به نام خداوند جان و خرد

انتشارات
۸۱۰

مقدّمه‌ای بر بیوفیزیک محیطی

گیلون س. کمپل و جان ام. نورمن

ترجمه:
دکتر محمد موسوی بایگی
استاد دانشگاه فردوسی مشهد
فائزه نیک‌ذات
حوریه تشکری صباغ

سرشناسه:	کمبل، گیلون اس.	Campbell, Gaylon S
عنوان و نام پدیدآور:	مقدمه‌ای بر بیوفیزیک محیطی/گیلون س. کمپل، جان ام. نورمن؛ ترجمه محمد موسوی بایگی، فائزه نیک‌ذات، حوریه تشکری صباغ؛ ویراستار علمی پرویز رضوانی‌مقدم؛ ویراستار ادبی هانیه اسدپور فعال مشهد.	
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۱.	
مشخصات ظاهری:	۳۲۸ ص.: مصوّر، جدول، نمودار.	
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۸۱۰.	
شابک:		ISBN: 978-964-386-503-0
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.	
یادداشت:	عنوان اصلی:	An introduction to environmental biophysics,2nd ed.,1998.
یادداشت:	کتابنامه. نمایه.	
موضوع:	فیزیک زیستی	Biophysics
	سازگاری (فیزیولوژی)	Adaptation (Physiology)
	بوم‌شناسی	Ecology
شناسه افزوده:	نورمن، جان ام.	Norman, John M.
شناسه افزوده:	موسوی بایگی، محمد، ۱۳۳۹ - ، مترجم	
شناسه افزوده:	نیک‌ذات، فائزه، ۱۳۶۵-، مترجم	
شناسه افزوده:	تشکری صباغ، حوریه، ۱۳۷۴-، مترجم	
شناسه افزوده:	رضوانی مقدم، پرویز، ۱۳۳۹ - ، ویراستار	
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.	
رده‌بندی کنگره:	QH۵۰۵	
رده‌بندی دیویی:	۵۷۴/۱۹۱	
شمارهٔ کتابشناسی ملّی:	۸۷۴۷۳۴۲	

مقدّمه‌ای بر بیوفیزیک محیطی

پدیدآورندگان: گیلون س. کمپل و جان ام. نورمن
ترجمه: دکتر محمد موسوی بایگی؛ فائزه نیک‌ذات؛ حوریه تشکری صباغ
ویراستار علمی: دکتر پرویز رضوانی‌مقدم
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، پاییز ۱۴۰۴ (اوّل، ۱۴۰۱)
چاپ و صحافی: همیار
بها : ۳/۸۰۰/۰۰۰ ریال

حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

انتشارات
۸۱۰

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)

مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)

مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار مترجم..... ۹
پیشگفتار چاپ دوم..... ۱۰

فصل ۱. کلّیات..... ۱۳
۱–۱ خُردمحیط‌ها..... ۱۵
۱–۲ تبادل انرژی..... ۱۶
۱–۳ انتقال تکانه و جرم..... ۱۷
۱–۴ پایستگی جرم و انرژی..... ۱۷
۱–۵ پیوستگی در زیست‌کره..... ۱۸
۱–۶ مدل‌ها، ناهمگنی و مقیاس..... ۱۹
۱–۷ کاربردها..... ۲۱
۱–۸ واحدها..... ۲۲
مسائل..... ۲۶
منابع..... ۲۶

فصل ۲. دما..... ۲۷
۲–۱ رفتار معمول دمای هوا و خاک..... ۲۷
۲–۲ تغییرات تصادفی دما..... ۳۰
۲–۳ مدل‌سازی تغییرات قائم دمای هوا..... ۳۲
۲–۴ مدل‌سازی تغییرات زمانی دمای هوا..... ۳۵
۲–۵ تغییرات دمای خاک با عمق و زمان..... ۳۶
۲–۶ دما و نمو زیستی..... ۳۸
۲–۷ زمان حرارتی..... ۴۱
۲–۸ محاسبهٔ زمان حرارتی با استفاده از داده‌های وضع هوا..... ۴۳
۲–۹ دماهای حدّی و محاسبهٔ زمان حرارتی..... ۴۵
۲–۱۰ نرمال کردن زمان حرارتی..... ۴۵

۲-۱۱ زمان حرارتی در ارتباط با سایر متغیرهای محیطی..... ۴۶
مسائل..... ۴۸
منابع..... ۴۹

فصل ۳. بخار آب و سایر گازها..... ۵۱
۳-۱ تعیین غلظت یک گاز..... ۵۲
۳-۲ بخار آب؛ شرایط اشباع..... ۵۴
۳-۳ شرایط اشباع جزئی..... ۵۷
۳-۴ تغییرات زمانی و مکانی بخار آب جو..... ۶۲
۳-۵ برآورد غلظت بخار در هوا..... ۶۴
مسائل..... ۶۵
منابع..... ۶۶

فصل ۴. آب مایع در بدن موجودات زنده و محیط اطراف آن‌ها..... ۶۷
۴-۱ پتانسیل آب و محتوای آب..... ۶۷
۴-۲ پتانسیل آب در موجودات زنده و محیط اطراف آن‌ها..... ۷۳
۴-۳ رابطهٔ آب در دو حالت مایع و گاز..... ۷۴
مسائل..... ۷۶
منابع..... ۷۷

فصل ۵. باد..... ۷۹
۵-۱ مشخصات تلاطم جوّی..... ۸۰
۵-۲ باد به‌عنوان یک بردار..... ۸۲
۵-۳ مدل‌سازی تغییرات سرعت باد..... ۸۳
۵-۴ تعیین سطح جابه‌جایی صفر و طول زبری..... ۸۵
۵-۵ باد درون کانوپی گیاه..... ۸۸
مسائل..... ۹۱
منابع..... ۹۲

فصل ۶. انتقال گرما و جرم..... ۹۳
۶-۱ شارهای مولی..... ۹۴
۶-۲ تجمیع معادلات انتقال..... ۹۵

۶-۳ مقاومت و هدایت..... ۹۶
۶-۴ مقاومت‌ها و رساناهای سری..... ۹۶
۶-۵ مقاومت‌های موازی..... ۹۸
۶-۶ محاسبهٔ شارها..... ۹۸
مسائل..... ۱۰۲

فصل ۷. هدایت در انتقال گرما و جرم..... ۱۰۳
۷-۱ هدایت در پخش مولکولی..... ۱۰۳
۷-۲ پخشیدگی مولکولی..... ۱۰۵
۷-۳ هدایت پخشی لایهٔ خارجی بدن موجود زنده..... ۱۰۶
۷-۴ انتقال تلاطمی..... ۱۱۰
۷-۵ موجگاه و شناوری..... ۱۱۳
۷-۶ هدایت لایهٔ سطحی جو..... ۱۱۵
۷-۷ هدایت گرما و انتقال جرم در فرارفت واداشتهٔ لایه‌ای..... ۱۱۷
۷-۸ استوانه، کره و شکل حیوانات..... ۱۱۹
۷-۹ هدایت در فرارفت آزاد..... ۱۲۱
۷-۱۰ ترکیب فرارفت واداشته و آزاد..... ۱۲۳
۷-۱۱ نسبت هدایت‌ها..... ۱۲۳
۷-۱۲ تعیین شاخص بُعد یک جسم..... ۱۲۴
۷-۱۳ جریان آزاد تلاطم..... ۱۲۶
مسائل..... ۱۲۸
منابع..... ۱۲۸

فصل ۸. جریان گرما در خاک..... ۱۳۱
۸-۱ جریان گرما و ذخیرهٔ آن در خاک..... ۱۳۱
۸-۲ خواص گرمایی خاک؛ ظرفیت گرمایی حجمی..... ۱۳۶
۸-۳ خواص گرمایی خاک؛ هدایت گرمایی..... ۱۳۷
۸-۴ پخشیدگی و پذیرش گرمایی خاک..... ۱۴۲
۸-۵ انتقال گرما از حیوانات به بستر آن‌ها..... ۱۴۴
مسائل..... ۱۴۷
منابع..... ۱۴۸

فصل ۹. جریان آب در خاک ۱۴۹
۹-۱ هدایت هیدرولیکی ۱۵۰
۹-۲ نفوذ آب به درون خاک ۱۵۰
۹-۳ توزیع مجدّد آب در خاک ۱۵۴
۹-۴ تبخیر از سطح خاک ۱۵۶
۹-۵ تعرّق و آب مصرفی گیاه ۱۶۰
۹-۶ موازنهٔ آب ۱۶۵
مسائل ۱۶۵
منابع ۱۶۶

فصل ۱۰. مبانی تابش ۱۶۷
۱۰-۱ طیف الکترومغناطیس ۱۶۸
۱۰-۲ تابش جسم سیاه ۱۶۹
۱۰-۳ تعاریف ۱۷۰
۱۰-۴ قانون کسینوس لامبرت ۱۷۷
۱۰-۵ تضعیف تابش ۱۷۸
۱۰-۶ توزیع طیفی تابش جسم سیاه ۱۸۰
۱۰-۷ توزیع طیفی تابش گرمایی و خورشیدی ۱۸۱
۱۰-۸ گسیلندگی تابشی ۱۸۳
مسائل ۱۸۶
منابع ۱۸۷

فصل ۱۱. شارهای تابشی در محیط‌های طبیعی ۱۸۹
۱۱-۱ زاویهٔ خورشیدی و طول روز ۱۹۰
۱۱-۲ تخمین تابیدگی طول‌موج کوتاه ناشی از تابش مستقیم و پخش‌شده ۱۹۵
۱۱-۳ تابش خورشیدی در زیر ابرها ۱۹۸
۱۱-۴ موازنهٔ تابش ۲۰۰
۱۱-۵ ضرایب جذب تابش‌های حرارتی و خورشیدی ۲۰۱
۱۱-۶ ضرایب دید ۲۰۳
مسائل ۲۰۹
منابع ۲۰۹

