2019, Vol.6, No.1, Pages 35 to 40
Journal of Water and Sustainable Development

سال ششم، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحات ۳۵ تا ۴۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review/ Conceptual

نوع مقاله: مروری/ مفهومی

A Review on Hydrological Modelling Concepts, Part2: Uncertainty Assessment Concepts

M. Shafiei[1*], B. Ghahraman[2], B. Saghafian[3]

1- Assistant Professor, Hydroinformatic Department, East Water & Environmental Research Institute, Mashhad, Iran. 2- Professor in Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. 3- Professor in Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: moj.shafiei@gmail.com)

Received: 18-07-2017
Accepted: 02-01-2019

Abstract

Nowadays, uncertainty assessment is a major step in hydrological modelling due to different sources of errors and lack of sureness. Quantifying the amount of uncertainty at models' outputs is considered as the main step before using the models for water resources decision makings. In modelling processes, the uncertainty quantification is assessed along with model calibration. Therefore, paying attention to the model calibration and its relation with uncertainty assessment is essential. This review paper presents the necessary concepts of uncertainty assessment and their relationship with modelling processes.

Keywords: Error, Uncertainty, Bayes Law, Monte Carlo.

مروری بر مفاهیم مدل‌سازی هیدرولوژی: بخش دوم، مبانی تحلیل عدم قطعیت

مجتبی شفیعی[۱*]، بیژن قهرمان[۲]، بهرام ثقفیان[۳]

۱- استادیارپژوهش، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق، مشهد. ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد. ۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: moj.shafiei@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۲۷
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۲

چکیده

امروزه به سبب وجود منابع متعدد خطا و نااطمینانی، تحلیل عدم قطعیت به‌عنوان بخشی جدانشدنی در مدل‌سازیِ هیدرولوژی پذیرفته شده است. بررسی و به کمیّت درآوردن میزان عدم قطعیت در نتایج پیش‌بینی مدل‌ها، مهم‌ترین گام، قبل از استفاده از نتایج مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌های منابع آب است. کمّی‌سازی میزان عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی به صورت توأم و همراه با واسنجی مدل انجام می‌شود. بنابراین لزوم توجه به واسنجی مدل و ارتباط آن با تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی، ضروری است. مقاله مروری حاضر با هدف ارائه تعاریف و مفاهیم اولیه و ضروری در تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها و ارتباط آن با فرآیند مدل‌سازی هیدرولوژی تدوین شده است.

واژه‌های کلیدی: خطا، عدم قطعیت، قانون بیز، مونت کارلو.

DOI: 10.22067/jwsd.v6i1.66199

مقدمه

مدل‌سازی امری ضروری جهت شناخت سامانه و کسب اطلاعات مورد نیاز در مورد کارکرد آن در شرایط مختلف می‌باشد. در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی، مدل‌های زیادی با اهداف مختلف تهیه و ارائه شده‌اند (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶). این مدل‌ها پارامترهایی دارند که اغلب به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و تخمین آنها تنها توسط واسنجی و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده متناظر با خروجی(های) مدل امکان‌پذیر می‌باشد. وجود خطا و نااطمینانی در داده‌های ورودی مدل‌ها (مانند بارندگی و درجه حرارت) و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده مرتبط با خروجی آن، بدون شک موجب نااطمینانی در تخمین پارامترهای مدل شده و در نتیجه پیش‌بینی‌های مدل نیز قابل اعتماد نخواهند بود (Tung و Yen، ۲۰۰۶؛ Refsgaard، ۲۰۰۷). بنابراین وجود خطا و نااطمینانی‌ها در مدل‌سازی همواره سبب وجود اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مقادیر مشاهده‌ای شده، و در نتیجه عدم قطعیت در نتایج پیش‌بینی مدل‌ها می‌شود.

