2017, Vol.3, No.2, Pages 93 to 104
Journal of Water and Sustainable Development

سال سوم، شماره ۲، اسفند ۱۳۹۵، صفحات ۹۳ تا ۱۰۴
نشریه آب و توسعه پایدار

معرفی نرم‌افزار «Menyanthes» برای تحلیل سری‌های زمانی هیدروژئولوژیک با نگرش فیزیکی

ترجمه: بابک خیاط رستمی

کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی.
E-Mail: babak.kh.rostami@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲

چکیده

نرم‌افزار منیانتیس[۱] مجموعه‌ای از توابع برای ادغام، ویرایش، تصویرسازی، تحلیل و مدل‌سازی هیدرولوژیکی سری‌های زمانی را در بردارد. این نرم‌افزار به منظور ترکیب روش‌های داده محور و مبتنی بر فیزیک در مدل‌سازی سری‌های زمانیِ تراز آب زیرزمینی تدوین گردیده است. در این نرم‌افزار، سری‌های زمانی با روش‌های آرما[۲] و پیرفیست[۳] مدل‌سازی می‌شوند. پیرفیست روش جدیدی برای تحلیل سری‌های زمانی است که دارای مزایای کاربردی بوده و امکان تفسیر و بکارگیری دانش در مورد رفتار فیزیکی را فراهم می‌سازد. روش‌های تحلیلی برای مسائل خاص هیدرولوژیک را در کنار پارامترهای فیزیکی آن‌ها می‌توان به‌عنوان تابع جواب استفاده نمود. مدل پیرفیست با تعداد زیادِ سری‌های زمانی تطبیق‌پذیر است. الگوی مکانیِ حاصله، اطلاعات مفیدی بدست می‌دهد که بُعد جدیدی به تحلیل سریهای زمانی اضافه می‌کند. نرم‌افزار Menyanthes امکان تفسیر آن‌ها را با ابزارهای تصویرسازیِ مکانی و تحلیلی فراهم می‌آورد. روش پیرفیست، همچنین ادغام سری‌های زمانی و مدل‌های مکان محور را فراهم می‌سازد. روش پیرفیست را می‌توان خارج از قلمرو علوم زیست محیطی، برای سری‌های زمانی دیگر نیز بکار برد.

واژه‌های کلیدی: پیرفیست، تحلیل سری‌های زمانی، تراز آب زیرزمینی، ارزیابی اثرات، منیانتیس.

Introduction to Menyanthes Software for Hydrogeologic Time Series Analysis with Physical Insight

Translated by: B.Khaiatrostami

M.Sc of Civil Engineering-Hydraulics, Young Researchers Club Member in Islamic Azad University, Iran.
Email: babak.kh.rostami@gmail.com

Received: 9-2-2016
Accepted: 23-8-2016

Abstract

The program Menyanthes combines a variety of functions for managing, editing, visualizing, analyzing, and modeling hydrogeologic time series. The primary aim of the software is the integration of data-driven and physics-based methods for modeling time series of groundwater heads. Within Menyanthes, time series can be modeled using both the ARMA and PIRFICT methods. The PIRFICT method is a new method of time series analysis that has practical advantages as well as facilitating the physical interpretation and implementation of knowledge on the physical behavior. The analytical solutions for specific hydrogeologic problems may be used as the response function, along with their physics-based parameters. The PIRFICT model may be fitted with a large number of time series in batch. Spatial patterns that emerge from the results provide useful information which adds a new dimension to the time series analysis. The Menyathes software provides spatial visualization and analysis tools for their interpretation. The PIRFICT method also facilitates the integration of time series and spatially-distributed models. The PIRFICT method may prove to be of use for other types of time series as well, both within and outside the realm of environmental sciences.

Keywords: PIRFICT, Time series analysis, Groundwater head, Impact assessment, Menyanthes.

ترجمه از :

Von Asmuth J.R., Maasa K., Knotters M., Bierkens M.F.P., Bakker M., Olsthoorn T.N., Cirkel D.G., Leunk I., Schaars F. and Von Asmuth D.C. 2012. Software for hydrogeologic time series analysis, interfacing data with physical insight, Environmental Modelling & Software, 38: 178–190.

DOI: 10.22067/jwsd.v3i2.53715

مقدمه

- نقاط قوت و محدودیت‌های مدل‌های سری زمانی

پویائی سیستم‌های زیست محیطی، چه طبیعی و چه محصول بشر، موضوع علوم مختلف است. در نتیجه، بسته به نوع سیستم مورد بررسی، کارکرد فیزیکی آن، در دسترس بودن داده‌ها و روش حل مسأله، تئوری و روش‌های تحلیل داده‌های سری‌های زمانی دامنه کاربرد وسیعی دارد؛ از جمله در تحلیل سیستم، مهندسی کنترل، پردازش سیگنال،. تئوری و روش‌های مورد استفاده در این زمینه‌ها به میزان قابل توجهی مشابهند. استفاده از مدل‌های سری زمانی موسوم به آریما[۴] رایج است، هر چند تفاوت‌هایی از نظر روش‌ها دارند. این مدل‌ها از دهه ۱۹۷۰ رو به رشد نهادند (Box و Jenkins، ۱۹۷۰).

به رغم توسعه‌ی مدل‌های فیزیک‌محور و توزیع‌یافته، مدل‌های نسبتاً ساده و داده‌محور نظیر مدل‌های سری زمانی آریما هنوز در علوم زیست محیطی به طور گسترده بکار می‌روند. مزایای مدل‌های سری زمانی فیزیک‌محور و توزیع‌یافته عبارتست از دقت نسبتاً زیاد، سادگی ایجاد و پیش زمینه‌ی قوی آماری. دو مزیت اول از آنجا ناشی می‌شوند که مدل‌های سری زمانی ابتداً سیستم فیزیکی را به صورت یک «کل» در نظر می‌گیرند. رفتار عمومی سیستم در یک نقطه معین بدون نیاز به تعریف صریح ساختار مکانی آن مدل می‌شود. در مقابل، مدل‌های فیزیک محور و توزیع یافته به‌صورت پایین به بالا ایجاد شده و به همه‌ی جزئیات نیاز دارند. نیاز به حجم زیادی از داده‌ها باعث می‌شود که همبستگی‌ها، برون‌یابی‌ها و مفروضاتی که قابل صحت‌سنجی نیستند، بخش اعظم مدل را تشکیل دهند(Oreskes، ۱۹۹۴). چنین مسائلی گاه می‌تواند سیستم‌های پیچیده زیست محیطی را به بن بست برساند (Beven، ۲۰۰۲).

البته مدل‌های آریما چند محدودیت دیگر نیز دارند. اولین محدودیت، مسأله تشخیص مرتبه‌ی مدل است. روش‌های پیشنهاد شده تا حدودی مبهم و ابتکاری هستند، پس استفاده از مدل‌های آریما تسلط به پیش زمینه تئوریک آن‌را می‌طلبد. ادبیات موجود در زمینه سری‌های زمانی، کاملاً تخصصی و پیچیده است. دومین مسأله نحوهء مواجهه با داده‌های نامنظم یا با فرکانس بالاست که در کارهای عملی هیدرولوژیک متداول‌اند ولی مدل‌های آریما را با مشکل مواجه می‌سازند، زیرا به همبستگیِ خودکارِ داده‌ها و مسائل ناشی از آن منجر می‌شوند. سومین معضل در برون‌یابی داده‌ها بروز می‌کند. به خاطرِ ماهیتِ داده‌محورِ سری‌های زمانی، در مواقعی که با فقدان داده مواجهیم برون‌یابی با مشکل مواجه می‌شود؛ مثلاً موقع محاسبه سناریوها. چهارم، علیرغم سادگی ذاتی مدل‌های آریما، هنگامی که سیستم ورودی‌های متعددی دارد یا ورودی‌ها در طول زمان چندان تغییری نمی‌کنند، جداسازی تأثیرات و برآورد صحیح، قابل اطمینان و منحصر به‌فرد پارامترها مشکل است. به‌عنوان پنجمین و آخرین مشکل، استفاده از آریما و مدل‌های سری زمانی (استاندارد) محدود به سیستم‌هائی است که خطی عمل می‌کنند یا رفتار آن‌ها تقریباً خطی فرض می‌شود. هر چند مدل‌های سری زمانی غیرخطی نیز وجود دارند و با موفقیت استفاده شده‌اند، کاربرد آن‌ها در مسائل خطی به اندازه آریما عمومیت ندارد و فقط در موارد خاص بکار می‌روند. برای بهبود قابلیت‌های مدل‌های سری زمانی، می‌بایست آن‌ها را با مؤلفه‌هایی ترکیب نمود که بتوانند خصوصیات غیر خطی فرآیندها را نظیر آنچه در ناحیه غیر اشباع اتفاق می‌افتد، تعریف کنند (Berendrecht، ۲۰۰۴؛ Peterson، ۲۰۱۱). در سایر موارد، شبکه‌های عصبی مصنوعی راهکار عمومی‌تری ارائه می‌کنند و بطور گسترده در پیش‌بینی جریان رودخانه (Maier، ۲۰۱۰)، تراز آب زیرزمینی (Daliakopoulos، ۲۰۰۵) و متغیرهای دیگر بکار می‌روند. البته با توجه به اینکه فهم ساختارهای ساده و خطی آسان‌تر است، مدل‌های سری زمانی می‌توانند در موارد غیر خطی هم مفید باشند. کارایی و نتایج آن‌ها می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای نتایج مدل‌های غیرخطی و پیچیده‌تر عمل کند.