فصل ۱۲. حیوانات و محیط پیرامون آن‌ها ۲۱۱
۱۲–۱ مفهوم بودجهٔ انرژی ۲۱۱
۱۲–۲ سوخت‌وساز ۲۱۵
۱۲–۳ تبادل گرمای نهان ۲۱۷
۱۲–۴ هدایت گرما در پوشش سطحی و بافت بدن حیوان ۲۲۱
۱۲–۵ تحلیل کیفی واکنش گرمایی حیوان ۲۲۵
۱۲–۶ دمای مؤثر ۲۲۶
۱۲–۷ کاربردهای معادلهٔ بودجهٔ انرژی ۲۲۸
۱۲–۸ حالت گذار ۲۳۰
۱۲–۹ پیچیدگی‌های انرژی درحیوانات ۲۳۱
۱۲–۱۰ حیوانات و آب ۲۳۲
مسائل ۲۳۵
منابع ۲۳۵

فصل ۱۳. انسان و محیط پیرامون آن ۲۳۷
۱۳–۱ سطح بدن، میزان سوخت‌وساز و تبخیر ۲۳۷
۱۳–۲ بقا در محیط‌های سرد ۲۴۰
۱۳–۳ خنکای باد و دمای مؤثر استاندارد ۲۴۲
۱۳–۴ بقا در محیط‌های گرم ۲۴۵
۱۳–۵ دمای مؤثر مرطوب ۲۴۸
۱۳–۶ آسایش ۲۵۰
مسائل ۲۵۱
منابع ۲۵۲

فصل ۱۴. گیاهان و جوامع گیاهی ۲۵۳
۱۴–۱ دمای برگ ۲۵۴
۱۴–۲ دمای آیرودینامیکی کانوپی‌های گیاهی ۲۶۰
۱۴–۳ دمای رادیومتری کانوپی‌های گیاهی ۲۶۱
۱۴–۴ تعرّق و بودجهٔ انرژی برگ ۲۶۳
۱۴–۵ تعرّق کانوپی ۲۶۵
۱۴–۶ فتوسنتز ۲۶۶
۱۴–۷ مدل‌های سادهٔ جذب ۲۶۷

۱۴–۸ مدل‌های بیوشیمیایی برای جذب..... ۲۷۱
۱۴–۹ کنترل هدایت روزنه‌ای..... ۲۷۴
۱۴–۱۰ شکل بهینهٔ برگ..... ۲۷۶
مسائل..... ۲۷۸
منابع..... ۲۷۹

فصل ۱۵. محیط نوری کانوپی گیاهی..... ۲۸۱
۱۵–۱ شاخص سطح برگ و عبور نور از درون کانوپی..... ۲۸۲
۱۵–۲ مدل‌های تفصیلی گیرایی نور توسط کانوپی..... ۲۸۴
۱۵–۳ عبور تابش پخش‌شده..... ۲۸۹
۱۵–۴ پراکنش نور در کانوپی‌ها..... ۲۹۰
۱۵–۵ بازتابش نور توسط کانوپی‌های گیاهی..... ۲۹۰
۱۵–۶ عبور تابش از کانوپی‌های غیرمتراکم؛ اثر بازتابش خاک..... ۲۹۳
۱۵–۷ تجمیع روزانه..... ۲۹۳
۱۵–۸ محاسبهٔ چگالی شار تابش فرودی روی برگ‌های یک کانوپی..... ۲۹۴
۱۵–۹ محاسبهٔ جذب کانوپی با توجه به جذب برگ‌ها..... ۲۹۵
۱۵–۱۰ سنجش‌ازدور و بررسی پوشش کانوپی و IPAR..... ۳۰۰
۱۵–۱۱ سنجش‌ازدور و دمای کانوپی..... ۳۰۹
۱۵–۱۲ بازتابش (انتشار) کانوپی در مقابل بازتابش (انتشار) برگ..... ۳۱۰
۱۵–۱۳ کانوپی‌های ناهمگن..... ۳۱۱
۱۵–۱۴ سنجش غیرمستقیم معماری کانوپی..... ۳۱۳
مسائل..... ۳۱۴
منابع..... ۳۱۵

فهرست نمادها..... ۳۱۷
پیوست..... ۳۲۳
نمایه..... ۳۲۶

پیشگفتار مترجم

بیوفیزیک محیطی ازجمله دروسی است که به‌طور مشخص با همین نام در سرفصل بعضی از رشته‌های دانشگاهی گنجانده شده است. در این درس رابطهٔ بین جرم و انرژی و تبادل آن‌ها بین محیط و موجودات زنده اعم از حیوانات و گیاهان بررسی می‌شود. این مفاهیم نقش مهمی در زندگی و بقای موجودات زنده ایفا می‌کنند. باوجودِ اهمیت این موضوع، متأسفانه منبع علمی مدوّنی به زبان فارسی موجود نبود و آنچه در کلاس‌های مقاطع مختلف توسط استادان ارائه می‌شد، معمولاً مبتنی‌بر مطالعات شخصی استادان بوده و دانشجویان دانشگاه‌ها کتاب مشخصی را به‌عنوان منبع رسمی در اختیار نداشتند. ازطرفی در منابع خارجی هم از تنوّع منابع در این زمینه برخوردار نیستیم. دراین‌میان کتاب *مقدّمه‌ای بر بیوفیزیک محیطی* نوشتهٔ کمپل و نورمن که توسط انتشارات اسپرینگر چاپ شده است، نظر ما را به خود جلب کرد. این کتاب مشتمل‌بر پانزده فصل است و خُردمحیط زندگی موجودات زنده را از منظرهای متفاوتی بررسی و تحلیل کرده است. خوشبختانه چینش فصل‌ها به‌گونه‌ای است که خواننده ابتدا با خُردمحیط زندگی موجودات زنده آشنا می‌شود و سپس نقش گرما، فشار و باد را در این محیط‌ها درک و سرانجام برهم‌کنش بین هریک از این مفاهیم را با خُردمحیط زندگی موجودات زنده بررسی می‌کند. در فصول انتهایی کتاب نیز با نقش سنجش‌ازدور در شناخت بهتر این مفاهیم آشنا می‌شویم. با توجه به این خصوصیات، بر آن شدیم تا نسبت به ترجمهٔ این کتاب اقدام کنیم. در ترجمهٔ کتاب سعی شده است که به‌طور کامل امانت‌داری رعایت شود. تنها در یک مورد هنگام ترجمه متوجه شدیم که نویسندگان کتاب دچار اشتباه شده‌اند که موضوع ازطریق ارسال پیام برای دکتر نورمن توضیح داده شد و ایشان در کمال بزرگواری ضمن تشکر از مترجمان اشتباه رخ‌داده را پذیرفتند و اظهار کردند که در چاپ بعدی کتاب، این مورد را با ذکر نام مترجمان اصلاح خواهند کرد. با توجه به اینکه این درس یک موضوع بین‌رشته‌ای به‌حساب می‌آید و مفاهیم متفاوتی از علوم مختلف ازجمله فیزیک، خاک‌شناسی، علوم زراعی، باغبانی، جانورشناسی و سنجش‌ازدور را شامل می‌شود و قطعاً مترجمان در همهٔ این موضوعات تخصّص کافی را ندارند، تمامی تلاش خود را به‌کار گرفته و ازطریق مشورت با صاحب‌نظران و کارشناسان از نظریات ایشان بهره‌مند شدیم تا ترجمهٔ کتاب تاحدّامکان بدون نقص، تقدیم خوانندگان شود. بااین‌حال، اعتراف می‌کنیم که این امر ممکن نیست و نکات ظریفی بوده که از چشم ما دور مانده است. بنابراین از همهٔ استادان، دانشجویان و خوانندگان عزیز تقاضا داریم ازسر مهربانی نقاط ضعف را بر ما ببخشایند و اجازه دهند تا از نظریات ارزشمندشان بهره‌مند شویم. در پایان خدای بزرگ را سپاس می‌گوییم که به ما توفیق این خدمت مختصر را عنایت فرمود.

محمد موسوی بایگی
فائزه نیک‌ذات؛ حوریه تشکری صباغ
بهار ۱۴۰۰

پیشگفتار چاپ دوم

هـدف مـا در چاپ اوّل کتاب *مقدّمه‌ای بر بیوفیزیک محیطی* این بود که خُردمحیط فیزیکی زندگی موجود زنده را تبیین کنیم، مدل‌های سادهٔ انتقال گرما و جرم را تعریف و آن‌ها را در فرایند تبادل گرما و جرم بین موجودات زنده و محیط پیرامونشان به‌کار بگیریم. این اهداف در چاپ جدید نیز مدنظر ما هستند. نسخهٔ اوّلیهٔ کتاب به‌عنوان یک منبع درسی در دانشگاه‌های واشنگتن و ویسکانسین تدریس شده است. در چاپ جدید سعی شده است نکات علمی جدید و تجربیات حاصـل از تدریس این مباحث طی بیست سال گذشته به‌شکل مناسبی گنجانده شود. دراین‌راستا پیشـنهادهای همکاران و دانشـجویان گردآوری و تمامی مطالب بازبینی شـده اسـت تا منعکس‌کنندهٔ تغییرات و گرایشات در این دانش باشد.

