

# مدل سازی محیط زیست

تألیف

دکتر بهمن جباریان امیری

بهار ۱۳۹۵



شماره مسلسل ۹۳۱۱

شماره انتشار ۳۸۸۳

### انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه : جباریان، بهمن، ۱۳۴۷-  
 عنوان و نام پدیدآور : مدل‌سازی محیط زیست/ تألیف بهمن جباریان امیری.  
 مشخصات نشر : تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۶.  
 مشخصات ظاهری : ۱۵۰ ص.: مصور، جدول.  
 فروست : انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۳۸۸۳.  
 شابک : 978-964-03-7098-8  
 وضعیت فهرست‌نویسی : فیبا  
 یادداشت : کتابنامه.  
 موضوع : علوم زیست‌محیطی -- شبیه‌سازی کامپیوتری  
 شناسه افزوده : دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات  
 رده‌بندی کنگره : ۱۳۹۶ ج۲ش/۴۵ GE  
 رده‌بندی دیویی : ۶۲۸  
 شماره کتابشناسی ملی : ۴۹۲۱۴۹۱

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.

ISBN:978-964-03-7098-8



9 789640 370988

عنوان: مدل‌سازی محیط زیست  
 تألیف: دکتر بهمن جباریان امیری  
 ویرایش ادبی: فاطمه جهانگیری  
 نوبت چاپ: اول  
 تاریخ انتشار: ۱۳۹۶  
 شمارگان: ۵۰۰ نسخه  
 ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران  
 چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلف است»

بها: ۱۰۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران  
 پست الکترونیک: [press@ut.ac.ir](mailto:press@ut.ac.ir) - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>  
 پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## فهرست مطالب

پیشگفتار .....	ز
فصل اول .....	س
مبانی و فرایند مدل سازی .....	۱
۱-۱. تعریف مدل .....	۱
۲-۱. ضرورت و اهداف مدل سازی .....	۱
۳-۱. فرایند مدل سازی .....	۲
۱-۳-۱. تعریف مسئله و تعیین هدف .....	۳
۲-۳-۱. تعیین مرز سیستم .....	۳
۳-۳-۱. تعیین نیاز اطلاعاتی .....	۴
۴-۳-۱. طراحی نمودار ادراکی .....	۴
۵-۳-۱. تعیین روابط میان اجزای سیستم .....	۶
۶-۳-۱. کالیبراسیون مدل .....	۷
۷-۳-۱. اعتبارسنجی مدل .....	۷
۸-۳-۱. تحلیل حساسیت .....	۸
۹-۳-۱. تحلیل عدم قطعیت .....	۸
فصل دوم .....	۹
پیشینه مدل سازی و انواع آن .....	۹
۱-۲. فرایند تکاملی مدل در دنیا .....	۹
۱-۱-۲. مدل های نسل اول .....	۹
۲-۱-۲. مدل های نسل دوم .....	۹
۳-۱-۲. مدل های نسل سوم .....	۱۰
۴-۱-۲. مدل های نسل چهارم .....	۱۰
۵-۱-۲. مدل های نسل پنجم .....	۱۰
۶-۱-۲. مدل های نسل ششم .....	۱۱