- پیشرفت‌های اخیر و استفاده از نگرش فیزیکی

یک راه حل ممکن برای محدودیت‌های فوق الذکر، بهره‌گیری از دانش فیزیکی در مورد عملکرد یک سیستم یا ادغام روش‌های داده‌محور با روش‌های فیزیک‌محور است. این نکته مورد توجه قرار گرفته است که عملکرد انتقالی مدل‌های سری زمانی، که پاسخ سیستم‌ها در طول زمان را تعریف می‌کند، باید یک مبنای فیزیکی داشته باشد، حداقل وقتی آن‌را در مورد یک مفهوم فیزیکی نظیر نوسانات سطح آب زیرزمینی به‌کار می‌بریم (Van Geer، ۱۹۸۷). وقتی که نگرش فیزیکی را وارد کاربرد مدل‌های سری زمانی می‌کنیم، رویکردهای زیر آشکار می‌گردند: اول، دانش فیزیکی بصورت استقرائی برای انتخاب صحیح مرتبه مدل از بین پیش‌فرض‌ها استفاده می‌شود. انتخاب بر این پرسش استوار است که آیا نتایج و توابع انتقالی محاسبه شده مدل از منظر فیزیکی-هیدرولوژیکی قابل قبول هستند یا خیر؟ (Price، ۲۰۰۰). بارش، مثال ساده‌ای است که باید به افزایش و عدم کاهش تراز آب منجر شود. نگرش دوم عکس این فرآیند است، که طی آن، مرتبه مدل از راه قیاسی و تحلیل فیزیکی-هیدرولوژیکی سیستم انتخاب می‌شود (Knotters و Bierkens، ۲۰۰۰). در نگرش سوم، ساختار

گسسته و آمار محورِ مدل آریما با ساختاری جایگزین می‌شود که در آن، توابع پاسخ به‌صورت زمان پیوسته به کار رفته باشند (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۵). این نگرش نسبت به تحلیل سری‌های زمانی، روش پیرفیست نامیده می‌شود. در این روش، راه‌حل‌های تحلیلی برای مسائل ژئوهیدرولوژیکی را می‌توان مستقیماً به‌عنوان توابع پاسخ استفاده نمود. در نتیجه، مدل‌های سری زمانی در پاسخ به تحریک‌های مختلف باید رفتار معین و قابل قبول از نظر فیزیکی نشان دهند. اثبات شده است که توابع توزیع ساده نظیر توزیع گاما، با رفتار اغلب سیستم‌های هیدرولوژیک بدون توجه به مشخصات یا ساختار خاص آن‌ها انطباق دارند. پیشرفت‌های دیگری در زمینه مدل‌سازی داده‌های نامنظم یا فرکانس بالا، و ترکیب سری‌های زمانی و مدل‌های مکان محور حاصل شده است (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۵؛ Yi و Lee، ۲۰۰۴).

مواد و روش‌ها

- روش پیرفیست و کاربرد توابع توزیع

روش جدید تحلیل سری‌های زمانی به نام پیرفیست ارایه شده است (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۲). تفاوت این روش با انواع روش‌های آریما و مدل‌های سری زمانی وابسته، اعم از زمان گسسته یا پیوسته، (Young و Garnier، ۲۰۰۶) در فرمول‌بندی آن به صورت یک انتگرال تلفیقی (زمان پیوسته) به جای معادله دیفرانسیل یا تفاضل مکانی می‌باشد.

روش استاندارد برای حل معادلات دیفرانسیل سیستم‌های دینامیک خطی به صورت صریح، در نظر گرفتن جواب آن‌ها به صورت یک تابع دلتای دیراک δ است (Dirac، ۱۹۴۷). تابع پاسخ جهشی θ به صورت اثر دلتا و ورودی p روی حالت سیستم h، یعنی انحراف زمانی از حالت پایدار d تعریف می‌شود. از منظر آب زیرزمینی، θ را می‌توان پاسخ یک بارش بسیار کوتاه مدت به ارتفاع واحد در نظر گرفت، در صورتی که هد ثابت یا برابر با زهکشی موضعی باشد. θ به زبان ریاضی، با شرایط ذیل تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \theta(t) = h(t) - d \\ h(t) = d,\ t<0 \\ p(t) = \delta(t) \end{cases} \qquad (۱)$$

اگر θ و d معلوم باشند، h را می‌توان از ورودی p بدست آورد، که به‌صورت دلخواه در دوره زمانی تغییر می‌کند. θ اساساً می‌تواند یک تابع ریاضی پیوسته دلخواه با انتگرال مشخص باشد. روش پیرفیست مزایای کاربردی مختلفی دارد و از دو طریق به ترکیب داده و روش‌های فیزیکی کمک می‌کند. اول، می‌توان رفتار فیزیکی سیستم را به‌عنوان تابع پاسخ θ مستقیماً در مدل لحاظ نمود. دوم، می‌توان نتایج مدل‌های سری زمانی و مدل‌های توزیع یافته فیزیکی را با استفاده از گشتاورهای توابع پاسخ جهشی تطبیق داد (Bakker، ۲۰۰۸).

هر چند ممکن است از راه‌حل‌های تحلیلیِ فیزیک‌محور و مختص سیستم برای θ استفاده نمود، رویکرد کلی‌تری نیز امکان‌پذیر می‌باشد. قدم اول در این راه، توسط مؤلفین مختلفی برداشته شده است، که به طور مستقل و برای مسائل مختلف، مشاهده نموده‌اند که توابع پاسخ جهشی به شکل یک تابع توزیع چوله در می‌آیند. Nash در سال ۱۹۵۸ در این راه پیشگام بوده و استفاده از توزیع گاما برای مدل‌سازی بارش-رواناب را ارایه کرده است. توزیع گاما عبارتست از:

$$\theta(t) = [a^n t^{n-1} \exp(-at)] / \Gamma(n) \qquad (۲)$$

که a و n ثابت هستند. مشابه فیزیکی توزیع گاما، آبشاری از مخازن خطی است، که به آبشار نش نیز معروف می‌باشد. مطالعات مختلف پس از Von Asmuth و Bierkens در سال ۲۰۰۲ نشان داده است که توزیع گاما با مقیاس (یعنی توزیع گاما ضرب‌در یک عدد ثابت) را می‌توان به طور مؤثر برای مدل‌سازی پاسخ تراز آب نسبت به تغذیه استفاده نمود، و نتایج حاصله (از نظر واسنجی و صحت‌سنجی) حداقل به اندازه مدل‌های آرما رضایت‌بخش هستند. Bakker در سال ۲۰۰۸ نتیجه گرفته است که توزیع گاما با مقیاس، همچنین تابع چاهِ هانتوش (Hantush، ۱۹۵۶) و تابع زمینِ بروگمان (Bruggeman، ۱۹۹۹) حالت‌های خاصی از تابع ذیل می‌باشند:

$$\theta(t) = At^v \exp(-at-(b/t)) \qquad (۳)$$

که در آن A، v و b ثابت هستند. این تابع، توزیع گوسیِ متحرکِ تعمیم‌یافته نام گرفته و مشخصات ریاضی آن ارایه شده است (Veling، ۲۰۱۰).

