
مقدمه‌ای بر مکانیک نوبنیاد

مروری بر تئوری‌های حاکم بر میکرو/نانو ساختارها

سیدان حباری بهروز
دکتر احمد رحمانی
عضو هیأت علمی دانشگاه زنجان



عنوان و نام پدیدآور	: مقدمه‌ای بر مکانیک نوین / مولفان: سامان جباری بهروز - دکتر امید رحمانی
مشخصات ظاهری	: - زنجان: دانشگاه زنجان، ۱۳۹۸.
شابک	: ۲۳۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
وضعیت فهرست نویسی	: 978-622-6933-01-8
یادداشت	: فیا
موضوع	: نانوتکنولوژی
شناسه افزوده	: مکانیک
شناسه افزوده	: جباری بهروز، سامان، ۱۳۷۰ مولف
شناسه افزوده	: رحمانی، امید / ۱۳۵۸ مولف
رده بندی کنگره	: شناسه افزوده: دانشگاه زنجان
رده بندی دیویی	: T۱۷۴/۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۶۲۰/۵
	: ۵۸۱۱۶۵۵



دانشگاه زنجان

مقدمه‌ای بر مکانیک نوین

تألیف: سامان جباری بهروز و دکتر امید رحمانی

ویراستار: دکتر محمد ابراهیم رهنما

نوبت چاپ: اول

سال چاپ: ۱۳۹۸

قیمت: ۸۰۰۰۰ ریال

شمارگان: ۵۰۰ جلد

ناشر: انتشارات دانشگاه زنجان

چاپ: کیامرثی

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: انتشارات پادینا

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۳۳-۰۱-۸

زنجان، کیلومتر ۵ جاده تبریز، دانشگاه زنجان، حوزه معاونت پژوهشی، واحد انتشارات.

فکس: ۰۲۴-۳۲۲۸۳۰۷۷

تلفن: ۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۴۱

فهرست مطالب

۹	پیشگفتار
۱۳	فهرست علائم
۱۹	فصل اول: نانوفناوری و نقش مهندسی مکانیک در توسعه آن
۲۱	۱-۱- مقدمه
۲۲	۲-۱- تاریخچه‌ی علم نانو
۲۵	۳-۱- برخی از تعاریف و اصطلاحات
۲۵	۱-۳-۱- نانو ذره (Nanoparticle)
۲۵	۲-۳-۱- نانو مواد (Nanomaterials)
۲۶	۳-۳-۱- نانو-شیء (Nano-object)
۲۶	۴-۳-۱- نانوفناوری (Nanotechnology)
۲۶	۴-۱- معرفی برخی نانو ساختارها و کاربردهای آنها
۲۷	۱-۴-۱- نانولوله کربنی (Carbon nano tube)
۲۹	۲-۴-۱- سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیکی
۳۵	فصل دوم: مقدمه‌ای بر مکانیک کلاسیک و ملزومات آن
۳۷	۱-۲- بردارها و تانسورها
۴۰	۲-۲- قرارداد جمع اندیسی
۴۴	۳-۲- قوانین حاکم بر انواع ضرب بین تانسورها
۴۴	۲-۳-۱- ضرب دایادیک
۴۵	۲-۳-۲- ضرب داخلی
۴۷	۳-۳-۲- ضرب خارجی
۴۹	۲-۳-۴- ضرب دو نقطه
۵۰	۴-۲- دیورژانس، کرل، گرادیان، لاپلاسین
۵۱	۵-۲- برخی ویژگی‌ها
۵۳	۶-۲- عملیات انقباض
۵۵	۷-۲- تانسور ایزوتروپ
۵۵	۸-۲- سینماتیک اجزا
۵۹	۹-۲- تنش
۶۳	۱۰-۲- معادلات تعادل
۶۵	۱۱-۲- تانسور کروی و انحرافی تنش
۶۷	۱۲-۲- تغییر شکل محیط پیوسته

