز چیست؟ (اندازه ترک بحرانی)
- چه زمانی طول می کشد تا یک ترک به طول بحرانی برسد؟
- طول مجاز ترک اولیه در یک قطعه چیست؟
- در چه بازه‌ی زمانی، یک قطعه باید از نظر وجود ترک مورد ارزیابی قرارگیرد؟
- ...

حوزه‌های مکانیک شکست



- علم مواد: در مقیاس اتم‌ها، نابجایی‌ها و ... شکست را بررسی می‌کند.
- مکانیک کاربردی: به محاسبه تنش، تغییرشکل‌ها و ... در نوک ترک می‌پردازد.
- کاربرد مهندسی: از مکانیک شکست در مسایل مهندسی استفاده می‌کند.

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

- شکست در برخی از کشتی‌ها در جنگ جهانی دوم

A liberty Tanker, 16 January 1943,
split in two while moored in calm water.

- شکست ترد
- شکست از گوشه‌ها و نقاط تمرکز تنش
- شکست در محل جوش

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

بخشی از پل بزرگ "موراندی" در هوای طوفانی فرو ریخت

A collapsed highway bridge (linking Italy with France) in Genoa in August 2018.

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

بخشی از پل بزرگ "موراندی" در هوای طوفانی فرو ریخت

A collapsed highway bridge (linking Italy with France) in Genoa in August 2018.

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

- شکست در مخازن
  - شکست ترد در آزمون فشار هیدرواستاتیکی

Hydro-test of a new vertical vessel

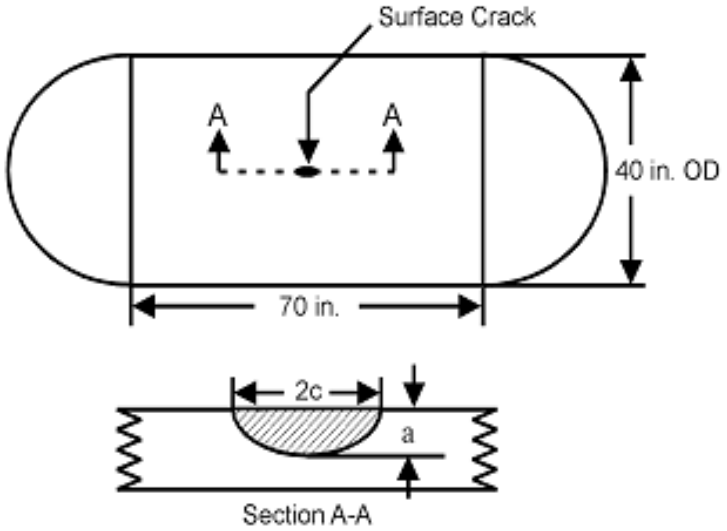
نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

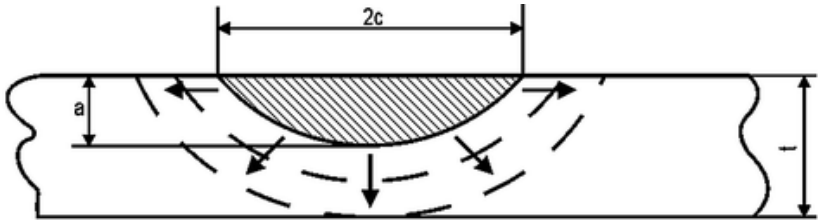
- شکست مخازن CNG
  - شکست ناگهانی

➢ مخازن CNG به دلیل پر و خالی شدن‌های متوالی، به طور متناوب تحت فشارهای بسیار بالا قرار می‌گیرند. ترک‌های سطحی مخزن می‌توانند با مکانیزم خستگی-خوردگی رشد کنند. بنابراین، این مخازن برای یک عمر کاری محدود طراحی شده و ترک‌های اولیه آنها نباید از یک حد مجاز بزرگ‌تر باشد. بارگذاری مخزن پس از عمرکاری، باعث رشد ترک‌های سطحی و عبور آنها از ضخامت می‌گردد. استانداردهای مخازن CNG عملکرد *نشت قبل از شکست* برای این محصول الزامی می‌دانند.

