

بسم الله الرحمن الرحيم

## رفتار مکانیکی مواد

( جلد اول )

تالیف :

مارک آندره میرز

دانشگاه کالیفرنیا، سان دیگو

کریشان کومار جاولا

دانشگاه آلاباما در بیرمنگهام

ترجمه :

پروفسور جمشید آقازاده

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر پیروز مرعشی

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر مسیح رضائی

پاییز ۱۳۹۱

|                     |                                                                                                              |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | مارک، مارک ا.، ۱۹۲۶ - م.                                                                                     |
| عنوان و نام پدیدآور | Meyers, Marc A.                                                                                              |
| مشخصات نشر          | رفتار مکانیکی مواد/ تألیف مارک آندره میرز، کریشان کومار چاولا؛ ترجمه جمشید آقازاده، پیروز مرعشی، مسیح رضائی. |
| مشخصات ظاهری        | تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر، ۱۳۹۱.                                             |
| شابک                | ج ۲: مصرع، جدول.                                                                                             |
| وضعیت فهرست نویسی   | دوره ۲- 978-964-463-477-2 : ۱۸۰۰۰۰ : ج ۸، 978-964-463-475-8 : ۱ : ۱۶۰۰۰۰ : ج ۵- 978-964-463-476-2            |
| پادداشت             | فبا                                                                                                          |
| پادداشت             | عنوان اصلی: Mechanical behavior of materials, 2nd ed., c2009.                                                |
| پادداشت             | واژه نامه.                                                                                                   |
| پادداشت             | نمابه.                                                                                                       |
| موضوع               | مقاومت مصالح                                                                                                 |
| شناسه افزوده        | چاولا، کریشان کومار، ۱۹۲۲ - م.                                                                               |
| شناسه افزوده        | Chawla, Krishan Kumar                                                                                        |
| شناسه افزوده        | آقازاده، جمشید، ۱۳۲۰ - مترجم                                                                                 |
| شناسه افزوده        | مرعشی، پیروز، ۱۳۳۲ - مترجم                                                                                   |
| شناسه افزوده        | رضائی، مسیح، مترجم                                                                                           |
| شناسه افزوده        | دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر                                                           |
| رده بندی کنگره      | TAT۰۵/۱۲۹۱                                                                                                   |
| رده بندی دهی        | ۶۲۰/۱۲                                                                                                       |
| شماره کتابشناسی ملی | ۲۹۱۰۲۹۲                                                                                                      |



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

|                       |                                                            |
|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| عنوان کتاب            | رفتار مکانیکی مواد (جلد اول) ♦                             |
| تألیف                 | مارک آندره میرز - کریشان کومار چاولا                       |
| ترجمه                 | پروفسور جمشید آقازاده - دکتر پیروز مرعشی - دکتر مسیح رضائی |
| ناشر                  | انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)          |
| لیتوگرافی چاپ و صحافی | انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)          |
| چاپ اول               | : پاییز ۱۳۹۱                                               |
| تیراژ                 | : ۱۰۰۰ نسخه                                                |
| قیمت                  | : ۱۸۰۰۰ تومان                                              |
| شابک                  | تلفن مرکز پخش: ۶۶۴۹۸۸۶۸                                    |
|                       | ISBN : 978-964-463-475-8                                   |
|                       | 978-964-463-477-2 : ISBN                                   |
| شابک دوره             | 978-964-463-477-2 : ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۴۷۷-۲                      |
|                       | 978-964-463-475-8 : ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۴۷۵-۸                      |

آدرس: خیابان ولیعصر روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

این کتاب برای جلوگیری از انتشار غیر مجاز رمزگذاری شده است

## رفتار مکانیکی مواد

در نظر داشتن یک رهیافت تعادلی بین مکانیک و مواد و پوشش آخرین پیش‌رفت‌ها در بیومواد و مواد الکترونیکی، چاپ جدید این کتاب پرخواننده را تبدیل به کامل‌ترین و جدیدترین کتاب موجود برای دوره‌های کارشناسی و تحصیلات تکمیلی در مورد رفتار مکانیکی مواد کرده است. ساده بودن متن کتاب از لحاظ روابط ریاضی و عدم نیاز به پیش‌زمینه‌ی وسیع در علم مواد، این کتاب را به صورت مقدمه‌ی مناسبی برای مطالعه‌ی رفتار مکانیکی مواد درآورده است.

## موارد جدید در چاپ دوم

- همه‌ی فصل‌های کتاب تصحیح، ارایش مجدد و به‌روزرسانی شده‌اند. تغییرات به نحوی اعمال شده‌اند که در کنار حفظ روال منطقی مباحث نظری برای آرایه در کلاس درس، مباحث مربوط به مواد جدید را نیز پوشش می‌دهند.
- در سراسر کتاب، بر اصول مکانیکی بیومواد شامل مواد متخلخل و همچنین مواد الکترونیکی تاکید شده است.
- فصل جدیدی راجع به اثرات محیطی به کتاب اضافه شده است (فصل ۱۶) که رابطه‌ی کلیدی بین شرایط محیطی، ریزساختار و رفتار مواد را بیان می‌کند.
- تمرین‌های جدیدی به انتهای هر فصل اضافه شده است.
- تاکید بر مکانیزم‌های فعال در سطوح میکرو- و نانومتری در گستره‌ی وسیعی از مواد و استفاده از تصاویر و نمودارهای فراوان برای تفهیم مناسب مباحث، این کتاب را به مرجعی کامل برای تدریس رفتار مکانیکی مواد در هر دو رشته‌ی علم مواد و مهندسی مکانیک تبدیل کرده است.

## نویسندگان کتاب

- مارک آندره میرز<sup>۱</sup>، پروفیسور دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و هوافضای دانشگاه کالیفرنیا در سان‌دیگو است. او یکی از موسسان کنفرانس‌های EXPLOMET و برنده‌ی جایزه‌ی دانشمند/مهندس مواد برجسته‌ی TMS<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۳ است.
- کریشان کومار چاولا<sup>۳</sup>، پروفیسور و رییس سابق دانشکده‌ی علم و مهندسی مواد دانشگاه آلاباما در بیرمنگهام است. او همچنین برنده‌ی جایزه‌ی ریاست جمهوری این دانشگاه برای تدریس عالی<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۶ شده است.

## مترجمان کتاب

- کتاب حاضر، دومین کتاب ترجمه‌شده توسط این گروه از مترجمین در رابطه با رفتار مکانیکی مواد است. کتاب اول ایشان به نام «خواص مکانیکی مواد نانوبلوری» در سال ۱۳۸۸ در انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر به چاپ رسیده است.
- جمشید آقازاده، پروفیسور دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. او بیش از ۲۰ سال به تدریس «خواص مکانیکی مواد ۱»، «خواص مکانیکی مواد ۲»، «نظریه‌ی نابجایی‌ها»، «مکانیک شکست» و «مواد مرکب» در دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی پرداخته و در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ به‌عنوان استاد نمونه دانشگاه صنعتی امیر کبیر شناخته شده‌اند.
  - پرویز مرعشی، استادیار دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. او حدود ۶ سال به تدریس «بلورشناسی» و «فیزیک حالت جامد» در دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی پرداخته است.
  - مسیح رضائی، دکتری مهندسی مواد از دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. او حدود ۴ سال تدریس‌یار درس‌های «خواص مکانیکی مواد ۱» و «خواص مکانیکی مواد ۲» در دوره‌ی کارشناسی و کارشناسی ارشد بوده است.

