

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مدل سازی سری داده های هیدرولوژیکی با روش های هوش مصنوعی

دکتر طاهر رجائی

دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه قم

مهندس حمیده جعفری، مهندس هادی ابراهیمی

دانشجوی دکتری آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه قم

سرشناسه	: رجائی، طاهر، ۱۳۵۶-
عنوان و نام پدیدآور	: مدل سازی سری داده های هیدرولوژیکی با روش های هوش مصنوعی / طاهر رجایی، حمیده جعفری، هادی ابراهیمی.
مشخصات نشر	: قم: دانشگاه قم، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	: ۲۴۸ ص.: مصور، جدول.
شابک	: 978-600-8436-46-1
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۳۷.
موضوع	: آب شناسی -- الگوها
موضوع	: Hydrologic models
موضوع	: هوش مصنوعی -- کاربردهای ژئوفیزیکی
موضوع	: Artificial intelligence -- Geophysical applications
شناسه افزوده	: جعفری، حمیده، ۱۳۶۸-
شناسه افزوده	: ابراهیمی، هادی، ۱۳۶۰-
رده بندی کنگره	: GB۶۵۶/۲
رده بندی دیویی	: ۵۵۱/۴۸۰۱۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۹۷۶۰۵۹



انتشارات دانشگاه قم

عنوان: مدل سازی سری داده های هیدرولوژیکی با روش های هوش مصنوعی

نویسنده: طاهر رجائی، حمیده جعفری، هادی ابراهیمی

چاپ و صحافی: هوشنگی

ناظر فنی: علیرضا معظمی

طراح جلد: حمیده جعفری

صفحه آرا: حسین معظمی

نوبت و سال چاپ: اول، پاییز ۱۳۹۸

شمارگان: ۵۰۰

بهاء: ۴۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۴۳۶-۴۶-۱

آدرس الکترونیکی: Publication@ Qom. ac.ir

کلیه حقوق مادی و معنوی برای ناشر محفوظ است.

قم، بلوار الغدیر، دانشگاه قم، اداره چاپ و انتشارات دانشگاه

تلفن: ۰۲۵-۳۳۴۴ ۳۲۱۰-۲۵-۳۳۴۵-۳۲۱۰-۲۵

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۱
فصل اول: مقدمه.....	۵
۱-۱- مدل سازی و شبیه سازی.....	۵
۲-۱- مدل سازی پدیده های هیدرولوژیکی.....	۶
۱-۲-۱- مدل های مفهومی.....	۷
۲-۲-۱- مدل های آنالوگ.....	۸
۳-۲-۱- مدل های آماری.....	۸
۱-۳-۲-۱- پارامترهای آماری.....	۸
۲-۳-۲-۱- تحلیل همبستگی.....	۹
۴-۲-۱- مدل های فیزیکی.....	۹
۵-۲-۱- مدل های عددی.....	۱۰
۶-۲-۱- مدل های هوش مصنوعی.....	۱۰
فصل دوم: سری های زمانی.....	۱۳
۱-۲- مقدمه.....	۱۳
۲-۲- مروری بر مفاهیم سری زمانی.....	۱۴
۳-۲- بررسی و شناخت طبیعت غیرخطی متغیرها.....	۱۶
۱-۳-۲- ایستایی سری های زمانی.....	۱۶
۲-۳-۲- آماده سازی اطلاعات.....	۱۹
۳-۳-۲- عملگر تفاضل.....	۱۹
۴-۳-۲- حذف رفتار دوره ای.....	۲۰
۵-۳-۲- عملگر میانگین متحرک.....	۲۱
۶-۳-۲- نرمال سازی یک سری زمانی.....	۲۱
۷-۳-۲- تعیین پارامترهای مدل.....	۲۳
۸-۳-۲- صحت سنجی مدل ها.....	۲۳
۹-۳-۲- نظریه آشوب در سری های زمانی.....	۲۳
۱۰-۳-۲- سیستم های دینامیکی آشوبی.....	۲۴
۱۱-۳-۲- شاخص های تعیین ماهیت آشوبناکی.....	۲۵