افرادی که با چاپ اوّل کتاب آشـنایی دارند، متوجه خواهند شـد که ترتیب بیان مطالب تاحدودی تغییر کرده اسـت. در چاپ جدید با توصـیف فیزیکی محیط موجودات زنده (دما، رطوبت، باد) شروع می‌کنیم و سپس فیزیک انتقال جرم و گرما بین موجود زنده و محیط پیرامونش را درنظر می‌گیریم. در ادامه، انتقال تابشی که برخلاف چاپ اوّل تنها در یک فصـل موردبحث قرار گرفت، در قالب دو فصـل بحث و بررسی می‌شود. ازآنجاکه با گذشت زمان سنجش‌ازدور نقش بسیار مهمی در بیوفیزیک محیطی پیدا کرده ما نیز در این چاپ درباب این موضوع، مطالبی را گردآوری کرده‌ایم. مانند چاپ اوّل، فصل پایانی کاربردهایی از اصول توصیف‌شده در سیستم‌های حیوانی و گیاهی است.

تعداد بسیار زیادی از دانشجویانی که این واحد درسی را می‌گذرانند، در رشتهٔ زیست‌شناسی تحصیل می‌کنند و بنابراین نسـبت به دانشجویان فیزیک و مهندسی مهارت‌های ریاضی کمتری دارند. به‌این‌منظور در هر فصل ابتدا مـبـحـث مـوردنـظـر را بـه‌صـــورت تـوصـــیـفی تشـــریح و در ادامـه مبـاحـث محـاســبـاتی را مطرح می‌کنیم تا نیاز این دسـته از دانشـجویان برطرف شـود. ازآنجاکه انتظار داریم دانشـجویان برای حل مسائل تبادل جرم و انرژی مهارت‌های محاسـباتی خود را تقویت کنند، تعداد زیادی مسـئلهٔ نمونه به هر فصـل اضـافه شـده و همچنین برای افزایش مهارت بیشتر دانشجویان، در انتهای هر فصل تمرین‌های اضافی گنجانده شده است.

بر خلاف چاپ اوّل، در چاپ جدید به‌صورت قراردادی از واحدهای مولی برای غلظت جرمی، هدایت و شارش اسـتفاده شده است. برای استفاده از این واحدها چند دلیل داریم: ازآنجاکه واحدهای مولی بنیادی هستند، معادلات با اسـتفاده از این واحدها ضـرایب کمتری دارند و ساده‌تر می‌شوند. همچنین پذیرش روزافزون واحدهای مولی در رشـته‌های علوم زیسـتی به‌دلایل علمیِ قوی افزایش یافته اسـت (به‌عنوان مثال، واکنش‌های نوری فتوسـنتزی به‌وضـوح توسط فوتون‌های نور هدایت می‌شوند و برای توصیف این فرایند واحدهای مولار لازم است). با استفاده

از دستگاه یکسان واحدها، دیدگاه منطقی پیوستگی موجودات زنده و محیط پیرامونشان به‌سادگی قابل‌دستیابی است. سومین دلیل استفاده از واحدهای مولی ناشی از این واقعیت است که وقتی هدایت‌های پخشی در واحدهای مولی بیان می‌شوند، مقادیر عددی عملاً از دما و فشار مستقل هستند. در دستگاه واحد قدیمی، اثر مقادیر دما و فشار به‌اندازه‌ای بزرگ است که نیاز به تغییر و اصلاح مقادیر آن‌ها وجود دارد. این اثرات دما و فشار به‌منظور ساده‌سازی در چاپ اوّل کتاب درنظر گرفته نشده است، ولی دانشجویان کنجکاوی که عمق مسئله را بررسی می‌کنند، درمی‌یابند که برای حل کامل و صحیح مسئله کارهای بسیار بیشتری باید انجام شود. چهارمین دلیل این است که استفاده از واحدهای مولی بلافاصله این سؤال را در ذهن ایجاد می‌کند که «مول چه چیزی؟» وابستگی مقادیر عددی هدایت بر روی مقداری که پخش می‌شود، نسبت به زمانی‌که واحد $m.s^{-1}$ استفاده می‌شود، بسیار واضح‌تر است. این امر به دانشجویان کمک می‌کند زمانی‌که شارش دی‌اکسیدکربن را تخمین می‌زنند، از هدایت پخشی بخار آب که ممکن است باعث خطای ۶۰ درصدی در محاسبات شود، پرهیز کنند. ما دریافته‌ایم که دانشجویان به‌دلیل ساده‌تر بودن معادلات و وابستگی مشخص به عوامل محیطی، به‌راحتی به استفادهٔ مداوم از واحدهای مولی عادت می‌کنند. تنها عیب استفاده از واحدهای مولی این است که مدتی طول می‌کشد تا افرادی که با واحدهای دیگر آشنا هستند، با مقادیر معمول در واحدهای مولی مأنوس شوند.

دومین نکته در این کتاب، برخلاف چاپ اوّل، استفادهٔ غالب از هدایت به‌جای مقاومت است. اینکه فرد از هدایت یا مقاومت استفاده کند اختیاری است، اما استفادهٔ غالب از یک نوع واحد در این کتاب به‌دلیل جلوگیری از سردرگمی برتری دارد. انتخاب هدایت در این کتاب به‌این‌دلیل است که با شارش متناسب است و بنابراین به توسعهٔ درک شهودی از فرایندهای انتقال در سیستم‌های پیچیده‌ای نظیر کانوپی‌های گیاهی کمک می‌کند. این امر از برخی سردرگمی‌ها مثل اشتباه رایج میانگین‌گیری از مقاومت برگ‌ها به‌منظور به‌دست‌آوردن مقاومت کانوپی جلوگیری می‌کند. درمورد مقاومت هم سخن می‌گوییم، اما برای پرهیز از پیچیده شدن معادلات، در موارد خاص از آن استفاده می‌کنیم.

سومین تفاوتی که کتاب حاضر با چاپ اوّل کتاب دارد، استفاده از مساحت سطح به‌جای سطح پیش‌بینی‌شده است. این نکته ابتدا در بحث بودجهٔ انرژی برگ و استفاده از «عامل دید» مطرح می‌شود. به‌این‌دلیل که تعداد زیادی از بیوفیزیک‌دانان تنها با برگ‌های تخت کار می‌کنند، معادلات تبادل انرژی برای برگ‌ها معمولاً برحسب مساحت یک طرف برگ بیان می‌شود؛ این یک روش معمول برای مشخص کردن مساحت سطوح تخت است. اگر معادلهٔ موازنهٔ انرژی برای سطوحی که تخت نیستند، نظیر بدن یا اندام حیوانات، تنه یا شاخهٔ درختان و یا سوزنی‌برگان به‌کار رود، استفاده از سطح یک‌طرفه باعث تفسیرهای مختلفی می‌شود و سردرگمی ایجاد می‌کند. در این شرایط، متناوباً خطاهای ضریب دو رخ می‌دهند و باتجربه‌ترین بیوفیزیک‌دانان هم گاهی‌اوقات با این مشکل روبه‌رو می‌شوند. ما بر این باوریم که استفاده از مساحت جزئی سطح و ضرایب دید تابش، بهترین راه‌حل این مشکل است و بنابراین از بسیاری از کج‌فهمی‌ها جلوگیری می‌شود. برای آن‌دسته از افرادی که تنها به تبادل در برگ‌های تخت علاقه‌مند هستند، روند این کتاب ممکن است تاحدودی پیچیده به‌نظر برسد. اگرچه معادلات برگ تخت کتاب ساده‌تر هستند و زمانی‌که بخواهیم معادلات سطوح غیرمسطّح را نیز بررسی کنیم مطلوبیت این نوع تحلیل بهتر درک می‌شود. زمانی‌که بودجهٔ انرژی را به کانوپی‌های گیاهی تعمیم می‌دهیم، سطح یک‌طرفه را

مطرح می‌کنیم که نیمی از مساحت سطح است. در کانوپی‌های با برگ‌های تخت، شاخص سطح یک‌طرفه شبیه شاخص معمول سطح برگ است، اما برای کانوپی‌هایی با برگ‌های غیرتخت مثل سوزنی‌برگان، شاخص سطح یک‌طرفه مبهم است، درحالی‌که شاخص سطح پیش‌بینی‌شدهٔ برگ به عوامل زیادی بستگی دارد که معمولاً به‌اندازهٔ کافی تعریف نمی‌شوند.

مانند چاپ اوّل کتاب از (Kg^{-1}) برای پتانسیل آب استفاده کردیم. اگرچه واحدهای فشار (KPa یا MPa) در علوم گیاهی بیشتر استفاده می‌شوند، اما ازآنجاکه پتانسیلْ انرژی بر واحد جرم است، واحد $J.Kg^{-1}$ بنیادی‌تر بوده و مطلوب‌تر است.

در این چاپ هم مانند چاپ اوّل کتاب، افراد بسیاری به ما کمک‌های قابل‌توجهی کرده‌اند. ازجمله همکاران و همچنین دانشجویانی که برای ارائهٔ بهتر مطالب به ما راهکارهایی را ارائه دادند. ناشرانی که به ما اجازه دادند از مطالب منتشرشده در چاپ قبل استفاده کنیم. مارچلو دوناتلی[1] که نسخهٔ خطّی کتاب را عیب‌یابی کرده و نسخهٔ خطّی و ارقام را برای ارسال به ناشر آمادّه کرد و کارکنان انتشارات اسپرینگر ورلاگ که با صبوری در تأخیرهای اجتناب‌ناپذیرِ آمادّه کردن کتاب از ما پشتیبانی کردند و همچنین از همسران و همهٔ اعضای خانوادهایمان برای کمک و تشویق‌هایشان سپاسگزاری می‌کنیم. سرانجام از چمپ بی[2]. تانر فقید یاد می‌کنیم که کمک‌های زیادی در چاپ این کتاب کرده و بسیاری از مطالب این کتاب تحت‌تأثیر تجربهٔ سال‌ها تدریس و تحقیقات دانشگاهی او بوده است و ما این اثر را به او تقدیم می‌کنیم.

