2018, Vol.4, No.2, Pages 95 to 102
Journal of Water and Sustainable Development

سال چهارم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۹۵ تا ۱۰۲
نشریه آب و توسعه پایدار

A Review on Hydrological Modelling Concepts: Part 1 - Introduction of Modelling Process

M. Shafiei[1, 2*], Sh. Gharari[3]

1- Hydroinformatics Department, East Water and Environment Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran. 2- Former expert of Studies Office, South Khorsan Water Authority, Birjand, Iran. 3- Global Institute for Water Security, School of Environment and Sustainability, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

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

Received: 27-01-2017
Accepted: 12-04-2017

Abstract

The processes and components of hydrological cycle are very complicated in nature, with significant spatial and temporal variation. This is due to high non-linear and complex relations between hydrological components, economical limitations for accurate measurements, and requiring a variety of data and information. The main solution for understanding and predicting hydrological processes at watersheds scale is using/developing simulation models based on desired goals. However, due to the lack of attentions to the concepts and practical knowledge, development of hydrological models has attracted less attention. By neglecting the modelling process in hydrological modelling, and starting this process directly by choosing a procedural model and its calibration would provide unreliable results. Therefore, it is essential to have a comprehensive and accurate inspection of the modelling process and its application as a useful tool for understanding and analyzing hydrological systems. This paper aims at providing concepts of hydrological modelling and introducing five-steps modelling process for watersheds, and finally presenting information about the various types of hydrological models.

Keywords: Perceptual model, Conceptual model, Verification, Calibration, Validation.

مروری بر مفاهیم مدل‌سازی هیدرولوژی: بخش اول، معرفی فرآیند مدل‌سازی

مجتبی شفیعی[۱،۲*]، شروان قراری[۳]

۱- استادیار پژوهش، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط‌زیست شرق (EWERI)، مشهد. ۲- کارشناس سابق بخش مطالعات، شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، بیرجند. ۳- محقق دوره پسادکتری، موسسه بین‌المللی امنیت آبی، دانشگاه ساسکاتون، کانادا.

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۳

چکیده

فرآیندها و مؤلفه‌های مرتبط با چرخه آب در طبیعت دارای ارتباطات نسبتاً پیچیده و همچنین تغییرات زمانی و مکانی بسیار گسترده و متفاوتی هستند. امروزه اصلی‌ترین راه‌حل در درک و پیش‌بینی این فرآیندها در حوضه‌های آبریز به سبب وجود روابط بسیار غیرخطی و پیچیده بین آنها، وجود محدودیت‌های اقتصادی در اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌ها و نیاز به داده‌ها و اطلاعات مختلف در شناخت فرآیندهای هیدرولوژی استفاده و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی با توجه به اهداف مورد انتظار می‌باشد. اما همواره به دلیل عدم وجود و رجوع به مبانی کار و شناخت مفاهیم کاربردی، چگونگی مدل‌سازی هیدرولوژی و توسعه مدل‌ها کمتر مورد توجه بوده است. نتایج مدل‌سازی‌های هیدرولوژی که بدون طی فرآیند مدل‌سازی و تنها با انتخاب یک مدل اجرایی و واسنجی آن انجام می‌شود از قابلیت اعتماد کمی برخوردار می‌باشند. بنابراین لزوم شناخت و نگاه دقیق‌تر به مدل‌ها، چگونگی توسعه آنها و کاربرد آنها به عنوان یک ابزار شناخت و تحلیل رفتار سیستم‌های هیدرولوژیک بسیار ضروری است. این مقاله با هدف ارائه تعاریف و دیدگاه‌های موجود در روند مدل‌سازی هیدرولوژی، معرفی فرآیند پنج‌گانه مدل‌سازی هیدرولوژی و در نهایت بررسی انواع مدل‌های هیدرولوژی تدوین شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل ادارکی، مدل مفهومی، صحت‌سنجی، واسنجی، اعتبارسنجی.

DOI: 10.22067/jwsd.v4i2.62154

مقدمه

شناخت ساز و کار چرخه آب در طبیعت و به طور کلی تغییرات جریان آب در زمان و مکان و انواع آن (مؤلفه‌های بیلان) از مهم‌ترین مسائل در مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. تخمین و پیش‌بینی مؤلفه‌های بیلان (هیدرولوژی) از جمله رواناب، تبخیر-تعرق و نفوذ در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌ها از مهم‌ترین ابزارهایی هستند که امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی چگونگی تغییرات چرخه آب در طبیعت و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب را مهیا می‌سازند. در واقع، تنها راه شناخت سامانه‌های هیدرولوژی و منابع آب و پیش‌بینی رفتار مؤلفه‌های آن استفاده از مدل یا به عبارتی مدل‌سازی فرآیندهای آن می‌باشد (Refsgaard و Knudsen، ۱۹۹۶؛ Refsgaard و همکاران، ۲۰۰۵). با رشد رایانه و گسترش روزافزون مخاطرات کمی و کیفی منابع آب، استفاده از مدل‌سازی در مدیریت منابع آب کشور تبدیل به ضرورتی اجتناب ناپذیر شده است. بنابراین، با تهیه مدل‌های مناسب امکان شبیه‌سازی تأثیر عوامل مختلف به راحتی فراهم شده و تصمیم‌سازی مبتنی بر دانش و تجربه می‌تواند جایگزین سعی و خطا گردد.