<sup>1</sup>Marc André Meyers, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, San Diego, USA

<sup>2</sup>TMS Distinguished Materials Scientist/Engineer Award

<sup>3</sup>Krishan Kumar Chawla, Department of Materials Science and Engineering, University of Alabama at Birmingham

<sup>4</sup>Presidential Award for Excellence in Teaching

# فهرست عناوین

عنوان

صفحه

|       |                   |
|-------|-------------------|
| xvii  | پیش‌گفتار مترجمین |
| xix   | پیش‌گفتار چاپ اول |
| xxiii | پیش‌گفتار چاپ دوم |

| ۱  | فصل اول: مواد، ساختار، خواص و کاربرد        |
|----|---------------------------------------------|
| ۱  | ۱-۱. مقدمه                                  |
| ۴  | ۱-۲. مواد تک‌جنسی، مرکب و مرکب‌های          |
| ۲۱ | ۱-۳. ساختار مواد                            |
| ۲۱ | ۱-۳-۱. ساختارهای بلوری                      |
| ۲۷ | ۱-۳-۲. فلزات                                |
| ۳۴ | ۱-۳-۳. سرامیک‌ها                            |
| ۴۰ | ۱-۳-۴. شیشه‌ها                              |
| ۴۳ | ۱-۳-۵. پلیمرها                              |
| ۵۵ | ۱-۳-۶. بلورهای مایع                         |
| ۵۷ | ۱-۳-۷. بیومواد                              |
| ۶۱ | ۱-۳-۸. مواد متخلخل و سلولی                  |
| ۷۸ | ۱-۳-۱۰. اسفنج دریایی: مثالی از مواد بیولوژی |
| ۷۹ | ۱-۳-۱۱. مواد فعال یا هوشمند                 |
| ۸۱ | ۱-۳-۱۲. مواد الکترونیکی                     |
| ۸۳ | ۱-۳-۱۳. نانوتکنولوژی                        |
| ۸۵ | ۱-۴. استحکام مواد واقعی                     |
| ۹۲ | تمرین‌ها                                    |

| ۱۰۱ | فصل دوم: الاستیسیته و ویسکوالاستیسیته       |
|-----|---------------------------------------------|
| ۱۰۱ | ۲-۱. مقدمه                                  |
| ۱۰۲ | ۲-۲. تنش و کرنش طولی                        |
| ۱۱۰ | ۲-۳. چگالی انرژی کرنشی (یا انرژی تغییر شکل) |
| ۱۱۳ | ۲-۴. تنش و کرنش برشی                        |

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| ۱۱۶ | ۵-۲. نسبت پواسون                                          |
| ۱۱۹ | ۶-۲. حالت‌های پیچیده‌تر تنش                               |
| ۱۲۴ | ۷-۲. حل گرافیکی یک تنش دومیحوری: دایره‌ی موهر             |
| ۱۳۱ | ۸-۲. برش خالص: ارتباط بین E و G                           |
| ۱۳۲ | ۹-۲. اثرات ناهم‌سان‌گردی                                  |
| ۱۴۵ | ۱۰-۲. خواص الاستیک چندبلورها                              |
| ۱۵۰ | ۱۱-۲. خواص الاستیک مواد                                   |
| ۱۵۱ | ۱-۱۱-۲. خواص الاستیک فلزات                                |
| ۱۵۲ | ۲-۱۱-۲. خواص الاستیک سرامیک‌ها                            |
| ۱۵۹ | ۳-۱۱-۲. خواص الاستیک پلیمرها                              |
| ۱۶۰ | ۴-۱۱-۲. ثوابت الاستیک مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف هم‌جهت |
| ۱۶۳ | ۱۲-۲. ویسکوالاستیسیت                                      |
| ۱۶۸ | ۱-۱۲-۲. مدول‌های ذخیره و افت                              |
| ۱۷۱ | ۱۳-۲. الاستیسیت‌های لاستیک‌سان                            |
| ۱۷۸ | ۱۴-۲. رابطه‌ی مونی-ریولین                                 |
| ۱۸۱ | ۱۵-۲. خواص الاستیک مواد بیولوژیکی                         |
| ۱۸۱ | ۱-۱۵-۲. رگ‌های خونی                                       |
| ۱۸۶ | ۲-۱۵-۲. غضروف مفصلی                                       |
| ۱۸۸ | ۳-۱۵-۲. خواص مکانیکی در سطح نانومتری                      |
| ۱۹۳ | ۱۶-۲. خواص الاستیک مواد الکترونیکی                        |
| ۱۹۵ | ۱۷-۲. ثوابت الاستیک و پیوندها                             |
| ۲۰۸ | تمرین‌ها                                                  |

|     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| ۲۱۷ | فصل سوم: پلاستیسیت                    |
| ۲۱۷ | ۱-۳. مقدمه                            |
| ۲۲۰ | ۲-۳. تغییر شکل پلاستیک در کشش         |
| ۲۲۹ | ۱-۲-۳. پارامترهای منحنی کشش           |
| ۲۳۱ | ۲-۲-۳. گردنی‌شدن                      |
| ۲۳۶ | ۳-۲-۳. اثرات نرخ کرنش                 |
| ۲۴۵ | ۳-۳. تغییر شکل پلاستیک در آزمایش فشار |
| ۲۴۹ | ۴-۳. اثر باوشینگ                      |
| ۲۵۱ | ۵-۳. تغییر شکل پلاستیک پلیمرها        |
| ۲۵۱ | ۱-۵-۳. منحنی‌های تنش-کرنش             |
| ۲۵۲ | ۲-۵-۳. پلیمرهای شیشه‌ای               |

|     |                                                         |
|-----|---------------------------------------------------------|
| ۲۵۳ | ۳-۵-۳. پلیمرهای نیمه بلوری                              |
| ۲۵۳ | ۳-۵-۴. سیلان ویسکوز                                     |
| ۲۵۴ | ۳-۵-۵. گرم شدن بی دررو                                  |
| ۲۵۵ | ۳-۶-۷. تغییر شکل پلاستیک شیشه‌ها                        |
| ۲۵۹ | ۳-۶-۱. مکانیزم تغییر شکل میکروسکوپی                     |
| ۲۶۰ | ۳-۶-۲. وابستگی دمایی و ویسکوزیته                        |
| ۲۶۴ | ۳-۷-۷. معیارهای سیلان تسلیم و شکست                      |
| ۲۶۵ | ۳-۷-۱. معیار تنش بیشینه (رنکین)                         |
| ۲۶۶ | ۳-۷-۲. معیار تنش برشی بیشینه (ترسکا)                    |
| ۲۶۶ | ۳-۷-۳. معیار انرژی انحراف بیشینه (فون میزر)             |
| ۲۶۷ | ۳-۷-۴. نمایش گرافیکی و تصدیق عملی معیارهای تسلیم        |
| ۲۷۲ | ۳-۷-۵. معیار شکست برای مواد ترد                         |
| ۲۷۶ | ۳-۷-۶. معیارهای تسلیم برای پلیمرهای نرم                 |
| ۲۷۹ | ۳-۷-۷. معیارهای شکست برای مواد مرکب                     |
| ۲۸۲ | ۳-۷-۸. معیارهای تسلیم و شکست برای سایر مواد ناهمسان‌گرد |
| ۲۸۳ | ۳-۸-۸. سختی                                             |
| ۲۸۴ | ۳-۸-۱. آزمایش‌های ماکروفروروندگی                        |
| ۲۹۳ | ۳-۸-۲. آزمایش‌های میکروفروروندگی                        |
| ۲۹۸ | ۳-۸-۳. نانوفروروندگی                                    |
| ۳۰۳ | ۳-۹-۹. شکل پذیری: پارامترهای مهم                        |
| ۳۰۶ | ۳-۹-۱. ناهمسان‌گردی پلاستیک                             |
| ۳۰۸ | ۳-۹-۲. آزمایش پانچ-تاسع و منحنی‌های حد شکل‌دهی          |
| ۳۱۴ | ۳-۱۰-۱. نیروی ماهیچه                                    |
| ۳۱۹ | ۳-۱۱-۱. خواص مکانیکی برخی مواد بیولوژیکی                |
| ۳۲۵ | تمرین‌ها                                                |

