



## مدل سازی محیط زیست

اندرو، فورد

ترجمه:

دکتر مهدی کلاهی

عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

سرشناسه: فورد، فردریک اندرو.  
 عنوان و نام پدیدآور: مدل سازی محیط زیست / اندرو فورد؛ ترجمه مهدی کلاهی.  
 مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۷.  
 مشخصات ظاهری: ۵۴۳ ص. مصور، جدول، نمودار.  
 فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ شماره ۷۰۲.  
 شابک: ISBN: 978-964-386-377-7  
 وضعیت فهرست نویسی: فیبا.  
 یادداشت: عنوان اصلی: Modeling the environment, 2 end ed., c2010.  
 یادداشت: واژه نامه. کتابنامه.  
 موضوع: علوم زیست محیطی -- شبیه سازی کامپیوتری. Environmental sciences -- Computer simulation.  
 شناسه افزوده: کلاهی، مهدی، ۱۳۵۷ - مترجم.  
 شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد.  
 رده بندی کنگره: ۱۳۹۷ ۹ف۲ش/GE۴۵  
 رده بندی دیویی: ۶۲۸  
 شماره کتابشناسی ملی: ۵۳۲۱۳۴۱

### مدل سازی محیط زیست

پدیدآورنده: اندرو فورد  
 ترجمه: دکتر مهدی کلاهی  
 ویراستار علمی: دکتر آریتا فراشی  
 مشخصات: وزیری، ۵۰۰ نسخه، چاپ اول، تابستان ۹۷  
 چاپ و صحافی: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد  
 بها: ۴۳۰/۰۰۰ ریال  
 حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.  
 مراکز پخش:



فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، سازمان مرکزی، جنب سلف یاس تلفن: ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)  
 مؤسسه کتابیران: تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی نژاد، بین خیابان فروردین و اردیبهشت، شماره ۲۳۸ تلفن: ۶۶۴۹۴۴۰۹-۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)  
 مؤسسه دانشسیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲ تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰-۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: [press@um.ac.ir](mailto:press@um.ac.ir)

## فهرست مطالب

۷	..... سخن مترجم
۹	..... پیشگفتار
۱۷	..... <b>بخش اول: مدل سازی مقدماتی</b>
۱۹	..... فصل اول: مقدمه
۳۹	..... فصل دوم: شروع کار با نرم افزارهای استلا و ونسیم
۵۷	..... فصل سوم: موجودی ها و جریان ها به عنوان قالب های سازنده مدل های پویایی شناسی سیستمی
۶۹	..... فصل چهارم: انباشتگی جریان ها
۸۱	..... فصل پنجم: جریان های آب در آبخیز مونیو
۱۰۵	..... فصل ششم: نمودارهای تعادل
۱۲۳	..... فصل هفتم: رشد S شکل
۱۳۷	..... فصل هشتم: پویایی شناسی بیماری همه گیر
۱۵۳	..... فصل نهم: بازخورد اطلاعات و نمودارهای حلقه سببی
۱۸۱	..... فصل دهم: خودپایداری
۱۹۳	..... فصل یازدهم: کنترل دما در جهان گل های مینا
۲۱۱	..... فصل دوازدهم: نشانه گرفتن خال هدف
۲۲۳	..... <b>بخش دوم: مدل سازی متوسط</b>
۲۲۵	..... فصل سیزدهم: فرایند مدل سازی
۲۵۳	..... فصل چهاردهم: استفاده پیشرفته تر از نرم افزارهای استلا و ونسیم
۲۷۹	..... فصل پانزدهم: ماهی آزاد شمال غرب اقیانوس آرام
۳۰۷	..... فصل شانزدهم: مدیریت برنامه تخفیف هزینه برای وسایل نقلیه پاک تر
۳۲۹	..... فصل هفدهم: تله های مدل سازی
۳۴۵	..... فصل هجدهم: مقدمه ای بر رفتار چرخه ای
۳۵۷	..... فصل نوزدهم: چرخه ها در ساخت و ساز املاک و مستغلات
۳۷۳	..... فصل بیستم: چرخه ها در جمعیت های شکارچی و شکار

۳۹۱	فصل بیست و یک: اضافه جهش در جمعیت گوزن کایباب
۴۲۵	فصل بیست و دو: ددت در اقیانوس
۴۳۳	فصل بیست و سه: دی‌اکسید کربن در جو
۴۴۹	فصل بیست و چهار: دورنمای پایانی
۴۶۳	<b>پیوست‌ها: مرور و روش‌های پیشرفته</b>
۴۶۵	پیوست الف: مرور واحدها
۴۷۴	پیوست ب: مرور رشد نمایی
۴۸۱	پیوست پ: انتخاب نرم‌افزار و مدل‌های فردمحور
۴۹۷	پیوست ت: تحلیل حساسیت و عدم قطعیت
۵۰۸	پیوست ث: گنجانیدن روش‌های دیگر در یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی
۵۱۳	پیوست ج: پویایی‌شناسی کوتاه‌مدت و بلندمدت در یک مدل تکی
۵۲۰	پیوست چ: پویایی‌شناسی فضایی و نمایش‌های فضایی
۵۳۱	<b>منابع</b>
۵۳۹	<b>نمایه</b>