در رویکردهای جدید مدل‌سازی، فرآیندی را که طبق آن مهندسان برای سیستم‌های تحت بررسی خود به مدل‌سازی می‌پردازند یک هنر ابتکاری قلمداد می‌شود. برای دست یافتن به آن تنها دانستن قوانین و ضوابط موضوع مورد نظر کفایت نمی‌کند، بلکه نیازمند تمرین و ممارست و هوش و ذکاوت است (Savenije، ۲۰۰۹). روش درست مدل‌سازی چنین است که کار با مدلی بسیار ساده شروع شده، به تدریج به کامل‌کردن مدل پرداخته می‌شود. هر مسأله، معمولاً از تعداد بی‌شماری متغیر، پارامتر، محدویت، جزء و رابطه تشکیل می‌شود. به هنگام بررسی هر مسأله معمولاً برخی خصوصیات واقعی مربوط به آن صرف نظر شده و فقط آن دسته از خصوصیات که مستقیماً به هدف بررسی مسأله ربط پیدا می‌کند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از انواع مدل‌ها در پژوهش‌های دانشگاهی و اخیراً کاربرد مدل‌ها در مطالعات کاربردی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم (DSS)[1] این مقاله به صورت مختصر مفاهیم و تعاریف مدل‌سازی را به همراه فرآیند مدل‌سازی جمع‌بندی و معرفی کرده است. آنچه که اغلب در مطالعات و پژوهش‌های حوزه مدل‌سازی هیدرولوژی نادیده گرفته شده است عدم توجه به شناخت کامل سیستم منابع آب مورد شبیه‌سازی و عدم رعایت مراحل توسعه و کاربرد مدل بوده است. به طوری که در برخی مطالعات مدل‌سازی صرفاً تمرکز بر تهیه داده‌های ورودی مدل و در نهایت واسنجی مدل با روش‌ها و نرم‌افزارهای مرسوم بوده است. این امر باعث شده در سطوح مختلف کارشناسی اعتماد به نتایج مدل‌ها بسیار کم باشد و مدل‌سازی هیدرولوژی صرفاً به صورت یک فعالیت رایانه‌ای و نرم‌افزاری فرض شود. هدف مقاله حاضر مروری بر تعاریف و مفاهیم مدل و مدل‌سازی هیدرولوژی به همراه تشریح مراحل مدل‌سازی هیدرولوژی می‌باشد. بخش‌های مختلف مقاله شامل: تعاریف مدل، معرفی فرآیندهای پنجگانه مدل‌سازی، ارائه دسته‌بندی‌های مختلف مدل‌ها و در نهایت جمع‌بندی و ارائه چالش‌های مدل‌سازی می‌باشد.

تعریف مدل و مدل‌سازی هیدرولوژی

مدل در واقع چکیده یا ساده‌سازی شده‌ای از واقعیت (یک سیستم) می‌باشد (Refsgaard و همکاران، ۲۰۰۵). به عبارت دیگر مدل ابزاری است جهت خلاصه‌سازی و تجمیع دانش و شناخت ما از یک سیستم واقعی که توسط روابط و قوانینی قابل ارائه می‌باشد. در برخی متون تخصصی هیدرولوژی (Beven، ۲۰۱۲)، مدل را گمان مهندسی[2] یا یک فرضیه[3] برای درک چگونگی رفتار یک سیستم می‌دانند. بنابراین فرضیه‌های ممکن توسط داده‌های اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های فیزیکی سیستم هیدرولوژی آزمون[4] می‌شوند. در صورتی که فرضیه در نظر گرفته شده براساس آزمون‌های مطرح شده مورد قبول واقع شود، آن‌گاه آن فرضیه قادر به توضیح فرآیند مورد بررسی و رفتار سیستم خواهد بود. بنابراین از این دیدگاه، مدل‌سازی را می‌توان فرآیند آزمودن فرضیه‌های مختلف در رابطه با چگونگی عملکرد سیستم واقعی دانست. در واقع منظور از کلمه «مدل» به تنهایی یک کد رایانه‌ای یا نرم‌افزار شبیه‌سازی نیست. در این مفهوم مدل در حالت‌ها و موضوعات مختلف بکار می‌رود؛ به طور مثال مدل مفهومی، مدل ادراکی، مدل ریاضی یا مدل اجرایی و...

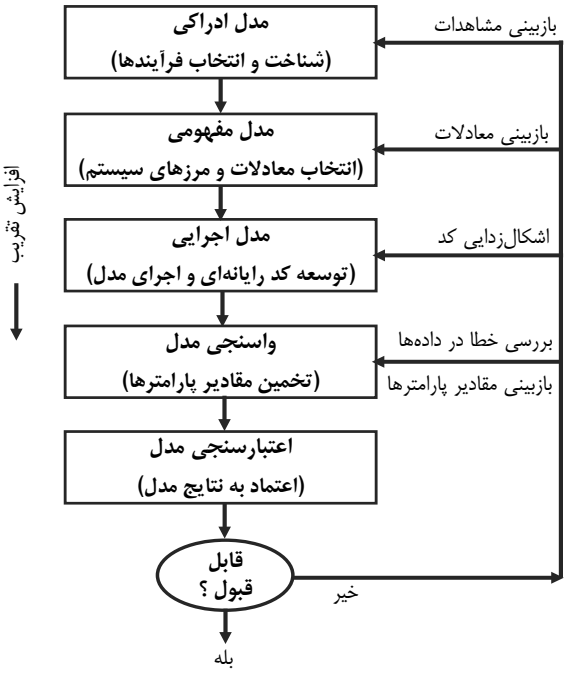
آنچه در ادبیات مدل‌سازی به عنوان مدل رایج شده است در واقع مدل اجرایی می‌باشد که در بخش بعد جزئیات آن تشریح شده است. در هیدرولوژی یک مدل اجرایی به مجموعه‌ای از روابط ریاضی و تعاملات آنها با هدف شبیه‌سازی فرآیندهای سیستم هیدرولوژی گفته می‌شود که به صورت کدهای (برنامه‌های) رایانه‌ای ایجاد و استفاده می‌شوند. هرچند که اغلب به جای کاربرد «مدل اجرایی» واژه «مدل ریاضی» یا «مدل» به تنهایی ممکن است استفاده شود. آنچه که در متون تخصصی هیدرولوژی و مدل‌سازی مرسوم است زمانی که واژه مدل به تنهایی استفاده می‌شود منظور مدل اجرایی می‌باشد.