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

➢ **نشت قبل از شکست**: برای جلوگیری از شکست ناگهانی و انفجار در مخازن می‌توان آنرا به‌گونه‌ای طراحی نمود که مخزن قبل از شکست، نشت کند. برای این هدف، حداکثر اندازه ترک در تنش طراحی مخزن، باید بزرگتر از اندازه ضخامت جداره مخزن باشد تا در صورت وجود ترک سطحی در جداره مخزن، آن ترک بتواند به صورت پایدار (آرام) رشد کرده و قبل از شکست نهایی مخزن، منجر به سوراخ شدن آن شود. در این صورت می‌توان قبل از بروز شکست نهایی و ناگهانی، محل ترک را از روی نشت مخزن شناسایی و نسبت به ترمیم آن اقدام کرد.

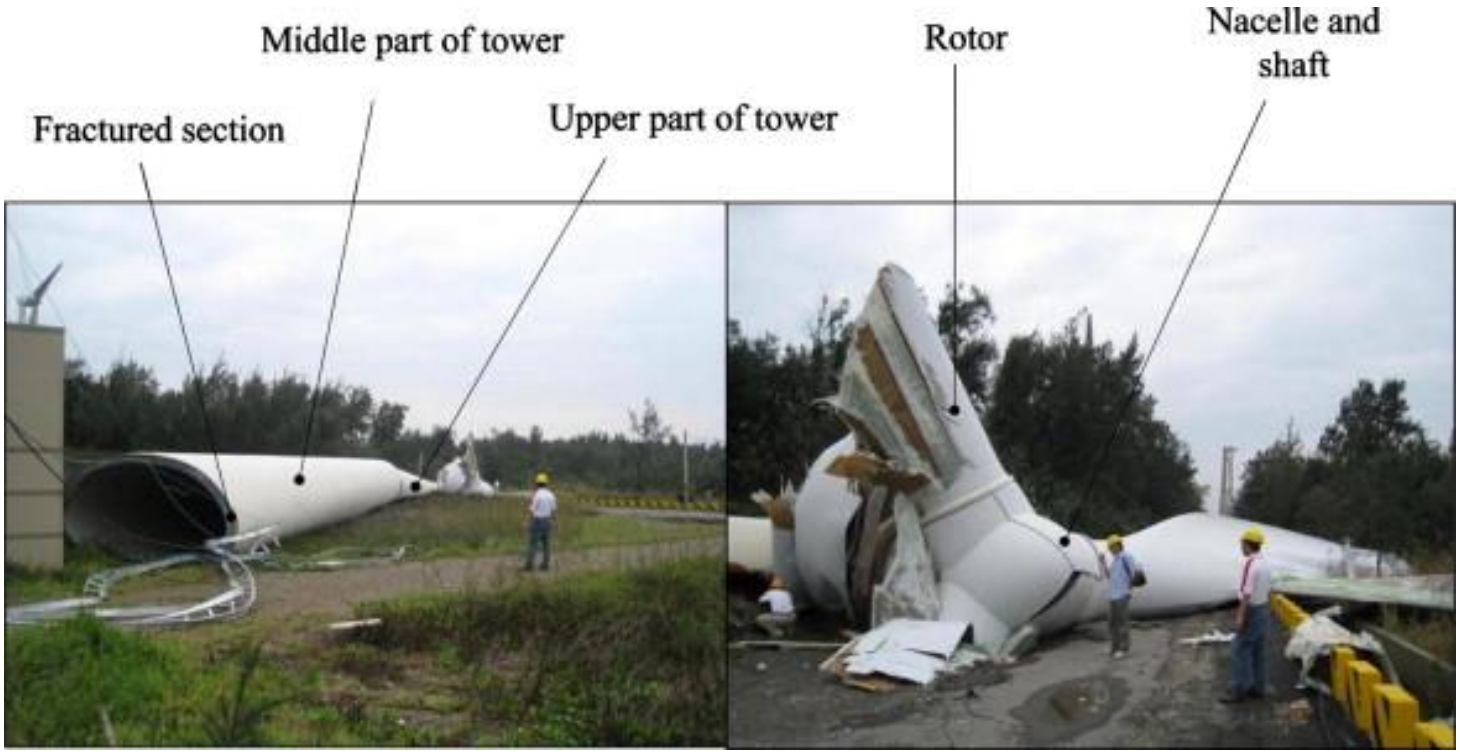




Section A-A

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

- شکست یک توربین بادی

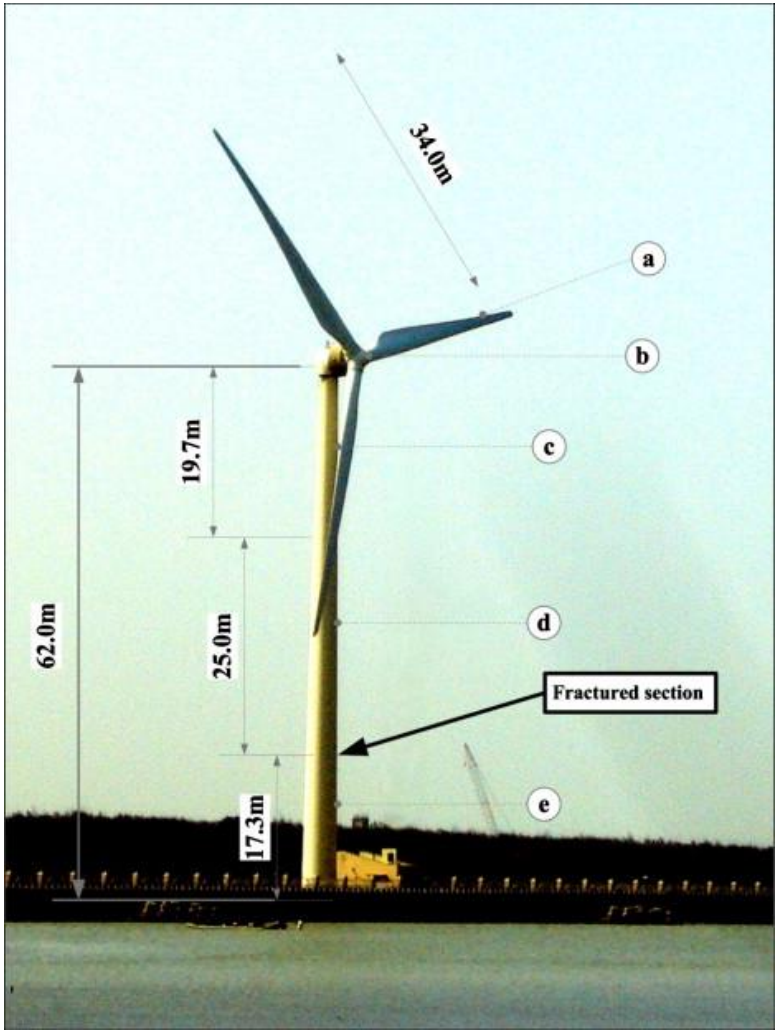


September 28, 2008, Typhoon Jangmi struck Taiwan, bringing strong winds and heavy rainfall that collapsed a wind turbine tower located on the shore of Taichung Harbor.
(https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.008)

