Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶
Volume 13, No. 2, Summer 2017 (IR-WRR)
۱۱۵-۱۲۶

مروری بر چالش‌های استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان در سیستم‌های منابع آب

سارا لطفی[۱]* و شهاب عراقی نژاد[۲]

چکیده

بازیگران، نقش قابل توجهی در پایداری سیستم‌های منابع آب دارند. اهمیت نقش بازیگران، لزوم در نظر گرفتن و مدل‌سازی این سیستم‌ها را از دیدگاه اجتماعی-اکولوژیکی روشن می‌سازد. مدل‌های عامل‌بنیان ابزاری قدرتمند در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی هستند که در سال‌های اخیر، استفاده از آن در زمینه‌های مختلف و به خصوص مدیریت منابع آب افزایش قابل توجهی داشته است. در این مقاله ضمن معرفی کلی رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، به بررسی چهار چالش اصلی پیش رو در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب پرداخته شده است: طراحی رفتار عامل‌ها؛ برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی؛ مکانی کردن مدل؛ کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی. با توجه به این که بخش کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده منابع آب به حساب می‌آید، در این مقاله سعی گردید تا از تحلیل مقاله‌های معتبر و با ارجاعات بالا در همین زمینه، برای روشن ساختن چالش‌های پیش رو و ایجاد نگرشی صحیح در رابطه با بکارگیری این مدل‌ها در زمینه مدیریت منابع آب استفاده گردد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عامل‌بنیان، عامل، سیستم منابع آب، اجتماعی-اکولوژیکی، چالش‌های مدل‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۴/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۹/۲۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

A Review on Challenges in Application of Agent-based Models in Water Resources Systems

S. Lotfi [1] and S. Araghinejad [2]*

Abstract

Actors involved in water resources system play a great role in sustaining it. The importance of this role signifies the necessity for taking into consideration the social-ecological aspects in modeling such systems. Agent-based models are powerful tools in modeling social-ecological systems with evolving applications in different fields, especially water resources management, in recent years. In this paper, a general introduction of the agent-based modeling approach is presented and four main challenges in modeling water resources systems with these models i.e. Designing agents' behaviors, linking social and ecological sections, spatial representation, and calibration, verification and validation have been discussed. Considering agricultural sector as the main user of water, well credited papers with high citations in this regard were analyzed to clarify the challenges and build a reliable approach for application of these models in water resources management.

Keywords: Agent-based modeling, Agent, Water resources system, Social-ecological, Modeling challenges.

Received: July 17, 2016
Accepted: December 15, 2016

1- PhD Candidate of Water Resources Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: saralotfi@ut.ac.ir
2-Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

بین انسان و محیط اطراف او ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. همانطور که انسان با بهره‌برداری از منابع، بر آن‌ها اثر می‌گذارد به طور متقابل از آن‌ها تأثیر می‌پذیرد (Redman et al., 2004). به دلیل تأثیر دو جانبه انسان و محیط اطراف او بر یکدیگر، مستقل در نظر گرفتن هر یک از آن‌ها منجر به نتایجی دور از واقعیت خواهد شد (Mulligan, et al., 2014). بنابراین برای تأکید بر مفهوم یکپارچه انسان و محیط، در مراجع مختلف از عبارت‌هایی چون سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی[1] (Anderies et al., 2004; Folke et al., 2005)، اجتماعی- محیط‌زیستی[2] (Filatova et al., 2016) و انسان و محیط طبیعی[3] (Turner II et al., 2003) استفاده شده است. این مسأله در مورد منابع آب و کاربران آن‌ها نیز صدق می‌کند. کاربران از منابع مشترک آب سطحی و زیرزمینی برداشت کرده و ضمن تأثیر بر منابع و دیگر کاربران، متقابلاً از آن‌ها تأثیر می‌گیرند. حجم باقیمانده از منابع آب بر تصمیمات آتی آن‌ها اثر گذاشته (Ostrom, 2007) و در نهایت بر پایداری سیستم، تأثیرات مثبت و منفی خواهد گذاشت. به همین دلیل، در نظر گرفتن کاربران در مدل‌های منابع آب به دلیل نقش پر رنگ آن‌ها در بهره‌برداری و پایداری منابع، امری ضروری خواهد بود. در نظر گرفتن منافع کاربران، رویکردهای آن‌ها، تعاملات آن‌ها با یکدیگر و ... می‌تواند به توسعه مدل‌هایی با نتایج واقع‌بینانه منتج شود؛ زیرا این کاربران هستند که در نهایت با تصمیمات خود، ضمانت اجرایی سیاست‌های اتخاذ شده از سوی تصمیم‌گیران را تعیین می‌کنند (Voinov and Bousquet, 2010). نقش تعیین‌کننده کاربران در زمینه مدیریت سیستم‌های منابع آب، نیاز به بررسی این سیستم‌ها را از منظر اجتماعی-اکولوژیکی روشن می‌سازد و در نتیجه آن‌ها را در زمره سیستم‌های پیچیده قرار می‌دهد (Liu et al., 2007).