۶۷.....	۲-۱۲-۱-حرکت صلب
۷۱.....	۲-۱۲-۲-تغییر طول المان خط
۷۹.....	۲-۱۲-۳-چرخش بسیار کوچک
۸۱.....	۲-۱۳-معادلات ساختاری
۸۵.....	فصل سوم: تئوری غیرموضعی
۸۷.....	۳-۱-مقدمه
۸۷.....	۳-۱-۱-رفتار وابسته به اندازه
۹۱.....	۳-۱-۲-نیروهای ناپیوندی بلندبرد و کوتاه‌برد
۹۲.....	۳-۱-۳-سیستم تک ذره‌ای
۹۲.....	۳-۱-۴-سیستم چندجسمی یا بس ذره‌ای
۹۴.....	۳-۱-۵-دال به وجود آمدن تئوری‌های غیرکلاسیک
۹۷.....	۳-۲-فلسفه تئوری غیرموضعی
۹۹.....	۳-۴-معادلات ساختاری در فرم انتگرالی
۱۰۱.....	۳-۵-تبدیل فرم انتگرالی به فرم دیفرانسیلی
۱۰۱.....	۳-۵-۱-تابع دین
۱۰۳.....	۳-۵-۲-تابع گرین در تئوری موضعی
۱۰۳.....	۳-۵-۳-محاسبه کرنل یا تابع گرین برای تئوری غیرموضعی
۱۰۹.....	۳-۶-فرم دیفرانسیلی تئوری غیرموضعی برای مسئله یک بعدی
۱۰۹.....	۳-۷-فرم دیفرانسیلی تئوری غیرموضعی برای مسئله دو بعدی
۱۰۹.....	۳-۸-فرم دیفرانسیلی تئوری غیرموضعی برای مسئله سه بعدی
۱۲۱.....	فصل چهارم: تئوری کوپل تنش
۱۲۳.....	۴-۱-مقدمه
۱۲۵.....	۴-۲-فلسفه تئوری کوپل تنش
۱۲۸.....	۴-۳-تاریخچه تئوری کوپل تنش
۱۲۸.....	۴-۱-۳-الاستیسیته خطی و تأثیر دانشمندان فرانسوی
۱۳۰.....	۴-۲-۳-مدل مولکولی ویت
۱۳۲.....	۴-۳-۳-الاستیسیته گسرات
۱۴۱.....	۴-۳-۴-تئوری کوپل تنش از منظر کوپتر
۱۵۰.....	۴-۳-۵-تئوری کوپل تنش اصلاح‌شده یانگ
۱۵۵.....	۴-۳-۶-تئوری کوپل تنش سازگار (یادمقارن)
۱۶۵.....	۴-۳-۷-تئوری گرادیان کرنش

فصل پنجم: تئوری اثرات سطحی.....	۱۷۹
۱-۵- مقدمه.....	۱۸۱
۱-۱-۵- تفاوت اتم‌های سطحی و حجمی.....	۱۸۱
۱-۲-۵- بروز اثرات سطحی.....	۱۸۴
۲-۵- اصطلاح‌شناسی و مفهوم فیزیکی.....	۱۸۵
۱-۲-۵- انرژی آزاد سطح.....	۱۸۶
۲-۲-۵- انرژی آزاد سطح واسط.....	۱۹۰
۳-۲-۵- تنش سطحی.....	۱۹۱
۳-۲-۵- منشأ فیزیکی.....	۱۹۱
۲-۵-۴- رابطه بین تنش سطحی و انرژی سطح.....	۱۹۴
۵-۵- روابط ساختاری.....	۱۹۷
۲-۵-۱-۵- اویلرین و لاگرانژین در الاستیسیته سطحی.....	۱۹۷
۲-۵-۲-۵- استخراج روابط ساختاری.....	۱۹۹
ضمیمه (الف): تئوری تیر وید برنولی کلاسیک.....	۲۲۵
مراجع.....	۲۳۱