نمونه‌هایی از شکست در سازه‌ها و قطعات

- شکست یک توربین بادی

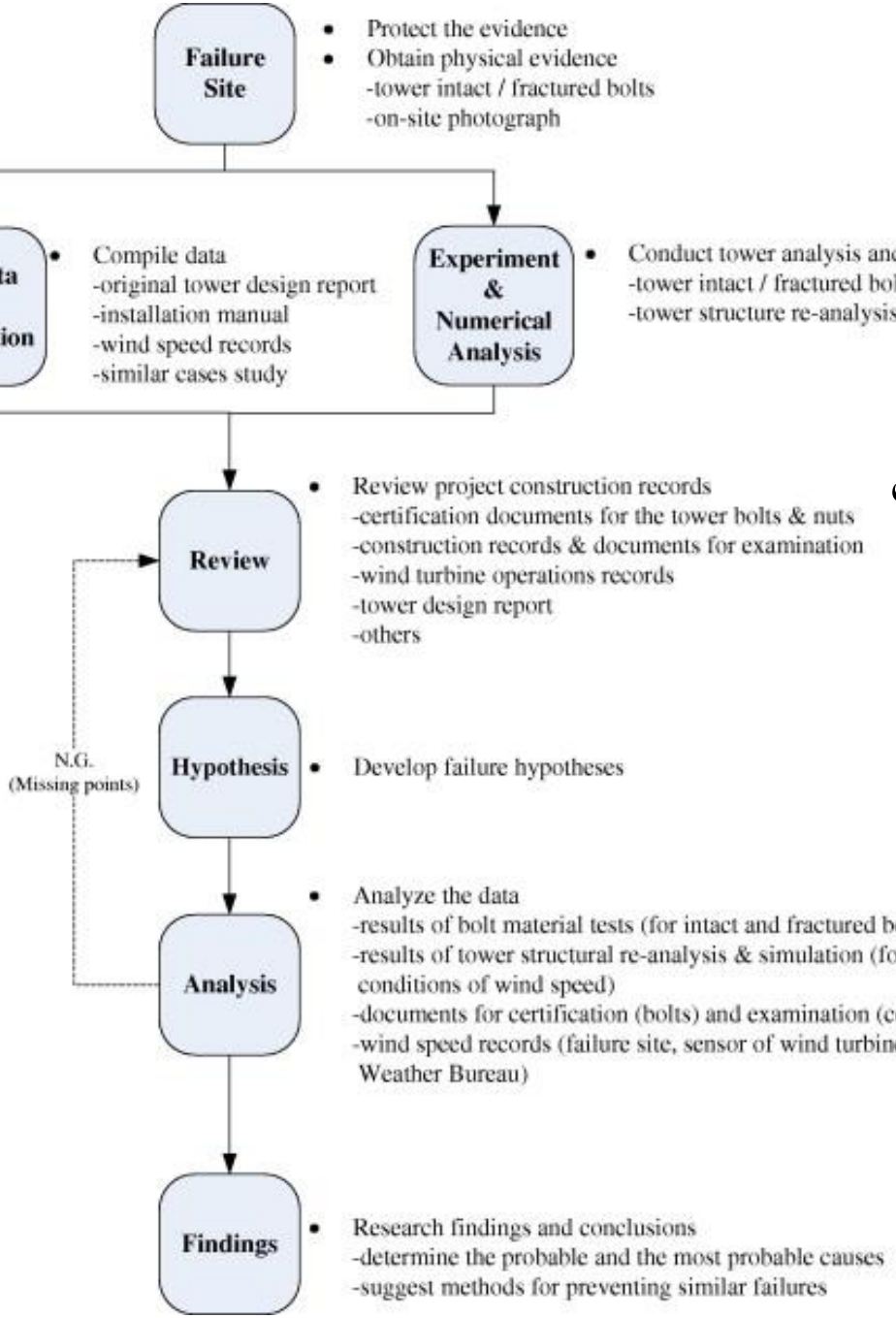
The current wind turbine field



Sketch of wind turbine components