مدل‌های عامل‌بنیان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشند (Levin, et al., 2013). استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، امکان در نظر گرفتن دو بخش کلی اجتماعی و اکولوژیکی و نیز تأثیرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر را فراهم می‌سازد. بخش اجتماعی در این رویکرد شامل کلیه کاربران و یا به عبارت دیگر بازیگرانی است که از سیستم تأثیر می‌پذیرند و متقابلاً بر آن تأثیر می‌گذارند. از نقاط قوت رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان این است که ضمن در نظر گرفتن بعد اجتماعی در مدل، این امکان را فراهم می‌سازد که مدل‌سازی رفتار عامل‌ها با در نظر گرفتن ابعادی همچون یادگیری، تعامل با یکدیگر، تنوع در رفتارها و ... انجام گیرد. بخش اکولوژیکی در مدل‌های عامل‌بنیان، شامل تمام زیر مدل‌هایی است که منابع آب و سیستم‌های مرتبط با منابع آب را تشکیل می‌دهند. در این رویکرد مدل‌سازی، هیچ محدودیتی برای تعریف بخش اجتماعی و اکولوژیکی و ارتباطات بین آن‌ها وجود ندارد و تنها کاستی در داده‌ها و اطلاعات میدانی است که می‌تواند در مدل محدودیت ایجاد کند. بزرگ‌ترین نقطه قوت این رویکرد مدل‌سازی، در نظر گرفتن بخش اجتماعی در مدل، همپای بخش اکولوژیکی و همینطور لحاظ نمودن ارتباطات و تأثیرات متقابل آن‌هاست. در واقع ایده اصلی این رویکرد مدل‌سازی، نزدیک‌کردن هر چه بیش‌تر مدل به شرایط واقعی مسأله و در نتیجه حصول نتایج واقع‌بنیانه‌تر از مدل است. به همین دلیل استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و به خصوص سیستم‌های پیچیده منابع آب در سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است (Berglund, 2015). البته با وجود نقاط قوت و ویژگی‌های مثبت این رویکرد، استفاده از آن در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و به خصوص سیستم‌های پیچیده منابع آب، که تمرکز اصلی این مقاله است، با چالش‌هایی روبه‌روست. منظور از چالش، نکات مهمی است که لازم است در زمان توسعه مدل به آن‌ها توجه شود. اطلاع از این چالش‌ها و نحوه برخورد با آن‌ها می‌تواند در راستای مدل‌سازی اینگونه از سیستم‌ها بسیار مفید باشد. به همین منظور، هدف اصلی این مقاله معرفی چالش‌های پیش رو در زمینه مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم‌های پیچیده منابع آب و ارائه راهکارهای مناسب جهت رویارویی با آن‌ها می‌باشد.