فرآیند و مراحل مدل‌سازی هیدرولوژی

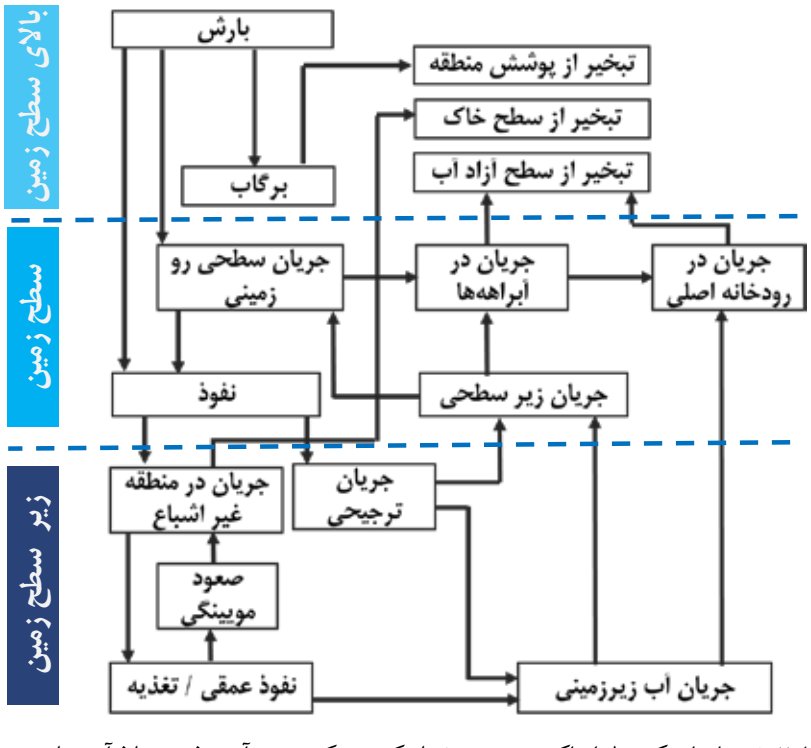
اغلب کتاب‌ها یا متون تخصصی برای شبیه‌سازی فرآیندهای مشخص هیدرولوژی مدل‌هایی را معرفی کرده‌اند یا به عبارتی فرآیند مدل‌سازی را با انتخاب مدل آغاز کرده‌اند. اما مراحلی قبل‌تر وجود دارد که در اغلب طرح‌ها و پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی از آنها صرف نظر شده است یا کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Beven، ۲۰۱۲). فرآیند مدل‌سازی در ۵ گام قابل توصیف است و در شکل (۱) به صورت شماتیکی نشان داده شده است. این گام‌ها در ادامه به تفکیک آمده است:

گام ۱ ـ تشکیل مدل اداراکی: اولین مرحله در فرآیند مدل‌سازی هیدرولوژی با ارائه مدل ادراکی[۵] فرآیندهای هیدرولوژی آغاز می‌شود (شکل ۱). مدل ادارکی خلاصه‌ای از شناخت و آگاهی از چگونگی پاسخ‌های[۶] حوضه آبریز به بارش اتفاق افتاده تحت شرایط مختلف یا به عبارتی شناخت شخص هیدرولوژیست از آن پاسخ‌ها می‌باشد. این امر به این موارد بستگی خواهد داشت: آموزش‌های دیده شده هیدرولوژیست، مطالعه کتب و مقالات، تحلیل مجموعه داده‌های مختلف و به خصوص تجربیات میدانی که شخص داشته است. بنابراین انتظار می‌رود که مدل ادراکی یک هیدرولوژیست با یک هیدرولوژیست دیگر متفاوت باشد.

می‌توان گفت که این مرحله، علمی‌ترین مرحله در فرآیند مدل‌سازی است. علم هیدرولوژی به دنبال بررسی چگونگی حرکت آب روی سطح زمین و زیر آن می‌باشد. بنابراین، چالش اصلی در این مرحله شناخت و تشخیص فرآیندهای غالب و مهم هیدرولوژی در حوضه و ارتباط دادن آنها به یکدیگر براساس اصول پایه علمی است. در شکل (۲) نمونه‌ای از یک مدل اداراکی به صورت شماتیکی در یک حوضه آبریز فرضی با فرآیندهای مختلف آن نشان داده شده است. مسلماً انجام بازدیدهای میدانی در این گام از اهمیت بسیاری برخوردار است.



شکل ۱- فرآیندهای پنج‌گانه مدل‌سازی هیدرولوژی



شکل ۲- نمونه‌ای از یک مدل ادراکی به صورت شماتیکی در یک حوضه آبریز فرضی با فرآیندهای مختلف

قابل ذکر است که تمامی تفاسیر و روابط ریاضی که برای پیش‌بینی‌ها استفاده می‌شوند در واقع حاصل ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل ادراکی است. مدل ادراکی با نظریه‌های ریاضی قابل محدود شدن نمی‌باشد، بلکه اساساً در فکر و ذهن شخص هیدرولوژیست وجود دارد و حتی لزومی به نوشتن آن نمی‌باشد. انسان می‌تواند پیچیده‌ترین فرآیندهای جریان را که حتی امکان ارائه آنها به صورت ریاضی دشوار باشد به صورت کاملاً کیفی درک کند؛ هرچند که توصیف ریاضی یک پدیده اولین گام در تشکیل یک مدل برای پیش‌بینی‌های کمّی است (گام دوم). مشاهدات و شناخت‌های صورت گرفته در این گام در مراحل بعدی ارزیابی می‌شوند و در صورت نیاز بازبینی و اصلاح می‌گردند.