جی. ۰اس. کمپل
ج. ام. نورمن
پولمن و مادیسون
۱۹۹۷

1. Marcello Donatelli
2. Champ B

۱

کلّیات

بیوفیزیک محیطی علمی است که تبادل جرم و انرژی را بین موجودات زنده و محیط اطراف آن‌ها بررسی می‌کند. ازآنجاکه کلید اصلی حیات و بقای موجودات زنده، آگاهی از چگونگی تعامل آن‌ها با محیط است، به‌نظر می‌رسد که باید سابقهٔ مطالعات بیوفیزیک محیطی از هر دانش دیگری بیشتر باشد. البته مطالعهٔ منظم این دانش و ثبت نتایج تجربی این مطالعات از چند صد سال قبل شروع شده، اما تنها چند دهه است که بیوفیزیک محیطی به‌عنوان یک رشتهٔ تحصیلی مطرح شده است.

پیشرفت‌های بیوفیزیک محیطی اساساً در دو زمینهٔ استفاده از مدل‌های ریاضی برای تعیین سرعت انتقال و نیز استفاده از اصول پایستگی برای تحلیل بودجهٔ جرم و انرژی موجودات زنده بوده است. برای اندازه‌گیری سرعت انتقال جرم و انرژی، از اصول فیزیک و مهندسی کلاسیک استفاده می‌شود. در این رابطه مدل‌های نظری و تجربی متعددی وجود دارد که در مسائل مختلف انتقال، مهندسان از آن‌ها بهره می‌برند.

هدف از نوشتن این کتاب، پاسخ به دو مسئله است که ذهن بشر را به خود مشغول کرده است: مسئلهٔ اوّل، توصیف و مدل کردن خردمحیط فیزیکی است که موجودات زنده در آن زندگی می‌کنند و موضوع دوم تبیین مدل‌های سادهٔ تبادل جرم و انرژی بین موجودات زنده و محیط زندگی آن‌ها همراه با مدل‌هایی است که پاسخ موجودات زنده به این میزان شار جرم و انرژی را بیان می‌کند. بیوفیزیک محیطی را می‌توان یک علم بین‌رشته‌ای دانست که مسائل زیست‌محیطی را از منظر مهندسی بررسی می‌کند و هدف آن این است که دانشجویان محاسبهٔ سرعت‌های واقعی انتقال و اصول مربوط به آن را در مسائل زیست‌محیطی بیاموزند. برای تبیین و تشریح بسیاری از اصول، در فصول مختلف کتاب مثال‌های عددی خوبی ارائه شده است. به‌منظور افزایش مهارت دانشجویان در استفاده از معادلات، در پایان هر فصل چند مسئلهٔ اضافی نیز

داده شده است. دانشجویان برای فهم اصول بیوفیزیک محیطی، باید تلاش وافر داشته باشند و به همان اندازه که به حل مسائل فیزیک و مهندسی اهتمام می‌ورزند، برای درک عمیق اصول بیوفیزیک محیطی نیز، حل مسائل هر فصل را جدّی بگیرند.

برای درک اصول بیوفیزیک محیطی، در ابتدای کتاب فهرست نمادها و تعریف آن‌ها و در ضمیمهٔ انتهای کتاب، جدول اطلاعات و تبدیل آن‌ها به یکدیگر ارائه شده است. نگاه اجمالی به این اطلاعات و استفادهٔ مکرّر از آن‌ها درحین مطالعهٔ کتاب می‌تواند بسیار مفید و مؤثر باشد. در پایان هر فصل فهرستی از منابع ارائه شده است که می‌توانند اطلاعات مفیدی را در اختیار خواننده قرار دهند. توجه داشته باشید که هدف از این کار صرفاً معرفی منابع نیست، بلکه هدایت دانشجویان فعال و پویا درجهت استفادهٔ بهینه از این منابع است.

امروزه تأثیر محیط فیزیکی و شرایط آن بر رفتار و زندگی ما به‌حدّی است که ما را ناگزیر از مطالعهٔ دقیق آن می‌کند. گرما، سرما، باد و رطوبت اصطلاحات رایجی هستند که در صحبت‌های روزانه از آن‌ها استفاده می‌کنیم و خیلی راحت از کنار آن‌ها عبور می‌کنیم. باوجوداین، اغلب تفسیر درستی از برهم‌کنش خود و محیط و درک درستی از متغیرهای محیطی خود نداریم. بنجامین فرانکلین[1]، مخترع، دانشمند و سیاستمدار پیشین آمریکا، در نامه‌ای که در تاریخ ۱۴ آوریل ۱۷۵۷ به *جان لینینگ*[2] نوشته است، به پتانسیل این سوءبرداشت‌ها و تفسیرهای غلط اشاره می‌کند (سیگر، ۱۹۷۳).

> *اکنون درحال نوشتن بر روی یک میز چوبی هستم که میز و قفل کشوی آن هر دو در یک محیط با دمای ثابت قرار دارند. بنابراین میزان سردی یا گرمی آن‌ها یکسان است. بااین‌حال اگر دستم را بر روی قسمت‌های چوبی میز قرار دهم و سپس قفل فلزی را لمس کنم، احساس می‌کنم که قفل فلزی بسیار سردتر از چوب است، درحالی‌که حقیقت این نیست، بلکه قفل فلزی هادی یا رسانای بهتری است و می‌تواند سریع‌تر از چوب، گرما و حرارت پوست من را جذب کند.*

آزمایش فرانکلین و تحلیلی که او ارائه کرد، کمک می‌کند تا بفهمیم که درحقیقت ما دما را احساس نمی‌کنیم، بلکه تغییر دمایی را حس می‌کنیم که ناشی از جریان گرما به داخل یا خارج از بدن ماست. شار گرما یا آهنگ جریان گرما به اختلاف دما و همچنین به مقاومت یا قابلیت هدایت مادّهٔ هادی یا رسانا بستگی دارد.

با نگاهی عمیق به اطراف خود متوجه می‌شویم که هر برهم‌کنشی بین ما و محیط، با تبادل جرم و انرژی همراه است. بینایی ما ناشی از تابش یا بازتابش فوتون‌هایی است که از اطراف به چشم ما وارد شده و باعث برهم‌کنش‌های شیمیایی در شبکیهٔ چشم می‌شوند. شنیدن اصوات، ناشی از جذب انرژی صوتی از محیط

1. Benjamin Franklin
2. John Lining

اطراف است. حس بویایی ما ناشی از شار گازها و هواویزها به حسگرهای بویایی ماست. احساسات دیگری مثل آفتاب‌سوختگی، تنش گرمایی و تنش سرمایی را نیز می‌توان بیان کرد که هرکدام از آن‌ها ناشی از شار چیزی به داخل یا خارج بدن یک موجود زنده است. در بسیاری از حالات، تبادل پایا و یکنواخت مادّه و انرژی بین موجود زنده و محیط اطرافش را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\text{شار} = g(C_s - C_a) \qquad (۱-۱)$$

که در آن C_s غلظت در سطح بدن موجود زنده (سطح مبادله‌کننده)، C_a غلظت محیط و g ضریب هدایت عامل مبادله‌شونده می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، حواس ما به شارها پاسخ می‌دهد، ولی تفسیر ما از آن‌ها برحسب مقدار و غلظت محیطی آن‌هاست. حتّی اگر غلظت در موجودات زنده ثابت باشد (که معمولاً این‌گونه نیست)، قضاوت ما بیشتر تحت‌تأثیر میزان هدایت است. آزمایش فرانکلین به‌خوبی این موضوع را روشن کرد. دیدیم که اگرچه چوب و فلز هر دو در یک دما قرار داشتند، ولی هدایت بالاتر فلز سبب شد که سردتر به‌نظر برسد.

۱-۱ خُردمحیط‌ها

خُردمحیط‌ها بخش بسیار مهمی از زندگی روزمرّهٔ ما هستند، ولی به‌ندرت به آن‌ها فکر می‌کنیم. خانهٔ ما، تختخواب ما، اتومبیل ما، پناه یک ساختمان، سایهٔ یک درخت، لانهٔ یک حیوان، همه نمونه‌هایی از خُردمحیط‌ها هستند. آب‌وهوای چنین مکان‌هایی را نمی‌توان با داده‌های هواشناسی معمول بیان کرد. ممکن است دمای هوا ۱۰ °C و سرعت باد $5\ m.s^{-1}$ باشد، اما هم‌زمان در گودال کوچکی که براثرِ حرکت یک حیوان بر روی زمین ایجاد شده است، حشره ای قرار بگیرد که از اثر باد در امان بماند، ولی به طور اتفاقی در معرض تابش خورشید قرار داشته باشد و دمای آسایش ۲۵°C را تجربه کند. با توجه به تبادل انرژی موجودات زنده، خُردمحیط اهمیت دارد، اما توصیف خردمحیط‌ها اغلب پیچیده است؛ زیرا موجودات زنده بر خردمحیط خود تأثیر می‌گذارند. علاوه‌برآن، چون خُردمحیط‌ها می‌توانند در فاصله‌های زمانی کوتاه تغییرات زیادی داشته باشند، برای اندازه‌گیری متغیرهای محیطی مربوط باید از ابزارهای تخصّصی ویژه استفاده کنیم. متغیرهای موردنظر ممکن است دما، رطوبت جوّی، چگالی شار انرژی تابشی، باد، غلظت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن، دما و هدایت حرارتی لایهٔ بستر (کف اتاق، سطح زمین و غیره) و توزیع‌های احتمالی طیف‌های تابشی باشند. ممکن است متغیرهای دیگری نیز وجود داشته باشند که به‌منظور انجام مطالعات خاصی اندازه‌گیری شوند.