Filatova et al. (2013) با مروری بر مراجع مربوطه در زمینه مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم‌های پیچیده، چهار چالش عمده را شناسایی کردند که عبارتند از: طراحی رفتار عامل‌ها؛ برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی؛ مکانی‌کردن مدل؛ و کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی. منظور از طراحی رفتار عامل‌ها، تعریف ویژگی‌ها و رفتار عامل‌ها یا به عبارتی بازیگران سیستم است. در برقراری ارتباط بین بعد اجتماعی و بعد اکولوژیکی، نحوه متصل کردن این دو بعد و در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر مدنظر است. چگونگی تعریف تغییرات مکانی پارامترهای اجتماعی و اکولوژیکی، و تأثیر آن بر بخش‌های اجتماعی و اکولوژیکی از دیگر چالش‌های پیش روست و در آخر، کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها، آخرین دسته از چالش‌های شناسایی‌شده توسط Filatova et al. (2013) هستند. از آنجایی‌که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب به حساب می‌آید، در این مقاله سعی گردید تا چهار چالش مذکور با تمرکز بر روی مسأله بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیاز بخش

www.SID.ir

Archive of SID

کشاورزی مورد بحث و بررسی قرار گیرند، که در همین راستا از تعدادی از مقالات شاخص با ارجاعات بالا، در این زمینه استفاده گردید. در پایان، بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، نکاتی کلیدی جهت بکارگیری هرچه بهتر این رویکرد در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب ارائه خواهد شد.

۲- مدل‌سازی عامل‌بنیان و کاربرد آن در سیستم‌های منابع آب

مجموعه‌ای از عامل‌ها[۴]، ارتباطات[۵] بین آن‌ها و محیطی[۶] که در آن قرار دارند اجزای یک مدل عامل‌بنیان را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). عامل‌ها دارای خصوصیات و رفتارهایی بخصوص هستند و بر اساس ارتباطات تعریف شده، با یکدیگر تعامل برقرار می‌کنند. پیکربندی ارتباطات بین عامل‌ها مشخص می‌کند که عامل‌های مختلف چگونه و با کدام عامل یا عامل‌ها تعامل داشته باشند. علاوه براین، عامل‌ها با محیط خود نیز تعامل دارند (MacAl and North, 2010). در نتیجه افراد، سازمان‌ها و محیط فعالیت آن‌ها را می‌توان به صورت سیستم‌های چندعامله (MAS) نمایش داد و یا از رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان (ABM) استفاده نمود.

سیستم‌های عامل‌بنیان ریشه در هوش مصنوعی دارند (Wooldridge, 1997). Davidsson et al. (2007) نـه حوزه مختلف را در زمینه استفاده از مـدل‌های عامل‌بنیان شناسایی کـردند. جوامع حیوانی، سیستم‌های روانشناختی، سیستم‌های اجتماعی، سازمان‌ها، سیستم‌های اقتصادی، سیستم‌های اکولوژیکی، سیستم‌های فیزیکی، سیستم‌های رباتیک، و نهایتاً سیستم‌های حمل و نقل و ترافیک از حوزه‌های مختلف شناسایی شده توسط آن‌هاست. در این دسته‌بندی، سیستم‌های منابع آب در حوزه سیستم‌های اکولوژیکی قرار می‌گیرند که در این میان می‌توان برای مثال به مدل‌سازی تأمین آب شهری (Kotz and Hiessl, 2005)، کشاورزی (Le Bars et al., 2005)، حـوضه رودخـانـه (Schlüter and Pahl-Wostl, 2007) و کیفیت منـابـع آب (Ng et al., 2011) اشاره نمود. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان به منظور مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب با رویکرد پایین به بالا، افزایش رو به رشدی داشته است. این مدل‌ها با قابلیت در نظر گرفتن دو بعد اجتماعی و اکولوژیکی یا در حقیقت کاربران و سیستم منابع آب، این امکان را می‌دهند تا بتوان با مسائل مدیریتی منابع آب با واقع‌بینی هر چه بیش‌تر برخورد کرد و در جهت پایدارسازی منابع آب گام برداشت. در مـدل‌های عامل‌بنیان، مشارکت ذی‌مدخلان به عنوان یک عنصر حیاتی مطرح است (Voinov and Bousquet, 2010) و بـرای یـادگیری اجتماعی و شناخت سیستم، در زمـانی کـه تعاملات بین افراد و اثـرات آن‌ها بر روی سیستم مدنظر باشد، بسیار کارآمد و مناسب خواهد بود (Kelly et al., 2013).