فصل سوم: روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی..... ۲۹

- ۲۹-۱-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)..... ۲۹
- ۲۹-۱-۱-۳- مدل ریاضی شبکه عصبی مصنوعی..... ۲۹
- ۳۰-۲-۱-۳- پرسپترون چند لایه..... ۳۰
- ۳۱-۳-۱-۳- آموزش شبکه..... ۳۱
- ۳۲-۴-۱-۳- الگوریتم پس انتشار خطا..... ۳۲
- ۳۴-۵-۱-۳- انواع مدل‌های شبکه عصبی..... ۳۴
- ۳۴-۱-۵-۱-۳- خودبازگشتی غیرخطی..... ۳۴
- ۳۵-۲-۵-۱-۳- مدل خودرگرسیون با ورودی‌های برون‌زا..... ۳۵
- ۳۷-۳-۵-۱-۳- مدل‌های رگرسیون عمومی عصبی (GRNN)..... ۳۷
- ۳۷-۴-۵-۱-۳- مدل‌های پایه شعاعی (RBF)..... ۳۷
- ۳۷-۵-۵-۱-۳- مدل‌های تبرید تدریجی عصبی (NDE)..... ۳۷
- ۳۸-۲- سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (ANFIS)..... ۳۸
- ۳۸-۱-۲-۳- قوانین اگر- آنگاه فازی و سیستم‌های استنتاج فازی..... ۳۸
- ۴۱-۳-۳- برنامه‌نویسی ژنتیک (GP)..... ۴۱
- ۴۴-۱-۳-۳- عملگرهای برنامه‌ریزی ژنتیک..... ۴۴
- ۴۴-۲-۳-۳- ساختار الگوریتم‌های ژنتیکی..... ۴۴
- ۴۵-۳-۳-۳- عملگرهای ژنتیکی..... ۴۵
- ۴۷-۴-۳-۳- مدل برنامه‌ریزی بیان ژن..... ۴۷
- ۴۹-۱-۴-۳-۳- مراحل اصلی در برنامه‌ریزی بیان ژن..... ۴۹
- ۵۰-۲-۴-۳-۳- ویژگی‌های برنامه‌ریزی بیان ژن..... ۵۰
- ۵۱-۴-۳- ماشین بردار پشتیبان (SVM)..... ۵۱
- ۵۲-۱-۴-۳- ویژگی‌های ماشین بردار پشتیبان..... ۵۲
- ۵۳-۲-۴-۳- تئوری ماشین بردار پشتیبان..... ۵۳
- ۵۸-۳-۴-۳- دسته بندی غیرخطی ماشین بردار پشتیبان..... ۵۸
- ۵۹-۴-۴-۳- رگرسیون بردار پشتیبان..... ۵۹
- ۶۲-۵-۳- مدل شبکه بیزین..... ۶۲
- ۶۴-۱-۵-۳- دسته‌بندی الگوریتم‌های بیزین با روش‌های مختلف..... ۶۴
- ۶۴-۱-۱-۵-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی بیزین..... ۶۴
- ۶۴-۲-۱-۵-۳- الگوریتم‌های بیزین ساده مثبت..... ۶۴
- ۶۵-۳-۱-۵-۳- شبکه‌های بیزین پویا..... ۶۵

۶۵	۳-۵-۱-۴- شبکه‌های بیزین گوسین
۶۶	۳-۵-۲- آموزش بیزین با شبکه عصبی (شبکه‌های عصبی بیزین)
۶۶	۳-۵-۳- شبکه‌های بیزین ساده
۶۷	۳-۶- درخت تصمیم