۱۱	۲-۲. پیشینه مدل‌سازی در ایران .....
۱۲	۳-۲. انواع مدل در بوم‌شناسی و محیط زیست .....
۱۲	۲-۳-۱. طبقه‌بندی کارکردی مدل .....
۱۳	۲-۳-۲. طبقه‌بندی ماهیتی مدل .....
۱۹	فصل سوم .....
۱۹	داده و پردازش آن .....
۱۹	۳-۱. پیش‌پردازش داده‌ها .....
۱۹	۳-۲. پیش‌فرض‌های مدل‌های احتمالی .....
۱۹	۳-۲-۱. پیروی از توزیع نرمال .....
۲۲	۳-۲-۲. بررسی داده‌های پرت .....
۲۷	۳-۲-۳. بررسی همگنی واریانس .....
۲۷	۳-۲-۴. بررسی پدیده هم‌خطی .....
۳۰	۳-۲-۵. بررسی رابطه میان متغیرهای تابع و مستقل .....
۳۰	۳-۳. رهیافت‌های انتخاب متغیرهای ورودی .....
۳۱	۳-۳-۱. طراحی و تحلیل سیستم ادراکی .....
۳۱	۳-۳-۲. رهیافت مبتنی بر دانش اکولوژیک پیشین .....
۳۱	۳-۳-۳. رهیافت مبتنی بر تحلیل همبستگی خطی .....
۳۲	۳-۳-۴. رهیافت مبتنی بر تکنیک‌های داده‌کاوی .....
۳۲	۳-۳-۵. رهیافت مبتنی بر انتخاب پیش‌رونده یا حذف پس‌رونده .....
۳۳	۳-۳-۶. رهیافت مبتنی بر تحلیل حساسیت .....
۳۵	فصل چهارم .....
۳۵	کالیبراسیون مدل .....
۳۶	۴-۱. معرفی انواع مدل‌های رگرسیونی .....
۳۶	۴-۱-۱. مدل رگرسیونی خطی .....
۳۶	۴-۱-۲. مدل رگرسیونی لگاریتمی .....
۳۶	۴-۱-۳. مدل رگرسیونی نمایی .....
۳۶	۴-۱-۴. مدل رگرسیونی توانی .....
۳۶	۴-۱-۵. مدل رگرسیونی منطقی .....

۳۷	۶-۱-۴. مدل رگرسیونی چندجمله‌ای.....
۳۷	۲-۴. روش حداقل مربعات خطا.....
۳۷	۱-۲-۴. برازش مدل رگرسیون یک‌متغیره.....
۳۹	۲-۲-۴. مثال برآورد پارامتر یک مدل ساده.....
۴۰	۳-۴. رهیافت‌های تحلیل رگرسیونی.....
۴۰	۱-۳-۴. روش گام به گام.....
۴۱	۲-۳-۴. روش پیش‌رونده.....
۴۱	۳-۳-۴. روش پس‌رونده.....
۴۱	۴-۴. برازش بی‌رویه مدل.....
۴۳	۱-۴-۴. ساختار نامناسب مدل.....
۴۳	۲-۴-۴. طراحی سیستم.....
۴۵	۳-۴-۴. نحوه تشخیص و اندازه‌گیری برازش بی‌رویه.....
۴۷	فصل پنجم.....
۴۷	اعتبارسنجی مدل.....
۴۸	۱-۵. سلسله‌مراتبی اعتبارسنجی.....
۴۹	۲-۵. فرایند اعتبارسنجی.....
۵۱	۳-۵. روش‌های اعتبارسنجی مدل.....
۵۱	۱-۳-۵. اعتبارسنجی مدل به روش گرافیکی.....
۵۱	۱-۱-۳-۵. روش نمودار یک‌به‌یک.....
۵۲	۲-۱-۳-۵. نمودار مقادیر باقی‌مانده.....
۵۵	۲-۳-۵. اعتبارسنجی مدل با به‌کارگیری سنجه.....
۵۷	۱-۲-۳-۵. سنجه‌های آماری مبتنی بر تحلیل مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده.....
۵۷	۲-۲-۳-۵. سنجه‌های آماری مبتنی بر تحلیل مقادیر باقی‌مانده.....
۵۸	۱-۲-۲-۳-۵. سنجه‌های برآورد خطای مطلق مدل.....
۵۸	الف) سنجه خطای بیشینه مطلق (AME).....
۵۸	ب) سنجه تفاوت در مقادیر بیشینه (PDIFF).....
۵۹	ج) سنجه میانگین مطلق خطا (MAE).....
۵۹	د) سنجه میانگین خطا (ME).....
۶۰	ه) سنجه ریشه میانگین مربع خطا (RMSE).....