۳- چالش‌های پیش رو

در این بخش به معرفی و بررسی چالش‌های پیش رو برای استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان در زمینه مدیریت منابع آب و کشاورزی خواهیم پرداخت. در هر زیربخش ضمن معرفی چالش مربوطه، نحوه برخورد با آن در مقالات مختلف در زمینه بهره‌برداری از منابع آب برای تامین نیاز بخش کشاورزی، مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۳-۱- طراحی رفتار عامل‌ها

در یک مدل عامل‌بنیان، عامل‌ها به نمایندگی از افراد، گروه‌ها و سازمان‌ها تعریف و با ویژگی‌ها و رفتارهایی که دارند شناخته می‌شوند. این موضوع با ارائه مثالی روشن‌تر می‌شود:

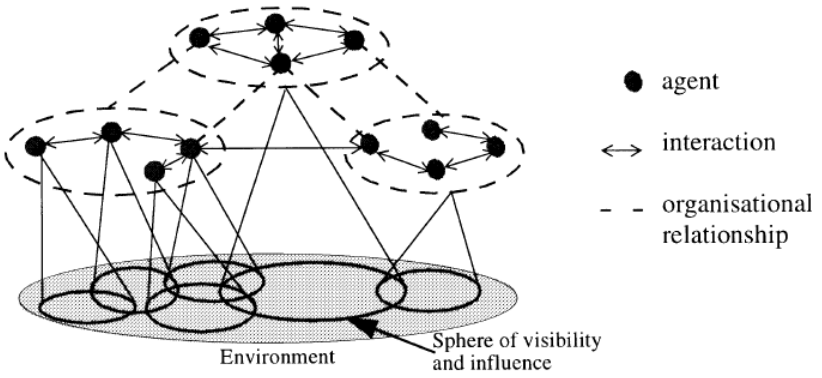

Fig. 1- Structure of an agent-based model (Jennings, 2000)

شکل ۱- ساختار مدل عامل‌بنیان (Jennings, 2000)

www.SID.ir

Archive of SID

«کشاورزی، زمینی در اختیار دارد. او در ابتدای فصل کشت بر اساس پارامترهایی همچون میزان سرمایه، اولویت کشت محصولات، مقدار حقابه و ... در مورد مساحت و نوع محصولات تحت کشت خود تصمیم می‌گیرد. او احتمالاً سعی می‌کند به نحوی تصمیم‌گیری کند که در نهایت بیش‌ترین درآمد ممکن را کسب نماید. او با تعدادی از کشاورزان (احتمالاً همسایگان خود که فاصله کمی با آن‌ها دارد) در تعامل است. آن‌ها یکدیگر را در جریان تصمیمات خود قرار می‌دهند و ممکن است برای اهدافی مشترک مثل بهسازی کانال‌های انتقال آب به اراضی خود با یکدیگر همکاری کنند. یک کشاورز ممکن است تصمیم بگیرد با سرمایه مازاد خود زمینی خریداری کرده یا سیستم آبیاری خود را بهینه کند یا اگر مجبور شود بخشی از یا حتی کل زمین خود را بفروشد. یک کشاورز ممکن است از نقاط ضعف و قوت تصمیمات گذشته خود درس گرفته و در تصمیمات آتی خود آن‌ها را در نظر بگیرد».

این مثال نشان‌دهنده یک کشاورز با ویژگی‌ها و رفتارهای اوست. مقدار سرمایه اولیه، نیروی کار، مساحت زمین کشاورزی، نوع سیستم آبیاری، محصولات تحت کشت و ... همگی از ویژگی‌های کشاورز در این مثال هستند. در کنار آن، کشت محصول، خرید و فروش زمین، تغییر سیستم آبیاری، تعاملات با سایر عامل‌ها و ... مجموعه رفتارهای این کشاورز را تشکیل می‌دهند.