فصل چهارم: تکنیک‌های ترکیبی هوش مصنوعی در مدل‌سازی..... ۷۱

۷۱	۴-۱- مقدمه
۷۲	۴-۲- روش‌های ترکیبی موجک-هوش مصنوعی
۷۲	۴-۲-۱- تبدیل فوریه
۷۳	۴-۲-۲- تبدیل موجک
۷۵	۴-۲-۲-۱- تبدیل موجک پیوسته
۷۸	۴-۲-۲-۲- تبدیل موجک گسسته
۸۰	۴-۲-۳- مدل ترکیبی شبکه عصبی موجک
۸۲	۴-۲-۴- مدل‌های تلفیقی شبکه‌ی عصبی-فازی تطبیقی-موجکی
۸۳	۴-۲-۵- مدل ماشین بردار پشتیبان-موجک (WLSSVM)
۸۳	۴-۳- سایر مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی
۸۳	۴-۳-۱- روش ترکیبی شبکه خودسازمانده- هوش مصنوعی (SOM-AI)
۸۴	۴-۳-۲- روش ترکیبی برنامه‌نویسی ژنتیک-هوش مصنوعی (GP-AI)
۸۵	۴-۳-۳- روش ترکیبی کریجینگ-هوش مصنوعی (AI-Kriging)

فصل پنجم: تحلیل آماری و مدل‌سازی..... ۸۷

۸۷	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- پیش‌پردازش داده‌ها
۸۸	۵-۲-۱- پاک‌سازی داده
۸۸	۵-۲-۲- یکپارچه‌سازی داده
۸۹	۵-۲-۳- کاهش داده
۸۹	۵-۲-۴- تبدیل داده
۸۹	۵-۳- تحلیل آماری
۸۹	۵-۳-۱- تحلیل آماری توصیفی
۸۹	۵-۳-۱-۱- شاخص‌های تمایل مرکزی
۹۰	۵-۳-۱-۲- شاخص‌های پراکندگی

- ۹۰.....۳-۱-۳-۵ شاخص‌های چولگی
- ۹۰.....۴-۱-۳-۵ شاخص‌های کشیدگی
- ۹۰.....۲-۳-۵ آمار استنباطی
- ۹۱.....۱-۲-۳-۵ ویژگی آمار تحلیلی یا استنباطی
- ۹۱.....۲-۲-۳-۵ آزمون‌های پارامتریک
- ۹۱.....۳-۲-۳-۵ آزمون‌های ناپارامتریک
- ۹۲.....۳-۳-۵ آماره‌های تقریبی و تست فرضیه‌ها
- ۹۲.....۱-۳-۳-۵ آمار تقریبی
- ۹۲.....۲-۳-۳-۵ تست فرضیه
- ۹۳.....۴-۳-۵ مهم‌ترین آزمون‌های آماری
- ۹۳.....۱-۴-۳-۵ آزمون نرمال بودن یا نبودن
- ۹۴.....۲-۴-۳-۵ آزمون کلموگروف- اسمیرنوف
- ۹۴.....۳-۴-۳-۵ آزمون من- کندال
- ۹۵.....۴-۵ آماده‌سازی اطلاعات
- ۹۵.....۱-۴-۵ دیفرانسیل‌گیری فصلی
- ۹۶.....۲-۴-۵ نرمال‌سازی داده‌ها
- ۹۶.....۵-۵ ارزیابی پیچیدگی سری زمانی
- ۱۰۱.....۶-۵ تعیین ورودی‌های مناسب
- ۱۰۲.....۱-۶-۵ ضریب خودهمبستگی
- ۱۰۲.....۲-۶-۵ میانگین اطلاعات متقابل (آنتروپی شانون)
- ۱۰۳.....۷-۵ تقسیم داده‌ها
- ۱۰۳.....۱-۷-۵ کالیبراسیون مدل (واستجی مدل)
- ۱۰۴.....۲-۷-۵ صحت‌سنجی مدل
- ۱۰۵.....۳-۷-۵ تعیین مدل پیش‌بینی مناسب
- ۱۰۵.....۸-۵ مروری بر انواع معیارهای ارزیابی مدل‌ها
- ۱۰۵.....۱-۸-۵ ضریب کارایی نش-ساتکلیف
- ۱۰۶.....۲-۸-۵ جذر میانگین مربعات خطا
- ۱۰۶.....۳-۸-۵ میانگین قدر مطلق خطا
- ۱۰۷.....۴-۸-۵ میانگین قدرمطلق درصد خطا
- ۱۰۷.....۵-۸-۵ میانگین خطای نسبی
- ۱۰۷.....۶-۸-۵ ضریب همبستگی