۶۱	..... ۲-۲-۲-۳-۵. سنجه‌های برآورد خطای نسبی مدل
۶۱	..... الف) سنجه خطای مطلق نسبی (RAE)
۶۱	..... ب) سنجه میانگین مطلق خطای نسبی (MARE)
۶۲	..... ج) سنجه میانه مطلق درصد خطا (MdAPE)
۶۲	..... د) سنجه میانگین خطای نسبی (MRE)
۶۳	..... ه) سنجه میانگین مربع خطای نسبی (MSRE)
۶۴	..... و) سنجه خطای حجمی نسبی (RVE)
۶۴	..... ۳-۲-۲-۳-۵. سنجه‌های مبتنی بر تحلیل کارایی مدل
۶۴	..... الف) سنجه ضریب تعیین
۶۵	..... ب) سنجه ضریب کارایی (CE)
۶۶	..... ج) شاخص همخوانی (IA)
۶۶	..... د) ضریب ماندگاری (PI)
۶۷	..... ۴-۵. قضاوت کیفی
۶۷	..... ۵-۵. مثال محاسبه سنجه‌های اعتبارسنجی مدل
۷۱	..... فصل ششم
۷۱	..... مقایسه و گزینش مدل
۷۲	..... ۱-۶. معیارهای مقایسه و گزینش مدل
۷۲	..... ۱-۱-۶. آزمون نسبت درست‌نمایی
۷۳	..... ۲-۱-۶. معیار اطلاعات بیزین
۷۴	..... ۳-۱-۶. معیار اطلاعات آکائیکه
۷۶	..... ۲-۶. مثال مقایسه و گزینش مدل به روش آکائیکه
۷۹	..... فصل هفتم
۷۹	..... تحلیل حساسیت مدل
۷۹	..... الف) روش‌های تحلیل حساسیت جزئی
۸۰	..... ب) روش‌های تحلیل حساسیت کلی
۸۰	..... ۱-۷. روش‌های تحلیل حساسیت
۸۰	..... ۱-۱-۷. روش‌های گرافیکی تحلیل حساسیت
۸۳	..... ۲-۱-۱-۷. روش تحلیل حساسیت مشروط

فهرست □ خ

۸۴	.....مثال روش تحلیل حساسیت مشروط.....۱-۲-۱-۱-۷
۸۶	.....روش‌های جبری تحلیل حساسیت.....۲-۱-۷
۸۸	.....روش تحلیل حساسیت دامنه اسمی.....۱-۲-۱-۷
۹۰	.....مثال روش تحلیل حساسیت دامنه اسمی.....۱-۱-۲-۱-۷
۹۳	.....روش تحلیل حساسیت تفاضلی.....۲-۲-۱-۷
۹۴	.....روش‌های احتمالی تحلیل حساسیت.....۳-۱-۷
۹۴	.....روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری.....۱-۳-۱-۷
۹۹	.....روش‌های تحلیل حساسیت واریانس مبنای.....۲-۳-۱-۷
۱۰۲	.....روش تحلیل حساسیت سوپول.....۳-۲-۳-۱-۷
۱۰۷	.....فصل هشتم.....
۱۰۷	.....تحلیل عدم قطعیت.....
۱۰۸	.....۱-۸. منابع عدم قطعیت.....
۱۱۲	.....۲-۸. روش انجام تحلیل عدم قطعیت.....
۱۱۲	.....۱-۲-۸. تشریح عدم قطعیت ورودی مدل.....
۱۱۳	.....۲-۲-۸. تکثیر عدم قطعیت.....
۱۱۳	.....۳-۲-۸. تحلیل اهمیت عدم قطعیت.....
۱۱۴	.....۳-۸. روش‌های برآورد عدم قطعیت.....
۱۱۴	.....۱-۳-۸. روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته.....
۱۱۹	.....۱-۳-۸. مثال برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته.....