بعد از شناسایی ویژگی‌ها و رفتار عامل‌ها در این مدل‌ها که اهمیت بسیاری در این دسته مدل‌ها دارند و شالوده اصلی کار را تشکیل می‌دهند، نوبت به فرموله‌کردن این ویژگی‌ها و رفتارها می‌رسد. به طور کلی برای فرمول‌کردن ویژگی‌ها و رفتارها از روش‌های منطقی (رابطه ۱) و تصمیم‌گیری (رابطه ۲) استفاده می‌شود. در این رابطه $f(x)$، تابع هدف و $g(x)$ و $h(x)$ به ترتیب محدودیت‌های نامساوی و مساوی هستند. ضمناً، m تعداد محدودیت‌های نامساوی و p تعداد محدودیت‌های مساوی می‌باشد.

```
If (Boolean condition) Then                    (۱)
   (consequent)
Else
   (alternative)
End If
```

$$\min_{x} \quad f(x) \qquad (۲)$$
$$\text{subject to} \quad g_i(x) \le 0, \quad i = 1,\dots,m$$
$$h_i(x) = 0, \quad i = 1,\dots,p$$

در ادامه ویژگی‌ها و رفتارهای تعریف‌شده برای عامل‌ها، در تعدادی از مقالات شرح داده شده است. غیر از طراحی ویژگی‌ها و رفتارهای عامل‌ها، فرمول‌کردن آن‌ها اهمیت دارد. با توجه به گستردگی این بعد، ضمن اشاره کلی به نحوه فرموله‌کردن ویژگی‌ها و رفتارها در مقالات، از پرداختن بیش‌تر به این بعد صرف نظر می‌شود.

Becu et al. (2003)، مدلی عامل‌بنیان برای بررسی اثر مدیریت آب در بالادست رودخانه بر کشاورزی پایین‌دست، توسعه دادند. آن‌ها اطلاعات مورد نیاز خود را از آمار خانوار و اطلاعات سازمان‌ها به دست آورده و عامل‌ها را در مدل خود تعریف کردند. عامل‌های اصلی در مدل آن‌ها، کشاورزانی هستند که ویژگی اصلی آن‌ها میزان سرمایه و نیروی کار است. هر کشاورز بر اساس سرمایه، نیروی کار و انتظاری که از مقدار آب در دسترس دارد، برای الگوی کشت خود تصمیم می‌گیرد. او در هر گام، از تجارب دوره‌های قبل خود برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. کشاورزان در فصل خشک به کاری غیر از کشاورزی مشغول شده و کسب درآمد می‌کنند. آن‌ها می‌توانند در صورت داشتن سرمایه کافی زمین خریداری کنند و با نصب تجهیزات آبیاری در زمین‌های دیم خود به کشت محصولات پرسودتر بپردازند. ویژگی‌ها و رفتارهای عامل‌ها در این مدل بر اساس مجموعه‌ای از قواعد منطقی و برنامه‌ریزی خطی در مدل وارد شده است.