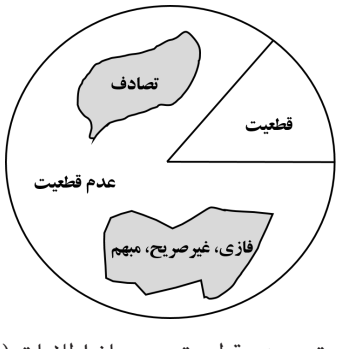
در بسیاری از زمینه‌ها، عدم قطعیت به خوبی شناخته شده و به درستی نیز بکار گرفته می‌شود. به طور مثال در علم هواشناسی، پیش‌بینی‌های هواشناسی عموماً با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن ارائه می‌شوند. در طراحی‌های مهندسی مانند طراحی سازه‌های مرتبط با سیل، عدم قطعیت به طور غیرمستقیم با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان یا به طور مستقیم با لحاظ کردن خصوصیات احتمالی وقایع اقلیمی در محاسبات لحاظ می‌شوند. در دو دهه‌ی اخیر در مدل‌سازی‌های هیدرولوژی، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر روی روش‌های مختلف تحلیل عدم قطعیت و واسنجی مدل‌ها و بهبود پیش‌بینی آنها بوده است. در برخی از این پژوهش‌ها، رویکرد اغلب آنها رسیدن به تخمینی یکتا از پارامترهای مدل‌ها بوده و عمدتاً به کمیّت در آوردن عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های این مدل‌ها نادیده گرفته شده است (Beven و Binley، ۱۹۹۲؛ شفیعی و همکاران، ۱۳۹۳).

در نظر گرفتن تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل‌ها اهمیت بسیار زیادی دارد؛ به خصوص زمانی که از این مدل‌ها به عنوان پشتوانه تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت منابع آب استفاده می‌شود. به طوری که نادیده گرفتن عدم قطعیت در مدل‌سازی‌ها می‌تواند موجب عدم پایداری در زیست‌بوم‌های محیطی و افزایش ریسک (خطر) در اتخاذ تصمیم‌گیری‌ها شود. اخیراً به طور گسترده‌ای اهمیّت درنظرگرفتن عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی‌های هیدرولوژی هم از لحاظ نظری و هم عملی (کاربردی) مورد توجه قرار گرفته است. شناخت عدم قطعیت در فرآیندهای مدل‌سازی هیدرولوژی از مهم‌ترین و محبوب‌ترین موضوعات در دهه‌ی اخیر به شمار می‌رود که نتایج آن در مباحث مدیریت منابع آب و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با آن بسیار حائز اهمیّت است. به طور کلی می‌توان ضرورت این مسئله را در چهار مورد بیان کرد (Shafiei و همکاران، ۲۰۱۴): ۱) درک و شناسایی منابع عدم قطعیت ۲) به کمیّت درآوردن عدم قطعیت ۳) ارزیابی نقش عدم قطعیت و چگونگی تأثیر آن در نتایج مدل‌ها و ۴) یافتن روش‌هایی جهت کاهش عدم قطعیت.

بنابراین، با توجه به رشد روزافزون تحقیقات در زمینه تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های هیدرولوژی و لزوم توجه به مبانی آن و نحوه ارتباط آن در کاربرد مدل‌های هیدرولوژی؛ با هدف یکسان‌سازی ارائه تعاریف و مفاهیم تحلیل عدم قطعیت، منابع آن در مدل‌سازی هیدرولوژی و چگونگی کمّی‌سازی آن براساس تجارب متعدد نویسندگان در این زمینه و همچنین در ادامه‌ی مقاله شفیعی و قراری (۱۳۹۶)، مقاله حاضر در پنج بخش با عناوین ذیل تدوین شده است: الف) تعریف عدم قطعیت و خطا، ب) منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژی، ج) مفهوم «تحلیل عدم قطعیت»، د) ارتباط واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی و ذ) روش‌های بیان عدم قطعیت و نمونه‌گیری مونت کارلو.