۱۰۸.....	۷-۸-۵- میانگین مربعات خطا
۱۰۸.....	۸-۸-۵- مجموع مربعات خطا
۱۰۸.....	۹-۸-۵- ضریب جرم باقیمانده
۱۰۹.....	۱۰-۸-۵- میانگین قدرمطلق خطای نسبی
۱۰۹.....	۱۱-۸-۵- معیار اطلاعات آکائیک
۱۱۰.....	۱۲-۸-۵- شاخص نسبت میانگین مجذور مربعات خطا به انحراف معیار
۱۱۰.....	۱۳-۸-۵- خطای نسبی
۱۱۰.....	۱۴-۸-۵- خطای استاندارد

فصل ششم: مدل سازی رسوب با روش های هوش مصنوعی ۱۱۱

۱۱۱.....	۱-۶- مقدمه
۱۱۲.....	۲-۶- مفهوم رسوب
۱۱۳.....	۱-۲-۶- واژه های کلیدی در هیدرولیک رسوب
۱۱۶.....	۲-۲-۶- طبقه بندی مواد رسوبی
۱۱۶.....	۱-۲-۲-۶- بار رسوبی بستر
۱۱۶.....	۲-۲-۲-۶- بار رسوبی معلق
۱۱۷.....	۳-۲-۲-۶- مواد محلول
۱۱۷.....	۳-۶- مدل سازی رسوب
۱۱۹.....	۱-۳-۶- کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی رسوب
۱۲۴.....	۲-۳-۶- کاربرد روش برنامه ریزی ژنتیک در مدل سازی رسوب
۱۲۶.....	۳-۳-۶- کاربرد منطق فازی در مدل سازی رسوب
۱۲۹.....	۴-۳-۶- کاربرد ماشین بردار پشتیبان برای مدل سازی رسوب
۱۳۰.....	۵-۳-۶- کاربرد روش های ترکیبی در مدل سازی رسوب
۱۳۶.....	۶-۳-۶- کاربرد مدل های هوش مصنوعی در تخمین مقادیر بیشینه
۱۴۰.....	۷-۳-۶- کاربرد مدل های هوش مصنوعی در بررسی پدیده هیستریزیس
۱۴۰.....	۱-۷-۳-۶- مفهوم هیستریزیس
۱۴۲.....	۲-۷-۳-۶- بررسی پدیده هیستریزیس در پژوهش های پیشین
۱۴۳.....	۸-۳-۶- نتایج عمومی
۱۵۵.....	۱-۸-۳-۶- توزیع پژوهش های انجام شده با سال انتشار و منطقه مورد مطالعه
۱۵۹.....	۲-۸-۳-۶- تقسیم بندی داده ها
۱۶۰.....	۳-۸-۳-۶- معیارهای ارزیابی مدل
۱۶۱.....	۴-۶- نتیجه گیری و چشم انداز پژوهش های آینده