در این کتاب ابتدا متغیرهای محیطی ازقبیل دما، رطوبت، باد و تابش را مطالعه می‌کنیم. در گام دوم، تبادل جرم و انرژی و روابط بنیادی بین موجودات زنده و محیط اطراف را موردبحث قرار می‌دهیم و سپس به‌عنوان نمونه، اصول مربوط به تبادل جرم و انرژی را درمورد تعدادی از خردمحیط‌های گیاهی، حیوانی و

انسانی به‌کار می‌بریم. سرانجام مسائلی را درزمینهٔ تبادل تابش، حرارت و بخار آب برای سطوح گیاهی در مزارع و جنگل‌ها موردتوجه قرار خواهیم داد.

۱-۲ تبادل انرژی

تبادل انرژی در بوم‌شناسی بیوفیزیکی، یک برهم‌کنش بنیادی است. انرژی ممکن است به‌اشکال مختلفی ازجمله ذخیرهٔ انرژی شیمیایی، انرژی گرمایی، انرژی تابشی یا انرژی مکانیکی مبادله شود. ابتدا به‌دلیل اهمیت بیشتر بر انتقال گرما و تابش تمرکز خواهیم کرد.

در مکالمات روزمره، وقتی‌که از انتقال انرژی صحبت می‌شود، بیشتر چهار نوع انرژی موردنظر است: آفتاب «داغ» (تبادل تابشی)، سرامیک «سرد» (هدایت)، باد «خنک» (فرارفت)، «حذف» رطوبت (کاهش گرمای نهان ازدست‌رفته). هریک از این فرایندها مبتنی‌بر اصولی است که درک آن‌ها زمینه‌ساز ایجاد یک محیط فیزیکی مناسب برای زندگی یک موجود خاص می‌باشد.

گرمای کلی موجود در یک مادّه، متناسب با مجموع انرژی جنبشی تک‌تک مولکول‌های آن است. اگر میانگین انرژی جنبشی مولکول‌ها در دو مادّه متفاوت باشد، گرما می‌تواند از یک مادّه به مادّهٔ دیگر جریان یابد. دما اندازهٔ متوسط انرژی جنبشی تصادفی مولکول‌های یک مادّه را توصیف می‌کند. اگر دو جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار بگیرند، در یک برهم‌کنش مستقیم مولکولی، گرما از مادّهٔ با دمای بالا به مادّهٔ با دمای پایین منتقل می‌شود. برای مثال اگر شما با دست خود یک بخاری داغ را لمس کنید، درنتیجهٔ هدایت گرما از بخاری، دست شما گرم می‌شود.

انتقال گرما توسط یک سیّال متحرّک، همرفت نامیده می‌شود. گرما ابتدا به‌وسیلهٔ هدایت گرمایی به سیّال منتقل می‌شود و با حرکت سیّال، گرمای ذخیره‌شده در آن منتقل می‌شود. اکثر سامانه‌های گرمایش خانگی، دیوارها و هوای خانه را برهمین‌اساس گرم می‌کنند.

برخلاف همرفت و رسانش که برای انتقال گرما نیازمند یک محیط مادّی هستند، فرایند تابش برای انتقال انرژی، به محیط مادّی و مولکول‌های رابط نیازی ندارد. هر سطحی با دمای معیّن می‌تواند مقداری انرژی را تابش کند که با توان چهارم دمای آن متناسب است. زمین و خورشید هر دو به‌عنوان دو جسم گرم تابش می‌کنند، لکن به‌دلیل دمای بیشتر خورشید، چگالی شار تابشی از سطح خورشید نسبت به آنچه که از سطح زمین تابش می‌شود، بسیار بیشتر است. شاید بتوان گفت بخش زیادی از گرمایی که از آتش یا بخاری دریافت می‌کنید، به‌دلیل تابش باشد و آسایش شما در یک اتاق، بیش از آنکه ناشی از هوای اتاق باشد، ناشی از میزان تابشی است که از دیوارها دریافت می‌کنید.

علاوه‌بر تابش، روش‌های دیگری برای انتقال گرما به بدن موجودات وجود دارد. برای اینکه یک گرم آب در دمای ۲۰ درجهٔ سلسیوس از مایع به گاز تغییر حالت بدهد، باید حدود ۲۴۵۰ ژول گرما (گرمای

نهـان تبخیر) جذب کند. این مقدار تقریباً ۶۰۰ برابر بیشـــتر از انرژی موردنیاز برای افزایش دمای یک گرم آب به اندازهٔ یک درجهٔ سـلسـیوس است. بنابراین، تبخیر آب از پیکرهٔ یک موجود زنده که شامل گرمای نهـان موردنیاز برای تبدیل آب مایع به بخار و همرفت این بخار از روی بدن موجود زنده اســـت، می‌تواند یک روش بسـیار مؤثر انتقال انرژی باشـد. تقریباً همهٔ شـما در فصـل تابسـتان، هنگامی‌که از اسـتخر خارج می‌شوید و بر لبهٔ استخر برای خشک شدن می‌ایستید، سرما را تجربه کرده‌اید.

۱-۳ انتقال تکانه و جرم

موجودات زنده در محیط طبیعی، درمعرض نیروهایی ازقبیل باد یا آب قرار دارند و برای تبادل اکسـیژن و دی‌اکسـیدکربن به انتقال جرم متّکی هسـتند. نیروی باد یا آب وارد بر یک موجود زنده نشـان‌دهندهٔ انتقال تکانه از سـیّال به موجود زنده اسـت. انتقال تکانه، اکسـیژن و دی‌اکسـیدکربن در سیّالات، از اصولی مشابه آنچه برای انتقال همرفتی گرما تبیین شـد، پیروی می‌کند. بنابراین، فقط یک مجموعه از اصـول را می‌توان آموخت و در هر سه مورد به‌کار برد.

۱-۴ پایستگی جرم و انرژی

یکی از قوی‌ترین قوانین مورداستفاده در تحلیل برهم‌کنش بین موجود زنده - محیط، قانون پایستگی است. براساس این قانون در شرایط عادی، جرم و انرژی نه ایجاد می‌شوند و نه از بین می‌روند. کارکرد این روش خیلی شـبیه توازن در حسـاب بانکی شـماسـت که تفاوت بین میزان واریزی‌ها و برداشـت‌ها، باقی‌ماندهٔ موجودی شما در بانک را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، موازنهٔ انرژی، شامل انرژی‌های ورودی، ازدست‌رفته و ذخیره‌شده در یک سطح با پوشش گیاهی را به‌شکل زیر می‌توان نوشت:

$$R_n + M - H - \lambda E = G \qquad (۲-۱)$$

که در آن R_n چگالی شـار تابش خالص جذب‌شـده توسـط سـطح، M انرژی داده‌شـده به سـطح براثرِ سـوخت‌وسـاز یا جذب انرژی توسـط فتوسـنتز، Hآهنگ اتلاف گرمای محسـوس (جریان گرما به‌وسـیلهٔ همرفت یا هدایت ناشی از اختلاف دما)، λE میزان اتلاف گرمای نهان از سطح (E تبخیر آب و λ گرمای نهان تبخیر یا مقدار گرمای جذب‌شده برای تبخیر یک گرم آب) و G مقدار گرمای ذخیره‌شده در پوشش گیاهی و خاک است. معادلهٔ مشابهی را نیز برای موازنهٔ آب در یک سطح با پوشش گیاهی می‌توان نوشت. ازآنجاکه قوانین پایسـتگی نقض نمی‌شـوند، بنابراین حاوی اطلاعات ارزشـمندی درمورد شـارها یا ذخیره جرم و انرژی هسـتند. به‌طور معمول در به‌کارگیری معادلهٔ (۱-۲) ممکن اسـت مقادیر R_n، M ، H و G را اندازه‌گیری یا تخمین زد و E را محاسبه کرد. کاربرد دیگر معادلهٔ (۱-۲) برمبنای این حقیقت است که R_n، H، E و G همه تابع دمای سـطح هسـتند. بنابراین در شـرایط محیطی (دمای هوا، تابش خورشـیدی،

فشار بخار) خاص، تنها در یک دمای سطح مشخص موازنهٔ معادلهٔ (۱-۲) برقرار است. به‌این‌ترتیب می‌توان از بودجهٔ انرژی برای تعیین آن دمای خاص استفاده کرد.

۱-۵ پیوستگی در زیست‌کره

بخشی از زمین و جو اطراف آن که محل زندگی حیوانات و گیاهان است، بیوسفر یا زیست‌کره نامیده می‌شود. زیست‌کره را می‌توان زنجیره‌ای پیوسته از مقیاس‌های مکانی با مؤلّفه‌های مختلف درنظر گرفت. هوا، بخار آب، دی‌اکسیدکربن، اکسیژن و سایر گازها می‌توانند یک زنجیرهٔ پیوسته گازی را شکل دهند که از جوّ آزاد تا هوای موجود در خلل‌وفرج خاک و منافذ روی برگ درختان را شامل شود. همچنین آب مایع موجود در خلل‌وفرج خاک‌های مرطوب تا سلول‌های ریشه و برگ گیاهان، نمونهٔ دیگری از یک زنجیرهٔ پیوسته است. در سرتاسر این سیستم، نقطهٔ تلاقی یا واسط بین حالت مایع و گاز، نقاطی هستند که مولکول‌های آب از یک حالت به حالت دیگر تبدیل می‌شوند و در این نقاط گرمای نهان مبادله می‌شود. این تبادل گرمای نهان، حلقهٔ اتصال بین جرم آب و انرژی مبادله‌شده است. به‌طور مشخص ارتباط خاک با جو ازطریق هدایت و پخش برقرار است. همچنین ازطریق آوندهای گیاهی نیز ارتباط با جو وجود دارد.