پیشگفتار

تصور کنید با آخرین فضاپیمایی که بشر ساخته، پا به سیاره‌ی دیگری می‌گذاریم که جغرافیا و پدیده‌های طبیعی و مصنوعی آن بسیار شبیه به کره‌ی زمین است. پس از اندکی گذشت متوجه می‌شویم که در این سیاره مردم با یک بطری خاص از جوی خیابان آب نامرئی برمی‌دارند و بلافاصله آن را تصفیه و مصرف می‌کنند. بیماری افراد به سرعت تنه‌ی خاص داده شده و فرایند درمان در اغلب مواقع بسیار سریع و آسان است. غذا و میوه به وفور و با قیمت بسیار پایین یافت می‌شود و معضل آلودگی هوا در این سیاره عملاً حل شده است. بازار شیشه‌های اتومبیل را خیس نمی‌کند. در حقیقت خودروها دیگر ابزاری به نام برف پاک‌کن ندارند. جواهرفروشی‌ها طلاهای خود را به رنگ‌های مختلف سبز، آبی و... عرضه می‌کنند. در هیچ شرایطی لباس‌ها چروک نمی‌شوند و هیچ باکتری‌ای روی آن‌ها نمی‌نشیند. در این سیاره مشاهده می‌کنید که استفاده از شارژر برای تلفن همراه و کامپیوتر شععی در حال منسوخ شدن است. به‌طور کلی مصرف انرژی به شدت کاهش یافته است و زمان بسیار کمتری برای انجام اموری مشخص اختصاص می‌یابد.

چنین سیاره‌ای جایی شبیه به بهشت به نظر می‌رسد. این طور نیست؟ خبر خوب این است که برای مشاهده و تجربه‌ی چنین پدیده‌هایی نیاز نیست به سیاره‌ی دیگری برویم بلکه می‌بایست سیاره‌ی شگفت‌انگیز خودمان را با دقت بیشتری تماشا کنیم تا در آن نقش منحصر به فرد علم نانو را در بنا کردن چنین دنیایی به درستی درک کنیم. حقیقتاً اگر بگوییم که علم نانو در حال خلق دنیایی جدید است که در آن ویژگی‌های

به‌ظاهر تغییرناپذیر و همیشگی مواد، ابزار، غذا و... با رفتاری جدید و غیرقابل‌انتظار ارائه می‌گردند به بیراهه نرفته‌ایم. پدیده‌های اشاره‌شده رخ داده‌هایی علمی هستند که یا اتفاق افتاده‌اند و یا تحقیقات علمی نوید تحقق آن‌ها را برای سال‌های آتی به ما داده‌اند. حال ما برای لمس سریع‌تر چنین آرمان‌شهری و حتی به‌مراتب آرمانی‌تر می‌توانیم سهم خود را به‌عنوان عضوی از جامعه بشری و البته علمی در توسعه زیرساخت و کاربرد این علم ایفا کنیم.

اگر چندی قه‌دی دارید و حوزه‌ی فعالیت شما مهندسی مکانیک است این کتاب می‌تواند به شما کمک کند. در حقیقت کتاب پیش‌رو با نیت بیان مفاهیم عمیق موجود در تئوری‌های حاکم بر میکرو/نانوساختارها نوشته شده است و سعی نموده که با بیان گام‌به‌گام چربی و چگرنگی پیدایش این تئوری‌ها و جزئیات آن‌ها، به درک عمیق و صحیح آن‌ها توسط خوانندگان کمک کند. چنین رویکردی از جانب نویسندگان به این دلیل اتخاذ شده است که ما معتقدیم هرگونه کمک به توسعه و بهبود علم و فناوری تنها و تنها منوط به درک عمیق و درست مفاهیم بنیادین موجود در آن حوزه است. در غیر این صورت، شاهد گسترش نوعی از علم خواهیم بود که گهگاه با کاستن و یا افزودن پدیده‌ای جدید به مقالات پیشین در جامعه علمی ارائه می‌شوند. مشکل چنین مقالاتی این است که غرض ما فهم بنیادین جاری در آن‌ها به‌درستی توسط نویسندگان درک نشده‌اند لذا نتایج ارائه‌شده جایگاه درست خود را در توسعه علم و فناوری نانو نمی‌یابند و یا حتی در برخی مواقع در بهره‌گیری از این تئوری‌ها دچار اشتباهاتی می‌شوند که نه تنها به توسعه علم نانو کمک نمی‌کند بلکه سایر پژوهشگران را نیز به دلیل ارائه مفاهیم اشتباه از مسیر درست دور می‌نمایند.^۱ البته اشتباه از سوی انسان در هر زمینه‌ای و به‌ویژه در مرزهای نامکشوف