تعریف عدم قطعیت و خطا

یافتن تعریفی واحد، دقیق و عمومی برای واژه «عدم قطعیت» به راحتی امکان‌پذیر نیست. عدم قطعیت[1] در لغت براساس فرهنگ لغت مریام-وبستر (Merriam-Webster، ۲۰۰۳) به معنی شک، تردید، ناشناخته، تعریف نشده و مبهم آمده است. تعریفی نسبتاً جامع و عمومی در شکل (۱) ارائه شده است (Ross، ۱۹۹۵) که در آن «عدم قطعیت» نسبت به «قطعیت» بخش بسیار بزرگتری را شامل شده و تنها بخش کوچکی از مسائل دارای «قطعیت» می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، مجموع همه‌ی اطلاعات در این مفهوم به عنوان جهان اطلاعات[2] تعریف شده است. اگر «عدم قطعیت» در این مضمون در نظر گرفته شود، تنها بخش کوچکی از مسئله به عنوان «قطعیت» درنظر گرفته می‌شود و مابقی به ناچار دارای «عدم قطعیت» بوده که برخواسته از پیچیدگی سیستم، کمبود دانش، شانس، جنبه‌های مختلف تصادفی بودن، بی‌دقتّی، ابهام و ... می‌باشد.



شکل ۱- قطعیت و عدم قطعیت در جهان اطلاعات (Ross، ۱۹۹۵)

در موضوع مدل‌های هیدرولوژی، عدم قطعیت به حالتی اطلاق می‌شود که منعکس‌کنندهٔ نداشتن اطمینان[3] درباره فرآیندهای فیزیکی یا سیستم مورد نظر بوده و به طور بالقوه منجر به تفاوت بین خروجی‌های بدست آمده و مقادیر درست[4] در سیستم می‌شود. به طور دقیق‌تر، عدم قطعیتِ خروجی مدل (به عنوان مثال، سطح آب یا جریان رودخانه) شرایطی است که نمی‌توان تنها یک مقدار را برای خروجی بدست آورد. لازم به ذکر است در موضوع مدل‌سازی هیدرولوژی، عدم قطعیت ناشی از دانش نادقیق یا اطلاعات ناقص از سیستم یا فرآیند است که جدا از طبیعتِ تصادفی وقایع می‌باشد.

منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژی

عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی را اساساً می‌توان به سه منبع مهم تقسیم‌بندی کرد. هرچند در برخی مراجع ممکن است منابع عدم قطعیت را به چهار یا پنج منبع طبقه‌بندی کرده باشند (Refsgaard و Knudsen، ۱۹۹۶)، اما همه‌ی آنها را می‌توان در قالب سه منبع که در ادامه آمده است خلاصه کرد. برای مطالعه بیشتر می‌توان به Tung و Yen (۲۰۰۶) مراجعه نمود.

الف) عدم قطعیت در داده‌های ورودی یا مشاهداتی[7]: این نوع عدم قطعیت مربوط می‌شود به داده‌های ورودی مدل (مانند بارندگی و درجه حرارت) و شارهای‌های خروجی سیستم (مانند جریان رودخانه) که معمولاً اندازه‌گیری می‌شوند. عدم قطعیت ناشی از داده‌ها یا مشاهدات شامل دو مؤلفه می‌باشد الف-۱) خطاهای اندازه‌گیری که مربوط به وسایل و انسان است و الف-۲) خطای ناشی از عدم تناسب داده‌های اندازه‌گیری شده با مقیاس، به طور مثال زمانی که داده‌های بارندگی نقطه‌ای در مدل به سطح تعمیم داده می‌شوند.

ب) عدم قطعیت در ساختار مدل‌ها[8]: مدل، سیستم ساده شده‌ای از جهان واقعی است (Refsgaard و Knudsen، ۱۹۹۶). جهت استخراج مفاهیم و معادلات در مدل، فرآیندهای واقعی که پیچیده[9] بوده بسیار ساده‌سازی شده‌اند. به طور مثال یک مدل ممکن است رفتار یک فرآیند کاملاً غیرخطی را بخواهد شبیه‌سازی کند، اما توسعه مدل به صورت چند رابطه خطی و درجه اول انجام شده است. این گونه ساده‌سازی‌ها و تقریب‌زدن‌ها منتج به خطاهایی در ساختار مفهومی مدل می‌شود. خطاهای ساختار مدل همچنین می‌تواند ناشی از ریاضیات بکار رفته در مدل (مانند تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی) باشد که در حقیقت مدل مفهومی را به مدل اجرایی تبدیل می‌کند.