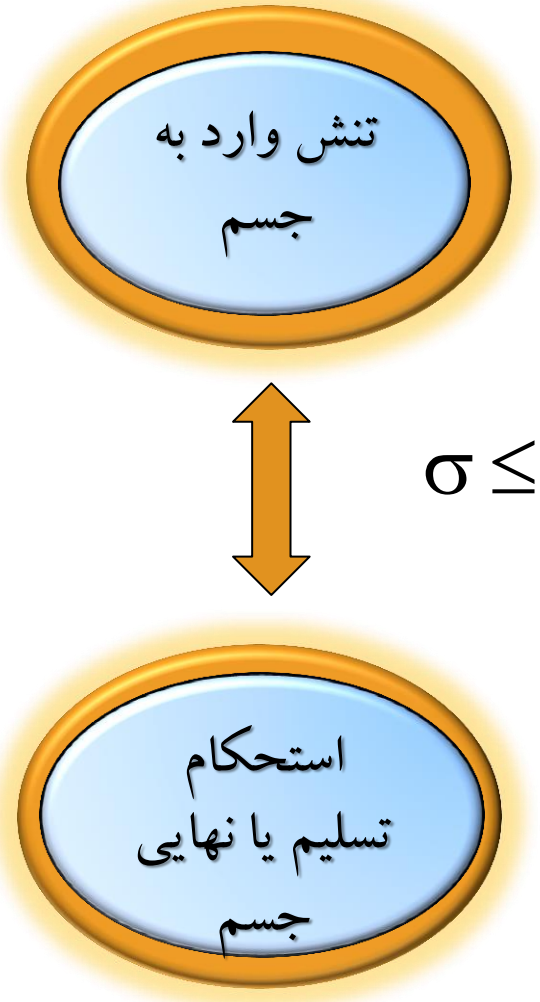
نمونه‌هایی از شکست

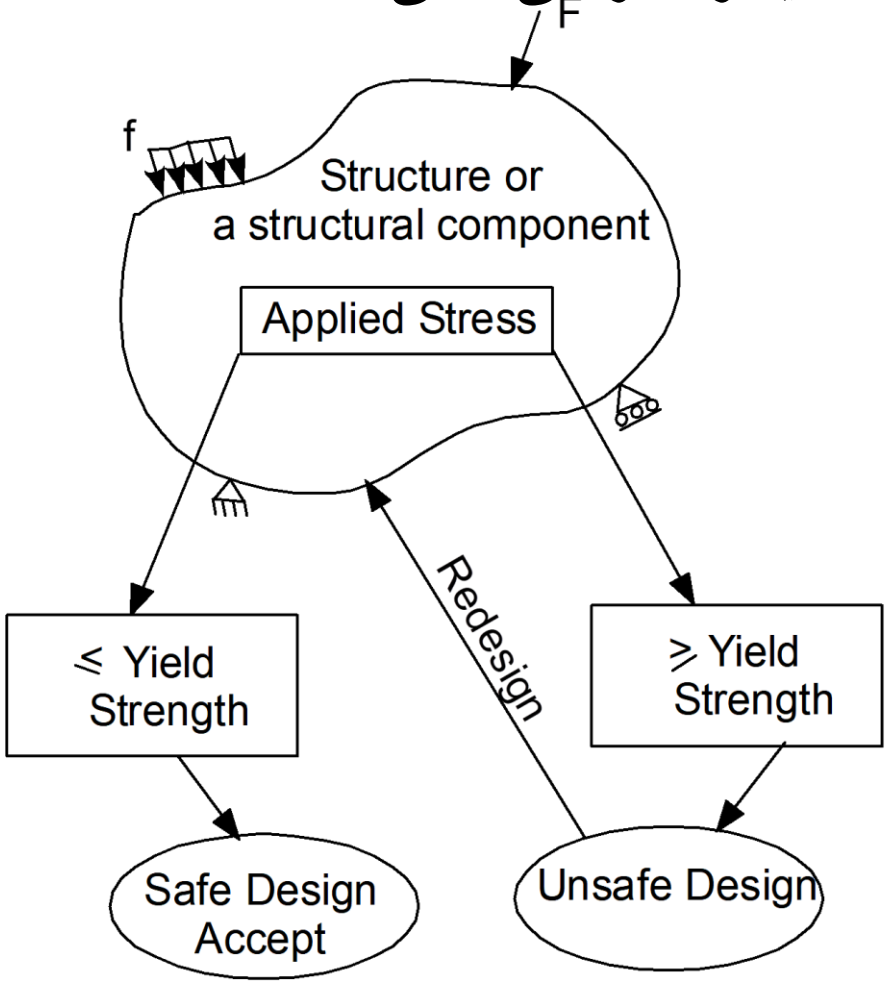
- روش سیستماتیک بازرسی مدارک و علت‌یابی شکست توربین بادی