گام ۲ ـ تشکیل مدل مفهومی: توصیف ریاضی جهت کمّی‌کردن پیش‌بینی‌ها را مدل مفهومی[۷] فرآیند یا فرآیندهای مورد بررسی می‌نامند. در این مرحله، فرضیه‌ها[۳] و فرض‌هایی[۸] با توجه به داده‌ها و اطلاعات موجود در نظر گرفته می‌شوند تا به کمک آنها بتوان توصیف کمّی فرآیندها را واضح‌تر بیان کرد.

در این مرحله به دنبال چگونگی و در نظر گرفتن مقیاس ارائه فرآیندهای شناسایی شده در مرحله قبل هستیم. در واقع گام قبلی براساس اصول محض علمی بوده است؛ اما این گام به نوعی هنر (ترکیبی از خلاقیت و مهندسی) می‌باشد. به طوری که تصمیم‌گیری در نحوه چگونگی معماری مدل و شکل‌دهی معادلات اساسی آن می‌باشد. این تصمیم‌گیری شامل انتخاب فرآیندهای غالب و تأثیرگذار هیدرولوژی براساس موجودیت و صحت داده‌ها، نحوه ارتباط آنها، انجام ساده‌سازی در آنها و در نهایت ارائه ساختار و روابط است. در واقع فرضیه‌هایی که در این مرحله شکل می‌گیرند، می‌بایست در گام‌های بعدی ارزیابی شوند و در صورت نیاز بازبینی یا اصلاح آنها انجام شود (Savenije، ۲۰۰۹؛ Beven، ۲۰۱۲).

یک مثال از مدل مفهومی، قانون دارسی است که تغییرات جریان در خاک با فرض اینکه تغییرات جریان تابعی از گرادیان هیدرولیکی است بکار می‌رود. در برخی خاک‌ها که گرادیان هیدرولیکی در فواصل کوتاه تغییر می‌کند (به سبب وجود جریان ترجیحی) در کاربرد قانون دارسی به طور ضمنی از فرض متوسط گرادیان هیدرولیکی در نیم‌رخ خاک استفاده می‌شود. بنابراین از تغییرات گرادیان هیدرولیکی در فواصل مختلف می‌توان صرف نظر کرد.

مدل مفهومی می‌تواند پیچیده یا ساده باشد، از معادلات ساده بیلان جرم گرفته تا معادلات غیرخطی دیفرانسیل جزئی که برای توصیف تغییرات ذخیره در یک مخزن بکار می‌رود. قابل ذکر است که در برخی مطالعات مدل‌سازی به خصوص مدل‌سازی‌های آب زیرزمینی تشکیل مدل ادارکی و مفهومی از اهمیت زیادی برخوردار است (Izady و همکاران، ۲۰۱۴)؛ به طوری که خروجی آنها در ترکیب با موجودیت داده‌های مورد نیاز، تعیین کننده ورود به (انتخاب) مدل اجرایی (گام سوم) می‌باشد.

گام ۳ ـ تشکیل مدل اجرایی: برخی معادلات و روابط حاصل از مدل مفهومی می‌توانند مستقیماً جهت محاسبات تبدیل به کدهای رایانه‌ای و ارائه مدل اجرایی[۹] شوند. از طرفی اگر معادلاتی امکان حل تحلیلی آنها با شرایط مرزی مشخص در سیستم واقعی وجود نداشته باشد (مانند معادلات با مشتقات جزئی)، یک مرحله دیگر از تقریب واقعیت لازم است که با روش‌های حل عددی به صورت یک مدل اجرایی (کدنویسی در رایانه) انجام می‌شود. مثال مرسوم از روش‌های حل عددی استفاده از روش‌های حل تفاضل محدود یا حجم محدود می‌باشد. در تبدیل (انتقال) معادلات از مدل مفهومی به کد مدل اجرایی بیشترین احتمال وقوع خطا در حل معادلات اصلی وجود دارد و باید این مرحله با دقت مضاعف انجام شود (Beven، ۲۰۱۲). یک گام مهم که در این مرحله انجام می‌شود، صحت‌سنجی یا اشکال‌زدایی[۱۰] کد رایانه‌ای یا مدل اجرایی می‌باشد. صحت‌سنجی به معنی کنترل و بازبینی کد رایانه‌ای و رفتار مدل اجرایی (حل معادلات آن) به کمک اعمال شرایط حدی و یا افزایش و کاهش تدریجی مقادیر ورودی به مدل و بررسی صحت خروجی‌های کد رایانه‌ای می‌شود.