علم محتمل و پذیرفته شده است ولی موضوع قابل تأمل قصور ناشی از نیندیشیدن است که همواره مورد ملامت قرار می‌گیرد. در کتاب پیش رو، ابتدا در فصل اول سعی شده است که با بیان مقدمه‌ای از نانوفناوری و تبیین نقش مهندسی مکانیک در توسعه‌ی آن، اهمیت توجه مهندسان این حوزه را به رفتارهای مکانیکی ویژه در نانوساختارها روشن سازیم. در ادامه و در فصل دوم مقدمه‌ای بر مکانیک کلاسیک مورد نیاز در این کتاب با تکیه بر مفاهیم بنیادین ریاضی و مکانیک محیط‌های پیوسته، با ذکر مثال‌های حل‌شده متعدد ارائه شده است. هدف از ارائه چنین فصلی این است که خواننده بتواند با مرور مفاهیم ذکرشده در فصول بعدی گام‌به‌گام پیش برود و درک کاملی از روابط ارائه‌شده در فصول مذکور به دست آورد. فصول بعدی که مقصود اصلی این کتاب است، پیرامون پنج به چند سؤال اساسی نوشته شده‌اند. به‌طور مثال، چرا در تئوری غیرموضعی مواد بیان می‌شود که تنش در هر نقطه، وابسته به کرنش در تمامی نقاط ماده است؟ چنین نگرانی از کجا نشئت می‌گیرد و چرا توجه به آن ضرورت دارد؟ چرا در تئوری کرپل-نیل از چرخش صلب به‌عنوان اندازه‌گیر محیط پیوسته یاد می‌شود؟ چرا در تمامی مقالات در نظر گرفتن تئوری کوپل‌تنش موجب سفتی ماده می‌شود؟ نسخه‌های مختلف این تئوری دارای چه مزایا و معایبی هستند و فلسفه حضور هر یک چیست؟ دلیل توجه به سطح چه می‌تواند باشد؟ تنش سطحی با انرژی سطحی چه تفاوتی دارد و چرا تنش در سطح را نادیده گرفتن و به‌صورت ویژه در برخی از مواد مورد توجه قرار می‌دهیم؟ تفکر و پاسخ پیرامون این سؤال‌ها و برخی سؤالات دیگر چارچوب اصلی فصول آتی را شکل می‌دهند. بنابراین فصل سوم، چهارم و پنجم به ترتیب به تئوری‌های غیرموضعی، کوپل‌تنش و اثرات سطحی پرداخته‌اند. در این فصل‌ها سعی شده که مفاهیم و روابط حاکم، گام‌به‌گام و با استدلال کافی پیش بروند به‌طوری‌که خواننده بتواند به‌راحتی مفاهیم را دنبال و روابط را درک و استخراج کند. در پایان هر سه فصل مذکور، مثالی مفصل از یکی از

مقالات چاپ‌شده در مجلات معتبر آورده شده است و تلاش شده که با استخراج مرحله‌به‌مرحله روابط حاکم بر این تئوری‌ها در قالب خمش، کمانش و یا ارتعاش تیر اوپلر-برنولی، جزئیات و تأثیرات تئوری‌های نوبنیاد بر رفتار مکانیکی این سازه ارائه شود.

در نهایت گفتنی است از آنجاکه هیچ‌یک از ادراکات بشر بی‌نقص و عاری از قصور و اشتباه نیست از خوانندگان محترم انتظار داریم که هرگونه ایراد و ابهام موجود در این کتاب را از طریق پست الکترونیکی^۱ ذکر شده در پایین همین صفحه، به نویسندگان اطلاع دهند تا اصلاح و بهبود بخشیدن به آنچه اکنون ارائه شده است در مسیر اعتلای هرچه بیشتر دانش قدم برداریم.