فصل هفتم: مدل سازی تراز آب زیرزمینی با روش های هوش مصنوعی ۱۶۵

- ۱-۷- مقدمه..... ۱۶۵
- ۲-۷- کاربرد شبکه عصبی در مدل سازی تراز آب زیرزمینی..... ۱۸۱
- ۳-۷- کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی در مدل سازی تراز آب زیرزمینی..... ۱۸۸
- ۴-۷- کاربرد برنامه نویسی ژنتیک در مدل سازی تراز آب زیرزمینی..... ۱۹۰
- ۵-۷- کاربرد ماشین بردار پشتیبان در مدل سازی تراز آب زیرزمینی..... ۱۹۱
- ۶-۷- کاربرد تکنیک های ترکیبی هوش مصنوعی در مدل سازی تراز آب زیرزمینی..... ۱۹۲
- ۷-۷- نتایج عمومی..... ۲۰۰
- ۱-۷-۷- انتخاب گام زمانی..... ۲۰۰
- ۲-۷-۷- انتخاب داده های ورودی..... ۲۰۱
- ۳-۷-۷- اندازه ی سری داده ها..... ۲۰۲
- ۴-۷-۷- تقسیم کردن داده ها..... ۲۰۳
- ۵-۷-۷- منطقه مورد مطالعه و نوع آبخوان..... ۲۰۵
- ۶-۷-۷- نرم افزارهای استفاده شده..... ۲۰۶
- ۷-۷-۷- توسعه نادرست مدل های هوش مصنوعی برای پیش بینی تراز آب زیرزمینی..... ۲۰۷
- ۸-۷- نتیجه گیری و چشم انداز پژوهش های آینده..... ۲۰۹

پیوست: برنامه یک مدل ترکیبی شبکه عصبی و موجک برای پیش بینی تراز آب زیرزمینی

(با زبان برنامه نویسی نرم افزار متلب):..... ۲۱۳

- فهرست منابع..... ۲۱۹

پیش‌گفتار

پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی همیشه یکی از مسایل مورد علاقه بشر بوده است. اندازه‌گیری و پیش‌بینی پدیده‌هایی همچون بارش، میزان آبدهی و کیفیت آب رودخانه‌ها، میزان رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها، تراز آب زیرزمینی و ... از جمله مسایلی هستند که به سادگی قابل مدل‌سازی و پیش‌بینی نیستند. درواقع عوامل بسیار زیاد و گوناگونی وجود دارند که بر این پدیده‌ها تأثیر می‌گذارند و پیش‌بینی و تخمین آن‌ها را مشکل و حتی ناممکن می‌سازند. در طول تاریخ علم، دانشمندان در خصوص پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی تحقیقات فراوانی صورت داده‌اند. با توجه به پیچیدگی این پدیده‌ها این تحقیقات معمولاً به صورت محلی و برای منطقه جغرافیایی خاصی انجام گرفته است و بعضاً روش‌هایی ابداع شده‌اند که تا حدودی توانسته‌اند پدیده‌های مورد نظر را شبیه‌سازی کرده و نتایجی با دقت‌های گوناگون به دست دهند. برای مثال در خصوص اندازه‌گیری بار معلق رسوب در رودخانه‌ها دانشمندان از روش آماری بهره برده‌اند. برای این کار از داده‌های اندازه‌گیری شده دبی و بار معلق یک رودخانه خاص استفاده شده و منحنی‌ای به نام منحنی سنج رسوب رسم می‌شود و از آن برای پیش‌بینی بار معلق همان رودخانه به ازای دبی مورد نظر استفاده می‌کنند. به عنوان مثالی دیگر برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از مدل‌های عددی / مفهومی همچون مدل مادفلو¹ استفاده شده است؛ اما با این وجود روش‌های ارائه شده تا حدود زیادی تقریبی بوده و در عین حال به داده‌ها و ورودی‌های زیادی نیاز است تا مدل‌سازی قابل قبول باشد. این در حالی است که در بسیاری از مناطق داده‌های زیادی در دسترس قرار ندارند و بنابراین استفاده از این روش‌ها با محدودیت همراه شده است.

برای فائق آمدن به مشکل کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده، محققان همواره در پی دستیابی به روش‌هایی بوده‌اند که درحالی که نیاز به داده‌های کمتری دارند، دقت قابل قبولی نیز ارائه

دهند؛ بنابراین در کنار روش‌های آماری و تحلیلی‌ای که در این خصوص ارائه شد، در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی نیز مرسوم شد.