Berger et al., (2007) مدلی، بر اساس آمار و اطلاعات به دست آمده از منطقه مطالعاتی خود در شیلی، برای نشان‌دادن پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب توسعه دادند. در این مدل، عامل‌ها در زمینه‌هایی همچون بهبود سیستم انتقال آب و رسیدگی به آن، با یکدیگر مشارکت می‌کنند. عامل‌ها در این مدل می‌توانند منابع آب و زمین‌های خود را معامله کنند. در این معاملات آن‌ها آب یا زمین خود را با عامل دیگری که بیش‌ترین پیشنهاد را می‌دهد (بر مبنای مسافت و قیمت سایه‌ای)، معامله می‌کنند. به علاوه در این مدل، انتشار اطلاعات در مورد نوآوری‌هایی همچون بکارگیری روش‌های بهینه آبیاری نیز در نظر گرفته شده است. عامل‌ها انتشار هر نوآوری را بین اعضای گروه خود ارزیابی کرده و چنانچه مقدار بکارگیری آن بین اعضا از حد آستانه مورد نظر بیش‌تر شود، آن ایده را به کار می‌گیرند. عامل‌ها تمایل اطرافیان خود به همکاری در مواردی چون نگهداری شبکه آبیاری را پیش‌بینی می‌کنند و بسته به گسترش تمایل عامل‌ها برای همکاری، اقدام می‌کنند. بعلاوه در این مدل، اتخاذ سیاست‌هایی در راستای تحریم عامل‌ها یا ترغیب آن‌ها به همکاری، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در الگوریتم تصمیم‌گیری کشاورزان این مدل، از قواعد منطقی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[۷] (MIP) استفاده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور بررسی ارتباط میزان مصرف با وضعیت دسترسی به آب در حوضه‌ای در برزیل، van Oel et al. (2012) از مدل‌سازی عامل‌بنیان استفاده کردند. در این مدل، کاربران اصلی کشاورزان هستند. آن‌ها بر اساس نوع دسترسی که به آب دارند به سه دسته کاربران رودخانه، سیلابی و سد تقسیم می‌شوند. هر دسته از عامل‌ها بر اساس آمار میدانی، برداشت متفاوتی از کفایت میزان آب در دسترس خود دارند. آن‌ها در ابتدای فصل کشت بر اساس میزان بارندگی، در مورد مقدار آب در دسترس خود پیش‌بینی کرده و برای کشاورزی خود، بر اساس قواعد منطقی که برگرفته از اطلاعات موجود، آمار جمع‌آوری شده از کشاورزان و مصاحبه‌هاست، برنامه‌ریزی می‌کنند.

برای مقایسه اثرات دو سیاست دریافت مالیات و سهمیه‌بندی آب بر پایداری منابع آب زیرزمینی سفره‌ای در ایالات متحده امریکا، Mulligan et al.(2014) مدلی عامل‌بنیان توسعه دادند. آن‌ها محدوده مطالعاتی را به سلول‌هایی با ابعاد متفاوت تقسیم کردند، بطوریکه هر عامل مالک یک یا چند سلول است و از چاه‌های آن سلول(ها) برای مصرف آبیاری برداشت می‌کند. عامل‌ها ترکیبی از دو محصول ذرت و سویا را کشت می‌کنند چراکه طبق آمار، ذرت و سویا محصولات غالب تحت کشت منطقه مطالعاتی هستند. در این مدل، بازدهی و نیاز آبی محصولات، و همینطور پارامترهای تأثیرگذار بر بهره‌وری کشاورزی در منطقه در نظر گرفته شده‌اند. عامل‌ها با هدف حداکثر کردن سود خود بر اساس هزینه کشت محصولات، قیمت فروش، هزینه پمپاژ و مالیات برداشت آب زیرزمینی، بدون توجه به تأثیر فعالیت خود بر سود سایر عامل‌ها و پایداری منبع (روندی معمول در سیستم‌های منابع مشترک)، در مورد نوع، سطح زیر کشت محصولات و میزان برداشت آب تصمیم‌گیری می‌کنند. در این مدل از الگوریتم سیمپلکس برای فرموله‌کردن تصمیم‌گیری کشاورزان استفاده شده است.