## فصل چهارم: عیوب نقطه‌ای و خطی

|     |                                         |
|-----|-----------------------------------------|
| ۳۳۳ | ۴-۱. مقدمه                              |
| ۳۳۳ | ۴-۲. استحکام برشی نظری                  |
| ۳۳۴ | ۴-۳. عیوب نقطه‌ای اتمی یا الکترونی      |
| ۳۳۸ | ۴-۳-۱. غلظت تعادلی عیوب نقطه‌ای         |
| ۳۴۱ | ۴-۳-۲. تولید عیوب نقطه‌ای               |
| ۳۴۴ | ۴-۳-۳. اثر عیوب نقطه‌ای بر خواص مکانیکی |
| ۳۴۶ | ۴-۳-۴. تخریب تابشی                      |
| ۳۴۷ |                                         |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۳۵۴ | ۴-۳-۵. کاشت یون                                       |
| ۳۵۶ | ۴-۴. عیوب خطی                                         |
| ۳۶۱ | ۴-۴-۱. مشاهده‌ی عملی نابجایی‌ها                       |
| ۳۶۴ | ۴-۴-۲. رفتار نابجایی‌ها                               |
| ۳۶۹ | ۴-۴-۳. میدان تنشی اطراف نابجایی‌ها                    |
| ۳۷۴ | ۴-۴-۴. انرژی نابجایی‌ها                               |
| ۳۷۸ | ۴-۴-۵. نیروی مور نیاز برای خم کردن یک نابجایی         |
| ۳۸۰ | ۴-۴-۶. نابجایی‌ها در ساختارهای مختلف                  |
| ۳۹۱ | ۴-۴-۷. نابجایی‌ها در سرامیک‌ها                        |
| ۴۰۰ | ۴-۴-۸. منابع نابجایی‌ها                               |
| ۴۰۶ | ۴-۴-۹. تجمع نابجایی                                   |
| ۴۰۸ | ۴-۴-۱۰. برخورد نابجایی‌ها                             |
| ۴۱۱ | ۴-۴-۱۱. تغییر شکل با حرکت نابجایی‌ها (معادله‌ی اروان) |
| ۴۱۵ | ۴-۴-۱۲. تنش پارلزنابارو                               |
| ۴۱۷ | ۴-۴-۱۳. حرکت نابجایی‌ها: اثرات دما و نرخ کرنش         |
| ۴۲۰ | ۴-۴-۱۴. نابجایی‌ها در مواد الکترونیکی                 |
| ۴۲۶ | تمرین‌ها                                              |

|     |                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------|
| ۴۳۳ | فصل پنجم: عیوب فصل مشترکی و حجمی                              |
| ۴۳۳ | ۵-۱. مقدمه                                                    |
| ۴۳۴ | ۵-۲. مرزدانه                                                  |
| ۴۳۹ | ۵-۲-۱. مرزهای کج و چرخشی                                      |
| ۴۴۱ | ۵-۲-۲. انرژی یک مرزدانه                                       |
| ۴۴۴ | ۵-۲-۳. تغییر انرژی مرزدانه با عدم تطابق                       |
| ۴۴۸ | ۵-۲-۴. مرزهای شبکه‌ی مکان تطابقی                              |
| ۴۴۹ | ۵-۲-۵. تقاطع‌های سه تایی مرزدانه                              |
| ۴۴۹ | ۵-۲-۶. نابجایی‌ها و لبه‌های مرزدانه‌ای                        |
| ۴۵۱ | ۵-۲-۷. مرزدانه به عنوان بسته‌ای از واحدهای چندوجهی            |
| ۴۵۳ | ۵-۳. دوقلویی و مرزهای دوقلویی                                 |
| ۴۵۳ | ۵-۳-۱. بلورشناسی و مورفولوژی                                  |
| ۴۵۷ | ۵-۳-۲. اثرات مکانیکی                                          |
| ۴۶۱ | ۵-۴. مرزدانه در تغییر شکل پلاستیک (استحکام‌دهی اندازه‌ی دانه) |
| ۴۶۵ | ۵-۴-۱. نظریه‌ی هال-پچ                                         |
| ۴۶۶ | ۵-۴-۲. نظریه‌ی کاترل                                          |

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| ۴۶۷ | ۳-۴-۵. نظریه‌ی لی          |
| ۴۶۹ | ۴-۴-۵. نظریه‌ی میرزا-اشورت |
| ۴۷۲ | ۵-۵. موانع درونی دیگر      |
| ۴۷۴ | ۶-۵. مواد نانوبلوری        |
| ۴۷۹ | ۷-۵. عیوب حجمی یا سه‌بعدی  |
| ۴۸۲ | ۸-۵. عیوب در پلیمرها       |
| ۴۸۷ | تمرین‌ها                   |

## فصل ششم: هندسه‌ی تغییر شکل و کارسختی ۴۹۳

|     |                                           |
|-----|-------------------------------------------|
| ۴۹۳ | ۱-۶. مقدمه                                |
| ۴۹۹ | ۲-۶. هندسه‌ی تغییر شکل                    |
| ۴۹۹ | ۱-۲-۶. تصاویر استریوگرافیک                |
| ۵۰۱ | ۲-۲-۶. تنش مورد نیاز برای لغزش            |
| ۵۰۸ | ۳-۲-۶. تغییر شکل برشی                     |
| ۵۰۹ | ۴-۲-۶. لغزش در سیستم‌ها و کارسختی         |
| ۵۱۴ | ۵-۲-۶. سیستم‌های لغزشی مستقل در چندبلورها |
| ۵۱۴ | ۳-۶. کارسختی در چندبلورها                 |
| ۵۱۷ | ۱-۳-۶. نظریه‌ی تیلور                      |
| ۵۱۹ | ۲-۳-۶. نظریه‌ی سیگر                       |
| ۵۲۰ | ۳-۳-۶. نظریه‌ی کولمان-ویلدورف             |
| ۵۲۴ | ۴-۶. مکانیزم‌های نرم‌شدن                  |
| ۵۲۸ | ۵-۶. استحکام‌دهی بافت                     |
| ۵۳۲ | تمرین‌ها                                  |

## فصل هفتم: شکست - جنبه‌های ماکروسکوپی ۵۴۱

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| ۵۴۱ | ۱-۷. مقدمه                         |
| ۵۴۴ | ۲-۷. استحکام کششی نظری             |
| ۵۴۷ | ۳-۷. تمرکز تنش و معیار شکست گریفیث |
| ۵۴۷ | ۱-۳-۷. تمرکز تنش                   |
| ۵۴۸ | ۲-۳-۷. عامل تمرکز تنش              |
| ۵۵۶ | ۴-۷. معیار گریفیث                  |
| ۵۶۱ | ۵-۷. رشد ترک با پلاستیسیته         |
| ۵۶۴ | ۶-۷. مکانیک شکست الاستیک خطی       |

|     |                                                         |
|-----|---------------------------------------------------------|
| ۵۶۵ | ۱-۶-۷. چقرمگی شکست                                      |
| ۵۶۶ | ۲-۶-۷. فرضیات LEFM                                      |
| ۵۶۷ | ۳-۶-۷. حالت‌های بازشدن نوک ترک                          |
| ۵۶۷ | ۴-۶-۷. میدان تنشی اطراف نوک ترک در یک ماده‌ی هم‌سان‌گرد |
| ۵۶۸ | ۵-۶-۷. جزییات میدان تنشی نوک ترک در حالت I              |
| ۵۷۴ | ۶-۶-۷. تصحیح اندازه‌ی منطقه‌ی پلاستیک                   |
| ۵۷۸ | ۷-۶-۷. تغییر چقرمگی شکست با ضخامت                       |
| ۵۸۱ | ۷-۷. پارامترهای چقرمگی شکست                             |
| ۵۸۱ | ۱-۷-۷. نیروی گسترش ترک (G)                              |
| ۵۸۵ | ۲-۷-۷. جابه‌جایی نوک ترک                                |
| ۵۸۹ | ۳-۷-۷. انتگرال J                                        |
| ۵۹۲ | ۴-۷-۷. منحنی R                                          |
| ۵۹۳ | ۵-۷-۷. روابط بین پارامترهای مختلف چقرمگی شکست           |
| ۵۹۵ | ۸-۷. اهمیت عملی $K_{Ic}$                                |
| ۵۹۷ | ۹-۷. مکانیک شکست پس از تسلیم                            |
| ۶۰۰ | ۱۰-۷. آنالیز آماری استحکام شکست                         |
| ۶۱۰ | پیوست: تکیه تنش در نوک ترک                              |
| ۶۱۳ | تمرین‌ها                                                |