روش‌های هوش مصنوعی به‌صورت ذاتی کاری به فیزیک و ماهیت پدیده موردنظر ندارند و در عوض روابط پیچیده‌ای را که بین داده‌ها وجود دارند تا حدودی کشف کرده و با استفاده از آن می‌توانند موارد مشابه را حدس زده و پیش‌بینی کنند. محققان زیادی در سراسر جهان در خصوص کارایی مدل‌های هوش مصنوعی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی تحقیق کرده و بعضاً با این نوع مدل‌سازی به نتایج قابل قبولی نیز رسیده‌اند.

کتاب حاضر در خصوص سری داده‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی آن با روش‌های هوش مصنوعی بحث می‌کند و حاصل بررسی مقالات انتشار یافته در مورداستفاده از روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی دو پدیده مهم هیدرولوژیکی یعنی (۱) بار معلق رودخانه و (۲) تراز آب زیرزمینی است. برای این کار نویسندگان تمامی مقالات انتشار یافته در خصوص مدل‌سازی این دو پدیده هیدرولوژیکی با روش‌های هوش مصنوعی را مورد بررسی و مقایسه قرار داده و نتایج بدست آمده را در قالب چگونگی توسعه هر یک از مدل‌ها و نتایج کلی در خصوص چگونگی انتخاب ورودی‌ها، چگونگی تقسیم‌بندی داده‌ها، نرم‌افزارهای استفاده شده و ... در قسمت‌های مجزا تشریح نموده‌اند. همچنین نویسندگان با بررسی شرایط مدل‌های موجود، روش‌هایی برای بهبود کارایی مدل‌ها و کاستن از ایرادهای مدل‌ها و افزایش دقت مدل‌سازی پیشنهاد نموده‌اند.

در فصل اول کتاب حاضر مقدمه‌ای در خصوص مدل‌سازی و کاربردهای آن ارائه خواهد شد. با توجه به اهمیت سری‌های زمانی در هیدرولوژی فصل دوم به بررسی سری‌های زمانی و ویژگی‌های آن خواهد پرداخت. در فصل سوم انواع روش‌های هوش مصنوعی اعم از روش شبکه عصبی، سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، برنامه‌نویسی ژنتیک و ... و همچنین در فصل چهارم روش‌های ترکیبی هوش مصنوعی از جمله استفاده از تحلیل موجک برای پیش‌پردازش داده‌ها خواهد آمد. در فصل پنجم انواع تحلیل آماری برای آماده‌سازی داده‌ها و همچنین انواع روش‌های ارزیابی مدل ارائه شده تا خواننده با شیوه‌های سنجش دقت مدل‌ها آشنا شود. در نهایت فصل‌های ششم و هفتم به ترتیب به بررسی کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی دو پدیده مهم هیدرولوژیکی یعنی بار معلق رودخانه و تراز آب زیرزمینی

خواهند پرداخت. این دو فصل شالوده اصلی کتاب بوده که در آن مدل‌ها، پارامترهای ورودی، نحوه و نوع مدل‌سازی‌ها، دقت مدل‌ها، تعداد داده‌ها و سایر مسائل و موارد انواع مدل‌سازی‌های هوشمند در مقالات مختلف مورد تحلیل، بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند و نیز پیشنهادهایی برای بهبود مدل‌سازی‌ها ارائه شده است.

امید است که کتاب حاضر بتواند برای دانشجویان و محققانی که قصد دارند در این زمینه تحقیق کرده و اقدام به مدل‌سازی با این روش‌ها کنند مفید واقع شده و سهمی هر چند کوچک در توسعه علم داشته باشد.

طاہر رجائی
حمیدہ جعفری
ہادی ابراہیمی
پاییز ۱۳۹۸