Giuliani and Castelletti (2013) تأثیر انتقال اطلاعات بین کاربران بر سود اقتصادی کل سیستم را از طریق مدلی عامل‌بنیان برای حوضه رودخانه زامبزی در آفریقا مورد ارزیابی قرار دادند. در این مدل، بر اساس اطلاعات و آمارهای به دست‌آمده از منطقه مطالعاتی، عامل‌ها همان کشاورزان در طول رودخانه هستند بطوریکه با برداشت آب توسط عامل‌های بالادست، آب در دسترس عامل‌های پایین‌دست کاهش پیدا می‌کند. در سناریوی پایه (شرایط فعلی در سیستم)، عامل‌ها با هدف حداکثر کردن سود خود از کشاورزی و بدون توجه به عامل‌های پایین‌دست از آب رودخانه برداشت می‌کنند. در سناریوی دوم، عامل‌های بالادست مشابه سناریوی اول عمل می‌کنند با این تفاوت که عامل‌های پایین‌دست را در جریان تصمیمات خود قرار می‌دهند. در نتیجه عامل‌های پایین‌دست بهتر می‌توانند برای کشاورزی خود و کسب سود بیش‌تر برنامه‌ریزی کنند. در سناریوی آخر که سناریوی برتر است کشاورزان بالادست و پایین‌دست در راستای حداکثر کردن سود کل سیستم با یکدیگر همکاری می‌کنند. در این مدل از الگوریتم SDP استفاده شده است و عامل‌ها در هر سناریو اهداف خود را بهینه می‌کنند.

به منظور مدیریت مناقشات در منابع آب، Akhbari and Grigg (2013) چارچوبی برای یک مدل عامل‌بنیان توسعه دادند. در این چارچوب سه دسته عامل در نظر گرفته شد: دولت به عنوان عامل تصمیم‌گیر، کشاورز به عنوان عامل درخواست‌کننده و عامل بخش محیط‌زیست که متقاضی جاری بودن آب به میزان کافی و با کیفیت مطلوب در رودخانه است. در صورتی که کشاورزان در راستای حفظ کیفیت و کمیت آب رودخانه با یکدیگر همکاری نداشته باشند، عامل محیط زیست با وضع قانون یا اعمال فشار آن‌ها را وادار به این کار می‌کند. کشاورزان در ابتدای هر گام زمانی، برای آب درخواست می‌دهند. اگر مقدار آب درخواستی آن‌ها بیش‌تر از مقدار مجاز باشد غیرهمکار، و اگر مساوی یا کم‌تر باشد همکار شناخته می‌شوند. در این شرایط اگر تصمیم بیش‌تر همسایگان آن عامل با تصمیم آن عامل همسو بود، بر تصمیم خود باقی می‌ماند و در غیر این صورت تصمیم خود را عوض کرده و با اکثریت همسایگان خود همسو می‌گردد.

در مدل SINUSE که توسط Feuillette et al. (2003) توسعه داده شده است، بر اساس اطلاعات میدانی به دست‌آمده از منطقه مطالعاتی در تونس، عامل‌ها کشاورزانی هستند که از آب چاه‌های شخصی و مشارکتی برای آبیاری زمین‌های خود استفاده می‌کنند. البته برخی از کشاورزان کشت دیم هم دارند. اکثر عامل‌ها به صورت سنتی گندم، جو یا زیتون کشت می‌کنند. به طور کلی در این مدل عامل‌ها بر اساس قواعد منطقی تصمیم‌گیری می‌کنند. اگر کمبود آب داشته باشند و از طرفی سرمایه کافی در اختیار داشته باشند، ممکن است تصمیم به حفر چاه بگیرند. علاوه بر این، اگر دو عامل مجاور مایل به حفر چاه باشند اما سرمایه کافی نداشته باشند، ممکن است برای این کار با یکدیگر شریک شوند. با توجه به شرایط منطقه مطالعاتی، خرید و فروش زمین انجام نمی‌شود و تنها زمانی که عاملی بدهی زیادی داشته باشد و بخواهد بدهی خود را بپردازد، زمین خود را فروخته و از کشاورزی کناره‌گیری می‌کند. از طرفی با توجه به سنتی بودن کشاورزی در این منطقه، کشاورزان نه بر بازار تأثیر گذاشته و نه از آن تأثیر می‌پذیرند. آن‌ها همگی اهداف یکسانی را

www.SID.ir

Archive of SID

دنبال می‌کنند، اما از لحاظ ویژگی‌هایی همچون میزان سرمایه و مساحت زمین با یکدیگر متفاوتند.