## سخن مترجم

کتاب *مدل‌سازی محیط‌زیست*، نخستین کتابی است که برای آموزش دانشجویان در زمینه مدل‌سازی مسائل محیط‌زیستی به رشته تحریر درآمده است. ویرایش دوم کتاب، از پشتوانه یک دهه تجربه استادانی که ویرایش اول کتاب را آموزش می‌دادند، سود برده است. مخاطب هدف نخستین ویرایش کتاب، دانشجویان کارشناسی علوم محیط‌زیست و برنامه‌ریزی منطقه‌ای بودند. اما به دلیل استفاده از نمونه‌ها و مدل‌های ملموس‌تر، مخاطب‌پذیری بسیار بیشتری را از آن خود کرد. کتاب، به معرفی چندین نرم‌افزار مرتبط با مسائل مدل‌سازی می‌پردازد، اما اقبال بیشتر به نرم‌افزارهای استلا و ونیسم است. کتاب حاضر، ضمن مناسب بودن جهت تدریس در دبیرستان تا تحصیلات تکمیلی، از این توانایی برخوردار است که برای دانشجویان و پژوهشگران علاقه‌مند در بسیاری از رشته‌ها، راهنما و راهگشا باشد.

مسائل اصلی محیط‌زیست زمان حاضر، فراوان، قابل توجه و به‌طور ذاتی میان‌رشته‌ای (دربرگیرنده رشته‌های مختلف علمی) و دارای پویایی‌های پیچیده‌ای هستند. قطعاً این گونه مسائل، شناخت و تمایل ما را به مبارزه خواهند طلبید، زیرا به‌علت پویایی‌های پیچیده‌ای که دارند نخواهیم توانست آنها را در ذهن خود شبیه‌سازی کنیم. از این رو، این مسائل نیازمند بیشترین تلاش در هر دو زمینه کمی و کیفی مدل‌سازی هستند. این گفته بدین معنی است که ایده‌های برآمده از مباحث کیفی و مفهومی را باید از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای مورد آزمون قرار داد. این کتاب، کاربرد مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستمی را در مثال‌هایی که دامنه آنها از محلی تا جهانی گسترده است، به نمایش می‌گذارد. این مدل‌ها می‌توانند باعث افزایش شناخت ما از مسئله شوند و همچنین به گروه‌ها و افرادی که موظف به حل مسئله هستند، کمک نمایند. مدل‌ها به ما در سازمان‌دهی بهینه اطلاعات، طراحی مفیدتر ساختارها و سیاست‌ها، درک آسان‌تر، انتخاب بهتر، تصمیم مناسب‌تر و در یک کلام، به بهتر فکر کردن، کمک می‌کنند. مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی، طبق هشت مرحله ذکر شده در کتاب، ایجاد می‌شوند و به صورت گام‌به‌گام بهبود می‌یابند و به پیچیدگی آنها تا آن هنگام که شبیه‌سازی‌ها، الگوی پویای مورد مطالعه را نشان دهند، اضافه می‌شود.

کتاب حاضر، با گردآوری مجموعه‌ای از علوم در یک بسته میان‌رشته‌ای جهت تعدادی از مدل‌ها، به درک بهتر مسائل جهانی محیط‌زیست کمک می‌کند. توانایی ترکیب ایده‌های رشته‌های مختلف یکی از مفیدترین جنبه‌های رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی برای سیستم‌های محیط‌زیستی است که در چندین مورد

این توانایی در کتاب به نمایش گذاشته شده است. مخاطب محترم با توجه به تخصص خود و با در اختیار داشتن داده‌ها و اطلاعات مربوط به یک سیستم می‌تواند آنها را وارد فرایند مدل‌سازی نماید. اصول مدل‌سازی کتاب، به مخاطب محترم در ترکیب دانش خود، کمک خواهد کرد. حتی می‌تواند تنها با مطالعه ایده‌ها، مفاهیم و شکل‌های این کتاب، به دانش کلی در مورد مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستمی پی ببرد و دریابد که با استفاده از مدل‌سازی، چه کارهایی می‌تواند انجام دهد. چنانچه مخاطب محترم تمایل به آگاهی بیشتر از نحوه ساختن یک مدل و آزمون آن داشته باشد، برخی از فصل‌های کتاب به شکل یک کتابچه راهنما به رشته تحریر درآمده است که در آنها، هر مدل به صورت گام‌به‌گام توضیح داده شده است، به نحوی که می‌توان هم‌زمان با مطالعه آن فصل‌ها، نسخه نرم‌افزاری را اجرا کرد. درنهایت اینکه، خواننده در عرض چند هفته، قادر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی خواهد بود.