## فهرست جداول

- جدول ۳-۱: طبقه‌بندی مقدار عددی ضریب تورش واریانس را برای تصمیم‌گیری ..... ۳۰
- جدول ۳-۲: طبقه‌بندی کمی و کیفی ضریب همبستگی ..... ۳۱
- جدول ۴-۱: داده‌های غلظت فسفر کل (متغیر وابسته) و درصد زمین‌های شهری (متغیر مستقل) ..... ۳۹
- جدول ۴-۲: نحوه محاسبه شیب خط در معادله رگرسیون خطی ..... ۴۰
- جدول ۵-۱: معیار مقایسه کارایی مدل با موضوعات مدل‌سازی گوناگون ..... ۶۷
- جدول ۵-۲: داده‌های غلظت یون منیزیم و درصد زمین‌های کشاورزی، جنگل با تراکم متوسط، زمین بایر، تراس‌های بادبزی دیوریت، مارن و بازالت ..... ۶۸
- جدول ۵-۳: مقادیر داده‌های پیش‌بینی شده، داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر باقی‌مانده (خطا) برای یون منیزیم ..... ۶۹
- جدول ۵-۴: محاسبه مقادیر سنج‌های اعتبارسنجی مدل ..... ۷۰
- جدول ۶-۱: قضاوت کیفی را در مورد مدل‌های مورد مقایسه به کمک معیار کمکی میزان تغییرات جزئی ( $\Delta_i$ ) ..... ۷۵
- جدول ۶-۲: ویژگی‌های آماری مدل‌های مفروض ..... ۷۷
- جدول ۶-۳: نتیجه‌گزینش مدل براساس معیار اطلاعات آکائیکه ..... ۷۸
- جدول ۷-۱: داده‌های درصد زمین‌های کشاورزی، درصد پهنه‌های آبی و تراکم جمعیت در حوزه‌های آبخیز رودخانه در یاماگوچی ژاپن ..... ۸۵
- جدول ۷-۲: تعیین اثر پارامتر زمین کشاورزی بر مقدار نیتروژن کل ..... ۸۶
- جدول ۷-۳: داده‌های درصد زمین‌های کشاورزی، درصد پهنه‌های آبی و تراکم جمعیت در حوزه‌های آبخیز رودخانه‌های منطقه یاماگوچی ژاپن ..... ۹۰
- جدول ۷-۴: داده‌های تولیدشده برای سه متغیر مستقل مدل و مقادیر مواد معلق پیش‌بینی‌شده ..... ۹۲
- جدول ۷-۵: مقادیر متغیرهای مدل، مقادیر اسمی (کمینه، بیشینه و میانگین) ..... ۹۲
- جدول ۷-۶: محاسبه شاخص حساسیت اسمی ..... ۹۳
- جدول ۷-۷: مقایسه برتری و کاستی‌های روش‌های گوناگون تحلیل حساسیت ..... ۱۰۴