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۶۲۳ | فصل هشتم: شکست - جنبه‌های میکروسکوپی          |
| ۶۲۳ | ۱-۸. مقدمه                                    |
| ۶۲۶ | ۲-۸. شکست در فلزات                            |
| ۶۲۶ | ۱-۲-۸. جوانه‌زنی ترک                          |
| ۶۲۸ | ۲-۲-۸. شکست نرم                               |
| ۶۴۲ | ۳-۲-۸. شکست ترد یا تورقی                      |
| ۶۵۰ | ۳-۸. شکست در سرامیک‌ها                        |
| ۶۵۰ | ۱-۳-۸. جنبه‌های ریزساختاری                    |
| ۶۵۹ | ۲-۳-۸. تاثیر اندازه دانه بر استحکام سرامیک‌ها |
| ۶۶۱ | ۳-۳-۸. شکست سرامیک‌ها تحت کشش                 |
| ۶۶۴ | ۴-۳-۸. شکست در سرامیک‌ها تحت فشار             |
| ۶۷۲ | ۵-۳-۸. شکست حرارتی در سرامیک‌ها               |
| ۶۷۵ | ۴-۸. شکست در پلیمرها                          |
| ۶۷۵ | ۱-۴-۸. شکست ترد                               |
| ۶۷۶ | ۲-۴-۸. پوست‌ماری شدن و تسلیم برشی             |

|     |                                            |
|-----|--------------------------------------------|
| ۶۸۱ | ۸-۴-۳. شکست در پلیمرهای نیمه بلوری و بلوری |
| ۶۸۳ | ۸-۴-۴. چقرمگی پلیمرها                      |
| ۶۸۷ | ۸-۵. شکست و چقرمگی مواد بیولوژیکی          |
| ۶۹۲ | ۸-۶. نقشه‌های مکانیزم شکست                 |
| ۶۹۴ | تمرین‌ها                                   |

### فصل نهم: آزمایش شکست

|     |                                            |
|-----|--------------------------------------------|
| ۶۹۹ | ۹-۱. مقدمه                                 |
| ۶۹۹ | ۹-۲. آزمایش ضربه                           |
| ۷۰۰ | ۹-۲-۱. آزمایش ضربه‌ی شارپی                 |
| ۷۰۰ | ۹-۲-۲. آزمایش وزنه‌ی سقوطی                 |
| ۷۰۵ | ۹-۲-۳. آزمایش ضربه‌ی شارپی تجهیز شده       |
| ۷۰۶ | ۹-۳. آزمایش چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای       |
| ۷۰۸ | ۹-۴. آزمایش بازشوندگی نوک ترک              |
| ۷۱۵ | ۹-۵. آزمایش انتگرال J                      |
| ۷۱۷ | ۹-۶. آزمایش خمش                            |
| ۷۱۸ | ۹-۶-۱. آزمایش خمش سه نقطه‌ای               |
| ۷۲۰ | ۹-۶-۲. آزمایش خمش چهار نقطه‌ای             |
| ۷۲۱ | ۹-۶-۳. آزمایش استحکام برشی بین لایه‌ای     |
| ۷۲۳ | ۹-۷. آزمایش چقرمگی شکست مواد ترد           |
| ۷۲۶ | ۹-۷-۱. آزمایش شیار V شکل                   |
| ۷۲۷ | ۹-۷-۲. روش‌های فروروندگی برای تعیین چقرمگی |
| ۷۲۹ | ۹-۸. چسبندگی لایه‌های نازک به زیرلایه‌ها   |
| ۷۳۴ | تمرین‌ها                                   |
| ۷۳۶ |                                            |

### فصل دهم: استحکام‌دهی محلول جامد، رسوب‌سختی و سختی پراکندگی

|     |                                                    |
|-----|----------------------------------------------------|
| ۷۴۵ | ۱۰-۱. مقدمه                                        |
| ۷۴۵ | ۱۰-۲. استحکام‌دهی محلول جامد                       |
| ۷۴۷ | ۱۰-۲-۱. برهم‌کنش الاستیک                           |
| ۷۴۹ | ۱۰-۲-۲. برهم‌کنش‌های دیگر                          |
| ۷۵۴ | ۱۰-۳. اثرات مکانیکی مرتبط با محلول‌های جامد        |
| ۷۵۴ | ۱۰-۳-۱. نقطه‌ی تسلیم مشخص در منحنی‌های تنش-کرنش    |
| ۷۵۶ | ۱۰-۳-۲. منطقه‌ی تخت در منحنی تنش-کرنش و نوار لودرز |
| ۷۵۷ |                                                    |

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| ۷۵۹ | ۱۰-۳-۳. پیرسازی کرنشی                |
| ۷۶۱ | ۱۰-۳-۴. منحنی تنش-کرنش دندانه‌دار    |
| ۷۶۲ | ۱۰-۳-۵. اثر اسنوک                    |
| ۷۶۴ | ۱۰-۳-۶. تردی آبی                     |
| ۷۶۴ | ۱۰-۴. رسوب‌سختی و سختی پراکندگی      |
| ۷۷۵ | ۱۰-۵. برهم‌کش نابجایی-رسوب           |
| ۷۸۳ | ۱۰-۶. رسوب‌دهی در فولادهای ریزآلیازی |
| ۷۸۹ | ۱۰-۷. فولادهای دوفازی                |
| ۷۹۱ | تمرین‌ها                             |

|     |                                          |
|-----|------------------------------------------|
| ۷۹۵ | فصل یازدهم: استحاله‌های مارتنزیتی        |
| ۷۹۵ | ۱۱-۱. مقدمه                              |
| ۷۹۶ | ۱۱-۲. ساختارها و مورفولوژی‌های مارتنزیت  |
| ۸۰۳ | ۱۱-۳. استحکام مارتنزیت                   |
| ۸۰۸ | ۱۱-۴. اثرات مکانیکی                      |
| ۸۱۴ | ۱۱-۵. اثر حافظه‌داری                     |
| ۸۲۲ | ۱۱-۵-۱. اثر حافظه‌داری در پلیمرها        |
| ۸۲۳ | ۱۱-۶. استحاله‌های مارتنزیتی در سرامیک‌ها |
| ۸۲۸ | تمرین‌ها                                 |

|     |                                                   |
|-----|---------------------------------------------------|
| ۸۳۳ | فصل دوازدهم: مواد خاص - ترکیبات بین‌فلزی و فوم‌ها |
| ۸۳۳ | ۱۲-۱. مقدمه                                       |
| ۸۳۴ | ۱۲-۲. سیلیسیدها                                   |
| ۸۳۵ | ۱۲-۳. ترکیبات بین‌فلزی منظم                       |
| ۸۳۸ | ۱۲-۳-۱. ساختار نابجایی در ترکیبات بین‌فلزی منظم   |
| ۸۴۲ | ۱۲-۳-۲. تاثیر منظم‌شدن بر خواص مکانیکی            |
| ۸۵۰ | ۱۲-۳-۳. انعطاف‌پذیری ترکیبات بین‌فلزی             |
| ۸۵۶ | ۱۲-۴. مواد سلولی                                  |
| ۸۵۶ | ۱۲-۴-۱. ساختار                                    |
| ۸۵۹ | ۱۲-۴-۲. مدل‌سازی رفتار مکانیکی                    |
| ۸۶۴ | ۱۲-۴-۳. مقایسه‌ی پیش‌بینی‌ها و نتایج عملی         |
| ۸۶۴ | ۱۲-۴-۴. فوم مصنوعی                                |
| ۸۶۵ | ۱۲-۴-۵. رفتار پلاستیک مواد متخلخل                 |

| ۸۷۵ | فصل سیزدهم: خزش و ابرپلاستیسیته                 |
|-----|-------------------------------------------------|
| ۸۷۵ | ۱-۱۳. مقدمه                                     |
| ۸۸۳ | ۲-۱۳. روش‌های همبستگی و برون‌یابی               |
| ۸۹۱ | ۳-۱۳. مکانیزم‌های اساسی عامل خزش                |
| ۸۹۳ | ۴-۱۳. خزش نفوذی                                 |
| ۸۹۷ | ۵-۱۳. خزش نابجایی (قانون نمایی)                 |
| ۹۰۰ | ۶-۱۳. لغزش نابجایی                              |
| ۹۰۱ | ۷-۱۳. لغزش مرزدانه                              |
| ۹۰۴ | ۸-۱۳. نقشه‌های مکانیزم تغییر شکل (ویرتمن-اشبی)  |
| ۹۰۷ | ۹-۱۳. شکست خزشی                                 |
| ۹۱۱ | ۱۰-۱۳. مواد مقاوم به حرارت                      |
| ۹۱۹ | ۱۱-۱۳. خزش در پلیمرها                           |
| ۹۳۰ | ۱۲-۱۳. پدیده‌های مرتبط با نفوذ در مواد الکتریکی |
| ۹۳۳ | ۱۳-۱۳. ابرپلاستیسیته                            |
| ۹۴۲ | تمرین‌ها                                        |
| ۹۵۳ | فصل چهاردهم: خستگی                              |
| ۹۵۴ | ۱-۱۴. مقدمه                                     |
| ۹۵۵ | ۲-۱۴. پارامترهای خستگی و منحنی‌های S-N (ووهلر)  |
| ۹۵۹ | ۳-۱۴. استحکام و عمر خستگی                       |
| ۹۶۱ | ۴-۱۴. تاثیر تنش متوسط بر عمر خستگی              |
| ۹۶۴ | ۵-۱۴. تاثیر فرکانس                              |
| ۹۶۵ | ۶-۱۴. تجمع خسارات و تحلیل عمر                   |
| ۹۶۹ | ۷-۱۴. مکانیزم‌های خستگی                         |
| ۹۶۹ | ۱-۷-۱۴. جوانه‌زنی ترک خستگی                     |
| ۹۷۵ | ۲-۷-۱۴. اشاعه‌ی ترک خستگی                       |
| ۹۸۲ | ۸-۱۴. مکانیک شکست الاستیک خطی اعمالی به خستگی   |
| ۹۹۴ | ۱-۸-۱۴. خستگی مواد زیستی                        |
| ۹۹۷ | ۹-۱۴. حرارت‌دهی هیستریزیس در خستگی              |
| ۹۹۹ | ۱۰-۱۴. اثرات محیطی در خستگی                     |
| ۹۹۹ | ۱۱-۱۴. بسته شدن ترک خستگی                       |