- محدوده مقاله

روش‌های مرتبط با رویکرد پیرفیست در مقالات مختلفی ارائه و بررسی گردیده‌اند. نشان داده شده است که روش پیرفیست امکان بررسی یکپارچه رفتار فیزیکی، کاهش تعداد پارامترها و اجتناب از خطاهای ناشی از فرکانس داده‌ها در مدل‌های سری زمانی را فراهم می‌کند (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۵). روش پیرفیست برای مواجهه با شرایط پیچیده و انواع تنش‌ها، توسعه یافته و آزمایش شده است (Von Asmuth، ۲۰۰۸).

در این مقاله، سنتز روش‌ها و نتایج انجام شده و بر وجه مشترک داده‌ها و روش‌های فیزیکی تمرکز گردیده است. علاوه برآن، نرم‌افزار منیانتیس معرفی شده است. در نهایت، مثالی ارائه شده که نحوه تحلیل، تصویرسازی با استفاده از الگوهای مکانی و نگرش فیزیکی در تفسیر نتایج را نشان می‌دهد. روش پیرفیست در مورد سری‌های تراز آب زیرزمینی به کار رفته است.

روش‌های مورد بحث در قالب یک پروژه تحقیقاتی دوره دکتری دانشگاه دلفت هلند و در سه زمینه توسعه داده شدند: سری‌های زمانی، آب زیرزمینی و مدل‌های اکو-هیدرولوژیک (Von Asmuth و Maas، ۲۰۰۱). این سه زمینه منجر به تدوین نرم‌افزاری به نام منیانتیس گردید. منیانتیس نام علمیِ شبدر سه برگی می‌باشد که مداخلات انسانی آن‌را در معرض خطر انقراض قرار داده است.

- سلسله مراتب سیستم‌های اطلاعاتی و مدیریت اطلاعات

به‌دلایل مختلف، برنامه‌نویسی این نرم‌افزار در محیط متلب[۵] انجام گرفت. متلب یک ابزار همه کاره برای محاسبات و تحلیل‌های کامپیوتری است. زبان برنامه نویسیِ سطح بالا و ماتریس محورِ آن، به دانشمندان و مهندسین امکان می‌دهد تا الگوریتم‌های مورد نظرشان را تدوین نمایند. علاوه بر این، می‌توان از برنامه های متلب نرم‌افزارهای مستقلی تولید کرد که به نحو چشمگیری زحمت تولید یک نرم‌افزار کاربر دوست را کاهش می‌دهد. متلب از نظر مدیریت و تصویرسازی دو و سه بعدی داده‌ها قدرتمند است، که جنبه‌های مهم منیانتیس را تشکیل می‌دهند. طراحی منیانتیس نشان می‌دهد که هدف، ترکیبِ مدل‌های تجربی و فیزیک‌محور بوده است. ما از مفهوم هرمِ داده- اطلاعات- دانش- خِرد[۶] (Ackoff، ۱۹۸۹) استفاده کرده (شکل ۱) و مدل سلسله مراتبی متناظری را در سیستم‌های اطلاعاتی مشخص کردیم.

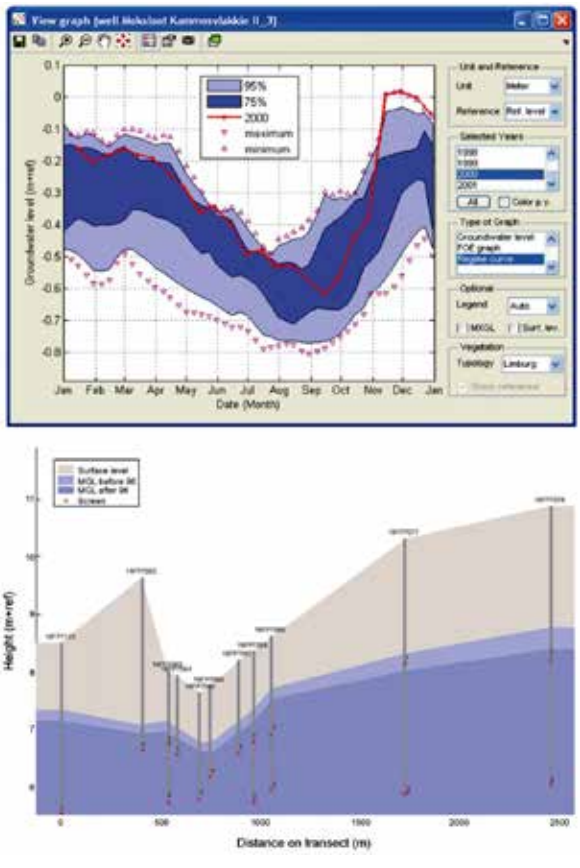
شکل ۱- سلسله مراتب داده، اطلاعات، دانش، خِرد

این مفهوم(Rowley، ۲۰۰۷) نشان می‌دهد که آگاهی از نحوه‌ی عملکرد سیستم‌ها چگونه می‌تواند به مدل‌هایی برای علوم زمین و علوم فنی تبدیل شود. از آن منظر، سیستم‌های خبره و سیستم‌های پشتیبان تصمیم، در سلسله مراتب قرار می‌گیرند و سطحی از خِرد را نشان می‌دهند که برای اتخاذ تصمیمات صحیح ضروری است. عملکرد منیانتیس از پایین به بالا و از یک پایگاه داده شروع می‌شود، تا ارتباط نزدیک با داده‌های مشاهداتی را حفظ نماید. روش پیرفیست می‌تواند روی داده‌های سری‌های زمانی به همان صورتی که هستند عمل نماید، بنابراین نیازی به درون‌یابی، تکمیل نواقص اطلاعاتی و گسسته‌سازی گام‌های زمانی (که با مدل‌های آرما همراهند) نمی‌باشد. منیانتیس برای پردازش، تصویرسازی و کنترل داده‌های سری‌های زمانی ابزارها و توابع مختلفی در اختیار دارد. فلسفه اصلی مدیریت داده‌ها آن است که داده‌های اصیل هرگز حذف یا تغییر داده نشوند. تغییرات و اصلاحات «در لایه فوقانی» ذخیره می‌شوند، لذا همیشه می‌توان مجدداً ارزیابی یا بازیابی شوند. پیشرفت نسبتاً جدید در مانیتورینگ آب‌های زیرزمینی، یعنی پایش آن‌ها به کمک سنسورهای فشار، خطاها و مشکلات خاصی به‌دنبال داشته (Von Asmuth، ۲۰۱۰؛ Sorensen و Butcher، ۲۰۱۱) و منیانتیس ابزار خاصی در اختیار دارد که به این مسائل بپردازد.

- تحلیل و تصویرسازی[۷] داده‌ها

همانطوری که درک تصاویر برای مغز آسان‌تر از کلمات و اعداد است، ابزارهای تحلیل و تصویرسازی نخستین وسایلی هستند انبوه داده‌ها را به اطلاعات مفید تبدیل می‌نمایند، اطلاعاتی که در سطح دوّم از سلسله مراتب داده، اطلاعات، دانش، خِرد قرار دارند (شکل ۱). در سیستم‌های زیست محیطی، مجموعه‌های داده اساساً چهار بُعدی هستند (طول، عرض، ارتفاع و زمان) و حجم اطلاعات موجود در آن‌ها بسیار بیشتر آن است که مستقیماً بتوان از آن‌ها برای اهداف مدل‌سازی تجربی، ترسیم و تفسیر بصری استفاده نمود. برای حصول این اهداف، داده‌ها باید به نحو معنی‌داری فشرده یا غربال شوند، چنانکه اطلاعات زیادی از دست نرود(Kelleher و Wagener، ۲۰۱۱). روش‌های خاصی برای تصویرسازی دینامیک تراز آب زیرزمینی ارائه گردیده است(Von Asmuth و Knotters، ۲۰۰۴). در منیانتیس، بخش‌ها یا مشخصات (گروهی) سری‌های زمانیِ تراز آب به صورت پلات سری‌های زمانی در دو یا سه بُعد تصویر می‌شوند. وقتی ساده‌ترین گراف بتواند اطلاعات را همانطور که می‌خواهید منتقل کند، گراف‌های پیچیده‌تر را می‌توان برای تحلیل و برجسته نمودن جنبه‌های خاص داده‌ها به کار برد. تصویرسازی، نه تنها اطلاعات را از داده‌ها استخراج می‌کند بلکه به صحت‌سنجی آن‌ها یاری می‌رساند. به‌عنوان مثال، تشخیص برونهشته‌ها در پلات ساده از یک مجموعه سری‌های تراز آب زیرزمینی آسان است. از طرف دیگر، تصویرسازی به "شناسائی بصری سیستم"[۸] یاری می‌رساند، زیرا الگوهای مکانی تراز آب زیرزمینی، اطلاعات بیشتری در مورد ساختار و کارکرد سیستم به دست می‌دهند (شکل ۲). از آنجائیکه سیستم‌های زیست‌محیطی معمولاً ناهمگن هستند، نقاط مورد پایش

در اعماق مختلف می‌توانند از یکدیگر ایزوله بوده و رفتار متفاوتی نشان دهند. بنابراین، عمق شبکه چاه‌ها و نقاط مورد پایش برای درک رفتار مشاهداتی اهمیت دارد، و تصویرسازی دو یا سه بُعدی برای تفسیر داده‌ها و مدل‌سازی صحیح نتایج، ضروری است. بدین منظور، منیانتیس می‌تواند مشخصات مختلف سری‌های زمانی را به‌صورت نقاط رنگی یا مقاطع عرضی، بسته به نوع و اهمیت مقادیر، ترسیم نماید.