کتاب با داشتن تارنمایی فعال (<http://public.wsu.edu/~forda/>)، به ارائه توضیحات تکمیلی، تمرین‌های بیشتر و مدل‌های جدیدتر پرداخته است. در قسمت اشتباه‌های چاپی این تارنما، در ترجمه حاضر، موردهای تصحیح‌شده اشتباه‌ها، ذکر شده‌اند. امید آنکه ترجمه حاضر مورد استفاده بهینه تمام خوانندگان عزیز قرار گیرد؛ و کلام آخر اینکه:

جهان را چو باران به بایستگی روان را چو دانش به شایستگی

(فردوسی، شاهنامه چاپ بروخیم)

مهدی کلاهی

MahdiKolahi@ferdowsi.um.ac.ir

## پیشگفتار

هم‌اکنون ماه می سال ۲۰۰۹ میلادی است که کتاب حاضر برای چاپ آماده می‌شود. روزنامه‌های این ماه مملو از گزارش‌هایی در مورد مسائل پیچیده و چالش‌برانگیزند. موضوع‌هایی چون تغییر سریع اقلیم و تغییرات خطرناکی که در صورت عدم کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای، موردانتظار هستند. درباره افزایش مرگ‌ومیرهای ناشی از آنفولانزای خوکی می‌خوانیم و هشدار داده می‌شود که برای یک بیماری جهانی، آماده شویم. گزارش‌های فراوانی درباره رونق و کساد در املاک و مستغلات وجود دارد و گفته می‌شود که خود را برای ورشکستگی‌های بیشتری، قبل از بهبودی بازار، آماده کنیم. این گزارش‌ها، با بیان علت‌های زیر بنایی این مسائل، ما را حیرت‌زده می‌کنند و با ارائه سیاست‌هایی که می‌تواند به رفتار بهتری در آینده هدایت نمایند، بر سردرگمی ما می‌افزایند.

### شناخت پیچیدگی پویایی<sup>۱</sup>

تغییر اقلیم، بیماری‌های جهانی و رونق و کساد در املاک و مستغلات، پویایی‌های پیچیده‌ای هستند که درک ما را به چالش می‌کشند. نمی‌توانیم پیامدهای پویایی سیاست‌هایی که امروزه انتخاب می‌شوند را پیش‌بینی کنیم، به‌ویژه آن هنگام که تأخیرهای طولانی بین عمل ما و واکنش‌های سیستم وجود دارد. همچنین درک ما به علت پیچیدگی فرایندهای بازخورد که رفتار سیستم را کنترل می‌کنند، محدود است. ممکن است اقدامات ما تا حدی به وسیله پاسخ‌های داخلی سیستم بی‌اثر شوند و مقاومت آشکار سیستم در برابر مداخله‌های ما، گیج‌کننده باشد. مجزا کردن اثرات تأخیرها و بازخوردهای متعدد، فراتر از توانایی‌های شناختی ما است؛ بنابراین گذشته را برای یافتن درس‌هایی جست‌وجو می‌کنیم؛ اما چگونه باید الگوهای گذشته در تغییر اقلیم، بیماری‌های جهانی و چرخه‌های رونق و کساد را تفسیر کنیم؟ شناخت ما از پویایی الگوهای تاریخی توسط همان پیچیدگی‌هایی محدود می‌شوند که تفکر درباره آینده را مشکل می‌سازند. تفسیرهای زیادی از رفتار گذشته وجود دارد و از گرایش‌های گذشته و مسائل فعلی درک محدودی داریم.

### فرض این کتاب

کتاب بر این فرض استوار است که مدل‌سازی می‌تواند به شکل‌گیری درکی از مسائل پیچیده کمک کند،

مانند مسائلی که در عناوین خبرها ظاهر می‌شوند. ما یک مدل ریاضی برای ضبط روابط متقابل مهم ایجاد می‌کنیم و شبیه‌سازی‌هایی را برای مشاهده الگوی پویایی اجرا می‌کنیم. توانایی‌های شناختی ما محدود است؛ بنابراین باید شگفتی‌هایی را در شبیه‌سازی‌ها انتظار داشته باشیم. در واقع ممکن است شبیه‌سازی ما درست برخلاف آنچه انتظار داریم به نظر برسد. سیاست‌هایی که تصور می‌شوند سیستم را بهتر می‌سازند، ممکن است آن را بدتر از قبل سازند. سیاست‌هایی که تصور می‌شوند برنده‌ها و بازنده‌هایی ایجاد کنند، ممکن است در بلندمدت، نتایج برد-برد به بار آورند. این شگفتی‌ها برای درک بهتر، مهم هستند.

### مثال‌هایی از رشته‌های متعدد

روش‌های شرح داده‌شده در کتاب، در انواعی از مسائل تجاری و محیط‌زیستی به کار رفته‌اند از جمله مسائل تغییر اقلیم (فصل ۲۳)، بیماری‌های همه‌گیر (فصل ۸) و رونق و کساد در املاک و مستغلات (فصل ۱۹). این روش‌ها در فصل‌های مقدماتی توضیح داده می‌شوند و سپس برخی از کاربردهای آنها در مسائل جدی محیط‌زیست مورد بحث قرار می‌گیرند. در هر مورد، در نتیجه نحوه تأثیر متقابل انسان با محیط‌زیست، مسئله‌ای پدید می‌آید. مثال‌های کتاب بر محور الگوهای اساسی مانند رشد نمایی و نوسان‌ها سامان‌دهی می‌شوند. نموداری متشکل از شش شکل بنیادی در سراسر کتاب ظاهر می‌شود. این نمودارها یادآور فرض مدل‌سازی سیستم‌ها هستند یعنی: ادغام موجودی‌ها<sup>۱</sup>، جریان‌ها<sup>۲</sup> و بازخوردها<sup>۳</sup> که الگوی پویایی در یک سیستم را توضیح می‌دهد، می‌تواند به ما در شرح همان الگو در سیستم دیگری کمک نماید.