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| ۱۰۰۱ | ۱۲-۱۴. رهیافت دو پارامتری           |
| ۱۰۰۲ | ۱۳-۱۴. مشکل ترک کوتاه در خستگی      |
| ۱۰۰۴ | ۱۴-۱۴. آزمایش خستگی                 |
| ۱۰۰۴ | ۱-۱۴-۱۴. آزمایش های خستگی معمول     |
| ۱۰۰۵ | ۲-۱۴-۱۴. دستگاه خمشی-چرخشی          |
| ۱۰۰۶ | ۳-۱۴-۱۴. آنالیز آماری منحنی های S-N |
| ۱۰۰۹ | ۴-۱۴-۱۴. آزمایش های خستگی غیر معمول |
| ۱۰۰۹ | ۵-۱۴-۱۴. دستگاه های سروو هیدرولیکی  |
| ۱۰۱۰ | ۶-۱۴-۱۴. آزمایش های خستگی کم چرخه   |
| ۱۰۱۲ | ۷-۱۴-۱۴. آزمایش اشاعی ترک خستگی     |
| ۱۰۱۴ | تمرین ها                            |

|      |                                                       |
|------|-------------------------------------------------------|
| ۱۰۲۳ | فصل پانزدهم: مواد مرکب                                |
| ۱۰۲۳ | ۱-۱۴. مقدمه                                           |
| ۱۰۲۴ | ۲-۱۵. انواع مواد مرکب                                 |
| ۱۰۲۶ | ۳-۱۵. تقویت کننده ها و مواد زمینه ی مهم               |
| ۱۰۲۸ | ۱-۳-۱۵. جنبه های ریز ساختمانی و اهمیت زمینه           |
| ۱۰۳۰ | ۴-۱۵. فصل مشترک ها در مواد مرکب                       |
| ۱۰۳۱ | ۱-۴-۱۵. ماهیت بلوری فصل مشترک رشته زمینه              |
| ۱۰۳۱ | ۲-۴-۱۵. پیوندهای فصل مشترکی در مواد مرکب              |
| ۱۰۳۳ | ۳-۴-۱۵. برهم کنش های فصل مشترکی                       |
| ۱۰۳۵ | ۵-۱۵. خواص مواد مرکب                                  |
| ۱۰۳۶ | ۱-۵-۱۵. چگالی و ظرفیت حرارتی                          |
| ۱۰۳۶ | ۲-۵-۱۵. مدول الاستیک                                  |
| ۱۰۴۲ | ۳-۵-۱۵. استحکام                                       |
| ۱۰۴۷ | ۴-۵-۱۵. ناهمسان گردی در مواد مرکب تقویت شده ی رشته ای |
| ۱۰۴۸ | ۵-۵-۱۵. رفتار پیرسازی زمینه در MMC ها                 |
| ۱۰۴۹ | ۶-۵-۱۵. چقرمگی                                        |
| ۱۰۵۳ | ۷-۱۵. انتقال بار از زمینه به رشته                     |
| ۱۰۵۵ | ۱-۷-۱۵. رشته و زمینه ی الاستیک                        |
| ۱۰۵۸ | ۲-۷-۱۵. رشته ی الاستیک و زمینه ی پلاستیک              |
| ۱۰۶۱ | ۷-۱۵. شکست مواد مرکب                                  |
| ۱۰۶۱ | ۱-۷-۱۵. شکست تکی و چند تایی                           |
| ۱۰۶۲ | ۲-۷-۱۵. حالت های شکست در مواد مرکب                    |

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| ۱۰۶۷ | ۸-۱۵. برخی مشخصه‌های بنیادی مواد مرکب |
| ۱۰۶۷ | ۱-۸-۱۵. ناهمگنی                       |
| ۱۰۶۷ | ۲-۸-۱۵. ناهمسانگردی                   |
| ۱۰۶۹ | ۳-۸-۱۵. جفت شدن برشی                  |
| ۱۰۷۱ | ۴-۸-۱۵. تغییر آماری در استحکام        |
| ۱۰۷۱ | ۹-۱۵. مواد مرتبه‌ای                   |
| ۱۰۷۲ | ۱۰-۱۵. کاربردها                       |
| ۱۰۷۳ | ۱-۱۰-۱۵. کاربردهای هوافضایی           |
| ۱۰۷۴ | ۲-۱۰-۱۵. کاربردهای غیرهوافضایی        |
| ۱۰۷۸ | ۱۱-۱۵. مواد مرکب طبقه‌ای              |
| ۱۰۸۲ | تمرین‌ها                              |

|      |                                           |
|------|-------------------------------------------|
| ۱۰۸۹ | <b>فصل شانزدهم: اثرات محیطی</b>           |
| ۱۰۸۹ | ۱-۱۶. مقدمه                               |
| ۱۰۹۰ | ۲-۱۶. ماهیت الکتروشیمیایی خوردگی در فلزات |
| ۱۰۹۱ | ۱-۲-۱۶. خوردگی گالوانیکی                  |
| ۱۰۹۲ | ۲-۲-۱۶. خوردگی یک‌نواخت                   |
| ۱۰۹۳ | ۳-۲-۱۶. خوردگی شیاری                      |
| ۱۰۹۳ | ۴-۲-۱۶. خوردگی سوراخی                     |
| ۱۰۹۳ | ۵-۲-۱۶. خوردگی بین‌دانه‌ای                |
| ۱۰۹۴ | ۶-۲-۱۶. آلیاژینگ انتخابی                  |
| ۱۰۹۵ | ۷-۲-۱۶. خوردگی سایشی                      |
| ۱۰۹۵ | ۸-۲-۱۶. تخریب تابشی                       |
| ۱۰۹۵ | ۹-۲-۱۶. خوردگی تنشی                       |
| ۱۰۹۵ | ۳-۱۶. اکسیداسیون فلزات                    |
| ۱۰۹۷ | ۴-۱۶. شکست به کمک محیط در فلزات           |
| ۱۰۹۷ | ۱-۴-۱۶. ترک خوردگی خوردگی تنشی (SCC)      |
| ۱۱۰۲ | ۲-۴-۱۶. تخریب هیدروژنی در فلزات           |
| ۱۱۱۰ | ۳-۴-۱۶. تردی فلز مایع و جامد              |
| ۱۱۱۲ | ۵-۱۶. اثرات محیطی در پلیمرها              |
| ۱۱۱۳ | ۱-۵-۱۶. حمله‌ی شیمیایی یا حلالی           |
| ۱۱۱۳ | ۲-۵-۱۶. تورم                              |
| ۱۱۱۵ | ۳-۵-۱۶. اکسیداسیون                        |
| ۱۱۱۶ | ۴-۵-۱۶. تخریب تابشی                       |

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| ۱۱۱۸ | ۱۶-۵-۵. ترک دوخت شدن محیطی          |
| ۱۱۱۹ | ۱۶-۵-۷. کاهش تخریب محیطی در پلیمرها |
| ۱۱۲۰ | ۱۶-۷. اثرات محیطی در سرامیک‌ها      |
| ۱۱۲۳ | ۱۶-۶-۱. اکسیداسیون سرامیک‌ها        |
| ۱۱۲۵ | تمرین‌ها                            |

|      |                              |
|------|------------------------------|
| ۱۱۲۹ | پیوست‌ها                     |
| ۱۱۳۷ | واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی |
| ۱۱۵۳ | واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی |
| ۱۱۷۱ | نمایه                        |