گام‌های ۴ و ۵ـ واسنجی و اعتبارسنجی: با داشتن مدل اجرایی، کدی در اختیارمان قرار دارد که در رایانه‌ها قابلیت اجرا دارد. اما قبل از کاربرد کد جهت انجام پیش‌بینی‌های کمّی در یک حوضه آبریز می‌بایست پارامترها یا ضرایب مدل واسنجی[۱۱] یا به عبارتی تخمین زده شوند. تمامی مدل‌هایی که در هیدرولوژی استفاده می‌شوند دارای معادلاتی هستند که هر کدام شامل انواع مختلفی از متغیرهای وضعیت[۱۲] و ورودی‌ها[۱۳] می‌باشند (Beven، ۲۰۱۲). ورودی‌هایی وجود دارند که که تعریف کننده هندسه و شکل حوضه آبریز هستند و معمولاً در طول دوره شبیه‌سازی مقادیر ثابتی دارند. متغیرهایی وجود دارند که تعریف کننده شرایط مرزی متغیر در زمان در طول دوره شبیه‌سازی هستند، مانند بارندگی یا سایر متغیرهای هواشناسی که در گام زمانی مشخصی وجود دارند. متغیرهای وضعیت مانند ذخیره رطوبتی خاک یا سطح ایستابی آب است که در طول دوره شبیه‌سازی در اثر محاسبات در مدل تغییر می‌کنند.

پارامترهای مدل تعریف کننده ویژگی‌هایی از حوضه مانند مساحت یا جریان می‌باشند. به طور مثال پارامترهای مانند تخلخل و هدایت هیدرولیکی مربوط به خاک‌های مختلف در حوضه که می‌تواند به صورت توزیعی[۱۴] در نقاط مختلف حوضه برای مدل در نظر گرفته شود یا به صورت یکجا[۱۵] میانگین آن برای مقدار پارامتر مدل در نظر گرفته شود. مقادیر اغلب پارامترهای مدل در طول زمان ثابت فرض می‌شود (هرچند که برای برخی پارامترها مانند ظرفیت مقدار برگاب که مقدار آن تابع طول دوره رشد گیاه است، ممکن است این وابستگی نیز در نظر گرفته شود). در همه حالات به هر حال، تعیین مقادیر پارامترهای مدل از قبل به راحتی امکان پذیر نمی‌باشد؛ بنابراین نیازمند واسنجی یا تخمین مقادیر پارامترهای مدل هستیم. رایج‌ترین روش مورد استفاده

در واسنجی پارامترها، تغییر و اصلاح مقدار پارامتر تا منطبق شدن پیش‌بینی مدل با مقدار مشاهده شده از پاسخ حوضه (در صورت مهیا بودن آن) می‌باشد. فرآیند تخمین پارامترها یا واسنجی مدل اغلب به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. به طوری که واسنجی، به بهینه‌سازی (تخمین بهینه) پارامترهای مدل با هدف به حداقل رساندن تمایز خروجی‌های مدل با مقادیر مشاهداتی[16] (واقعی) اطلاق می‌شود (Abbaspour و همکاران، ۱۹۹۷).

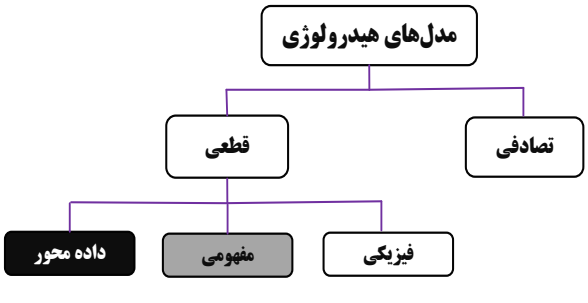
بعد از اینکه مقادیر پارامترهای مدل مشخص شدند، مدل اجرا می‌شود و نتایج شبیه‌سازی آن بررسی می‌شود. مرحله بعدی اعتبارسنجی[17] پیش‌بینی‌های مدل می‌باشد. اعتبارسنجی می‌تواند در یک چارچوب گسترده‌تر نیز باشد به طوری که شاخص‌هایی برای بررسی عملکرد مدل با مقایسه نتایج پیش‌بینی و واقعیت حوضه محاسبه شوند. مشکل معمول در این مرحله، پذیرش مدل با عمل واسنجی و یافتن مقادیر مناسب برای پارامترها نیست، بلکه احتمالاً وجود مجموعه مقادیر پارامترهای متفاوت است که موجب عملکرد یکسان در نتایج پیش‌بینی مدل شده و انتخاب بهترین مقادیر پارامترهای مدل را با چالش مواجه خواهد کرد. این موضوع مرتبط با ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی است که خارج از بحث و هدف اصلی این مقاله می‌باشد. آنچه که به طور معمول در واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده می‌شود به این طریق است که بخشی از داده‌های اندازه‌گیری شده را برای اعتبارسنجی مدل کنار می‌گذارند و در واسنجی استفاده نمی‌کنند و سپس مدل واسنجی شده را نسبت به پیش‌بینی آن داده‌ها ارزیابی می‌کنند. هر چند این روش اخیراً مورد نقد قرار گرفته است (Gharari و همکاران، ۲۰۱۳؛ Gharari و همکاران، ۲۰۱۴a و ۲۰۱۴b)؛ به طور مثال در برخی کاربردها از سایر متغیرهای وضعیت سیستم مانند تغییرات سطح آب زیرزمینی یا جریان در زیرحوضه‌ها و ... که در واسنجی استفاده نشده‌اند، برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده می‌شود که به معنی از دست دادن برخی از اطلاعات ارزشمند است. همین‌طور اخیراً روش واسنجی ـ اعتبارسنجی معرفی شده که با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی متفاوت[18] در واسنجی و یافتن مقادیر پارامترها به نحوی که عملکرد مدل در مجموعه بازه‌های مختلف به هم نزدیک باشد، واسنجی و اعتبارسنجی را با هم انجام می‌دهد (Gharari و همکاران، ۲۰۱۳).