پ) عدم قطعیت در پارامترها[10]: عدم قطعیت در پارامترهای مدل نتیجه‌ی ناتوانی در تعیین دقیق (به کمیّت درآوردن) پارامترهای مدل می‌باشد. پارامترهای مدل ممکن است مستقیماً دارای معنی فیزیکی نباشند. از طرفی، پارامترهایی که معنی فیزیکی هم دارند را همواره نمی‌توان به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد یا این که اندازه‌گیری مستقیم آنها بسیار هزینه‌بر است. بنابراین تخمین آنها با روش‌های غیرمستقیم مانند قضاوت‌های مهندسی و واسنجی صورت می‌گیرد. پارامترهایی که در فرآیند واسنجی بدست می‌آیند نیز به دلایل مختلفی می‌توانند تحت تأثیر عدم قطعیت قرار گیرند که شامل عدم قطعیت داده‌ها (داده‌هایی که برای واسنجی به کار می‌روند)، عدم قطعیت ساختار مدل، کمبود داده و ... می‌باشند.

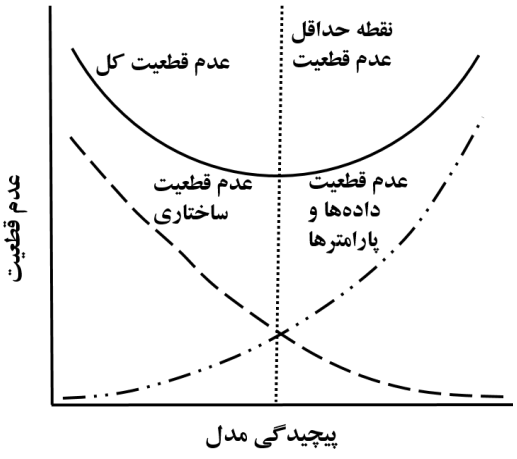
عدم قطعیتِ ناشی از اطلاعات ناکافی را ممکن است بتوان با اطلاعات بیشتر کاهش داد.

در برخی موارد ممکن است تفاوت عدم قطعیت با خطا[5] توجه نشود و معادل یکدیگر بکار روند. در واقع خطا به معنی انحراف از مقدار واقعی یا مقدار درست[6] است. اما در مفهوم عدم قطعیت ما مقدار درست را نمی‌دانیم و عدم قطعیتِ ناشی از عدم اطلاع ما از وضعیت درست می‌باشد. همچنین می‌توان اذعان نمود که دانستن عدم قطعیت درجه‌ای از اطمینان را به ما نشان می‌دهد.

مفهوم «تحلیل عدم قطعیت» در مدل‌های هیدرولوژی

همان‌طورکه در بخش‌های پیش اشاره شد، عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل، نتیجهٔ عدم قطعیت داده‌های ورودی، ساختار مدل و پارامترهای آن است. شکل (۲) نشان می‌دهد که چگونه منابع مختلف عدم قطعیت با پیچیدگی مدل تغییر می‌کنند. پیچیدگی مدل توسط تعداد پارامترهای آن و میزان نیاز به داده‌های ورودی تعیین می‌شود. با افزایش پیچیدگی مدل، جزئیات فرآیندهای فیزیکی بهتر ارائه شده و عدم قطعیت ساختاری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش پیچیدگی مدل، تعداد داده‌های ورودی و پارامترها نیز افزایش یافته و در نتیجه احتمال افزایش عدم قطعیت بیشتر می‌شود. بنابراین همواره بین عدم قطعیت ساختار مدل و عدم قطعیت پارامترها (یا داده‌ها) یک حالت بهینه از پیچیدگی مدل وجود دارد که عدم قطعیت کل[11] در آن حداقل است (Schoups و همکاران، ۲۰۰۸).