کتاب قابلیت انتقال ایده‌های سیستم‌ها را به بسیاری از رشته‌ها نشان می‌دهد. چرخه‌هایی را در بازارهای مسکن و چرخه‌هایی را در جمعیت‌های شکار-شکارچی مشاهده خواهید کرد. شما احیای حوضه‌های آبخیز در معرض تهدید و جمعیت ماهی‌های در معرض تهدید را شبیه‌سازی خواهید کرد. همچنین گرایش‌های خود تعادلی در سیستم‌های اعضاء بدن و در سیستم اقلیم را خواهید آموخت. این نمونه‌ها به وسیله مجموعه متنوعی از مثال‌ها تشریح می‌شوند که در تارنمای کتاب<sup>۴</sup> ذکر شده‌اند. مثال‌های کاربردی تارنمای این کتاب، به انسان‌شناسی، بوم‌شناسی<sup>۵</sup>، اقتصاد، وراثت، ریخت‌شناسی<sup>۶</sup>، آب‌شناسی<sup>۷</sup>، دریاچه‌شناسی<sup>۸</sup>، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و بهره‌برداری منابع می‌پردازند.

### مدل‌سازی میان‌رشته‌ای<sup>۹</sup>

چالش‌های اصلی محیط‌زیست زمان ما، به‌طور ذاتی، میان‌رشته‌ای<sup>۱۰</sup> هستند. اگر مدل‌ها از تأثیرات

1- Stocks  
2- Flows  
3- Feedbacks  
4- <http://public.wsu.edu/~forda/>  
5- Ecology  
6- Geomorphology  
7- Hydrology  
8- Limnology  
9- Interdisciplinary Modeling



بازخوردی که مرتبط کننده سیستم‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی در یک سیستم یکپارچه هستند پیروی کنند، می‌توانند به ما در درک بهتر چالش‌ها کمک نمایند. کتاب حاضر دورنمای بازخورد و روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویایی‌شناسی سیستمی<sup>۱</sup> را شرح می‌دهد. پویایی‌های سیستم به‌خاطر شفافیت در نمایش موجودی‌ها، جریان‌ها و فرایندهای بازخوردی که جریان‌ها را کنترل می‌کنند، ارزشمند است. این شیوه زبان مشترکی فراهم می‌کند که پژوهشگران از همه زمینه‌ها می‌توانند آن را بفهمند و از این رو به‌ویژه در مدل‌سازی میان‌رشته‌ای، مفید است. پویایی‌شناسی سیستمی برای مدل‌سازی مشارکتی بسیار مناسب بوده و به یک بستر کلی برای مدل‌سازی مشارکتی سیستم‌های محیط‌زیستی تبدیل شده است.

کتاب، فرصت‌هایی را برای کاربرد مدل‌ها در محیط‌زیست و یا رشته‌های مربوط به آن فراهم می‌آورد. بهترین راه برای شروع، ساخت و بازیابی مدل‌های کتاب است. سپس تمرین‌های پایان هر فصل، پیوست‌ها و تمرین‌های اضافه تارنمای این کتاب را انجام دهید. یک شیوه مطلوب جهت درک بیشتر موضوع، گسترش و ارتقای یکی از مدل‌هاست. اگر در حال تحصیل در یک کلاس تک‌ترمی می‌باشید (یعنی ۱۵ هفته)، باید زمان برای تمرین با یکی از مدل‌های میان‌رشته‌ای را داشته باشید. این مدل‌ها می‌توانند نشان‌دهنده بینش به‌دست آمده از ترکیب چندین رشته در یک مدل باشند، مدلی که در درون بسیار به‌هم پیوسته است.

### چه کسی باید مدل‌سازی را بیاموزد؟

کتاب *مدل‌سازی محیط‌زیست* جهت تدریس در دبیرستان تا تحصیلات تکمیلی و برای استفاده در یک کلاس معمولی، کلاس‌های مکاتباتی (از راه دور) و در بسیاری از ترکیبات آموزشی دوگانه مناسب است. مخاطب هدف اولین ویرایش، دانشجویان کارشناسی علوم محیط‌زیست و برنامه‌ریزی منطقه‌ای بودند؛ اما مشخص گردید که مخاطب‌پذیری آن بسیار بیشتر از این است. خوانندگان اولین ویرایش کتاب، از دانش‌آموزان مقطع راهنمایی تا مدیران بازنشسته بودند. بسیاری از خوانندگان قادر بودند مفاهیم و نرم‌افزار را بدون دستور کار فرا بگیرند. اکثر مخاطبان به‌صورت گروهی بیشتر می‌آموزند، به‌ویژه اگر به‌صورت گروهی با نرم‌افزار مدل‌سازی تمرین کنند.