اصول پایستگی جرم و انرژی را می‌توان درمورد کل سیستم و یا اجزای خاص از قبیل یک گیاه مجزّا، برگ، آوند چوبی یا حتّی یک سلول به‌کار برد. معادلات انتقال نیز می‌توانند درمورد کل سیستم و یا یک مؤلّفهٔ مشخص به‌کار گرفته شوند. مشخصاً باید دقت کنیم که کدام بخش از سیستم را در یک تحلیل خاص موردمطالعه قرار می‌دهیم.

حیوانات، چه موجودات میکروسکوپی موجود در لایهٔ نازک آب موجود در خاک و چه جانداران بزرگ‌تر مانند کرم‌ها و یا حیواناتی مثل موش‌ها یا ملخ‌ها یا حتّی حیوانات بزرگ‌تری که در کانوپی پوشش گیاهی وجود دارند را شامل می‌شوند. خردمحیط خاصی که حیوان درمعرض آن قرار می‌گیرد، تابع برهم‌کنش مؤلّفه‌های این زنجیرهٔ پیوسته است. بعضی از حیوانات می‌توانند اجزای زنجیرهٔ پیوسته را تغییر دهند. به‌عنوان مثال گیاه‌خواران با خوردن برگ گیاهان، عملاً اثر روزنه‌های برگ را تغییر می‌دهند؛ همچنین بعضی از امراض می‌توانند مانع عمل فتوسنتز شوند.

جرم و انرژی مرتباً از بخشی از یک سیستم به بخش دیگر آن جریان می‌یابد و نتیجهٔ این برهم‌کنش، موضوعی است که در «بیوفیزیک محیطی» موردمطالعه قرار می‌گیرد. آب در سراسر زیست‌کره، در حالت‌های جامد، مایع یا گاز موجود است و می‌تواند از یک مکان یا حالت به مکان و حالت دیگر منتقل شود. موجودات زنده به آب وابسته هستند و به‌شکل عجیبی با ویژگی‌های آن سازگار شده‌اند. برای یک لحظه، جریان آب را در سیستم خاک- گیاه- جو درنظر بگیرید. پس از تراکم بخار آب در هوا، باران بر زمین می‌بارد و به‌دلیل گرادیان پتانسیل آب موجود در خاک، در خلل‌وفرج خاک نفوذ می‌کند و در سراسر خاک توزیع می‌شود. آب موجود در خاک به ریشه و سپس ازطریق سیستم آوندی گیاه تحت‌تأثیر

کـاهش مداوم پتانسـیل آب به داخل برگ گیاهان جریان می‌یابد. در برگ، آب مایع به بخار آب تبدیل می‌شـود، البته این عمل نیازمند مقدار قابل‌توجهی گرمای نهان اسـت. بخار آب براثرِ گرادیان شـدید فشـار بخار آب موجود بین برگ و جوّ زمین حرکت می‌کند و وارد جو می‌شـود. این بخار آب ازطریق مجاری روزنه، در لایهٔ مرزی مجاور سـطح برگ پخش می‌شـود و توسـط تلاطم‌های همرفتی در سـراسـر فضـای کانوپی[1]، جابه‌جا و درنهایت به فضای آزادْ منتقل و در سرتاسر فضا پخش می‌شود و مجدّداً به‌صورت باران متراکم می‌گردد. انرژی موردنیاز برای تبدیل آب مایع در برگ‌ها به بخار آب، ممکن است از هوا گرفته یا از انرژی تابشـی خورشـید تأمین شود. دریافت انرژی از محیط توسط گیاه و گرفتن آب از گیاه توسط جو مثال خوبی از حلقهٔ تبادل جرم و انرژی اسـت. قوانین انتقال را می‌توان در ارتباط با پایسـتگی جرم و انرژی برای توصـیف حرکت آب در سـراسـر این سـیسـتم مورداسـتفاده قرار داد. حتّی اگر نیروهای لازم برای حرکت آب در قسـمت‌های مختلف سـیستم متفاوت باشند، هدایت مناسبی را می‌توان برای توصیف انتقال در سـراسـر سـیسـتم تعریف کرد. در برخی موارد ممکن اسـت شـکل معادلهٔ انتقال در بخش‌های مختلف سـیستم متفاوت باشد، اما می‌توان از اصل پایستگی جرم برای ارتباط معادلات انتقال در بخش‌های مختلف سیستم استفاده کرد.

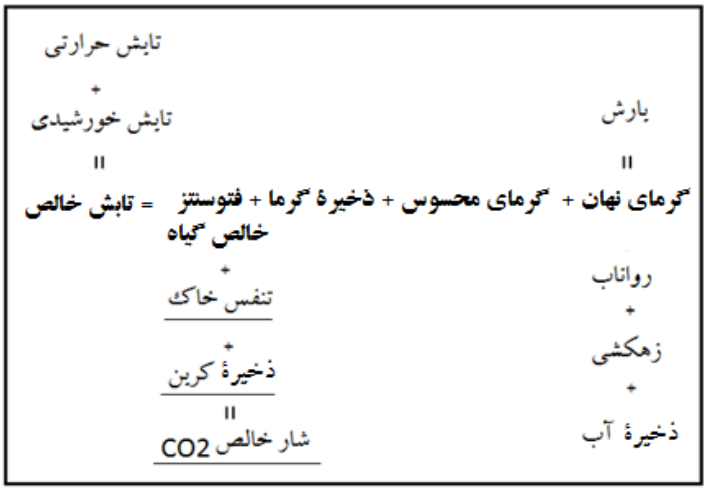
بدیهی است که زیست‌کره، نه‌تنها به‌دلیل واقعیت هم‌بستگی متقابل موجودات زنده و محیط آن‌ها، بلکه ازنظر روابط ریاضـی و فیزیکی که متخصّصـان بیوفیزیک برای توصـیف این سـیسـتم جالب‌توجه از آن‌ها اسـتفاده می‌کنند، بسیار پیچیده است. شناخت منطقی از زیست‌کره و آگاهی ما درمورد آن هنوز در ابتدای راه اسـت و امیدواریم که ساختار این دانش جدید به‌گونه‌ای تبیین شود که شما را از وابستگی هرچه بیشتر به آن آگاه سـازد و به آنچه که شناخته‌شده نیست، ایمان بیاورید. به‌طوری‌که برای افزایش درک و ارتباط تنگاتنگ بین خود و محیط اطرافتان، ابزاری در اختیار داشـته باشـید که بتواند به‌صـورت کمّی آن را به دیگران نیز عرضـه کنید. در شـکل ۱-۱ تصویری شماتیک از اتصال مادّه و انرژی در زیست‌کره نشان داده شده است.

۱-۶ مدل‌ها، ناهمگنی و مقیاس

در این کتاب ما از مدل‌های گوناگونی استفاده خواهیم کرد. یک مدل، نمایشی ساده از یک حالت پیچیده یا یک پدیده است. عبارت «مدل» یک بیان عام است و بدون استفادهٔ ضمنی و یا آشکار از بعضی از مدل‌ها امکـان تفسـیر داده‌هـا وجود نـدارد. انواع مختلفی از مـدل‌هـا وجود دارد و مـا قطعاً بر مدل‌های ریاضـی سیستم‌های فیزیکی و بیولوژیکی همراه با بعضی از فرمول بندی‌های احتمال تأکید خواهیم کرد.

---

۱. کانوپی به فضای بین سطح زمین تا بلندترین نقطهٔ گیاه گفته می‌شود. در بعضی از منابع، از کانوپی با عنوان تاج پوشش یا آسمانهٔ گیاه نام برده شـده اسـت که مفهوم جامعی از کانوپی را بیان نمی‌کند. بنابراین در این کتاب ترجیح داده شـده اسـت که از خود واژهٔ کانوپی استفاده شود.



شکل ۱-۱ تفسیرشماتیک هم‌بستگی بودجهٔ منابع آب (خط ایتالیک) کربن (خط زیرین)، تابش (خط معمولی) و انرژی (خط تیره) در زیست‌کره

توصیف پدیده‌های طبیعی در طول یک زنجیرهٔ پیچیده می‌تواند جزئی یا کلی و جامع باشد و سطح مناسب پیچیدگی و درهم‌تنیدگی به هدف ما بستگی دارد. به‌کارگیری اصول بنیادی در پدیده‌های طبیعی، اغلب نیازمند تطبیق این اصول یا ساده‌سازی خلاقانهٔ سیستم طبیعی است، به‌گونه‌ای‌که با الزامات اصول بنیادی، ارتباطی منطقی داشته باشد. ساده‌سازی خلاقانه مواد یا پدیده‌های طبیعی، «هنر» بیوفیزیک محیطی است و اجرای آن به درک صحیح افراد از اصول مرتبط که یکی از اهداف این کتاب است، بستگی دارد. طبیعی است که بتوان سؤالاتی را مطرح کرد که راه‌حل آن‌ها بسیار دشوار و پیچیده باشد. طبیعت اطراف ما بسیار پیچیده است. شاید بتوان گفت بی‌نهایت پیچیده است. بااین‌حال، فهم پیچیدگی آن را می‌توان با ساده‌سازی و مدل کردن آن، قابل‌درک کرد. آلبرت انیشتین می‌گوید:

«همه‌چیز باید تاآنجاکه ممکن است ساده شود، البته این کار ساده نیست»

در فرایند ساده‌سازی، رابطهٔ بین مقیاس مکانی برخی از پیش‌بینی‌های موردنظر یا فهم ما و میزان ناهمگنی ذاتی که در سیستم‌های زنده وجود دارد، اهمیت دارد. ناهمگنی و ناخالصی از مشخصه‌های بارز مواد موجود در طبیعت است. ازطرفی بشر همیشه به‌دنبال این بوده است که این مواد را طبقه‌بندی و پالایش کند و پس از جداسازی عناصر آن‌ها، ترکیب‌های جدیدی از آن‌ها را ایجاد نماید. در طبیعت، مواد همگنی که تمام حجم آن‌ها دارای خواص یکسان و یکنواخت باشد، به‌ندرت پیدا می‌شوند. بنابراین می‌توان به‌جرئت بیان کرد که در مقیاس‌های موردعلاقهٔ ما، در طبیعت هیچ مادّهٔ همگن خوبی وجود ندارد. بهتر است بگوییم همگنی و یکنواختی تابع مقیاس مکانی است و هرچه این مقیاس بزرگ‌تر باشد، ناهمگنی بیشتر است. در

بیوفیزیک محیطی، مطالعهٔ مواد طبیعی از قبیل خاک، لایه‌های سنگی، ترکیب‌های گیاهی و پوشش‌های حیوانی موردنظر ماست. اصولی که معمولاً در این علم مورداستفاده قرار می‌گیرند، به‌راحتی قابل‌درک هستند و البته درمورد مواد خالص کاربرد دارند. بنابراین بسیار مهم است که بدانیم فرض‌های همگنی، چه‌زمانی به‌اندازهٔ کافی وجود دارد و چه‌زمانی برای حل منطقی یک مسئله نیازمند سطح معیّنی از ناهمگنی هستیم. ما معمولاً محیط‌های طبیعی را همگن تلقّی می‌کنیم، ولی ویژگی‌هایی را به محیط‌ها اختصاص می‌دهیم که اثر مهمی دارند و این خود ناهمگنی است.