شکل ۲- نمونه تصویرسازی سری‌های مشاهداتی تراز آب زیرزمینی و مشخصات آن‌ها (بالا) منحنی‌های رژیم (پائین) مقاطع دو بعدی

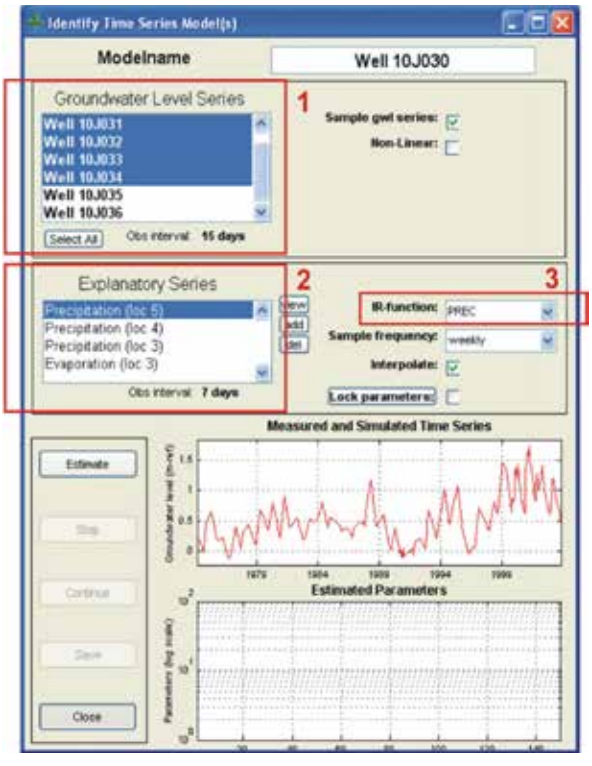
- صفحه اصلی و ابزارهای مدل‌سازی

ابزارهای مدل‌سازی سری‌های زمانی و روش‌های مورد اشاره در بخش‌های قبلی در سوّمین سطح از هرمِ داده، اطلاعات، دانش، خِرد قرار دارند، و قلب منیانتیس را تشکیل می‌دهند. با انجام تنظیمات در صفحه اصلی نرم‌افزار (شکل ۴)، یک سیستم باز طرح‌ریزی می‌شود. رُبع بالا سمت راست صفحه، مختص سری‌های تراز آب زیرزمینی (خروجی)، ربُع پائین سمت راست صفحه مختص سری‌های توضیحی (ورودی) و رُبع پائین سمت چپ صفحه مختص مشخصات مدل و نتایج (سیستم) است. نقشه در چهارمین رُبع در گوشه چپ و بالای صفحه جای دارد که انتخاب مکان و نمایش نقاط در آن یا نمای مقطع (شکل ۲) صورت می‌گیرد. برای تصویرسازی سه بُعدی از صفحه دیگری استفاده می‌شود. در اصل، ابزارهای تصویرسازی و کنترل و تفسیر نتایج حاصل از مدل سری‌های زمانی یکسان هستند. هر سری زمانی به طور مستقل از سایر سری‌ها مدل می‌شود. الگوی مکانی از نتایج سری‌های زمانی شکل می‌گیرند بنابراین اطلاعات ارزشمند و مستقلی در خصوص ساختار مکانی، عملکرد سیستم و قابل قبول بودن نتایج بدست می‌دهند (Von Asmuth، ۲۰۰۸). منیانتیس برای تحلیل سری‌های زمانی، امکان استفاده از توابع پاسخ، هم به صورت پیرفیست و هم آرما، و مقایسه مستقیم آن دو را فراهم می‌کند (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۲). همچنین، می‌تواند برای ارزیابی صحت توابع پاسخ پیوسته کمک کند. منیانتیس روش‌های مدل‌سازی غیرخطی سری‌های زمانی را در بر دارد (Knotters و De Gooijer، ۱۹۹۹) که برای مدل کردن سیستم‌هائی با رواناب دوره‌ای مفید هستند.

- تحلیل هم‌زمان سری‌های زمانی

یکی از بزرگترین مزایای روش پیرفیست، کاهش حجم محاسبات لازم برای شناسائی مدل[۹] است. روش تکراری باکس-جنکینس برای تعیین تعداد پارامترها در مدل آرما می‌تواند بسیار هزینه‌بر باشد (De Gooijer، ۱۹۸۵)، در حالی‌که توابعی نظیر توزیع گاما با مقیاس بسیار انعطاف‌پذیر هستند و می‌توان آن‌ها را برای مدل کردن پاسخ سیستم بدون توجه به ترتیب هیدروژئولوژیک چاه‌های مشاهداتی به کار برد (Von Asmuth و Bierkens، ۲۰۰۲).

روش پیرفیست این امکان را فراهم می‌کند که از یک تابع پاسخ استاندارد برای نوع خاصی از ورودی استفاده شود، در نتیجه شناسائی مدل تا سطح شناسائی ورودی‌ها یا تنش‌هائی که بر پویاییِ سیستم تأثیر می‌گذارند، ساده‌تر می‌شود (Von Asmuth، ۲۰۰۸). در مورد تراز آب زیرزمینی یا هر متغیر زیست‌محیطیِ دیگری از آن دست، تأثیر تنش‌ها حالت مکانی دارد و بر تمامی نقاط یک ناحیه اثر می‌گذارد. ارزیابی ناحیه تأثیرِ یک تنش معیّن (مثلاً استخراج آب زیرزمینی) در حقیقت یکی از کاربردهای ممکن برای مدل‌های سری زمانی است. با استفاده از روش پیرفیست، به طور کلی شناسائی تنش در همه چاه‌های مشاهداتی ناحیه و به صورت پردازش تک‌باره[۱۰] انجام می‌پذیرد. در شکل (۳)، رابط کاربری منیانتیس نشان داده شده است که از پردازش همزمان شناسائی مدل برای سری‌های زمانی چندگانه پشتیبانی می‌کند.