ده‌ها سال تدریس به من آموخت که دانشجویان به شیوه‌ای متفاوت از دوران دانشجویی‌ام، به مدل‌سازی نظر دارند. پرسش‌های دانشجویان مرا به زوایای متفاوت استفاده از مدل‌ها رهنمون ساخت. ویرایش حاضر کتاب، دیدگاه یک دانشجو را در قالب «پرسش‌هایی از جو» معرفی می‌کند که به‌صورت متن‌های حاشیه‌ای در فصل‌های کتاب آمده است. جو یک دانشجوی فرضی است که پرسش‌هایی که اغلب دانشجویان در کلاس‌هایم مطرح کرده‌اند را بیان می‌کند. پرسش‌های او و جواب‌های من، به گسترش درک شما و تشویق آنچه دیگران ممکن است درباره مدل‌سازی بیندیشند، کمک خواهد کرد.

## پیش‌زمینه ریاضیاتی شما

اولین پرسش جو، پرسشی است که اغلب اوقات در آغاز کلاس درس می‌شنوم:

آیا قبل از اینکه بتوانم مدل‌سازی را فراگیرم، باید حساب دیفرانسیل و انتگرال<sup>۱</sup> را یاد بگیرم؟

این پرسش اغلب توسط دانشجویانی که درس حساب دیفرانسیل و انتگرال را نگذرانده‌اند یا دانشجویانی که آن را سال‌های قبل فرا گرفته اما اکنون فراموش کرده‌اند، مطرح می‌شود. برخی دانشجویان فهم ریاضیات را سخت و دشوار درمی‌یابند. گاهی اوقات به من می‌گویند که مدل‌سازی را افراد دیگری باید فراگیرند نه ما. از طرف دیگر، بسیاری از دانشجویان تسلط خوبی به حساب دیفرانسیل و انتگرال دارند و این پرسش را مطرح می‌کنند که آیا مدل‌سازی محیط‌زیست، فرصت آنها برای به کارگیری حساب دیفرانسیل و انتگرال در مورد مسئله‌های محیط‌زیست است یا خیر؟

حساب دیفرانسیل و انتگرال ممکن است اولین مطلب در ذهن دانشجو باشد، باین حال موضوع محوری این کتاب نیست. کتاب برای خوانندگان با گستره وسیعی از پیش‌زمینه‌های ریاضی، به رشته تحریر درآمده است. نیاز فزاینده‌ای به مجموعه‌ای از پروژه‌های مدل‌سازی وجود دارد که به افراد کمک می‌کند تا به صورت گروهی آنها را فراگیرند. این پروژه‌ها از کارشناسان در چندین رشته، از کارکنان سازمان و از افراد ذی‌نفع با دانش از این سیستم، بهره می‌برند. این کتاب با در نظر داشتن این افراد نوشته شده است. من بر این باورم که هر فرد می‌تواند مدل‌سازی را فراگیرد و این کتاب موانع ریاضی که بسیاری از افراد را از انجام این امر بر حذر می‌دارد را به حداقل می‌رساند.

شیبه‌سازی رایانه‌ای به طور مشخص، شکلی از تحلیل کمی است، بنابراین شما به دانش ریاضیات نیاز دارید و باید تمایل داشته باشید تا در مورد اعداد و واحدهای اندازه‌گیری آنها فکر کنید. شاید در مورد واحدها در دبیرستان مطالبی آموخته باشید و مفید است تا آنچه را که فرا گرفته‌اید مرور نمایید (پیوست الف). همچنین سودمند است تا واحدها را در نمودارهای تعادل (فصل ۶) بررسی کنید. نمودارهای تعادل نیز روش خوبی برای ایجاد آشنایی با مقادیر عددی مدل هستند. همچنین فرض من این است که شما در مورد نمودارها فرا گرفته‌اید. این دانش مهم است، زیرا صدها نمودار در این کتاب وجود دارد. از مطالعه دقیق نمودارها مطمئن شوید و توجه ویژه‌ای به مقیاس‌های عمودی داشته باشید؛ و در تفکر در مورد بهترین ترکیب متغیرها و مقیاس‌ها در زمان ایجاد نمودارهای خود، عجله نکنید.

همچنین فرض می‌کنم که شما جبر مقدماتی را فرا گرفته‌اید. این دانش مهم است، زیرا مدل‌ها از جبر برای توضیح جریان‌ها استفاده می‌کنند. من بر این باورم که باید به دنبال شفافیت باشیم و شفاف‌ترین مدل‌ها، مدل‌هایی هستند که معادله‌های جبری آنها را می‌توان با یک بررسی ساده حدس زد. باید نام‌های شناخته شده‌ای برای متغیرها انتخاب کنیم و باید بتوانیم معادله‌ها را با ترکیبی از جمع، تفریق، ضرب یا