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ۱. مراحل گوناگون ساخت یک مدل ..... ۲
- شکل ۱-۲: ۲. ترازهای سازمانی در زیست‌شناسی و اکولوژی ..... ۳
- شکل ۱-۳: ۳. نشانه‌های ابداعی فارستر (۱۹۶۱) برای طراحی سیستم ..... ۵
- شکل ۱-۴: ۴. نشانه‌های ابداعی اودوم (۱۹۶۹) برای طراحی سیستم ..... ۶
- شکل ۲-۱: ۱. بیان تصویری تئوری فاجعه ..... ۱۸
- شکل ۳-۱: ۱. نمودار هیستوگرام برای بررسی توزیع نرمال دو متغیر مستقل  $X_1$  و  $X_2$  ..... ۲۲
- شکل ۳-۲: ۲. حالت‌های متعارف یک نمودار چارک-چارک ..... ۲۳
- شکل ۳-۳: ۳. نمونه ای از یک نمودار جعبه ای و نمودار کلیولند برای تشخیص داده‌های پرت ..... ۲۵
- شکل ۳-۴: ۴. نمونه نمودارهای دومتغیره برای تشخیص و تعیین داده‌های پرت ..... ۲۶
- شکل ۴-۱: ۱. پراکنش فضایی نقاط داده و خط برازش داده شده به روش حداقل مربعات خطا ..... ۳۸
- شکل ۴-۲: ۲. رابطه میزان پیچیدگی، میانگین خطا با توجه به رابطه متقابل واریانس و اریبی یک مدل مفروض ..... ۴۲
- شکل ۴-۳: ۳. نمونه از تأثیر ساختار انتخابی مدل بر چگونگی برازش آن ..... ۴۴
- شکل ۵-۱: ۱. فرایند انجام اعتبارسنجی یک مدل مفروض ..... ۵۰
- شکل ۵-۲: ۲. نمودار یک به یک مقادیر مدل‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی ..... ۵۲
- شکل ۵-۳: ۳. حالت‌های گوناگون پراکنش نقاط متناظر مقادیر باقی‌مانده استاندارد شده و مقادیر پیش‌بینی شده یک مدل مفروض ..... ۵۵
- شکل ۷-۱: ۱. نمودار جریانی نشان‌دهنده گام‌های انجام تحلیل حساسیت با به‌کارگیری نمودار ابرنقاط ..... ۸۲
- شکل ۷-۲: ۲. گام‌های تحلیل حساسیت مشروط در چارچوب فرایند مدل‌سازی ..... ۸۳
- شکل ۷-۳: ۳. نمودار تغییرات نیتروژن کل پیش‌بینی شده به ازای تغییر در درصد زمین‌های کشاورزی، پهناهای آبی و تراکم جمعیت انسانی ..... ۸۷
- شکل ۷-۴: ۴. گام‌های انجام تحلیل حساسیت به روش‌های دامنه اسمی و تفاضلی ..... ۸۹
- شکل ۷-۵: ۵. گام‌های انجام تحلیل حساسیت به روش ضرایب همبستگی نمونه و رتبه‌ای ..... ۹۵
- شکل ۷-۶: ۶. گام‌های انجام تحلیل حساسیت به روش تحلیل رگرسیونی خطی ..... ۹۷
- شکل ۷-۷: ۷. گام‌های انجام تحلیل حساسیت به روش تجزیه واریانس ..... ۱۰۰
- شکل ۸-۱: ۱. رده‌بندی ساختاری عدم قطعیت در مدل‌سازی محیط زیست ..... ۱۱۱



## پیشگفتار

با نگاهی گذرا به پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینه‌های گوناگون علوم و فناوری، کمتر کار پژوهشی را می‌توان یافت که در انجام آن از مدل یا مدل‌سازی بهره‌گرفته نشده باشد. از سال ۱۳۸۹ که در دانشگاه تهران به کسوت معلمی نائل آمدم، همواره ضرورت وجود کتابی را احساس می‌کردم که در آن به زبانی ساده اصول و مفاهیم بنیادین مدل‌سازی را که در ذات خود از مفاهیم پیچیده و سخت ریاضیات و آمار و احتمالات ریشه می‌گیرد، برای دانشجویان و علاقه‌مندان به این رشته، تشریح و به آنها کمک کند تا با نگاهی روشن از مدل‌سازی در انجام کارهای پژوهشی خود بهره‌گیرند. در پاسخ به آن نیاز، کتاب حاضر که در آن مبانی، مفاهیم و روش‌های مدل‌سازی محیط زیست تشریح شده، تألیف شده است.

از آنجا که هیچ کار انسان به دور از ایراد و کاستی نیست، اثر حاضر نیز از این اصل مبرا نیست. از این‌رو از استادان، دانشجویان و کارشناسان این زمینه درخواست می‌شود تا با مطرح کردن آنها، نگارنده را در برطرف کردن آنها در فرصت‌های بعدی یاری رسانند.

در پایان لازم می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر هوشنگ سبحانی که زحمت بازخوانی نسخه نخست کتاب را پذیرفتند و نکات ارزشمندی را در حاشیه آن هامش کردند، آقای دکتر حسین آذرنیوند، نماینده محترم دانشکده منابع طبیعی در شورای انتشارات دانشگاه تهران، خانم بهاره باهری، به سبب یاری‌رسانی در تهیه و تنظیم مثال‌ها، آقای مهدی شیخ‌گودرزی، برای طراحی روی جلد و نیز کمک‌های بی‌دریغ مسئولان و کارکنان محترم مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران که بدون آنها اثر پیش‌رو فرصتی برای عرضه پیدا نمی‌کرد، کمال تشکر و قدرانی را داشته باشم.

بهمن جباریان امیری  
دانشیار دانشگاه تهران