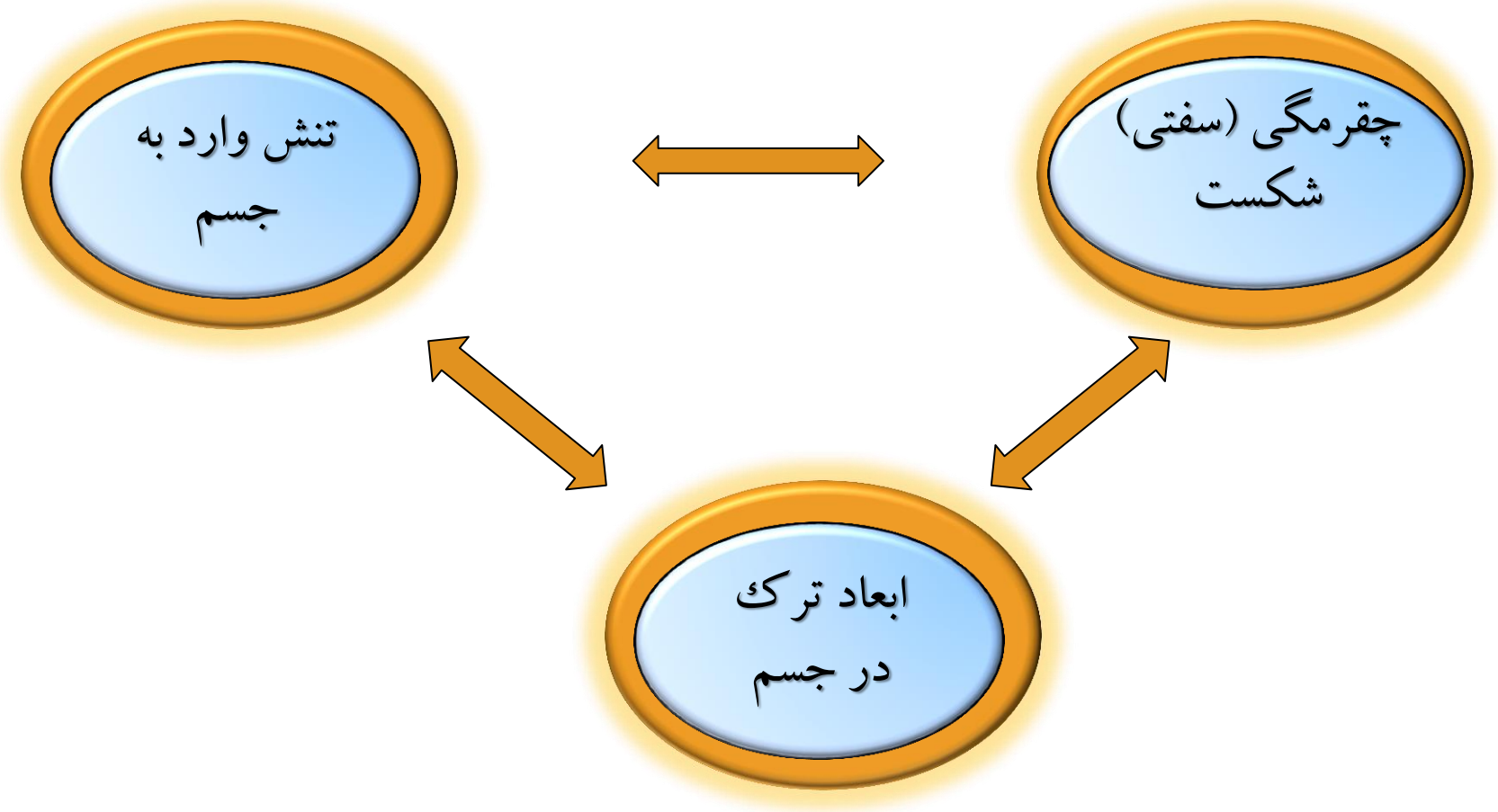
Traditional Design Approach

رویکرد طراحی سنتی

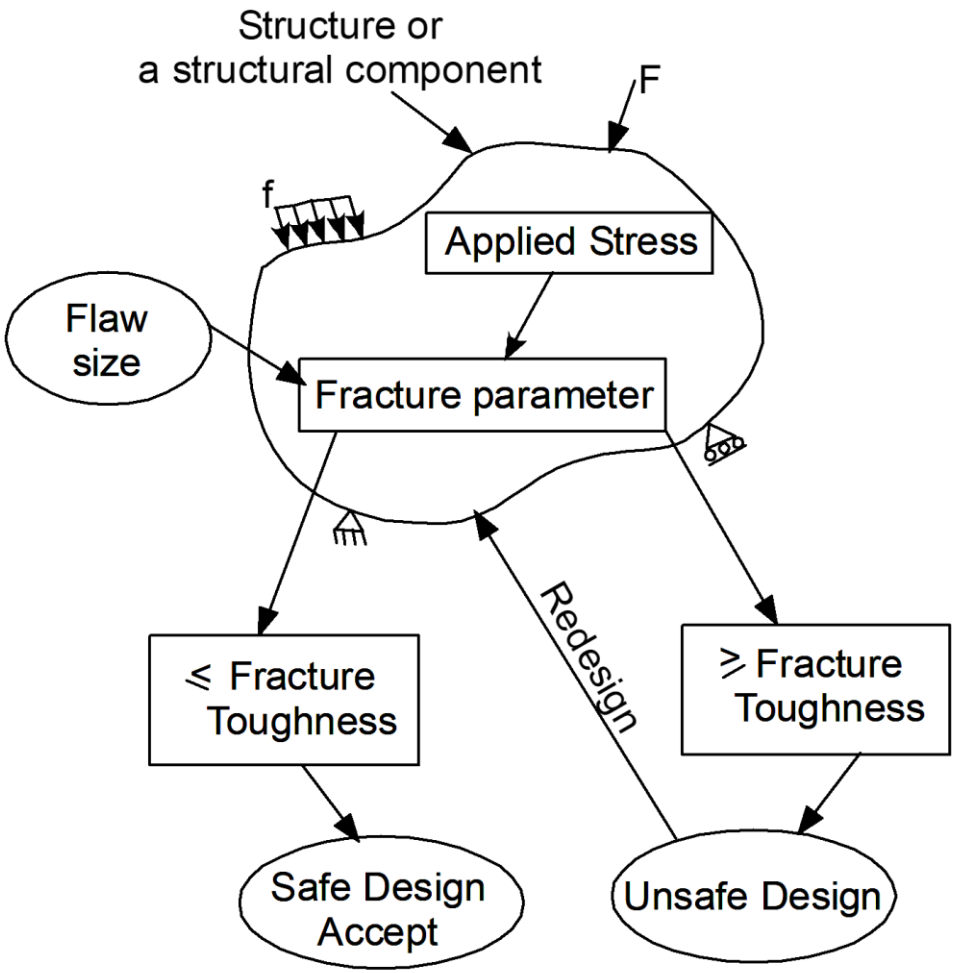




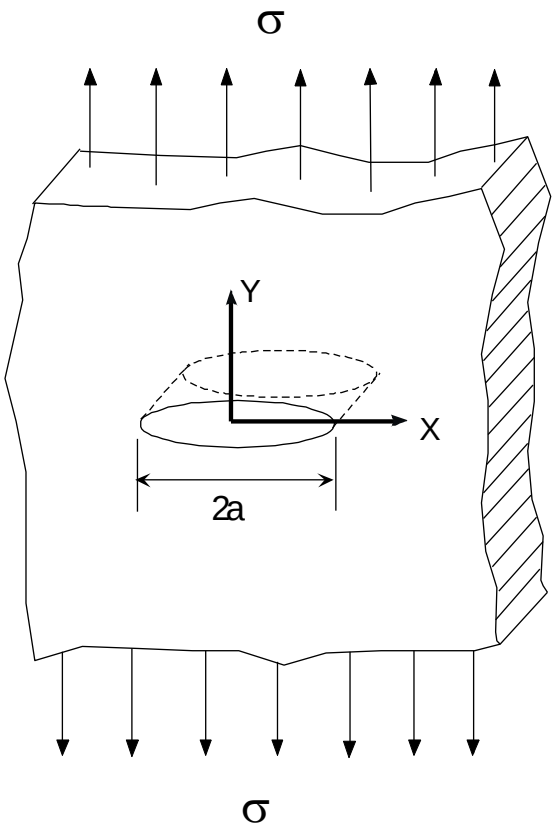
➢رویکرد مکانیک شکست Fracture Mechanics Approach



- رویکرد مکانیک شکست



Design based on Fracture Mechanics Approach



شرایط شکست یک صفحه نامحدود ترک‌دار:

$$K_C = \sigma \sqrt{\pi a}$$

- چقرمگی (انتخاب ماده)
- تنش طراحی
- اندازه مجاز ترک

اثر متقابل خواص ماده؛ مثل چقرمگی شکست، تنش طراحی و اندازه ترک، شرایط شکست یک قطعه را کنترل می‌کنند.