تقسیم بنویسیم. این کتاب به دنبال شفافیت در هر فصل و متعهد به کارگیری جبر ساده<sup>۱</sup> است. در واقع، تنها چند مثال وجود دارند که معادله‌های جبری در آنها فراتر از جمع، تفریق، ضرب یا تقسیم می‌روند. کتاب حاضر به آموزه دیفرانسیل و انتگرال، معادله‌های تفاضلی، معادله‌های تفاضلی جزئی، تحلیل آماری یا برنامه‌نویسی رایانه‌ای، نیازی ندارد. دانش این مباحث، مورد نیاز نیست و برای توانایی شما، جهت به کارگیری مدل‌سازی هم الزامی نیست. نیاز اصلی، آگاهی شما از فرایندهای بازخورد در سیستم خودتان است. مدل‌های موجود در این کتاب به شیوه نمایش روی رایانه ساخته شده‌اند. شما از دانش خود برای انتخاب ترکیب مناسب موجودی‌ها، جریان‌ها و بازخوردها استفاده خواهید کرد. کار خسته‌کننده تولید نتایج شبیه‌سازی به عهده رایانه است. چالش شما، استفاده از نتایج شبیه‌سازی برای فهم مسئله پویای خودتان است.

### پشتیبانی تارنما برای استادان و دانشجویان

بسیاری از استادان به من می‌گویند که برای نخستین بار است که مدل‌سازی را تدریس می‌کنند و اولین چیزی که نیاز دارند دسترسی به شکل‌های این کتاب است. این شکل‌ها را استادان در بخش تعلیم‌دهندگان تارنمای کتاب خواهند یافت. این بخش همچنین پاسخ‌هایی برای تمرین‌ها ارائه می‌کند. تارنمای کتاب، برای دانشجویان نیز مفید است. آنها تمرین‌هایی جدا از آنچه در پایان هر فصل آمده، مشاهده خواهند کرد و از تمرین‌های متفاوت در زمینه‌های انسان‌شناسی تا بهره‌برداری از منابع، سود خواهند بود.

بسیاری از مدل‌های موجود در این کتاب را می‌توان به شیوه مرحله‌به‌مرحله، طبق شرحی که در فصل‌ها آمده، ایجاد کرد. رونوشت‌های این مدل‌ها در بخش تعلیم‌دهندگان تارنمای کتاب در دسترس است. شرح کلی چند مدل از مدل‌های موجود آمده است، بنابراین خوانندگان نمی‌توانند خود آنها را ایجاد کنند. این مدل‌ها برای استفاده دانشجویان و استادان در تارنمای کتاب ارائه شده است. اطلاعات موردی نیز برای تمام خوانندگان در دسترس است. نوشته‌هایی در مورد رودخانه مونو، جمعیت ماهی آزاد تک‌کاین و شبیه‌ساز رودخانه ایداکون تا تاریخ ۲۰۰۹ میلادی، از مهم‌ترین نوشته‌ها هستند.

نرم‌افزارهای استلا و ونسیم مدام در حال ارتقاء هستند و تارنمای کتاب برای همگام بودن با نرم‌افزار در حال ارتقاء، مناسب است. قطعاً اشتباه‌های چاپی و خطاهای دیگری در کتاب وجود خواهند داشت و تارنمای کتاب، فهرستی از خطاها را ارائه خواهد کرد. اگر چیزی اشتباه است، فهرست را بررسی کنید تا مشاهده نمایید که آیا خطا توسط خواننده قبلی گزارش شده است یا خیر؟ اگر پاسخ خیر است، خطا را گزارش دهید و آن را به فهرست اضافه کنید. همچنین از نظرات در مورد تمرین‌ها و پاسخ‌دهی استقبال می‌کنم. تارنما با گذر زمان توسعه می‌یابد و بازخورد شما به رشد آن در جهت سودمند بودن، کمک خواهد کرد.

## تازه‌های ویرایش دوم

ویرایش دوم کتاب، از پشتوانه یک دهه تجربه استادانی که ویرایش اول این کتاب را تدریس کرده‌اند، سود می‌برد. در واقع بسیاری از بهترین تمرین‌های موجود در ویرایش حاضر، از تدریس خوب استادان قبلی و دانشجویان آنها توسعه یافته‌اند. مدرسان نیز روش‌های تدریس خود را با من به اشتراک گذاشته‌اند و من تلاش کرده‌ام تا فصل‌ها را به‌منظور سودبری از تجارب آنها، دوباره مرتب نمایم.

بسیاری از استادان در مورد ترکیب زمانی که باید برای فراگیری روش‌های مدل‌سازی در برابر فراگیری نرم‌افزار مدل‌سازی صرف شود، متعجب هستند. نرم‌افزارهای استلا و ونسیم فراگیرتر و یادگیری آنها ساده‌تر شده است. هر دو این نرم‌افزارها دارای اسناد برخط عالی هستند؛ بنابراین قسمت اعظم کتاب به مفاهیم کلی، روش‌های مدل‌سازی و برنامه‌های مشخص، اختصاص می‌یابد. با این حال، بر این باورم که اضافه کردن آموزش مرحله‌به‌مرحله نرم‌افزار نیز مفید است. چندین فصل برای کمک به خوانندگان جهت کار روی رایانه‌های خودشان اختصاص یافته است. این روش در فصل‌های دوم و چهاردهم و قسمت «بخوانید و تأیید کنید» فصل شانزدهم اتخاذ شده است. یک دهه تدریس در فاصله ویرایش اول و دوم کتاب، سهمی بسزا در آگاهی بیشتر از مشکلات فنی موجود در ساخت مدل، داشته است. در مسیر ساخت، تله‌هایی که از آنها به‌عنوان خطرات پنهانی برای مدل‌ساز ناآگاه یاد می‌شود، وجود دارند. فصل هفدهم برخی از رایج‌ترین تله‌های شناسایی شده از گفت‌وگوها با گستره وسیعی از مدرسان، دانشجویان و متخصصان را شرح می‌دهد. هر تله با یک مدل ساده و رفتار مشکل‌آفرین آن نشان داده می‌شود. ساخت‌های متناوب برای نشان دادن نحوه اجتناب از این مسئله ارائه می‌شوند.