در نهایت با توجه به آنچه در فرآیند مدل‌سازی و مراحل آن ذکر شد، می‌توان پیش‌بینی‌های انجام شده را به همراه سایر خروجی‌های مورد نظر براساس مدل اداراکی اولیه حوضه ارزیابی کرد. معمولاً یافتن یک مدل کاملاً منطبق بر شرایط یک حوضه امکان‌پذیر نیست. تفاوت‌های موجود را می‌توان عموماً با بازبینی مقادیر واسنجی شده پارامترها، تغییر یا اصلاح مدل مفهومی و در برخی حالات تصحیح مدل ادراکی بدست آمده از حوضه (به عبارتی بازبینی و تلاش مجدد در فهم فرآیندهای هیدرولوژی حوضه) برطرف کرد. همچنین قابل ذکر است که در دهه اخیر واسنجی مدل‌ها به همراه تحلیل عدم قطعیت انجام می‌شود (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۳) این امر باعث افزایش اعتماد به نتایج تخمین پارامترهای مدل و خروجی مدل می‌شود. تحلیل عدم قطعیت در کاربرد مدل‌ها، روش‌ها و مفاهیم مفصلی دارد که با توجه به هدف این مقاله در اینجا ارائه نشده است.

انواع مدل‌های هیدرولوژی

بر اساس یک طبقه‌بندی کلی انواع مدل‌های هیدرولوژیکی به دو دسته مدل‌های غیرقطعی یا تصادفی[19] و مدل‌های قطعی[20] تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های غیرقطعی در حقیقت روشی برای برآورد توزیع‌های احتمالاتی از خروجی‌ها با در نظر گرفتن تغییرات تصادفی متغیرهای ورودی مدل هستند (Refsgaard و Knudsen، ۱۹۹۶). از طرف دیگر در یک مدل قطعی از عنصر یا جزء تصادفی آن صرف نظر می‌شود. هر ورودی ثابت دارای یک خروجی ثابت است (Chow، ۱۹۶۴). از دیدگاه کاربردی مدل‌های غیرقطعی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مگر در شرایط توصیف و پیش‌بینی پدیده‌های خاص اقلیمی یا حدی مانند خشکسالی و سیل استفاده شوند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۰).

مدل‌های قطعی خود به سه دسته از لحاظ پیچیدگی تقسیم می‌شوند (شکل ۳) که شامل مدل‌های داده- محور[21] یا تجربی (معروف به جعبه سیاه[22])، مفهومی[23] (معروف به جعبه خاکستری[24]) و فیزیکی[25] (معروف به جعبه سفید[26]) هستند (Refsgaard و Storm، ۱۹۹۶). مدل‌های داده- محور یا تجربی همان‌طور که از اسم این مدل‌ها بر می‌آید، هیچ‌گونه تفسیری از فرآیندهای فیزیکی صورت گرفته در یک فرآیند هیدرولوژیکی را ارائه نمی‌دهد؛ ولی با استفاده از آن می‌توان پارامترهایی را پیش‌بینی نمود (مانند مدل‌های رگرسیونی یا شبکه عصبی) (Price، ۲۰۰۲). در مقابل، مدل‌های فیزیکی با استفاده از روابط ریاضی صرف و درک دقیق فرآیندهای موجود در یک سامانه، سعی در مدل کردن آن دارند؛ این در حالی است که مدل‌های هیدرولوژیکیِ مفهومی با درک رفتار سامانه به تفسیر فرآیندها و ارتباط آنها در شکل‌گیری یک پارامتر هیدرولوژیکی نظیر رواناب روزانه خروجی از حوضه می‌پردازند.



شکل ۳- تقسیم‌بندی انواع مدل‌های هیدرولوژی

۱- مدل‌های پایه فیزیکی در مقابل مدل‌های مفهومی

مدل‌های پایه فیزیکی جهت افزایش سطح آگاهی از پیچیدگی فیزیکی حاکم بر فرآیند تبدیل بارش به رواناب و به منظور توسعه مدل ریاضی از فرآیندهای متعدد، بر اساس قانون بقای جرم و انرژی متغیر بوده و رشد یافته‌اند. مدل‌های پایه فیزیکی به طور کلی مجموعه‌ای وسیع از مدل‌های دیفرانسیلی توزیعی را تشکیل می‌دهند (Abbott و همکاران، ۱۹۸۶). پارامترهای آنها معمولاً به وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی تعیین می‌شوند (Beven و Binley، ۱۹۹۲). از طرفی، مدل‌های مفهومی در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسعه پیدا کردند. دلیل اصلی برای توسعه چنین مدل‌هایی، نمایش چرخه هیدرولوژی با ارتباط دادن اجزاء فرآیند بارش-رواناب با مفاهیم فیزیکی حاکم بر حوضه به صورت مفهومی است. با این فرض که پارامترهای مدل، مفاهیم فیزیکی حاکم بر مدل را توصیف می‌کنند. به این ترتیب مقادیر پارامترهایی که منبع آنها مشخص نیست به داده‌های مشاهداتی مرتبط می‌گردند. به بیان دیگر فرض می‌گردد که بیشتر پارامترهای موجود در این نوع مدل‌ها مانند ضرایب ذخیره، ضرایب زبری و آستانه‌ها که در زیر اجزاء مختلف ارائه می‌گردد، توسط خصوصیات فیزیوگرافی حوضه حدس زده شده و در واقع چکیده‌ای از ویژگی‌های حوضه هستند (Todini، ۱۹۹۶). در حوضه‌های آبریز مدل‌های مفهومی بارش- رواناب ارائه دهنده چگونگی تبدیل بارندگی به رواناب، تبخیر- تعرق، حرکت آب به سمت سیستم آب زیرزمینی و تغییرات حجم آب در داخل حوضه‌ها توسط مجموعه‌ای از روابط ریاضی می‌باشند. این مدل‌ها ذخیره آب در حوضه آبریز را با استفاده از چندین مخزن[۲۷] مفهومی در نظر می‌گیرند که بیانگر نگه‌داری رطوبت در خاک، گیاه، آب زیرزمینی یا بستر رودخانه در حوضه آبریز است. جریان آب بین مخازن و ورودی و خروجی مدل توسط روابط ریاضی کنترل می‌شوند. معمولاً در مدل‌سازی‌های کاربردی مدل‌های مفهومی به مدل‌های پایه فیزیکی ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا ضمن ارائه پاسخ‌های قابل‌قبول، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند.