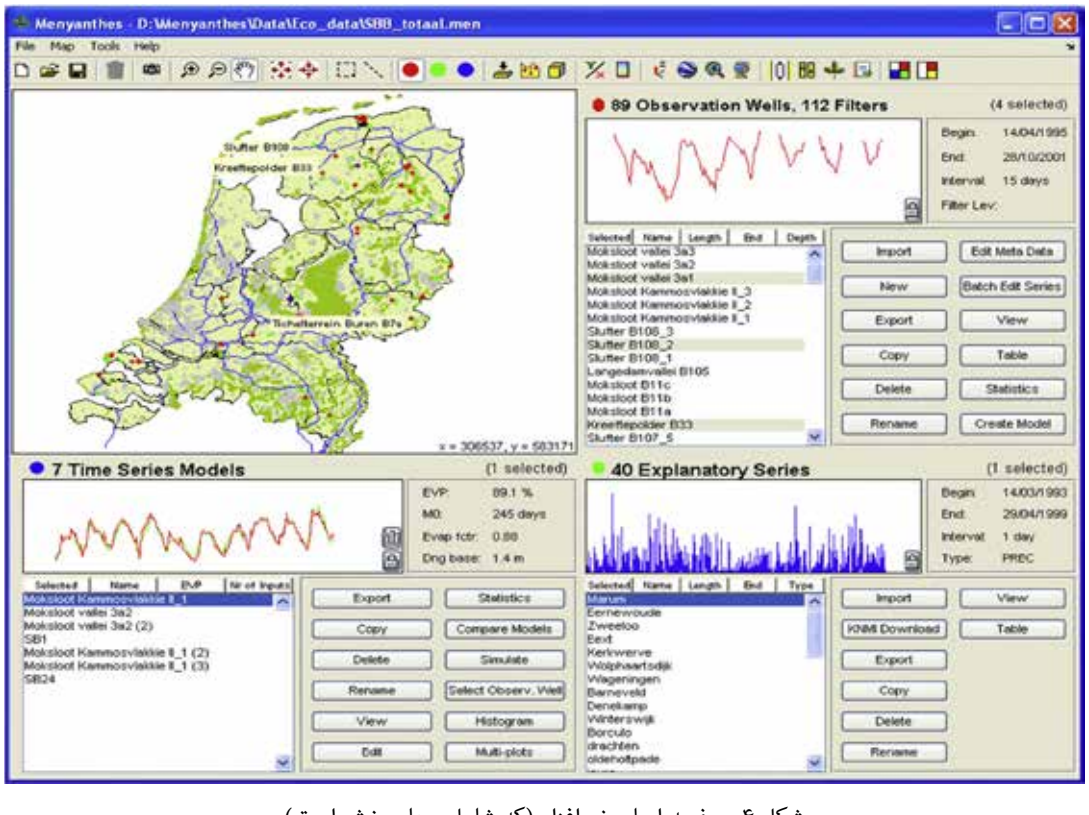
شکل ۳- رابط کاربری برای «شناسائی» همزمان مدل‌های سری زمانی

در جعبه شماره ۱ فهرست نقاط مربوط به سری‌های تراز آب زیرزمینی دیده می‌شود. همه تنظیماتی که در رابط کاربری انجام می‌پذیرند بر سری‌های منتخب این فهرست اعمال می‌شوند. در جعبه شماره ۲، فهرست تنش‌ها یا سری‌های توضیحی قرار دارد. با توجه به تأثیر دائمی بارش و تبخیر بر تراز آب زیر زمینی، منیانتیس به طور خودکار نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی را انتخاب می‌کند. سری‌های توضیحیِ نشان داده شده در جعبه شماره ۲ لزوماً برای تمام نقاط مندرج در جعبه شماره ۱ استفاده نمی‌شوند، بلکه بالعکس، لیست سری‌های توضیحی برای هر یک از آن‌ها به کار می‌رود. مشخصات سری‌های توضیحی برای همه نقاط منتخب در فهرست شماره ۱ تعریف می‌شود. به عنوان مثال می‌توان نوع تابع پاسخ جهشیِ مورد استفاده برای یک تنش مشخص را نام برد (Von Asmuth، ۲۰۰۸)، که از منوی کشویی شماره ۳ قابل انتخاب است.

پس از آنکه تنظیمات مناسب، سری‌های توضیحی و توابع پاسخ انتخاب شدند، با فشردن دکمه «برآورد»[11] می‌توان پارامترهای مدل را یک به یک بهینه نمود. جزئیات فرآیند بهینه‌سازی در منبع Von Asmuth و Bierkens (۲۰۰۵) ارایه شده است. شناسائی مدل به روش باکس – جنکینز، از معیارها و روش‌های آماری برای خطایابی نتایج استفاده می‌کند.

- مقایسه منیانتیس با نرم‌افزارهای دیگر

ترکیب ابزارهای مدل‌سازی سری‌های زمانی و تمرکز بر سیستم‌های ژئوهیدرولوژیک و داده‌های متناظر آن‌ها، منیانتیس را در نوع خود بی رقیب ساخته است. البته، نرم‌افزارهائی وجود دارند که بخشی از امکانات منیانتیس را پوشش می‌دهند.



شکل ۴- صفحه اصلی نرم‌افزار (که شامل چهار بخش است)

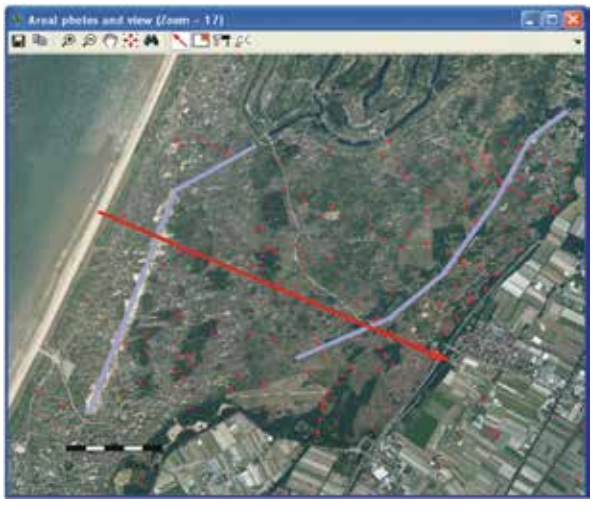
نرم‌افزارهای مدل‌سازی هیدرولوژیک نظیر ویژوال مادفلو[12] و جی ام اس[13]، معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی را به روش تفاضلات محدود حل می‌کنند. نرم‌افزارهایی همچون اِم لیم[14] یا تی تیم[15]، از روش عناصر تحلیلی بهره می‌گیرند. تفاوت منیانتیس با مدل‌های این چنینی در آن است که تنها مدلی است که پویائیِ زمانی و نه مکانی، همچنین تراز آب زیرزمینی به جای جریان آن را مدل می‌کند. در کاربردهای عملی، قابلیت مهم منیانتیس آن است که به هیچ الگو یا پارامتری‌سازی هیدرولوژیک نیاز ندارد. البته، نرم‌افزارهای مدل‌سازی سری‌های زمانی دیگری نظیر جعبه ابزار متلب (Ljung، ۲۰۱۱) یا کاپیتان تولباکس[16] (Taylor، ۲۰۰۷) نیز موجود هستند که برای هیدرولوژیست‌های غیر متخصص، رابط کاربری منیانتیس در مقایسه با آن‌ها «کاربرپسند»تر است، زیرا تمرکز اولیه آن بر خود سیستم آب زیرزمینی است و نه بر داده‌های آماری و مشخصات مدل. همچنین، منیانتیس به طور منحصر به‌فرد روش پیرفیست را در بر دارد، که امکان تحلیل تعداد زیادی از سری‌های زمانی به طور همزمان را فراهم می‌آورد.

در زمینه هیدرولوژی آب‌های سطحی، بسته‌های نرم‌افزاری وجود دارند که (مثل منیانتیس) از مدل‌های مفهومی یا آماری برای انبوه داده‌ها پشتیبانی می‌کنند و به نحو قدرتمندی روی تحلیل داده‌ها و ارزیابی کارایی مدل تمرکز دارند. در مقایسه با آن‌ها، منیانتیس کمتر به تحلیل رویدادها تمرکز می‌کند، همانطوری‌که سیستم‌های آب زیرزمینی حافظه طولانی دارند و زمان زیادی طول می‌کشد تا رویدادهای منفرد بر آن‌ها تأثیر بگذارند. منیانتیس به نحو قدرتمندتری بر تجزیه و تحلیل فاکتورهای مختلف تمرکز دارد. علاوه بر این، سیستم‌های آب زیرزمینی ذاتاً سه بُعدی هستند و اهمیت و ارزش الگوهای مکانی در مورد آن‌ها بیشتر است، در حالیکه در مورد رودخانه‌ها یک بُعد (جهت جریان) غالب است.

هر زمان که فرآیندهای هیدرولوژیک مورد نظر به طور آشکار، خطی باشند، تحلیل سری‌های زمانی و منیانتیس را می‌توان به نحو مؤثر و رضایت‌بخش برای مدل‌سازی آن‌ها بکار برد. این امر همچین مواردی را شامل می‌گردد که در آن‌ها، تبدیل یک سری به دیگری در حقیقت نتیجه ترکیبی از فرآیندها باشد، نظیر آنچه که در نواحی اشباع و غیراشباع اتفاق می‌افتد. در چنین مواردی، پاسخ ترکیبی، تلفیقی از توابع پاسخ منفرد است. در سایر موارد، راه حل ممکن برای ترکیب مدل‌های سری زمانی، مدل‌های فرآیندمحوری هستند که کمابیش پیچیده‌اند. برای تسهیل این امر، استفاده از منیانتیس می‌تواند ارزشمند باشد؛ زیرا می‌تواند مؤلفه‌های مدل‌سازی هیدرولوژیک را به‌هم پیوند دهد.