بنابراین عدم قطعیت در مدل‌ها نیازمند مدیریت و تحلیل است تا بتوان اثرات آن را کاهش داد. مشکل اصلی در شناخت فرآیندهای طبیعی، وجود عامل احتمال و برخی عوامل غیرقابل کنترل و ناشناخته است، از این‌رو «تحلیل عدم قطعیت» برای هر پدیده درکی واقعی از پارامترهای آن را نمایان کرده و شناخت درستی از نقش عوامل تأثیرگذار بر آن را ایجاد می‌نماید. در واقع هدف اصلی از «تحلیل عدم قطعیت» به کمیّت درآوردن ویژگی‌های آماریِ خروجی مدل (یا سیستم) است که به طور مستقیم به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها، ورودی‌های مدل و ساختار مدل بستگی دارد.



شکل ۲- ارتباط شماتیک بین منابع مختلف عدم قطعیت و اثر ترکیبی آن روی عدم قطعیت کل پیش‌بینی مدل

ارتباط واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی

در بخش قبل اشاره شد که منظور از تحلیل عدم قطعیت به کمیت درآوردن خروجی‌های نامطمئنِ مدل می‌باشد که اغلب به صورت بازه‌های اطمینان یا محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد، بیان می‌شود. در مدل‌سازی‌های هیدرولوژی معمولاً تحلیل عدم قطعیت به همراه واسنجی مدل و به صورت توأمان و براساس رویکردهای احتمالی (قانون بیز) انجام می‌شود. در ادامه تعریف ریاضی واسنجی یک مدل و مفهوم قانون بیز آمده است.

مدل‌های هیدرولوژی پارامترهایی دارند که اندازه‌گیری آنها به صورت مستقیم امکان‌پذیر نبوده یا این که ماهیت آن‌ها تجربی است. بنابراین در فرآیند مدل‌سازی می‌بایست این پارامترها را تخمین زد و یا واسنجی نمود. واسنجی پارامترها با استفاده از داده‌های مشاهداتی متناظر با خروجی مدل و به شیوه مدل‌سازی معکوس[۱۲] انجام می‌شود (Duan و همکاران، ۱۹۹۲). در فرآیند واسنجی، با کمینه کردن تابع هدف (به طور مثال مجموع مربعات خطا از مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده‌ی متناظر آنها) یک مجموعه مقادیر پارامتر بهینه به صورت دستی (سعی و خطا) یا به صورت خودکار جستجو می‌شود. برای مثال می‌توان به کد PEST اشاره کرد که یک روش تکرار و بر مبنای روش بهینه‌سازی ریاضی مارکوارت است (Doherty، ۱۹۹۴). از جمله ضعف‌های روش PEST، محدودیت در تعداد پارامترهای واسنجی و حساس بودن نتایج نسبت به تخمین اولیه‌ی پارامترها می‌باشد (Zhang و همکاران، ۲۰۰۶). از روش‌های دیگر واسنجی خودکار پارامترها می‌توان روش‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (Ines و Droogers، ۲۰۰۲) یا سایر روش‌های مرسوم بهینه‌سازی (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۱) را نام برد. در این روش‌ها علاوه بر برخی از محدودیت‌ها مانند زمان‌بر بودن و وجود پاسخ‌های غیر بهینه محلّی (local)، مهم‌ترین محدودیت آنها در واسنجی مدل‌ها این است که تنها یک مجموعه پارامتر بهینه محتمل بدست آمده و خطاهای موجود در مدل‌سازی درنظر گرفته نمی‌شود. بنابراین به سبب وجود خطاها، مجموعه پارامتر بدست آمده نمی‌تواند بیانگر واقعی رفتار سیستم باشد (Refsgaard و همکاران، ۲۰۰۷). در نتیجه اعتمادپذیری نتایج این روش‌ها در مدل‌سازی، کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر اخیراً روش‌های واسنجی که بر مبنای نظریه بیز[۱۳] هستند کاربرد گسترده و محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. در این روش‌ها این امکان وجود دارد که می‌توان شناخت و دانشی که از پارامترهای مدل وجود دارد را با داده‌های مشاهداتی متناظر با خروجی مدل ترکیب کرد. چنین نتایجی به صورت توزیع احتمال در فضای پارامتری مدل قابل بیان بوده و امکان به کمیّت درآوردن عدم قطعیت پارامترها نیز وجود دارد (Bates و Campbell، ۲۰۰۱). در واقع علت اصلی محبوبیت روش‌های بیز در تخمین پارامترهای مدل‌ها این است که چارچوبی را برای بررسی عدم قطعیت در مدل‌ها فراهم می‌کنند. مدل را می‌توان در قالب رابطه زیر در نظر گرفت:

$$Q_t = f(x_t;\theta) + \varepsilon_t \quad (۱)$$

که در آن $f(x_t;\theta)$ خروجی مدل در زمان t متناظر با مجموعه داده‌های ورودی مدل (یعنی x_t) مانند بارندگی و درجه حرارت، θ بردار پارامترهای مجهول مدل که باید تخمین زده شوند، ε_t مؤلفه‌ی خطا است و Q_t بردار داده‌های مشاهداتی (مانند جریان یا تغییرات رطوبت) در زمان t می‌باشد.

در ابتدا، شناخت اولیه از پارامترهای مدل (مجموعه پارامتر) در قالب توزیع احتمال آن $P(\theta)$، که توزیع پیشین[۱۴] نام دارد خلاصه می‌شود. تصمیم در مورد نوع توزیع پیشین بستگی به در دسترس بودن اطلاعات راجع به پارامترها دارد. برای مثال مرسوم‌ترین توزیع پیشین، توزیع یکنواخت (پخشیده) است که داری دو حد پایین و بالا می‌باشد. توزیع پسین[۱۵] پارامترها، $P(\theta|Q)$ با کاربرد نظریه بیز بدست می‌آید:

$$P(\theta|Q) = \frac{P(\theta)P(Q|\theta)}{P(Q)} \quad (۲)$$

که در آن $P(\theta|Q)$ تابع درست‌نمایی بوده و مقدار آن نشان می‌دهد که براساس داده‌های موجود و پارامترهای تخمین زده شده، مقادیر خروجی مدل تا چه میزان به مقادیر واقعی نزدیک هستند. به بیان دیگر $P(\theta|Q)$ مربوط به فرض‌های مرتبط با مؤلفه خطا ε_t در رابطه (۱) است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین $P(Q)$ بیانگر چگونگی توزیع داده‌های مشاهده‌ای است که مستقل از پارامترها بوده و در برآورد درست توزیع پسین (یعنی $P(\theta|Q)$) به صورت ضریب تناسب بکار می‌رود (Malakoff، ۱۹۹۹). بنابراین به طور خلاصه می‌توان بیان کرد که در روش‌های بیز، پارامترها متغیرهای تصادفی بوده که توسط تابع چگالی احتمال‌شان (pdf) درنظر گرفته شده و توزیع پیشین و پسین آنها نشان‌دهنده‌ی دانش ما درباره مقادیر آنها، قبل و بعد از استفاده از داده‌های مشاهداتی است.

روش‌های بیان عدم قطعیت و نمونه‌گیری مونت کارلو

در علوم مختلف نظریه‌هایی که برای بیان عدم قطعیت به کار می‌روند شامل نظریه احتمال، نظریه مجموعه‌های فازی و نظریه آنتروپی است. نظریه احتمال، اولین و اصلی‌ترین ابزار جهت بیان عدم قطعیت در انواع مدل‌های ریاضی (از جمله مدل‌های هیدرولوژی) بوده که از آن به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (Kundzewicz، ۱۹۹۵). به طور کلی روش‌های تحلیل عدم قطعیت برمبنای نظریه احتمال به سه دسته تقسیم می‌شوند: الف) روش‌های تحلیلی[۱۶]، ب) روش‌های تقریب‌زدن[۱۷] و پ) روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی[۱۸]. با توجه به قانون بیز در واسنجی مدل‌ها و با استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت می‌توان توزیع احتمال پسین پارامترهای مدل را به دست آورد. به سبب وجود روابط ریاضی پیچیده و غیرخطی در مدل‌های هیدرولوژی و نیز تعداد زیاد متغیرها (پارامترها)، کاربرد روش‌های تحلیلی و تقریب‌زدن، بسیار دشوار و در برخی شرایط ناممکن است. بنابراین در ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژی به طور گسترده از روش‌های شبیه‌سازی (که براساس نمونه‌گیری مونت کارلو[۱۹] می‌باشد) استفاده می‌شود.