از مدل‌های معروف پایه فیزیکی می‌توان MIKE SHE را نام برد (Abbott و همکاران، ۱۹۸۶). این مدل قادر است تمامی فرآیندهای هیدرولوژی را با جزئیات کامل شبیه‌سازی کند. به طور مثال از حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی جریان در محیط غیراشباع استفاده می‌کند. کاربرد این مدل نیازمند داده‌های ورودی زیاد و تعریف شرایط مرزی مختلف می‌باشد. از مدل‌های معروف مفهومی می‌توان مدل HBV، HyMod، SWAT، و FLEX را نام برد (Bergström، ۱۹۷۶؛ Arnold و همکاران، ۱۹۹۸؛ Fenicia و همکاران، ۲۰۱۱). این مدل‌ها از روابط ساده‌شونده‌ای جهت ارائه فرآیندهای هیدرولوژی استفاده کرده‌اند و اغلب آنها بنا به رویکرد کاربرد آنها (توزیعی یا یکجا) به داده‌های ورودی کمی نیاز دارند. به طور مثال ورودی‌های مدل HyMod تنها بارندگی، درجه حرارات و تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشد.

قابل ذکر است که در بحث انواع مدل‌های هیدرولوژی، مدل مفهومی را نبایستی با مرحله دوم مدل‌سازی (به عبارتی تشکیل مدل مفهومی) اشتباه گرفت. در این بحث، مدل‌های مفهومی (مدل اجرایی با فرضیات ساده شونده) در مقابل مدل‌های پایه فیزیکی (مدل اجرایی نسبتاً پیچیده و با در نظر گرفتن تمامی جزئیات فرآیندها) مقایسه شده و به کار می‌روند.

۲- مدل‌های توزیعی در مقابل مدل‌های یکجا

مدل‌های یکجا[۱۵] سطح حوضه را به عنوان یک واحد یکنواخت جهت محاسبه فرآیندها در نظر می‌گیرند و کاربرد آنها ساده است. اما مدل‌های توزیعی[۱۴] تمام تغییرات عوارض زمین را در نظر می‌گیرند. به عبارتی غیر همگنی[۲۸] حوضه را در محاسبات با در نظر گرفتن شبکه‌های محاسباتی سلولی لحاظ می‌کنند. مدل‌های توزیعی نیازمند ابزار قویتری جهت کاربرد هستند. اغلب کاربردهای مدل‌های مفهومی به صورت یکجا بوده است. به طوری که فرض بر آن است که تغییرات سری زمانی داده‌های اقلیمی و پارامترهای مدل در سطح حوضه یکنواخت[۲۹] هستند. اخیراً به طور گسترده‌ای کاربرد آنها به صورت نیمه‌توزیعی[۳۰] مورد توجه قرار گرفته است. در حالت نیمه توزیعی حوضه آبریز به زیرحوضه‌ها یا واحدهای همگنی تقسیم می‌شوند که در هر کدام از آنها پارامترها و ورودی‌های مدل یکسان در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر مدل‌های پایه فیزیکی اغلب به صورت کاملاً توزیعی استفاده می‌شوند و واحدهای محاسباتی در آنها به صورت شبکه‌ای یا سلولی با ابعاد مشخص در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به رشد استفاده از مدل‌های مفهومی به صورت نیمه‌توزیعی، امروزه مطالعات مختلفی در این حوزه در حال انجام است. این مطالعات از نحوه ارائه ساختار مدل‌ها گرفته تا نحوه واسنجی مدل‌ها وجود دارد (Gharari و همکاران، ۲۰۱۴b). یکی از معروف‌ترین مدل‌های مفهومی ـ نیمه‌توزیعی مدل SWAT (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸) می‌باشد. این مدل ناهمگنی‌های مکانی در حوضه را با تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها و سپس زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای محاسباتی کوچکتر در نظر می‌گیرد. این واحدهای محاسباتی، واحدهای هم‌واکنش هیدرولوژیک (HRU)[۳۱] نامیده می‌شوند. این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از پوشش گیاهی، خاک و پستی و بلندی می‌باشند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲).

جمع‌بندی

امروزه با توجه به رشد روز افزون فناوری‌ها و قابلیت‌های محاسباتی در رایانه‌ها، پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌های فرآیندهای منابع آبی بسیار گسترش یافته‌اند. به طوری که در اغلب مطالعات کاربردی منابع آب مانند ارزیابی مولفه‌های بیلان آب، پیش‌بینی جریان رودخانه، پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده از مدل‌ها امری غیر قابل انکار می‌باشد. هرچند که توصیه می‌شود که نگاه به مدل تنها به عنوان یکی از ابزارهای شناخت و پشتیبان تصمیم‌گیری در مطالعات باشد و نه به عنوان جایگزین یک کارشناس متخصص. بنابراین با این دیدگاه استفاده از مدل باعث افزایش بینش و درک هیدرولوژیست از فرآیندهای مورد مطالعه و ارزیابی اثرات تغییرات محتمل در حوضه از طریق سناریوسازی‌های مختلف می‌شود.