با احترام

فهرست علائم

A	بردار دلخواه
A	تانسور دلخواه
A^T	ترانزاده ماتریس A
A_R	بردار یکه المان خط در مختصات مرجع
A_0	سطح ماده قبل از کشش الاستیک
A_1	سطح ماده بعد از کشش الاستیک
a	بردار دلخواه
a_i	بردار یکه المان خط در مختصات تغییر شکل یافته
a	ضریب ثابت طول مشخصه داخلی
a_{ij}	مؤلفه‌های ماتریس دلخواه (با هر اندیسی)
a_x, a_y, a_z	سه مؤلفه‌ی شتاب
B	بردار دلخواه
B	تانسور دلخواه، تانسور کوشی-گرین چم
b	بردار دلخواه
b_k	مؤلفه‌های بردار دلخواه (با هر اندیسی)
C	تانسور دلخواه، تانسور کوشی-گرین راست
C_{ijkl}	تانسور ضرایب الاستیسیته
C_{ijkl}^s	تانسور ضرایب الاستیسیته سطحی
C_{ij}	ثوابت الاستیک
c	بردار دلخواه، بردار کوپل بدنی
c_1, c_2, c_3, c_4	ثوابت معادله
$c_i(t)$	انتقال صلب
D	تانسور دلخواه، سفتی خمشی
dl / dL	نسبت طول نهایی المان خط به طول اولیه
E	مدول یانگ
E_{ij}	تانسور کرنش
E_b	انرژی کاهش یافته از طریق پیوند
$e_x, e_y, e_z, e_{xz}, e_{yz}, e_{xy}$	مؤلفه‌های تانسور کرنش
e_i	مؤلفه‌های بردار یکه در دستگاه مختصات (با هر اندیسی)

$e_0 a$	پارامتر غیر موضعی
e_{ijk}	نماد جایگشت
F	نیرو، تانسور مرتبه دوم گرادیان تغییر شکل
$F(x)$	نیروی بدنی بر واحد حجم
F_R	نیرو
F_e	نیروی برهمکنش
$\mathbf{f}$	بردار نیروی بدنی
f_{na}	تنش سطحی پاد صفحه‌ای
f_{ij}	تانسور تنش سطحی درون صفحه‌ای
$\bar{f}(\xi)$	تبدیل فریه مختلط
$f(x)$	تابع نیرو یا جمله ناهمگن، معکوس تبدیل فوریه مختلط
f	بار محوری
f_i	مجموع نیروها، نیروی بدن
G	تابع گرین
H_0	تابع هنکل
I	ماتریس همانی، ممان اینرسی دوم سطح
I_p	ممان اینرسی سطحی
K	انرژی جنبشی
k_e	ثابت کولمب
$k(x-x')$	تابع کرنل
k^2	عدد ثابت
K_0	تابع بسل
L	عملگر دیفرانسیلی، طول تیر
L_i	کوپل
l	طول مشخصه خارجی، پارامتر مقیاس طول ماده
$\mathbf{l}$	بردار کوپل بدنی
M	ممان، متجه ممان
M_s	منتجه تنش سطحی
M_b	منتجه تنش
M_x	ممان خمشی روی لبه‌ی ورق
M_{xy}	ممان پیچشی روی لبه ورق

$m^{(n)}$	بردار ترکشن کوپل
$m^{(nm)}$	مؤلفه‌ی عمودی تانسور کوپل تنش
m_i	تعداد پیوندهای گسسته شده
m_0, m_2	ممان اینرسی جرمی
m	مراتب تانسور
N_{atoms}	تعداد اتم‌ها
$\bar{N}, \bar{N}_{nd}$	نیروی کمانش، نیروی کمانش بی‌بعد
N	منتجه‌ی نیرو
n	شمارنده سری، رتبه تانسور
n	بردار یکه
NP, NP_0	پاره خط درفضا
n_i	مؤلفه بردار یکه عمود بر سطح
O	مبدأ مختصات
OQ	محور دوران
P	تانسور دلخواه، نقطه‌ی دلخواه در فضا در پیکره‌بندی تغییر شکل یافته
P_0	نقطه‌ی دلخواه در فضا در پیکره‌بندی مرجع
Q	میانگین مؤلفه‌های روی قطر اصلی تانسور، تانسور انتقال، ماتریس انتقال
Q_x	نیروی برشی در لبه‌ی ورق
Q_n	ضریب تابع بارگذاری
q	بارگذاری عمودی، بزرگی بار الکتریکی
q_i	مختصه
R	ناحیه ثابت‌شده در فضا در زمان $t = t_0$
R_0	ناحیه ثابت‌شده در فضا در زمان $t = 0$
r	فاصله‌ی بین ذرات
r', r	مؤلفه‌ی سیستم مختصاتی در نقطه مرجع و سایر نقاط
S	سطح
s_{ij}	مؤلفه‌های تانسور دلخواه (با هر اندیسی)
T	تانسور تنش
$T(t)$	تابع زمانی
$T^n(x, n), T$	بردار ترکشن