در واقع، شبیه‌سازی مونت کارلو (MC) یک روش عددی جهت تولید متغیرهای تصادفی است به گونه‌ای که خصوصیات تابع توزیع حاکم بر آن‌ها را حفظ کند (Tung و Yen، ۲۰۰۶). در واقع روش MC تنها روشی است که به طور عملی می‌تواند توزیع احتمال خروجی(های) مدلی با درجه غیرخطی بالا و روابط پیچیده را تخمین زده و در ارزیابی‌های عدم قطعیت از آن به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. در این روش مقادیر تصادفی از هر کدام از متغیرهای (پارامترها) نامطمئن با توجه به توزیع‌های احتمالاتی آنها تولید شده و مدل به ازای هر مجموعه متغیر (پارامتر) تولید شده اجرا می‌شود. سپس ویژگی‌های آماری (مانند میانگین، انحراف معیار) خروجی مدل توسط روش‌های آماری استاندارد ارزیابی شده و در نهایت تابع توزیع خروجی(های) مدل تخمین زده می‌شود. درستی توزیع احتمالاتی و آماری خروجی در این روش، تابعی از تعداد شبیه‌سازی‌ها است. بنابراین افزایش نمونه‌برداری‌ها (شبیه‌سازی‌ها) موجب افزایش دقت در این روش می‌شود. برای افزایش راندمان روش MC، از روش مربع لاتین (LH) استفاده می‌شود (McKay و همکاران، ۱۹۷۹). روش مربع لاتین در واقع همان روش مونت کارلو است با این تفاوت که در آن نمونه‌گیری در فواصل مساوی از دامنه منطقی هر متغیر صورت گرفته که سبب افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو می‌شود.

مهم‌ترین روش‌های واسنجی-تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی بر مبنای نمونه‌گیری مونت کارلو می‌باشد؛ از جمله روش محبوب GLUE را می‌توان در این زمینه نام برد. همچنین از روش‌های مبتنی بر مونت کارلو، زنجیره مارکوف (MCMC) نیز دارای قابلیت‌های بیشتر از جمله سرعت بالاتر در رسیدن به جواب بهینه را دارا می‌باشد (پوررضا بیلندی و همکاران، ۱۳۹۳). در این مقاله با توجه به هدف آن به این روش‌ها پرداخته نشده است و می‌توان به Shafiei و همکاران (۲۰۱۴) و شفیعی و همکاران (۱۳۹۳و ۱۳۹۷) مراجعه نمود.

جمع‌بندی

تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اطلاعات بیش‌تری در مورد خروجی‌های مدل پیش‌بینی به‌دست آورده و با اطمینان بیش‌تری از نتایج آن‌ها در فرآیندهای تصمیم‌گیری استفاده کرد. بررسی عدم قطعیت از طریق شناخت منابع آن، به کمیّت درآوردن میزان آن و در نهایت تلاش جهت کاهش آن در مدل‌های هیدرولوژی از مهم‌ترین مسائل روز در مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. آنچه که ممکن است قبل از ورود به مباحث تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی کمتر توجه شود، عدم تسلط به مبانی و تعاریف اولیه این موضوع می‌باشد. همچنین اغلب مشاهده شده است که استفاده از ابزارها و نرم‌افزارهای آماده باعث شده تا به مفاهیم پایهٔ این موضوع کمتر توجه شود. بنابراین با توجه به رشد روزافزون استفاده از مفاهیم مورد نظر در تحقیقات علمی و دانشجویی، این مقاله مفاهیم، تعاریف و مبانی اولیه و ضروری مرتبط با ورود به بحث تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی را مد نظر قرار داده و تدوین نموده است. قابل ذکر است که پرداختن به روش‌های واسنجی ـ تحلیل عدم قطعیت با توجه به گستردگی و حجم بالای مطالب خارج از هدف این مقاله است.