رویکردهای مکانیک شکست

- آنالیز تنش
- روش‌های انرژی
- مکانیک شکست محاسباتی
- میکرومکانیزم های شکست (به عنوان مثال در سطح اتمی)
- آزمون‌های تجربی
- کاربرد مکانیک شکست

عمر ایمن (Safe life)

در این رویکرد قطعات بدون نقص و ریزترک اولیه در فرآیند ساخت و طراحی در نظر گرفته می‌شوند و در طول عملکرد در بارگذاری استاتیک و یا دینامیکی بدون نقص باقی می‌ماند و در تنش‌های کاری برای یک دوره زمانی محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر ریزترک یا آسیب‌های مشابه در طول سرویس بازدید مشاهده شد این اجزاء باید بلافاصله از سرویس‌دهی حذف شوند.

تحمل آسیب (Damage tolerance)

در این رویکرد قطعات با حضور عیوب، ترک و یا وجود آسیب‌های خاصی از هندسه و یا اندازه طراحی می‌شوند تا حداکثر بار استاتیکی یا دینامیکی را برای یک دوره خاصی از زمان تحمل نمایند.

سرفصل درس

- مقدمه‌ای بر مکانیک شکست، تقسیم‌بندی شکست (شکست نرم، ترد، خزشی، خستگی، دینامیکی ...)
- مکانیک شکست الاستیک خطی
  - مکانیک شکست از دیدگاه میکروسکوپی
  - روش انرژی- معیار گریفیث، نرخ رهایی انرژی کرنشی
  - تنش در اجسام ترک‌دار
  - ضریب شدت تنش
  - مودهای ترکیبی شکست

سرفصل درس

- مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک
  - ناحیه پلاستیک نوک ترک
  - انتگرال J
  - جابجایی دهانه نوک ترک ($CTOD$)
- شکست خستگی
  - میکرومکانیزم رشد ترک خستگی
  - معادلات رشد ترک خستگی
  - اثر بسته شدن دهانه ترک

سرفصل درس

- آزمون‌های تجربی تعیین پارامترهای شکست
  - تعیین K_{IC}، J_{IC}
  - تعیین نرخ رشد ترک
- شکست‌نگاری

- شکست‌های ترد، نرم، تورق و بین‌دانه‌ای، انتقال شکست نرم به ترد
- شکست‌های خستگی
- طراحی بر اساس مکانیک شکست
- مطالعه موردی

سرفصل درس

- مکانیک شکست محاسباتی (روش اجزای محدود)
  - مقدمه ای بر روش اجزاء محدود خطی
  - المان‌های تکین
  - روش گسترش ترک مجازی
  - روش اجزای محدود تعمیم یافته ($XFEM$)

اهداف درس

- شناخت و تسلط بر مبنای مکانیک شکست
- به‌کارگیری روابط حاکم بر مکانیک شکست در مسایل کاربردی
- پیاده‌سازی مسایل مکانیک شکست به روش اجزای محدود
- توانایی تفسیر و ارزیابی قطعات شکسته شده
- شناخت مزیت‌های رویکرد مکانیک شکست و محدودیت‌ها آن

مراجع

References:

1.T. L. Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd Edition, CRC Press, 2004.

2. D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th Revised Edition, Springer, 2013).

3. B. Broek, The Practical Use of Fracture Mechanics, Springer, 1998.

4. S. Murakami, Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture, Springer Netherlands, Dordrecht, 2012.

5. S. Suresh, Fatigue of Materials. 2nd ed. Cambridge University Press, 1998.

6. L. B. Freund, Dynamic Fracture Mechanics, Cambridge University Press, 1998.

7. B. Lawn, Fracture of Brittle Solids, Cambridge University Press, 1993.

8. M.F. Kanninen and C.H. Popelar, Advanced Fracture Mechanics, Oxford Press, 1985.

9. R.W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012.

10. S. Al. Laham, Stress Intensity Factor and Limit Load Handbook, British Energy Generation Limited, 1998.

11. H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin, Stress Analysis of Cracks Handbook, 3rd ed., ASME Press. 2000.