دهه گذشته شاهد پیشرفت‌های مهمی در برنامه‌های پویایی‌شناسی سیستمی بوده است. به‌ویژه گسترش مدل‌سازی مشارکتی، مورد تشویق قرار گرفته است (همچنان که در فصل‌های ۱۳ و ۲۴ تشریح شده است). کاربرد متمادی پویایی‌شناسی سیستمی در طرح‌های میان‌رشته‌ای هم مدنظر قرار گرفته است. به‌نظر من مدل‌های میان‌رشته‌ای دارای بالاترین توانایی جهت بصیرت ژرف هستند و به همین خاطر، مدل‌های میان‌رشته‌ای را موضوع کتاب حاضر قرار داده‌ام.

همچنین پیشرفت‌های مهمی در نرم‌افزار و روش‌های اولیه اتفاق افتاده است. دهه گذشته شاهد توسعه محدود و وسیعی از نرم‌افزار آیکون محور<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی موجودی-و-جریان (پیوست پ) بوده است. هم‌اکنون پیشرفت‌های اخیر در تحلیل فواصل نامشخص و جست‌وجو برای نهاده‌های کلیدی، در دسترس گروه وسیعی از مدل‌سازان است (پیوست ت). دهه گذشته همچنین شاهد توانایی بهینه جهت ترکیب پویایی کوتاه‌مدت در مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی با روندهای طولانی‌مدت بوده است (پیوست‌های ث و ج) و توسعه‌های نرم‌افزاری اخیر، توانایی نمایش فضایی نهاده‌ها و خروجی‌های مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی را بهبود بخشیده‌اند (پیوست چ).

1- Icon-based software

## چشم‌انداز مؤلف

یکی از استادان موردعلاقه‌ام تمام دانشجویانش را مجبور می‌کرد تا انگاره‌های خود از نحوه عملکرد سیستم‌های محیط‌زیستی را بازتاب دهند. استدلال او این بود که این انگاره‌ها بر روش تفکر ما غلبه می‌کنند، به این معنی که آنها پرسش‌هایی را که ما می‌پرسیم، افرادی را که به آنها گوش می‌دهیم، مدل‌هایی را که می‌سازیم، داده‌هایی را که جست‌وجو می‌کنیم و از سیاست‌هایی که پشتیبانی می‌کنیم را شکل می‌دهند. او تمام دانشجویانش را مجبور می‌کرد تا انگاره‌های متضمن خود را پررنگ کنند، در این صورت، گروه‌های دانشجویان، از جایی که هم‌گروه‌هایشان می‌آیند، آگاه‌تر خواهند بود. زمانی که من دانشجو بودم این یک توصیه خوب بود و اکنون که من این کتاب را به شما ارائه می‌کنم نیز یک توصیه است.

تفکر من در مورد سیستم‌های محیط‌زیستی به شدت تحت تأثیر ایده‌های منتشرشده توسط جی فارستر و همکاران در دانشکده مدیریت اسلون در MIT است. درک آنها از سیستم‌ها و ارزش شبیه‌سازی رایانه‌ای، متضمن آن چیزی است که در این کتاب خواهید خواند. پویایی‌شناسی سیستمی به میزان زیادی در پژوهش و مشاوره‌های خود من مفید بوده است و من تحت تأثیر کار مؤثر بسیاری از متخصصان پویایی‌شناسی سیستمی قرار گرفته‌ام. این روش بسیار سودمند است و ما به افراد مجربی نیاز داریم تا آن را در مورد مسائل جدی محیط‌زیست زمانه خود به کار ببریم.

در جوانی، تفکر من در مورد سیستم‌های محیط‌زیستی توسط اثر گارت هاردین بانام «ریست‌شناسی: اصول و دلالت‌های آن» شکل گرفت. عقاید او در مورد تعادل حیاتی این استنباط عمیق را شکل داده است که تا به امروز استوار مانده است و دید او از عرصه تعادل حیاتی در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. شما همچنین می‌توانید تأثیر او بر چندین مورد در این کتاب را از خلاصه موجود در جدول ۱-۱۰ مشاهده کنید.