پی‌نوشت

1- Uncertainty
2- Information world
3- Sureness
4- True
5- Error
6- True value
7- Observational or input data uncertainty
8- Model structure uncertainty
9- Complex
10- Parameter uncertainty
11- Total uncertainty
12- Invers modelling
13- Bays
14- Prior distribution
15- Posterior distribution

16- Analytical
17- Approximation
18- Simulation
19- Monte Carlo

منابع

پوررضا بیلندی، م.، آخوند علی، ع.، قهرمان، ب. و تلوری، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی دو الگوریتم مختلف مونت‌کارلو زنجیرمارکف در تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل توزیعی هیدرولوژیکی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۱(۵): ۱-۲۶.

شفیعی، م.، انصاری، ح.، داوری، ک. و قهرمان، ب. ۱۳۹۲. واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت یك مدل نیمه‌توزیعی در یك منطقه نیمه‌خشك. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی(علوم آب و خاک)، ۱۷(۶۴): ۱۳۷-۱۴۸.

شفیعی، م.، قهرمان، ب.، ثقفیان، ب.، داوری، ک. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP توسط روش GLUE. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۲): ۴۷۷-۴۸۸.

شفیعی، م. و قراری، ش. ۱۳۹۶. مروری بر مفاهیم مدل‌سازی هیدرولوژی: بخش اول، معرفی فرآیند مدل‌سازی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۴(۲): ۹۵-۱۰۲.

Abbaspour K.C., Schulin R. and van Genuchten M.T. 2001. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. Adv. Water Resour, 24: 827–841.

Bates B.C., and Campbell E.P. 2001. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall - runoff model-ing, Water Resour. Res., 37(4): 937–947.

Beven K. and Binley A. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrol. Process, 6: 279–298.

Doherty J. 1994. PEST: a unique computer program for model-independent parameter optimisation. Water Down Under 94 Groundwater/Surface Hydrol. Common Interes. Pap. Prepr. Pap. 551.

Duan Q., Sorooshian S. and Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 28(4): 1015-1031.

Ines A.V.M. and Droogers P. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. Hydrol. Earth Syst. Sci, 6: 49–66.

Kundzewicz Z. 1995. Hydrological uncertainty in perspective. In: Z. Kundzewicz (ed.), New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources, University Press, Cambridge, UK, 3-10.

Malakoff D. 1999. Bayes offers a 'New' way to make sense of numbers. Science, 286: 1460–1464.

McKay M.D., Beckman R.J. and Conover W.J. 1979. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics, 21: 239–245.

Merriam-Webster. 2003. Merriam Webster Online Dictionary. Retrieved May 26, 2003 from http://www.merriam-webster.com

Refsgaard J.C. and Knudsen J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resource Research, 32(7): 2189–2202.

Refsgaard J.C., van der Sluijs J.P., Højberg A.L. and Vanrolleghem P. 2007. Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. Environ. Model. Softw, 22: 1543–1556.

Ross T.J. 1995. Fuzzy logic with engineering applications. McGraw-Hill, New York, NY, USA.

Schoups G., Van de Giesen N. and Savenije H. 2008. Model complexity control for hydrologic prediction. Water Resources Research, 44, W00B03, doi: 10.1029/2008WR006836.

Shafiei M., Ghahraman B., Saghafian B., Davary K., Pande S. and Vazifedoust M. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region. Agricultural Water Management, 146: 324-334.

Tung Y. and Yen B. 2006. Hydrosystem engineering uncertainty analysis. McGraw-Hill Book Company, NY, USA.

Zhang D., Beven K. and Mermoud A., 2006. A comparison of non-linear least square and GLUE for model calibration and uncertainty estimation for pesticide transport in soils. Adv. Water Resour, 29: 1924–1933.