خاکی متشکّل از مواد معدنی شامل ذراتی با اندازه و خصوصیات مختلف، با مواد آلی در مراحل مختلف تجزیه، هوا، آب، ریشهٔ گیاهان، کرم‌ها، حشرات، قارچ‌ها، باکتری‌ها و غیره را درنظر بگیرید. چنین خاکی قطعاً یک محیط ناهمگن است. باوجوداین، می‌توانیم به‌خوبی انتقال حرارت را شبیه‌سازی کنیم، البته با فرض اینکه هدایت حرارتی خاک که تابع محتوای آب، نوع ذرات و توزیع اندازه و چگالی است، همگن و یکنواخت باشد. توجه داشته باشید که ناهمگنی خاک، در مقیاس میلی‌متر بوده و این میزان در مقایسه با مقیاس جریان گرما که درحدّ متر است، معمولاً ناچیز و قابل‌اغماض است. باوجوداین اگر بخواهیم دما و رطوبت را در فضای محدود بین یک تخته‌سنگ و سطح زمین که موجودات زندهٔ کوچکی در آن زندگی می‌کنند، تخمین بزنیم، نیازمند توصیف‌های پیچیده‌تری از آن هستیم. درخصوص چنین مواد ناهمگنی «مثل خاک» خصوصیات مختلفی ازقبیل چگالی ظاهری، ظرفیت گرمایی، نفوذپذیری هوا، هدایت مویینگی و غیره تعریف می‌شود.

دومین محیط ناهمگن طبیعی مهم برای ما، کانوپی گیاهی، شامل برگ، شاخه، ساقه، میوه و گل است که به‌صورت حجمی درنظر گرفته می‌شود که در مقابل باد، نور، رشد و یا تنش آبی تأثیر می‌پذیرد. برای توصیف نفوذ نور و فتوسنتز درون کانوپی گیاهی از یکسری معادلات ساده استفاده می‌کنیم. در این معادلات، کانوپی مثل یک فضای سبز همگن درنظر گرفته می‌شود. باوجوداینکه با آگاهی از نفوذ تابش خورشیدی به درون یک کانوپی جنگلی با ارتفاع ۵۰ متر نمی‌توان فتوسنتز را در فضای سبز جنگل توصیف کرد، اما درعوض به‌خوبی می‌توان از هندسه و توزیع‌های تصادفی آماری (با پشتوانه از اندازه‌گیری‌های مستقیم میدانی) استفاده کنیم. درواقع، علم آمار ابزار مناسبی است که به‌کمک آن و با میانگین‌گیری بر روی یک سیستم ناهمگن می‌توانیم نمونه‌ای همگن را ایجاد و جایگزین آن کنیم.

۱-۷ کاربردها

با توجه به مثال‌هایی که ارائه شد، به‌خوبی دریافتیم که بیوفیزیک محیطی در طیف وسیعی از مسائل کاربرد دارد. برای بسیاری از مسائل، ارزیابی‌های نسبتاً کاملی وجود دارد، اگرچه هنوز باید در این زمینه کارهای بیشتری انجام شود. تجزیه‌وتحلیل آسایش و بقای انسان در هوای گرم و سرد نیازمند درک خوبی از اصولی است که در آینده درمورد آن‌ها بحث خواهیم کرد. شرایط آب‌وهوایی مطلوب، بقا و نیازهای غذایی حیوانات اهلی و وحشی را نیز می‌توان در این راستا قرار داد. سازگاری گیاهان در سیستم‌های طبیعی را

می‌توان درک کرد و با استفادهٔ مناسب از این اصول، انواع گیاهان مطلوب و شرایط رشد در کشاورزی و جنگل‌داری را برگزید. حتّی معماری موفق یک ساختمان، به‌منظور استفادهٔ بیشینه از گرمای خورشیدی و لحاظ کردن اثر باد و سایر متغیرهای اقلیمی در آن، مستلزم درک مفاهیم بیوفیزیک محیطی است. سرانجام، مدل‌هایی که وضع هوا را پیش‌بینی می‌کنند و یا تغییرات اقلیم گذشته و آینده را تخمین می‌زنند، برای انطباق مبادلات بین سطح زمین و جو، به‌شدت به اصول بیوفیزیک محیطی وابسته هستند.

با مطالعهٔ بیوفیزیک محیطی، متوجه خواهیم شد که انسان‌های اوّلیه و حتّی حیوانات، اغلب درک درست‌تری از کاربرد اصول بیوفیزیک محیطی نسبت به ما دارند. درک محیط و چگونگی برهم‌کنش بهتر با آن، اغلب تفاوت بین زندگی و مرگ را برای آن‌ها ایجاد می‌کند، درحالی‌که پیامد آن برای ما ممکن است فقط یک ناراحتی کوچک یا افزایش صورت‌حساب سوخت باشد.

۱-۸ واحدها

در این کتاب از واحدهای دستگاه بین‌المللی (SI) استفاده می‌کنیم. نمادهای پذیرفته‌شده در دستگاه SI برای طول، متر (m)، برای جرم، کیلوگرم (Kg)، برای زمان، ثانیه (s)، برای درجه‌حرارت ترمودینامیکی، کلوین (K) و برای مقدار مادّه، مول (mol) است. واحدهای مشتق‌شده از آن‌ها را که در این کتاب مورداستفاده قرار خواهیم داد، در جدول ۱-۱ آمده‌اند. واحدهای دیگری نیز وجود دارد که می‌توانید در اینترنت آن‌ها را جست‌وجو کنید.

جدول ۱-۱ مثال‌هایی از واحدهای SI به‌دست‌آمده و علامت آن‌ها

کمیّت	نام	علامت	واحد SI	واحد جانبی
سطح	ــــــ	ــــــ	m^2	ــــــ
حجم	ــــــ	ــــــ	m^2	ــــــ
سرعت	ــــــ	ــــــ	$m.s^{-1}$	ــــــ
چگالی	ــــــ	ــــــ	$Kg.m^{-3}$	ــــــ
نیرو	نیوتن	N	$m.Kg.s^{-2}$	$N.s^{-2}$
فشار (سطح/نیرو)	پاسکال	Pa	$Kg.m^{-1}.s^{-2}$	N m
انرژی	ژول	J	$m^2.Kg.s^{-2}$	$N.m^2$
پتانسیل شیمیایی	ــــــ	ــــــ	$m^2.s^{-2}$	$J.Kg^{-1}$
توان	وات	W	$m^2.Kg.s^{-2}$	$J.s^{-1}$
غلظت	ــــــ	ــــــ	mol	ــــــ
چگالی شار مولی	ــــــ	ــــــ	$mol.m^2.s^{-1}$	ــــــ
چگالی شار گرما	ــــــ	ــــــ	$Kg.s^{-2}$	$W.m^{-2}$
ظرفیت گرمایی	ــــــ	ــــــ	$m^2.s^{-2}.K^{-1}$	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$

در بسیاری از مسائل بیوفیزیک، مقیاس دمای سلسیوس مناسب‌تر از مقیاس ترمودینامیکی (کلوین) است. ما با استفاده از رابطهٔ $C = K - \frac{۲۷۳}{۱۵}$ از هر دو مقیاس استفاده خواهیم کرد. ازآنجاکه درجهٔ سلسیوس و درجهٔ کلوین هم‌اندازه هستند، واحدهای تبدیلی که در مخرج کسر آن‌ها دما وجود دارد، می‌توانند به‌صورت $C^{-۱}$ یا $K^{-۱}$ نوشته شوند. به‌عنوان مثال، دو واحد مربوط به گرمای ویژه، یعنی $\mathrm{J.Kg^{-1}.K^{-1}}$ یا $\mathrm{J.Kg^{-1}.C^{-1}}$ مشابه هستند. برای تمایز بین این مقیاس دما، برای درجهٔ سلسیوس از فونت معمولی (T) و برای دمای کلوین از فونت سیاه $(\boldsymbol{T})$ استفاده خواهیم کرد. برخی از فاکتورهای مفید برای تبدیل به واحدهای SI در جدول A.۴ ضمیمه آمده است.