- نمونه کاربرد در ناحیه ساحلی آمستردام

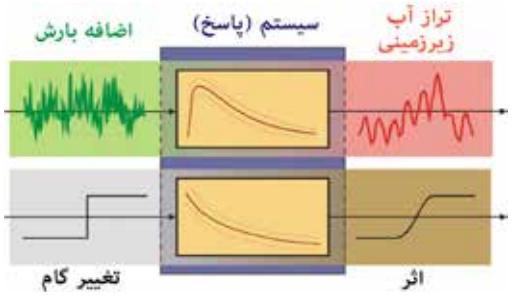
در این بخش، نمونه کاربرد منیانتیس در زمینه ارزیابی اقدامات حفاظت آبخوان، ارایه می‌شود. نمونه‌های دیگر عبارتند از: تعیین مشخصات دینامیک آب زیرزمینی (Von Asmuth و Knotters، ۲۰۰۴)، ارزیابی اثر پمپاژ (Von Asmuth، ۲۰۰۸)، تهیه نقشه ریسک (Manzione، ۲۰۱۰)، برآورد اثرات تغییر اقلیم (Lehsten، ۲۰۱۱)، و تعیین اثرات تغییر کاربری اراضی (Yihdego و Webb، ۲۰۱۱). منطقه مورد مطالعه، بخشی از ناحیه ساحلی تحت پوشش سازمان آب آمستردام است که از قرن نوزدهم آب این شهر را تأمین می‌کند. در این ناحیه، تأسیسات ذخیره و استخراج آب زیرزمینی ایجاد شده است (شکل ۵) و شاید بتوان آن‌را صاحب دقیق‌ترین سیستم پایش هیدروژئولوژیک جهان دانست. در این مطالعه روی بخش جنوبی این ناحیه تمرکز شده، که اقدامات تأمین آب نسبتاً بر آن بی‌تأثیر بوده است. دو کانال اصلی در این بخش از ناحیه ساحلی حفر شده و سیستم را زهکشی می‌کنند. کانال غربی در نزدیکی دریا «وان لیمبورگ»، و کانال شرقی در اراضی پست «اوستر» نام دارند.



شکل ۵- موقعیت شبکه ۴۳۸ پیزومتر منتخب (نقاط قرمز) و ایستگاه‌های هواشناسی (نقاط سبز). کانال وان لیمبورگ (چپ) و کانال اوستر (راست) به رنگ آبی. پیکان قرمز رنگ موقعیت مقاطع عرضی شکل ۷ را نشان می‌دهند.

به منظور ارتقای ارزش طبیعی و احیای کارکرد اکولوژیک ناحیه، همچنین افزایش تراز آب زیرزمینی و حفظ اکوسیستم (در معرض خطر) در ناحیه اشباع، اقدامات حفاظت آبخوان از ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۶ به مورد اجراء در آمد. بخشی از این اقدامات، پر کردن کانال وان لیمبورگ با ماسه و افزایش ۵۰ سانتی‌متری

تراز کانال اوستر بود. علاوه بر این، تعداد محدودی از چاه‌های پمپاژ در این ناحیه مسدود گردیدند. در نهایت، تراز کانال‌های ذخیره نیز افزایش داده شد.



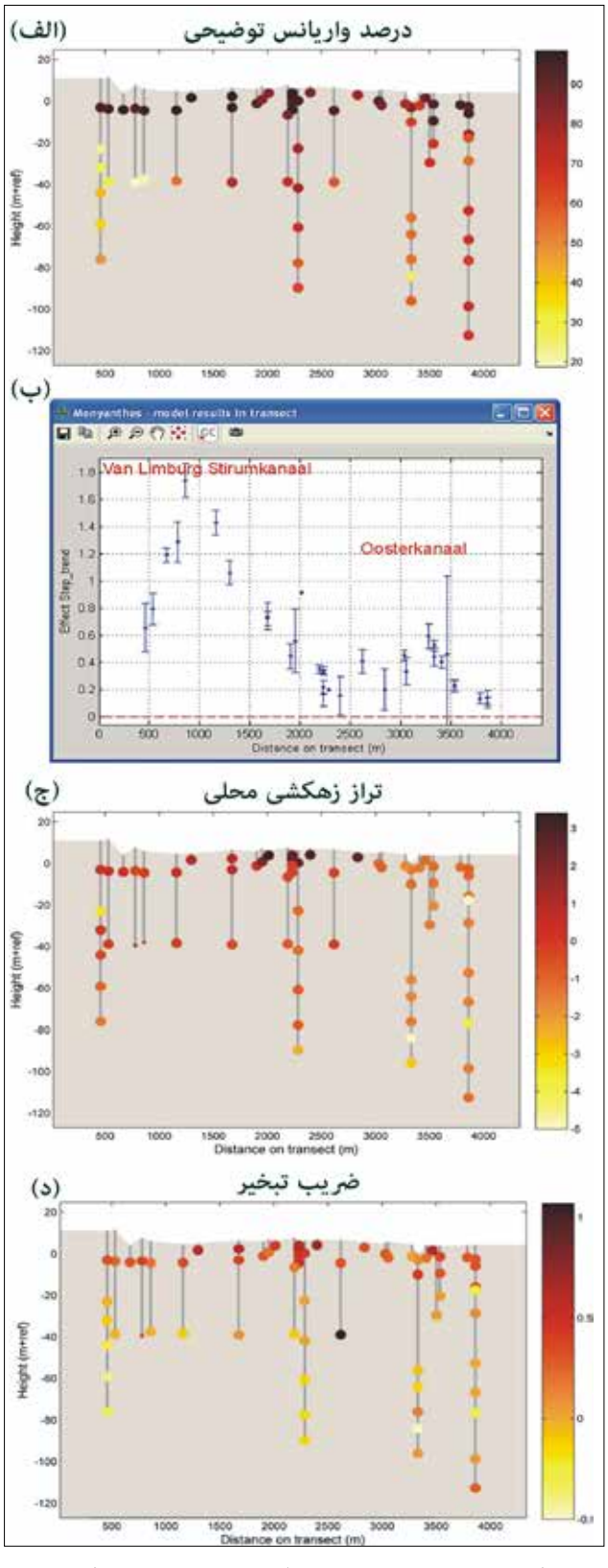
شکل ۶- هر تغییر گام در ورودی، توسط سیستم به یک اثر سیگما شکل تبدیل می‌شود. اگر تغییر با سری‌های ورودی دیگر ارتباط نداشته باشد، تابعِ پاسخِ مستقلِ خود را خواهد داشت.

پس از خاتمه این اقدامات در بهار سال ۱۹۹۷ خسارت قابل توجهی در حدود ۳ میلیون دلار به مزارع کشتِ پیازِ گل در مجاورت ناحیه ساحلی به بار آمد. علت مسأله کمبود اکسیژن در پیازها و مرتبط با اقدامات حفاظت آبخوان دانسته شد و سازمان آب زیر سؤال رفت (Olsthoorn، ۲۰۰۰). از آنجایی‌که تلاش برای کمّی‌سازی تأثیر اقدامات حفاظتی با مدل‌های آریما شکست خورده بود، از منیانتیس استفاده شد. خلاصه‌ای از نتایج این مطالعات در این بخش ارائه می‌شود.