## پیش‌گفتار مترجمین

خدای بزرگ را شاکریم که ترجمه‌ی کتاب «رفتار مکانیکی مواد» پس از گذشت حدود ۵ سال تلاش بی‌وقفه‌ی مترجمین و هم‌کاری جمعی از دوستان پایان یافته و آماده‌ی چاپ و استفاده‌ی پژوهش‌گران علوم مختلف شده است. ترجمه‌ی این کتاب بر اساس چاپ دوم کتاب «رفتار مکانیکی مواد» نوشته‌ی «پروفسور میر» و «پروفسور چاولا» منتشرشده در سال ۲۰۰۹ میلادی، به‌روزرسانی شده است. بی‌شک این کتاب جدیدترین و شاید قوی‌ترین کتاب در زمینه‌ی رفتار مکانیکی مواد برای تدریس در دوره‌های کارشناسی و تحصیلات تکمیلی رشته‌های علم و مهندسی مواد و همچنین مهندسی مکانیک است. چاپ دوم کتاب علاوه بر مطالب معمول ذکرشده در کتاب‌های مشابه، شامل مباحث کاملاً جدید این زمینه از علم و البته مباحثی راجع به رفتار مکانیکی مواد جدید به ویژه بیومواد و مواد الکترونیکی است که علاوه بر دانش‌جویان و پژوهش‌گران دو رشته‌ی مذکور، سایر افراد مشغول به تحصیل یا پژوهش در دیگر رشته‌های علوم و مهندسی نیز می‌توانند از این کتاب استفاده کرده و بهره‌ی لازم را ببرند.

مترجمین کتاب نهایت سعی خود را داشته‌اند که تا حد امکان معادل‌های فارسی برای کلمات و اصطلاحات علمی استفاده‌شده توسط نویسندگان به کار ببرند. به منظور تسهیل در خواندن کتاب، علاوه بر ذکر اصطلاحات انگلیسی در پاورقی برای معادل‌های فارسی مورد استفاده در هر بخش از متن، دو واژه‌نامه‌ی «انگلیسی به فارسی» و «فارسی به انگلیسی» در انتهای کتاب گنجانده شده است. چند جدول شامل نحوه‌ی تبدیل واحدها، توضیح علائم استفاده‌شده در کتاب و نیز برخی از خواص معمول مواد شناخته‌شده نیز در بخش ضمیمه‌ی انتهای کتاب آورده شده است.

امید است کتاب حاضر بتواند انتظارات دانش‌جویان و پژوهش‌گران عزیز را برآورده کند. هر چند که مترجمین تمام سعی خود را برای ارائه‌ی کتابی عاری از نقص کرده‌اند، اما احتمالاً با توجه به حجم بالای کتاب، باز هم مشکلاتی در آن وجود دارد. لازم به ذکر است که نسخه‌ی اصلی چاپ دوم کتاب دارای یک سری اشتباهات نگارشی در بخش‌های مختلف است که مترجمین تا حد امکان سعی در برطرف کردن آن‌ها داشته‌اند. مترجمین کتاب پذیرای هر گونه نظر، انتقاد و پیشنهاد از سوی خوانندگان عزیز در راستای بهبود کیفیت کتاب هستند.

در پایان، مترجمین بر خود لازم می‌دانند از همه‌ی دوستانی که در بهبود کیفیت کتاب و نیز چاپ آن کمک کرده‌اند، تشکر فراوان به عمل آورند. در این راستا، از خانم‌ها مهندس تینا شادلو، مهندس سارا شکوری، مهندس درساسادات صفانما و آقایان مهندس محسن سعادت‌مند و مهندس مجید پورانوری به دلیل کمک‌های فراوان ایشان در بازخوانی بخش‌های مختلف کتاب و ویرایش آن نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

پروفسور جمشید آقازاده، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر پیروز مرعشی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر مسیح رضائی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بهار ۱۳۹۱

www.ketab.ir

## پیش‌گفتار چاپ اول

رفتار مکانیکی مواد، یکی از دروس استاندارد در هر دو رشته‌ی علم/مهندسی مواد و مهندسی مکانیک است. این دروس معمولاً در دو سطح ابتدایی و پیش‌رفته تدریس می‌شوند. کتاب حاضر، مقدمه‌ای بر رفتار مکانیکی مواد با رهیافت تعادلی مکانیکی-موادی است که همین خصوصیت، آن را برای دانشجویان مهندسی مکانیک و مواد مناسب کرده است. این کتاب دربرگیرنده‌ی اطلاعاتی راجع به فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها و مواد مرکب است که خیلی پیش‌تر از حد نیاز یک نیم‌سال تحصیلی است. بنابراین، مدرس کلاس می‌تواند مناسب‌ترین مسیر متناسب با سطح کلاس (دانشجوی کارشناسی سال سوم یا چهارم) و پیش‌زمینه‌ی رشته (مهندسی مکانیک یا مواد) را انتخاب کند. این کتاب دارای ۱۵ فصل است که هر کدام تقریباً متناسب با درس یک هفته است. اغلب این گونه است که نظریه‌های مختلفی برای توصیف اثرات خاص توسعه یافته‌اند؛ این کتاب فقط ایده‌های اصلی را ارائه می‌کند. در سطح کارشناسی، جنبه‌های ساده باید مورد تأکید قرار گیرند. در حالی که در دروس کارشناسی ارشد باید نقطه‌نظرات مختلف برای دانشجویان مطرح شوند. بنابراین، اغلب از محدوده‌های فعال و مهم تحقیقاتی صرف‌نظر شده است. فصل ۱ شامل اطلاعات مقدماتی در مورد مواد است که احتمالاً دانشجویانی که قبلاً درسی در زمینه خواص مواد گذرانده‌اند با این مباحث آشنا هستند. خواندن این فصل می‌تواند به افزایش «سرعت یادگیری» دانشجویان ناآشنا با مواد کمک کند. همه‌ی دانشجویان باید بخش مربوط به استحکام نظری یک بلور را مطالعه کنند. فصل ۲ در مورد الاستیسیته و ویسکوالاستیسیته، شامل یک بحث مقدماتی متناسب با نیازهای دانشجویان کارشناسی است. پیش‌تر فلزات و سرامیک‌ها دارای رفتار الاستیک خطی هستند. در حالی که پلیمرها اغلب دارای رفتار الاستیسیته‌ی غیرخطی با یک مولفه‌ی ویسکوز قوی هستند. در فصل ۳، بحث گسترده‌ای راجع به تغییر شکل و سیلان پلاستیک و معیار شکست ارائه می‌شود. اگر چه دانشجویان مهندسی مکانیک باید تا حدودی با این مباحث آشنا باشند (بنابراین می‌توانند از خواندن بخش ۲-۳ صرف‌نظر کنند)، اما دانشجویان مهندسی مواد باید این بخش را مطالعه نمایند. دو آزمایش بسیار معمول مورد استفاده برای مواد شامل آزمایش‌های کشش و فشار تک‌محوری نیز در این فصل بیان می‌شوند. فصل‌های ۴ تا ۹ در رابطه با عیوب، شکست و چقرمگی شکست، برای درک رفتار مکانیکی مواد ضروری