مقاله حاضر به جمع‌بندی و تدوین تعاریف مدل و مدل‌سازی، ارائه مراحل مدل‌سازی و پیشرفت‌های اخیر آن و در نهایت بررسی انواع مدل‌های هیدرولوژی پرداخته است. این امر تا حدی اندک در یکسان‌سازی ادبیات استفاده و کاربرد مدل‌ها در شبیه‌سازی‌های حوضه آبریز و تغییر نگرش در این زمینه می‌تواند موثر باشد. در این مورد می‌توان مدل‌سازی‌های حوضه‌های آبریزی که بدون طی فرآیند مدل‌سازی و فقط با انتخاب یک مدل اجرایی و واسنجی آن انجام می‌شود، مدل‌سازی ناآگاهانه یا کورکورانه نامید. قابل ذکر است که پیشرفت‌های بسیار زیاد و متفاوتی در حوزه‌های مدل‌سازی هیدرولوژی وجود دارد؛ از جمله می‌توان به روش‌ها و مبانی تحلیل عدم قطعیت، ارزیابی ریسک استفاده از مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌ها، مباحث پیشرفته در مدل‌سازی‌های آب سطحی و زیرزمینی و فرضیات آنها و در نهایت کاربرد عملی مدل‌ها در قالب سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری از طریق فراهم‌آوری دسترسی به داده‌ها (بانک اطلاعات) و ایجاد رابط‌های گرافیکی جهت سهولت در استفاده از مدل‌ها اشاره نمود. این موارد خارج از هدف مروری حاضر بوده است و به طور حتم از جمله موارد کاربردی و مهمی به شمار می‌رود که می‌توان موجب افزایش اعتمادپذیری و استفاده درست از مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌ها شود.

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر بخشی از طرح تحقیقاتی انجام شده در شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی می‌باشد. بدین وسیله از همکاری خانم مهندس شهابی فرد، خانم مهندس موسی‌زاده و آقای مهندس خراشادی‌زاده تشکر می‌شود.

پی‌نوشت

1- Decision support system
2- Expert guess
3- Hypothesis
4- Test
5- Perceptual
6- Response
7- Conceptual
8- Assumptions
9- procedural
10- Verification
11- Calibration
12- State variable
13- Inputs or forcing
14- Distributed
15- Lump
16- Observational data
17- Validation or Evaluation
18- Sub-period
19- Stochastic
20- Deterministic
21- Data driven
22- Black box
23- Conceptual model
24- Grey box
25- Physical based model
26- White box
27- Bucket
28- Non-homogeneity
29- Consistent
30- Semi-distributed
31- Hydrologic Response Unit

منابع

شفیعی، م.، قهرمان، ب.، انصاری، ح. و شریفی م. ب. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۲): ۱-۱۳.

شفیعی، م.، انصاری، ح.، داوری، ك. و ب، قهرمان. ۱۳۹۲. واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت يك مدل نیمه‌توزیعی در يك منطقه نیمه‌خشك. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، 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.

Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E. and Rasmussen J. 1986. An Introduction to the European Hydrological System–Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically based, distributed modelling system. Journal of Hydrology, 87(1): 61-77.

Abbaspour K.C., van Genuchten M.T., Schulin R. and Schläppi E. 1997. A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. Water Resour, Res. 33: 1879–1892.

Arnold J.G., Srinivasan R.S., Muttiah R, and Williams J.R.. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. J. Amer. Water Resour. Assoc., 341: 73-89.

Bergström S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian

catchments, SMHI, Report No. RHO 7, Norrköping, 134 pp.

Beven K.J. 2012. Rainfall-runoff modelling: the primer. Wiley Chichester. 457 pp.

Beven K.J. and Binley A.M. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6: 279–298.

Chow V. 1964. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill, New York, NY, USA.

Fenicia F., Kavetski D. and Savenije H.H.G. 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. Water Resour. Res., 47, W11510, doi: 10.1029/2010WR010174.

Gharari S., Hrachowitz M., Fenicia F. and Savenije H.H.G. 2013. An approach to identify time consistent model parameters: sub-period calibration. Hydrology and Earth System Sciences, 17(1): 149–161.

Gharari S., Shafiei M., Hrachowitz M., Kumar R., Fenicia F., Gupta H.V. and Savenije H.H.G. 2014a. A constraint-based search algorithm for parameter identification of environmental models. Hydrology and Earth System Sciences, 18 (12): 4861–4870.

Gharari S., Hrachowitz M., Fenicia F., Gao H. and Savenije H.H.G. 2014b. Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. Hydrology and Earth System Sciences, 18(12): 4839–4859.

Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ziaei A.N., Alipoor A., Joodavi A. and Brusseau M.L. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. Arabian Journal of Geosciences, 7(9): 3611-3631.

Price R.K. 2002. Hydroinformatics: Advanced study course on river basin modelling for flood risk mitigation, The University of Birmingham, UK, pp. 5.1-5.19.

Refsgaard J.C. and Storm B. (eds.), 1996. Distributed hydrological modelling. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

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., Henriksen H.J., Harrar W.G., Scholten H. and Kassahun A. 2005. Quality assurance in model based water management - review of existing practice and outline of new approaches. Environmental Modelling & Software 20(10), 1201–1215.

Savenije H.H.G. 2009. Hess opinions "the art of hydrology". Hydrology and Earth System Sciences, 13: 157–161.

Todini E. 1996. The ARNO rainfall—runoff model. Journal of hydrology, 175(1-4): 339-382.