تفکر خود من معطوف به سیستم‌ها بیشتر و بیشتر در مورد نقش تأخیرها است. شاید این نتیجه کلی مطالعات سیاستی است که در آنها توانایی شبیه‌سازی اثر تأخیرها به‌عنوان امری کلیدی برای فهم بهتر پدیدار شده است. تأخیرها نقشی دائمی در این کتاب ایفا می‌کنند که شما در فصل ۱۵ (تأخیرهای چرخه حیات ماهی آزاد)، فصل ۱۸ (نوسانات)، فصل ۱۹ (تأخیرها در ساخت املاک)، فصل ۲۲ (تأخیرها در تجزیه د.د.ت) و فصل ۲۳ (تأخیرها در حذف مؤثر CO<sub>2</sub> از جو) مشاهده خواهید کرد.

با نگاه به سالیان قبل، چه بسا با تفکر به آزمون رانندگی در نوجوانی به موضوع تأخیرها تحریک شده‌ام. این آزمون توسط پدرم در یک روز برفی در شهر صحرايي مان سامان‌یافته بود (ما در شرق سیرا نوادا زندگی می‌کردیم که سرزمینی بود با برف و بارندگی اندک). من و دوستانم مشغول یادگیری رانندگی بودیم و والدینمان به ما می‌گفتند که به‌دقت بر روی خیابان‌های صاف رانندگی کنیم. پدرم می‌توانست دریابد که این توصیه برای نوجوانانی که در مورد اسب بخار و اندازه موتور صحبت می‌کنند، کارساز

نیست. بنابراین او ما را وادار می‌کرد که در محل آموزش که مملو از بشکه‌های پلاستیکی بود به‌نحوی که نیازمند دور زدن و ترمز بود، به رانندگی بپردازیم. این آزمایش خیلی ساده به‌نظر می‌رسید تا اینکه اولین فرد خودرو والدینش را به یک ستون کوباند که نتیجه آن پرتاب شدن دو بشکه به بیرون بود. بقیه به اشتباه او خندیدیم و تعجب کردیم که آیا او توصیه «مراقب باش» را شنیده است یا خیر؟ من نتیجه‌گیری کردم که دوستم یا توصیه را نشنیده یا اینکه در طول آزمایش رانندگی به بشکه‌ها توجه نکرده است. هر یک از دوستان با اطمینان این دوره را دنبال می‌کردند و هر یک از آنها به‌سرعت، کنترل خودرو را از دست می‌دادند و بشکه‌ها را در طول مسیر به هوا پرتاب می‌کردند. من آخرین نفری بودم که این آزمون را تجربه می‌کردم، بنابراین از شکست‌های دیگران، درس‌ها آموخته بودم. من فرمان را به دست گرفتم و انتظار داشتم که در طول مسیر مانع‌ها، با سرعت اندکی بدون هیچ‌گونه مشکلی فرمان را بچرخانم. شاید شما بتوانید حدس بزنید که چه اتفاقی افتاد - بعد از اولین بشکه به سمت ستون رفتم و بشکه‌های دیگر را نیز به هوا پرتاب کردم.

همه از رانندگی خود خجالت‌زده شده بودیم و شرمندگی من از همه بیشتر بود، زیرا نتوانستم از تجربه دوستانم درس بگیرم. آنچه به یاد می‌آورم، توضیحات سرسری ناکامی‌های دوستانم است. من به‌سادگی، تجربه آنها را به‌عنوان امری که برای من رخ نداده است، محسوب کردم. آزمون رانندگی نشان داد که همه ما به‌نحو فاحشی تأخیر طولانی برای تغییر جهت خودرو در زمانی که چرخ‌ها اصطکاک کمتری روی سطح داشته‌اند را دست‌کم ارزیابی کرده بودیم. ما همه استنباط اشتباهی از سرعت‌پایین ضروری برای حرکت مطمئن خودرو روی سطح شیب‌دار داشتیم. پدرم در پایان آزمون چیزی به من نگفت؛ اما او همانند اسکار وایلد شاید به این فکر می‌کرد که تجربه چیزی است که بدون عمل به‌دست نمی‌آید.

داستان آزمون رانندگی را برای مبالغه تأخیرها و دشواری یادگیری اهمیت آنها بیان کردم. آزمون رانندگی به ما یادآور می‌شود که به کار بردن توصیه کلی (برای نمونه مراقب باش) بسیار دشوار است و به ما یادآور می‌شود که ما از شکست‌های گذشته ضرورتاً چیزی فراموشی نمی‌گیریم. با این حال مدل‌سازی شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌تواند در غلبه بر موانع یادگیری به ما کمک کند. وجود یک تأخیر در یک حلقه بازخورد مهم، ممکن است عامل اختلالی باشد که رفتار سیستم را گنگ می‌سازد. مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی به‌صورت ایده‌آلی برای شبیه‌سازی نقش تأخیرها تناسب یافته‌اند. ما باید برای مدل‌های واقع‌گرایانه‌ای تلاش کنیم که مسئله پویایی‌شناسی سیستمی را آشکار می‌سازند. سپس باید مدلهایی را طراحی کنیم تا به شرکت‌کنندگان اجازه دهیم تا اثر تأخیرها از طریق شبیه‌سازی تعاملی را تجربه کنند. اگر ما این کار را به‌خوبی انجام دهیم، می‌توانیم به درک سیستم‌های محیط‌زیستی کمک کنیم.