هستند و بنابراین هسته‌ی اصلی درس را تشکیل می‌دهند. عیوب نقطه‌ای، خطی در فصل ۴ و عیوب فصل‌مشرکی و حجمی در فصل ۵ بیان می‌شوند. بحث ارایه‌شده، یک بیان مقدماتی و ابتدایی است. بحث ریاضی راجع به عیوب بسیار پیچیده است و واقعا برای درک رفتار مکانیکی مواد در سطح مهندسی ضرورتی ندارد. در فصل ۶، از مفهوم نایجایی‌ها برای توصیف کارسختی، شامل فهم ما از این پدیده که از سال ۱۹۳۰ مطرح شده و همچنین توسعه‌های تکمیلی مربوط به آن استفاده شده است. فصل‌های ۷ و ۸ به ترتیب در رابطه با شکست از نقطه‌نظر ماکروسکوپی (اصولا مکانیکی) و میکروسکوپی بحث می‌کنند. در مواد ترد، استحکام شکست تحت کشش و فشار تا ۱۰ برابر با هم تفاوت دارند و در مورد این اختلاف بحث می‌شود. تغییر استحکام از یک نمونه به نمونه‌ی دیگر نیز مهم است و بر حسب آمار و ویبول موردتحلیل قرار می‌گیرد. در فصل ۹، روش‌های مختلف آزمایش مقاومت به شکست مواد شرح داده می‌شود. در فصل ۱۰، سه مکانیزم بسیار مهم استحکام‌دهی فلزات شامل محلول جامد، رسوب‌سختی و سختی‌پراکندگی ارایه می‌شوند. استحاله‌ی مارتنزیتی و چقرمه‌شدن (فصل ۱۱) به ترتیب در فلزات و سرامیک‌ها بسیار موثر هستند. اگر چه این اثر به مدت بیش از ۴۰۰۰ سال استفاده شده است، اما فقط در نیمه‌ی دوم قرن بیستم، یک درک علمی واقعی از آن به دست آمد. به عنوان یک نتیجه، کاربردهای جدید بی‌شماری از آلیاژهای حافظه‌دار تا فولادهای مارایجینگ ظاهر شده‌اند که دارای استحکام‌های بالاتر از ۲GPa هستند. ترکیبات بین‌فلزی از جمله مواد جدید با خواص منحصربه‌فرد هستند که برای کاربردهای پیش‌رفته توسعه یافته و اغلب دارای ساختارهای منظم هستند. این مواد در فصل ۱۲ بررسی می‌شوند. فصل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب شامل بحث‌های جزئی‌تر راجع به مکانیزم‌های اساسی عامل خزش و خستگی ارایه شده‌اند. این بحث با ارایه‌ی توصیفی از آزمایش‌های اصلی و روش‌های آنالیز داده برای این دو پدیده تکمیل می‌شود. در فصل آخر کتاب، راجع به مواد مرکب بحث شده است. این مبحث مهم در برخی دانشگاه‌ها، به صورت موضوعی جداگانه تدریس می‌شود. اگر چنین حالتی باشد، این فصل را می‌توان حذف کرد.

این کتاب، نسخه‌ی جدیدی از کتابی با عنوان *ماتلورژی مکانیکی* نوشته‌ی همین نویسندگان است که در سال ۱۹۸۴ توسط انتشارات پرنیتس هال<sup>۱</sup> به چاپ رسید. آن کتاب

<sup>1</sup>Prentice-Hall

به موفقیت قابل‌توجه‌ای در ایالات متحده و کشورهای خارجی دست یافت و به چینی ترجمه شد. برای چاپ حاضر، تغییرات و اضافات عمده‌ای مطابق با گسترش سریع حوزه‌ی مواد در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ صورت گرفته است. امروزه، سرامیک‌ها، پلیمرها، مواد مرکب و ترکیبات بین‌فلزی، مواد ساختاری مهم برای کاربردهای پیش‌رفته هستند و در این کتاب راجع به آن‌ها به صورت مفصل بحث شده است. در انتهای هر فصل، لیستی از متون پیشنهادی ارائه شده است. در صورت نیاز به گسترش یک نکته‌ی خاص یا افزایش دانش نسبت به یک موضوع خاص، خواننده‌ها باید به این متون رجوع کنند. مراجع مورد استفاده برای همه‌ی جدول‌ها و شکل‌ها در متن کتاب ذکر شده است. ممکن است به صورت سهوی ارجاع برخی از منابع در متن نهایی فراموش شده باشد؛ اگر چنین حالتی رخ داده است صادقانه عرض می‌نمایم. همه‌ی فصل‌ها حاوی مسایل حل‌شده و لیستی از تمرین‌ها هستند. این بخش می‌تواند ابزار ارزش‌مندی برای کمک به دانشجویان برای فهم مباحث ارائه‌شده باشد.

دانشجویان ما با طرح سوالات هوشمندانه و انتقادهای ارزشمند، مهم‌ترین مشارکت را در کتاب داشته‌اند که از آن‌ها بسیار تشکر می‌کنیم. در این جا بر خود لازم می‌دانیم مراتب سپاسگزاری خود نسبت به هم‌کاران و محققان دیگر بابت تلاش فراوان و کمک بی‌شایبه، پیشنهاد مفاهیم، انجام آزمایش‌های حساس و گسترش نظریه‌هایی برای فراهم آوردن چارچوب درک کمی رفتار مکانیکی مواد، را اعلام نمایم. به منظور تسهیل خواندن کتاب، تلاش شده است تا استفاده‌ی کم‌تری از مراجع شود. در برخی موارد، آن‌ها درون متن گنجانده شدند. تایپ صبورانه و مناسب متن توسط جنیفر ناتلی<sup>۱</sup>، تهیه‌ی پیش‌نویس توسط جسیکا مک‌کینیس<sup>۲</sup> و ویرایش متن و مساله‌ها توسط اچ. سی. (بریان) چن<sup>۳</sup> و الیزابت کریستوفتز<sup>۴</sup> قابل‌تقدیر است. کریشان چاولا از کمک‌های تحقیقاتی اداره‌ی تحقیقات دریایی آمریکا<sup>۵</sup> طی سالیان متمادی، آزمایشگاه ملی پشته‌ی بلوط<sup>۶</sup>، آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس<sup>۷</sup> و آزمایشگاه‌های ملی ساندا<sup>۷</sup> تشکر و قدردانی می‌نماید. او هم‌چنین مراتب

<sup>۱</sup>Jennifer Natelli

<sup>۲</sup>Jessica McKinnis

<sup>۳</sup>H.C. (Bryan) Chen and Elizabeth Kristofetz

<sup>۴</sup>US Office of Naval Research

<sup>۵</sup>Oak Ridge National Laboratory

<sup>۶</sup>Los Alamos National Laboratory

<sup>۷</sup>Sandia National Laboratories

تشکر و قدردانی خود نسبت به همسرش (نیودیتا<sup>۱</sup>)، پسرش (نیخیلش<sup>۲</sup>) و دخترش (کانیکا<sup>۳</sup>) را به پاس همه‌ی خوبی‌های‌شان ابزار می‌دارد! کمک کانیکا در پردازش کلمات، شایسته‌ی قدردانی است. مارک میرز از پشتیبانی مداوم موسسه‌ی ملی علم<sup>۴</sup> (به ویژه آر. جی. رینیک و بی. مک‌دونالد<sup>۵</sup>)، اداره‌ی تحقیقات نظامی آمریکا<sup>۶</sup> (به ویژه جی. میر، ای. کراوسون، کی. ایر و ای. چن<sup>۷</sup>) و اداره‌ی تحقیقات دریایی تشکر و قدردانی می‌نماید. الهامات صورت گرفته توسط پدر بزرگ (ژان-پیر میرز<sup>۸</sup>) و پدر (هنری میرز<sup>۹</sup>) او قابل تقدیر قابل تقدیر است. آن‌ها هر دو متالورژی‌هایی بودند که زندگی خود را صرف پیشه‌ی خویش کردند. انجمن مکانیک و مواد دانشگاه کالیفرنیا در سان‌دیگو<sup>۱۰</sup> سخاوت‌مندانه از نوشتن کتاب طی سال‌های ۱۹۹۲-۹۶ حمایت کرد. از کمک‌های مدیر انجمن، پرفسور آر. اسکالاک<sup>۱۱</sup>، تشکر و قدردانی می‌شود. انجمن مکانیک و مواد توسط موسسه‌ی علمی ملی حمایت می‌شود. نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود نسبت به پرفسور بی. ایلشنر<sup>۱۲</sup> در فدرال پلی تکنیک اکول در لوران سویس<sup>۱۳</sup> برای مهمان‌نوازی حین آخرین مرحله‌ی آماده‌سازی کتاب اعلام می‌دارند.