منطقه‌ای که اقدامات حفاظتی در آن انجام گرفته، دارای شبکه پیزومتری متشکل از ۶۸۰ سلول است که توسط سازمان آب پایش می‌شوند. داده‌های بارش در پنج نقطه مختلف در مقطعی که از دریا تا اراضی پست امتداد دارد، جمع‌آوری می‌گردد. داده‌های مرجع تبخیر از ایستگاه هواشناسی سازمان آب دریافت می‌شود. به غیر از این موارد و تاریخ اقداماتِ حفاظتِ آبخوان، از داده دیگری استفاده نشده است. از بین ۶۸۰ سلول، ۴۳۸ سلول بین ۱۹۴ چاه مشاهداتی که سری‌های آن‌ها قبل و بعد از اقدامات حفاظتی اندازه‌گیری شده و تعداد اندازه‌گیری‌ها کافی بود انتخاب گردید (شکل ۵). با توجه به اینکه فعالیت‌های کنونیِ تامین آب بر این ناحیه نسبتاً بی‌تأثیر بوده، فقط اثرات تنش‌های طبیعی (بارش و تبخیر) و اقدامات حفاظتی در نظر گرفته شد. هر اقدام تأثیر متفاوتی بر بخش متفاوتی از سیستم می‌گذارد، امّا مجموعه اقدامات، نسبتاً در مدت کوتاهی انجام می پذیرند (با توجه به حافظه طولانی مدتِ ناحیه ساحلی). بنابراین اثرات آن‌ها شدیداً همبسته بوده و امکان جداسازی و برآورد تأثیرات منفرد از داده‌ها وجود ندارد. البته، می‌توان تأثیر ترکیبیِ اقدامات را با مدل‌سازی آن‌ها به صورت یک تابع پله‌ای در سری‌های ورودی برآورد نمود. تابع پله‌ای نشان‌دهنده یک تغییر ناگهانی و ادامه‌دار در سری ورودی است. تأثیر تابع پله‌ای بر خروجی، که تابع پاسخ پله‌ای نامیده می‌شود، عموماً ناگهانی نیست و شکل سیگمائی و تدریجی دارد (شکل ۶). اگر تغییر گام با یکی دیگر از سری‌های ورودی مرتبط نباشد (مثلاً تبخیروتعرق در اثر جنگل‌زدائی ناگهان تغییر کند) باید تابع پاسخ جهشیِ مستقلی برای آن در نظر گرفت. چهار تصویر خروجی از منیانتیس در شکل (۷) ارایه شده است. این تصاویر نتایج سری‌های چندگانه در مقاطع دو بعدی را نشان می‌دهند. کارائی مدل منیانتیس به طرق مختلفی مشخص می‌شود که یکی از آن‌ها درصد واریانس توضیحی[۱۷] (EVP) است:

$$EVP = [(\sigma_h^2 - \sigma_n^2) / \sigma_h^2]100\% \qquad (۴)$$

که σ_h^2 و σ_n^2 به ترتیب واریانس تراز آب زیرزمینیِ مشاهداتی و خطا را نشان می‌دهند. در شکل ۷- الف، EVP برای هر سری به صورت نقطه رنگی در محل شبکه پیزومتری آن نشان داده شده است. برآورد تأثیر اقدامات، بر اساس انتخاب سلولی که بالاتر از ارتفاع ۱۵- متری از سطح مبنا قرار دارد در شکل ۷-ب نشان داده شده است. نظر به عدم ثبات و افزایشی بودن تأثیرات، برآورد اثر نهائی فقط از طریق برون‌یابی میسر بوده، پس دقیق نیست. تأثیر برآورد شده در ۳۱-۸-۲۰۰۳، پایان سری زمانی، به همراه فاصله اطمینان ($\pm 2\sigma$) اینجا مورد استفاده قرار گرفته است. در کنار آن، شکل‌های ۱۱-ج و ۱۱-د به ترتیب مقادیر تراز زهکشی محلی و ضریب تبخیر برآورد شده را نشان می‌دهند. در همه شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-د الگوی مکانی از نتایج منفرد شکل گرفته است. مثلاً در سلول‌های کم‌عمق‌تر، مقادیر EVP به وضوح بیشتر هستند (و تا۹۸/۴٪ می‌رسند)، درحالی‌که حداقل مقادیر در ناحیه غربی مجاور دریا یافت می‌شوند. این الگوی ساده، نتایج مختلفی به دست می‌دهد. اول اینکه، بایستی یک لایه (شِبه) محصور در عمق ۱۰- تا ۲۰- متری از سطح مبنا (متناسب با داده‌های پروفیل خاک) وجود داشته باشد، در غیر این‌صورت، شبکه رفتار تحتانی نباید خیلی متفاوت از رفتار شبکه فوقانی باشد.



شکل ۷- نتایج مدل در امتداد مقطع نشان داده شده در شکل ۵، (الف) درصد واریانس توضیحی به صورت نقاط رنگی در محل شبکه پیزومتری (ب) برآورد اثر در شبکه بالاتر از ۱۵- متر نسبت به سطح مبنا در ۳۱-۸-۲۰۰۳ (ج) تراز زهکشی محلی (د) ضریب تبخیر برآورد شده

بدین سبب، فقط شبکه تحتانی در شکل ۷-ب نشان داده شده است. دوم، مقادیر EVP پائین‌تر بر فاکتورهای فراموش شده در مدل دلالت دارند، و الگوی مکانی مدل به وضوح به جزر و مد به‌عنوان یکی از آن‌ها اشاره می‌کند. دومین فاکتوری که به لحاظ منطقی می‌توان آن‌را فراموش شده دانست، وجود پمپاژ در بخش شمالیِ ناحیه است. پمپاژ، همانند جزر و مد، بسیار دورتر از لایه محصور تأثیر می‌گذارد، و روشن می‌شود که چرا این فاکتورها برای مدل‌سازی دینامیکِ شبکه فریاتیک تحتانی ضروری نیستند. با توجه به الگوی ارایه شده در شکل ۷-ب، اثراتِ منفردِ پر کردن کانال وان لیمبورگ و افزایش تراز کانال اوستر مشخص هستند. اثر پر کردن کانال از نظر منطقی در مجاورت خود کانال بیشترین مقدار را دارد (و از ۱ الی ۱/۷۴متر در تاریخ ۳۱-۸-۲۰۰۳ تغییر می‌کند). به طور مشابه، اثر افزایش تراز کانال در محل خود کانال بیشترین است. این اثرات به تدریج در جهت دریا و اراضی پست و وسط ناحیه ساحلی کم‌رنگ می‌شوند. گرادیانِ تراز زهکشی محلی از دریا به سمت اراضی پست (که دائماً در حال زهکشی است) مشاهده می‌شود. در مجاورت آن، شبکه فریاتیک در وسط سیستم ساحلی، به وضوح تراز زهکشی بالاتری نشان می‌دهد. علت مسأله می‌تواند این باشد که اضافه بارش روی آب شور یک "لنز" آب شیرین تشکیل می‌دهد. اطلاعات بیشتر در مورد فرآیند مدل‌سازی در Von Asmuth (۲۰۰۸) ارایه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

منیانتیس در بین ابزارهای تحلیلِ سری‌های زمانیِ «کاربر دوست» موجود، جایگاه ویژه‌ای دارد. منیانتیس در وهله اول طیف متنوعی از توابع را ادغام می‌کند، که از پای هرم داده، اطلاعات، دانش، خِرد شروع می‌شوند، در سطح بالاتر، ابزارهای تصویرسازی و تحلیل قرار می‌گیرند، و ابزارهای مدل‌سازی سری‌های زمانی در بالاترین سطح قرار دارند. ترکیب این توابع با هم، هر یک از آن‌ها را تقویت می‌کند. به‌عنوان نمونه، ابزارهای مدل‌سازی و ارتباط نزدیک آن‌ها با داده‌ها در فرآیند مدل‌سازی سری‌های زمانی مفید واقع می‌شود. بالعکس، مدل‌های سری زمانی را می‌توان برای بهبود مشخصات و تصویرسازی پویائیِ یک سیستم به کار برد. همچنین از آن‌ها می‌توان برای مدیریت اطلاعات استفاده نمود. در وهله دوم، منیانتیس استفاده از اصول و تفسیرهای فیزیکی یاری می‌رساند. از این منظر، روش پیرفیست برای تحلیل سری‌های زمانی با روش‌های مکانیکیِ مبتنی بر داده برابری می‌کند (به عنوان مثال، Young و Beven، ۱۹۹۴؛ Young، ۱۹۹۸). کاربردهای بالقوه روش پیرفیست اساساً با مدل‌های سری زمانی آرما مشابه (و گسترده) هستند. ویژگی جذاب سری‌های