برای ساده کردن اعدادی که با این واحدها استفاده می‌شوند، از پیشوندهایی استفاده می‌کنیم که معرف مضارب اعشاری واحدها هستند. پیشوندهای موردقبول، نمادها و مضارب در جدول ۱–۲ نمایش داده شده است. استفاده از پیشوندهایی با گام‌های کوچک‌تر از $۱۰^{۳}$ ممنوع است. ما در استفاده از سانتی‌متر استثنا قائل می‌شویم؛ زیرا برای توصیف اندازهٔ برگ میلی‌متر بسیار مناسب است و در این مورد، متر خیلی بزرگ است. پیشوندها را می‌توان با واحدهای پایه یا واحدهای مشتق‌شده مورداستفاده قرار داد، اما استفاده از آن‌ها در مخرج یک واحد مشتق‌شده ممکن نیست (به‌عنوان مثال، $\mathrm{g.m^{-3}}$ یا $\mathrm{mg.m^{-3}}$ صحیح، اما $\mathrm{mg.cm^{-3}}$ درست نیست). یکی از استثنائات در استفاده از این قانون، استفاده از کیلوگرم است که ممکن است در مخرج کسر واقع شود؛ زیرا واحد اصلی جرم است. توجه داشته باشید که در جدول ۱–۲، توان ده اغلب برای نوشتن اعداد بسیار بزرگ یا بسیار کوچک استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، عدد ۰٫۰۰۷۴ می‌تواند به‌صورت $۱۰^{-۳} \times ۷۴$ یا ۸۶۴۰۰ که می‌تواند به‌صورت $۱۰^{۴} \times ۸۶۴$ نوشته شود.

اکثر اعدادی که ما استفاده می‌کنیم، واحدهای مرتبط دارند. قبل از انجام هر محاسبه‌ای با این اعداد، مهم است که واحدها را به واحد پایهٔ SI تبدیل و اعداد را با استفاده از ضریب مناسب از جدول ۱–۲ تبدیل کنید. همچنین نوشتن واحدها با اعداد مربوط بسیار مهم است. واحدها را می‌توان با استفاده از قوانین ضرب و تقسیم به همان اندازهٔ اعداد دست‌کاری کرد. مقادیر و همچنین واحدها، در دو طرف معادله باید موازنه شده باشند. یکی از بررسی‌های مفید درمورد صحّت یک معادله در فیزیک و مهندسی، بررسی موازنهٔ واحدهاست. دو مثال زیر به روشن‌تر شدن این موضوع کمک می‌کند.

مثال ۱–۱ محتوای انرژی صبحانه‌ای شامل غلات، معادل $\mathrm{۳٫۹\ Kcal.g^{-1}}$ است. این مقدار را به واحد SI تبدیل کنید $(\mathrm{J.Kg^{-1}})$.

حل– با مراجعه به جدول A۴ می‌بینیم که یک ژول معادل ۰٫۲۳۸۸ کالری است. بنابراین:

$$\frac{۳.۹\ \mathrm{Kcal}}{\mathrm{g}} \times \frac{۱۰^{۳}\mathrm{cal}}{\mathrm{Kcal}} \times \frac{۱۰^{۳}\mathrm{g}}{Kg} \times \frac{۱\mathrm{J}}{۰.۲۳۸۸\ \mathrm{cal}} = ۱۶.۳ \times ۱۰^{۶}\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Kg}} = ۱۶.۳\ \mathrm{MJ/Kg}$$

جدول ۱-۲ علامت‌ها و مضرب‌های پذیرفته‌شدهٔ واحدها در SI

مضرب	پیشوند	علامت
1000 000 000 000 000 000 = 10^{18}	Exa	E
1000 000 000 000 000 = 10^{15}	Peta	P
1000 000 000 000 = 10^{12}	Tera	T
1000 000 000 = 10^{9}	Giga	G
1000 000 = 10^{6}	Mega	M
1000 = 10^{3}	Kilo	K
100 = 10^{2}	Hecto	H
10 = 10^{1}	Deka	Da
0.1 = 10^{-1}	Deci	D
0.01 = 10^{-2}	Centi	C
0.001 = 10^{-3}	Milli	m
0.000 001 = 10^{-6}	Micro	μ
0.000 000 001 = 10^{-9}	Nano	N
0.000 000 000 001 = 10^{-12}	Pico	P
0.000 000 000 000 001 = 10^{-15}	Femto	F
0.000 000 000 000 001 = 10^{-18}	atto	a

مثال ۱-۲ در فصل ۲، فرمولی برای محاسبهٔ عمق میرایی نوسانات دما به‌صورت $D = \sqrt{\frac{2k}{\omega}}$ داده شده است. در این رابطه k پخشیدگی حرارتی خاک و ω بسامد زاویه‌ای نوسانات دما در سطح می‌باشد. شکل ۸-۴ نشان می‌دهد که پخشیدگی حرارتی خاک معمولاً حدود ۰/۴ $mm^2.s^{-1}$ است. عمق میرایی روزانه را بیابید.

حل- بسامد زاویه‌ای برابر با $2\pi/p$ می‌باشد. در این رابطه p دورهٔ نوسانات دماست. برای تغییرات روزانه، دوره برابر با یک روز می‌باشد (برای جزئیات بیشتر به فصل‌های ۲ و ۸ رجوع کنید) درنتیجه $\omega = \frac{2\pi}{\text{یک روز}}$ می‌باشد. با تبدیل ω و k به واحدهای پایه SI داریم:

$$\omega = \frac{2\pi}{1\text{day}} \times \frac{1\text{day}}{24\text{hr}} \times \frac{1\text{hr}}{60\text{min}} \times \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 7.3 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$$

$$k = \frac{0.4\text{mm}^2}{\text{s}} \times \frac{1\text{m}}{1000\text{ mm}} \times \frac{1\text{m}}{1000\text{ mm}} = 4 \times 10^{-7}\, m^2/_s$$

$$D = \sqrt{\frac{2 \times 4 \times 10^{-7}\text{m}^2\text{s}^{-1}}{7.3 \times 10^{-5} s^{-1}}} = 0.1\text{ m}$$

مثال ۱-۳ واحد پتانسیل آب $J.Kg^{-1}$ است (فصل ۴ را ببینید). مؤلّفهٔ گرانشی پتانسیل آب از رابطهٔ $\psi_g = -gz$ به‌دست می‌آید که در آن g شتاب جاذبه ($۹٫۸\ m.s^{-2}$) و z ارتفاع (m) بالای سطح مرجع است. دو طرف رابطه را ازنظر ابعادی انطباق دهید.

حل- در جدول ۱-۱ واحد پایهٔ ژول معادل $Kg.m^2.s^{-2}$ داده شده است. بنابراین:

$$\frac{J}{Kg} = \frac{Kg.m^2.s^{-2}}{Kg} = \frac{m^2}{s^2}$$

بنابراین واحد gz معادل واحد ψ می‌باشد.

اگر در عملگرهای ریاضی (مانند رادیکال، لگاریتم، سینوس، کسینوس، تانژانت و غیره) اعداد بی‌بُعد باشند، سردرگمی و اشتباه حداقل خواهد بود؛ زیرا در بسیاری از موارد واحدها را حذف می‌کنیم، اما در بعضی از معادلات تجربی، مناسب است که واحدها را حفظ و واحدهای مربوط به عناصر معادله و نتیجه را بادقت مشخص کنیم. مثلاً در فصل هفتم، ما مقاومت گرمایی لایهٔ مرزی را از رابطهٔ زیر حساب می‌کنیم:

$$r_{Ha} = 7.4\sqrt{\frac{d}{u}} \qquad (۳-۱)$$

که در آن d طول سطح برحسب متر، u سرعت باد در امتداد سطح برحسب متر بر ثانیه و r_{Ha} مقاومت لایهٔ سطحی و واحد $m^2.s.mol^{-1}$ است. ثابت ۷٫۴ مقدار ثابتی است که حاصل ارزیابی‌های متعدد تجربی است و واحد آن برابر $m^2.s^{0.5}.mol^{-1}$ می‌باشد که البته از ظاهر معادله به‌سادگی متوجه نمی‌شویم که این مقدار ثابت دارای بُعد است. بنابراین اگر کسی بدون توجه به اینکه ثابت ۷٫۴ دارای واحد هست، بخواهد واحدها را حذف کند، قطعاً در به‌دست‌آوردن واحد مقاومت دچار خطا خواهد شد. این مسئله جدّی‌تر خواهد بود اگر مثلاً مقدار d را برحسب mm و مقدار u را برحسب $cm.s^{-1}$ بنویسیم. در این کتاب هرزمان که معادلات تجربی ازقبیل ۱-۳ مورداستفاده قرار گیرد، فرض بر این است که همهٔ پارامترها (مانند d و u) در دستگاه SI نوشته شده‌اند و برهمین‌اساس واحد مربوط به مشتقات آن‌ها را نیز تعریف می‌کنیم. به‌این‌ترتیب هیچ‌گونه ابهامی باقی نمی‌ماند.

حالت دیگری از خطا هنگامی رخ می‌دهد که اصطلاحاً واحدهای مشابه را با هم می‌زنیم و حذف می‌کنیم. در این حالت یک عدد ظاهراً بی‌بعد باقی می‌ماند، اما برای تفسیر این عدد، واحدها خیلی مهم هستند. برای مثال، ممکن است محتوای آب جسمی ۰٫۲۹ یا ۲۹ درصد گزارش شود. درحالی‌که محتوای آب $۰٫۲۹ m^3.m^{-3}$ می‌تواند کاملاً با محتوای آب $۰٫۲۹ Kg.Kg^{-3}$ متفاوت باشد. با بیان واحدها در زمان حذف کردن می‌توان از وقوع این نوع اشتباهات اجتناب کرد. در این کتاب برای بیان غلظت گاز از سهم *مولی* $mol.mol^{-1}$ استفاده می‌کنیم. این واحدها اگرچه به‌نظر می‌رسد که با هم حذف شده‌اند، ولی درواقع معرّف تعداد مول‌های یک گاز خاص، مثلاً بخار آب در یک مول هوا هستند. بنابراین در کنار