مارک آندره میرز، لاجولا، کالیفرنیا<sup>۱۴</sup>

کریشان کومار چاولا، بیرمنگهام، آلاباما<sup>۱۵</sup>

<sup>1</sup>Nivedita

<sup>2</sup>Nikhilesh

<sup>3</sup>Kanika

<sup>4</sup>National Science Foundation

<sup>5</sup>R.J. Reynik and B. MacDonald

<sup>6</sup>US Army Research Office

<sup>7</sup>G. Mayer, A. Crowson, K. Iyer and E. Chen

<sup>8</sup>Jean-Pierre Meyers

<sup>9</sup>Henri Meyers

<sup>10</sup>Institute for Mechanics and Materials of the University of California at San Diego

<sup>11</sup>Professor R. Skalak

<sup>12</sup>Professor B. Ilshner

<sup>13</sup>École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

<sup>14</sup>La Jolla, California

<sup>15</sup>Birmingham, Alabama

## پیش‌گفتار چاپ دوم

در چاپ دوم کتاب رفتار مکانیکی مواد، هر فصل، مطابق با تغییرات به‌وجودآمده در این حوزه، بازبینی و به‌روزرسانی شده است. با توجه به افزایش اهمیت مهندسی زیستی، تاکید خاصی بر رفتار مکانیکی مواد بیولوژیکی و بیومواد در چاپ دوم صورت گرفته است. یک فصل جدید راجع به اثرات محیطی بر خواص مکانیکی نیز اضافه شده است. پروفیسورها فلین و وورهیژ<sup>۱</sup> تلاش زیادی برای وارد کردن مواد بیولوژیکی به مباحث مهندسی و علم مواد به خرج داده‌اند. این روند در بسیاری از دانشگاه‌های آمریکایی و اروپایی در حال پیش‌روی است. در چاپ دوم، از این روند مهم پیروی شده است. ما در مقابل اضافه کردن فصلی جداگانه راجع به مواد بیولوژیکی و بیومواد مقاومت کردیم. به جای آن، راجع به این مواد در کنار مواد متداول یعنی فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و غیره بحث شده است. به علاوه، با توجه به اهمیت مواد الکترونیکی، بر جنبه‌های خاص این مواد از نظر رفتار مکانیکی تاکید شده است.

قالب بحث در چاپ دوم مشابه چاپ اول است. متن کتاب، مکانیزم‌های اصلی عامل بروز گسترده‌ی وسیعی از خواص مکانیکی مواد مختلف تحت شرایط محیطی متفاوت را بیان می‌کند. این کتاب در نوع خود منحصر به فرد است، زیرا به شیوه‌ای یک‌پارچه، اصول مهم مربوط به رفتار مکانیکی مواد مختلف شامل فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها، مواد مرکب، مواد الکترونیکی و بیومواد را بیان می‌کند. رویه‌ی یک‌پارچه‌ی این کتاب مبتنی بر اصل کنترل رفتار مکانیکی یک ماده توسط نانو/ریزساختار آن است. تعداد زیادی تصاویر میکروسکوپی و نمودارهای خطی برای روشن کردن این مفاهیم استفاده شده است. مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های آخر فصل نیز در تمام متن استفاده شده است.

متن کتاب برای استفاده در دوره‌های مهندسی مکانیک و مهندسی و علم مواد در سطوح کارشناسی و تحصیلات تکمیلی طراحی شده است. این کتاب هم‌چنین مرجع مفیدی برای مهندسانی است که کارشان در ارتباط با رفتار مکانیکی مواد است. کتاب با فرض داشتن دانش گسترده‌ی اولیه‌ی راجع به مواد نوشته نشده است و به لحاظ ریاضی ساده است. در واقع، فصل ۱ پیش‌زمینه‌ی لازم را فراهم می‌کند. از آن جا که این فصل دارای مفاهیم عمومی است، مطالعه‌ی آن پیش از مطالعه‌ی بقیه‌ی فصل‌ها پیشنهاد می‌شود.

<sup>1</sup>M.E. Fine and P. Voorhees, "On the evolving curriculum in materials science & engineering", Deadline, Spring 2005, 134.

علاوه بر تغییرات عمده‌ی ذکرشده در بالا، رفتار مکانیکی مواد متخلخل و الکترونیکی نیز به کتاب اضافه شده است. بیش‌تر تغییرات در بخش‌های زیر اعمال شده است: الاستیسیته؛ بحث دایره‌ی موهر؛ ثوابت الاستیک مواد مرکب تقویت‌شده با رشته؛ خواص الاستیک مواد بیولوژیکی و بیومواد؛ معیارهای شکست مواد مرکب؛ روش نانوفروندگی و استفاده‌ی آن در استخراج خواص مواد و غیره. مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های آخر فصل جدیدی به کتاب اضافه شده است. تصاویر میکروسکوپی و نمودارهای جدیدی نیز برای تفهیم بهتر مفاهیم به کتاب افزوده شده است.

در این جا لازم می‌دانیم از تمام اساتیدی که چاپ اول کتاب را در کلاس‌های درس خود مورد استفاده قرار دادند و ما را از نظرات مفید خود بهره‌مند کردند، تشکر کنیم. هم‌چنین از نظرات دانشجویان نیز ممنون هستیم. MAM تشکر خود از کانیکا چاولا و جنیفر کو<sup>۱</sup> برای کمک در زمینه‌ی بیومواد را اعلام می‌دارد. کمک‌های مارک اچ. میرز و ام. کریستینا میرز<sup>۲</sup> برای آموزش اصول متمدناتی بیولوژی بسیار ارزش‌مند بوده است. KKC تمایل دارد از کا. بی. کارلایسل، ان. چاولا، ای. گول، ام. کوپمن، آر. کولکارنی و بی. آر. پترسون<sup>۳</sup> برای کمک‌های‌شان تشکر کند. KKC هم‌چنین مراتب قدردانی خود را از مهمان‌نوازی دکتر پی. دی. پورتلا در مؤسسه‌ی فدرال تحقیقات و آزمایش مواد، برلین، آلمان<sup>۴</sup> به دلیل فراهم آوردن جایی برای گذراندن بخشی از فرصت مطالعاتی اعلام می‌دارد. مانند همیشه، او از اعضای خانواده‌ی خود، آنیتا، کانیکا، نیخیل و نیوی<sup>۵</sup> برای صبر و حوصله‌ی فراوان ممنون و سپاسگزار است.

مارک آندره میرز، دانشگاه کالیفرنیا، سان‌دیگو<sup>۱</sup>

کریشان کومار چاولا، دانشگاه آلاباما در بیرمنگهام<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>Kanika Chawla and Jennifer Ko

<sup>۲</sup>Marc H. Meyers and M. Cristina Meyers

<sup>۳</sup>K.B. Carlisle, N. Chawla, A. Goel, M. Koopman, R. Kulkarni, and B.R. Patterson

<sup>۴</sup>Dr. P. D. Portella, Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany

<sup>۵</sup>Anita, Kanika, Nikhil and Nivi

<sup>۶</sup>University of California, San Deigo

<sup>۷</sup>University of Alabama at Birmingham

## یادداشتی برای خواننده

هدف از نوشتن کتاب «رفتار مکانیکی مواد»، تولید کتابی به عنوان مرجع اصلی دانش پایه‌ای در رابطه با این موضوع بوده است. نویسندگان کتاب انتظار دارند که این کتاب بتواند راهنمای مناسبی برای دانشجوی، حتی پس از اتمام تحصیلات دانشگاهی خود باشد. البته اطلاعات بسیار زیادی در این کتاب وجود دارند که می‌توانند موضوعات موردنیاز برای یک دوره‌ی درسی معمول طی یک ترم تحصیلی را پوشش دهند. ما تمایلی به پوزش خواستن برای افزودن اطلاعات بیش‌تر از حد کلاس درس به کتاب نداریم. در حقیقت، ما می‌خواهیم که این کتاب به عنوان یک مرجع مناسب و مفید در رابطه با خواص مکانیکی مواد در اختیار پژوهش‌گران و مهندسين قرار بگیرد.

فصل اول این کتاب به عنوان مقدمه‌ای بر کل مباحث کتاب نوشته شده است که شامل ارتباط بین ساختار، خواص مکانیکی و کاربرد مواد است. این فصل، برخی اصطلاحات و مفاهیم کلیدی موردنیاز در فصل‌های بعد را معرفی می‌کند. ما به خواننده پیشنهاد می‌کنیم که از این فصل به عنوان مرجع در دسترس استفاده کرده و در مواقع لزوم به آن مراجعه کند. به جدت تأکید می‌کنیم که مدرسین دروس از فصل اول کتاب به عنوان یک مرجع برای مطالعه‌ی دانشجویان استفاده کنند. هر چند که هر فصل شامل مثال‌ها و تمرین‌هایی است، اما حتماً ما از پیشنهادهای شما برای افزودن مواد جدید به کتاب استقبال می‌کنیم.

لذت ببرید