زمانی در آن است که بر فرضیات نسبتاً محدودی مبتنی بوده و عموماً به خوبی برازش می‌یابند؛ و این مدل اجازه می‌دهد که داده‌ها خود سخن بگویند. هنگام استفاده از مدل‌های سری زمانی، تنش‌های فراموش شده یا سری‌هایی که تحت تأثیر مداخلات هیدرولوژیک قرار دارند به آسانی مشخص می‌شوند. هر چند ممکن است این سریها برای کالیبراسیون مدل مناسب نباشند. مشخصه روش پیرفیست، کارائی بالا و سادگی استفاده از آن است. با اثبات این مسأله که توابع توزیع نامتقارن گوس بر رفتار سیستم‌های هیدرولوژیک (و دیگر سیستم‌ها) انطباق دارند، امکان مدل‌سازی تمامی سری‌های زمانیِ یک ناحیه به طور انبوه میسر می‌شود. مدل‌سازی انبوه نه فقط یک مزیت کاربردی است، بلکه تصویرسازی و تحلیل همزمان نتایج، بُعد دیگری به این تکنیک می‌افزاید (بُعد مکانی). الگوهای مکانی که از نتایج تحلیل سری‌های زمانی شکل می‌گیرند، مستقل هستند و اطلاعات ارزشمندی هم در مورد خود نتایج مدل و هم نحوه عمل و مشخصات سیستم بدست می‌دهند. علاوه بر آن، تأثیر تنش‌های منفرد که در تحلیل منفرد سری‌های زمانی قابل تفکیک نیستند، با الگوی مکانی قابل تفکیک می‌شوند. ابزارهای تحلیل و تصویرسازی مکانی منیانتیس به نحو مؤثری کارائی و تفسیر این الگوها را بهبود می‌بخشند. منیانتیس تمرکز بر جنبه‌های آماری و داده‌ای سری‌های زمانی را در جهت مشخصات فیزیکی سیستم‌ها و تغییرات مکانی آن‌ها، ارتقاء می‌دهد. تاکنون، منیانتیس در سه قاره، شش کشور و هفتاد و هشت سازمان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. ده‌ها هزار سری زمانی تراز آب زیرزمینی با آن تحلیل و اثبات شده است که می‌تواند نیازهایی را برآورده سازد که بدون آن میسر نمی‌شد. همانطوری‌که اشاره شد، خطی بودن مدل‌های استاندارد سری‌های زمانی هم نقطه قوت و هم یک محدودیت است. روش‌های غیرخطی تحلیل سری‌های زمانی به منیانتیس اضافه شده و سودمندی آن‌ها اثبات گردیده است.

پی‌نوشت

1- Menyanthes
2- ARMA
3- PIRFICT
4- ARIMA
5- Matlab
6- Data, Information, Knowledge, Wisdom (DIKW)
7- Visualization
8- Visual system identification
9- Model identification
10- Batch Process
11- estimate
12- Visual Modflow (www.swstechnology.com)
13- GMS (www.scisoftware.com)
14- MLAEM (www.scisoftware.com)
15- TTim (ttim.googlecode.com)
16- Captain Toolbox
17- Explained variance percentage

منابع

Ackoff R. 1989. From data to wisdom. Journal of Applied Systems Analysis, 16 (1): 3-9.

Bakker M., Maas K. and Von Asmuth J.R. 2008. Calibration of transient groundwater models using time series analysis and moment matching. Water Resources Research, 44: 1-19.

Box G.E.P. and Jenkins G.M. 1970. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San Fransisco.

Beven K. 2002. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. Hydrological Processes, 16: 189-206.

Berendrecht W.L., Heemink A.W., Van Geer F.C. and Gehrels J.C. 2004. State-space modeling of water table fluctuations in switching regimes. Journal of Hydrology, 292: 249-261.

Bruggeman G.A. 1999. Analytical Solutions of Geohydrological Problems. Elsevier, Amsterdam, P.956.

Daliakopoulos I.N., Coulibaly P. and Tsanis I.K. 2005. Groundwater level forecasting using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 309: 229-240.

De Gooijer J.G., Abraham B., Gould A. and Robinson L. 1985. Methods for determining the order of an autoregressive-moving average process: a survey, International Statistical Review, 53(3): 321-329.

Dirac P.A.M. 1947. The Principles of Quantum Me-

641-646.

Peterson T.J. and Western A.W. 2011. Time-series modelling of groundwater head and its de-composition to historic climate periods. In: Proceedings of the 34th IAHR Congress, Brisbane, Australia.

Price L.E., Goodwill P., Young P.C. and Rowan J.S. 2000. A data-based mechanistic modelling (DBM) approach to understanding dynamic sediment transmission through Wyresdale Park Reservoir, Lancashire, UK. Hydrological Processes, 14: 63-78.

Rowley J. 2007. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. Journal of Information Science, 33(2): 163-180.

Sorensen J.P.R. and Butcher A.S. 2011. Water level monitoring pressure transducers - a need for industry-wide standards. Ground Water Monitoring & Remediation, 31(4): 1-7.

Taylor C.J., Pedregal D.J., Young P.C. and Tych W. 2007. Environmental time series analysis and forecasting with the captain toolbox. Environmental Modelling & Software, 22: 797-814.

Van Geer F.C. 1987. Application of Kalman Filtering in the Analysis and Design of Groundwater Monitoring Networks. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.

Veling E.J.M. 2010. Approximations of impulse response curves based on the generalized moving Gaussian distribution function. Advances in Water Resources, 33: 546-561.

Von Asmuth J.R. and Maas K. 2001. The method of impulse response moments: a new method integrating time series-, groundwater- and eco-hydrological modelling. In: Gehrels, J.C., Peters, N.E., Hoehn, E., Jensen, K., Leibundgut, C., Griffioen, J.,Webb, B., Zaadnoordijk, W.J. (Eds.), Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics. IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, (p. 51-58).

Von Asmuth J.R., Bierkens M.F.P. and Maas K. 2002. Transfer function noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. Water Resources Research, 38(12): 1287-1299.

chanics. Clarendon Press, Oxford. International Statistical Review, 53(3): 301-329.

Hantush M.S. 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Transactions, American Geophysical Union, 37 (6):.702-714.

Kelleher C. and Wagener T. 2011. Ten guidelines for effective data visualization in scientific publications. Environmental Modelling & Software, 26(6): 822-827.

Knotters M., and Bierkens M.F.P. 2000. Physical basis of time series models for water table depths. Water Resources Research, 36(1): 181-188.

Knotters M. and De Gooijer J.G. 1999. Tarso modelling of water table depths. Water Resources Research, 35 (3): 695-705.

Lehsten D., Von Asmuth J.R., Kleyer M. 2011. Simulation of water level fluctuations in Kettle Holes using a time series model. Wetlands, 31: 511-520.

Ljung L. 2011. System Identification Toolbox, User's Guide. The MathWorks, Inc., Natick, MA.

Maier H.R., Jain A., Dandy G.C. and Sudheer K.P. 2010. Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: current status and future directions. Environmental Modelling &Software, 25: 891-909.

Manzione R., Knotters M., Heuvelink G., Von Asmuth J. and Camara G. 2010. Transfer function-noise modeling and spatial interpolation to evaluate the risk of extreme (shallow) water-table levels in the Brazilian Cerrados. Hydrogeology Journal, 18(8): 1927-1937.

Nash J.E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. Journal of Geophysical Research, 64(1): 111-115.

Olsthoorn T.N. 2000. Hydrologic restoration measures in the dunes, cause of millions of damage to flower bulbs? (in Dutch). H2O 33 (25/26), (p. 23-24).

Oreskes N., Schrader-Frechette K. and Belitz K. 1994. Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences. Science, 263:

drology, 288: 272-287.

Yihdego Y. and Webb J.A. 2011. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. Hydrogeology Journal, 19: 877-887.

Young P.C. 1998. Data-based mechanistic modelling of environmental, ecological, economic and engineering systems. Environmental Modelling & Software, 13: 105-122.

Young P.C. and Beven K.J. 1994. Data-based mechanistic modelling and the rainfall flow non-linearity. Environmetrics, 5: 335-365.

Young P.C. and Garnier H. 2006. Identification and estimation of continuous-time, data-based mechanistic (DBM) models for environmental systems. Environmental Modelling & Software, 21(8): 1055-1072.

Von Asmuth J.R. and Knotters M. 2004. Characterising spatial differences in groundwater dynamics based on a system identification approach. Journal of Hydrology, 296 (1e4): 118-134.

Von Asmuth J.R. and Bierkens M.F.P. 2005. Modeling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process. Water Resources Research, 41 (12):W12404.

Von Asmuth J.R., Maas K., Bakker M. and Petersen J. 2008. Modeling time series of groundwater head fluctuations subjected to multiple stresses. Ground Water, 46(1): 30-40.

Von Asmuth J.R. 2010. On the Quality, Frequency and Validation of Pressure Sensor Series (in Dutch). Rapportnr. KWR 2010.001. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Yi M.J. and Lee K.K. 2004. TFN modeling of irregularly observed groundwater heads. Journal of Hy-