۳-۲- برقـــراری ارتباط بین بخش اجتماعی و بخش اکولوژیکی

همانطور که اشاره شد، نقطه قوت مدل‌های عامل‌بنیان توانایی در نظر گرفتن دو بخش اجتماعی و اکولوژیکی و ارتباط بین آن‌هاست. در سیستم‌های اجتماعی اکولوژیکی منابع آب، کاربران با رفتارها و تصمیم‌های خود، بر منابع آب اثر گذاشته و متقابلاً از آن‌ها تأثیر می‌گیرند. بخش اکولوژیکی مدل که تشکیل‌دهنده محیطی است که عامل‌ها با آن در ارتباطند، با توجه به نوع مسأله تعریف می‌شود. در مورد مسائل مربوط به منابع آب و کاربرد آن در بخش کشاورزی، بخش اکولوژیکی مدل بسته به نوع مسأله شامل مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی، بارش–رواناب، مجموعه سد و رودخانه، رشد و تبخیر و تعرق گیاه (Becu at al., 2003; Berger et al., 2007)، اقلیم (van Oel et al., 2012) و یا ترکیبی از همه آن‌ها می‌باشد. ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی در مدل از دو دیدگاه کلی قابل بررسی است: نحوه بکارگیری بخش اکولوژیکی؛ اجرا و به روز رسانی بخش اکولوژیکی.

۳-۲-۱- بکارگیری بخش اکولوژیکی

همانطور که در بالا به آن اشاره شد، بخش اکولوژیکی مدل‌های عامل‌بنیان بسته به شرایط مسأله، در قالب یک یا چند زیر مدل تعریف می‌شوند. مدل بیلان آب، اصلی‌ترین بخش اکولوژیکی در سیستم‌های منابع آب به حساب می‌آید، البته در کنار آن ممکن است زیرمدل‌های دیگری نیز تعریف شود.

یکی از رویکردهای رایج، استفاده از مدل‌های بیلان آب یا هیدرولوژیکی برای بخش اکولوژیکی است. استفاده از این مدل‌ها این مزیت را دارد که می‌توان از توانایی مدل‌های از پیش توسعه‌یافته موجود به طور مستقیم در مدل عامل‌بنیان بهره برد. برای مثال استفاده از مدل‌هایی همچون مادفلو (Kock, 2008; Mulligan, et al., 2014; Castilla-Rho et al., 2015) و سوات (Ng et al., 2011) مثال‌هایی از کاربرد این گونه مدل‌هاست. البته Castilla-Rho et al. (2015) به جای استفاده از مدل‌های موجود، روابط مدل مادفلو را مستقیماً در کد خود وارد کرد. در این دسته از مدل‌های عامل‌بنیان، در هر گام زمانی، اطلاعات لازم به زیرمدل‌های اکولوژیکی منتقل شده و اجرا می‌شوند. سپس نتایج به دست آمده، در مدل اصلی وارد و در واقع مدل عامل‌بنیان به روزرسانی می‌شود.

۳-۲-۲- اجرا و به روزرسانی بخش اکولوژیکی

در مدل‌های عامل‌بنیان، می‌توان بسته به نوع، هدف و دقت مورد انتظار از مسأله، برای به روزرسانی بخش‌های اجتماعی و اکولوژیکی گام‌های زمانی متفاوتی را در نظر گرفت. برای مثال، در مسأله بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، با فرض عدم تأثیر مخروط افت چاه بر سطح آب در چاه‌های مجاور (Mulligan, et al., 2014)، اجرا و به روزرسانی بخش آب زیرزمینی می‌تواند هم‌گام با بخش اجتماعی (تصمیم‌گیری بهره‌برداران) انجام شود. اما با فرض اثرگذاری مخروط افت یک چاه بر آبدهی چاه‌های مجـــاور (Madani and Dinar, 2012)، لازم خواهد بود تا اجرای مدل آب زیرزمینی در گام‌های بسیار کوتاه‌تری انجام شود. در نتیجه لازم است حداقل در ابتدای هر گام اجتماعی پارامترهای فیزیکی، مثل بارش و جریان در رودخانه، و پارامترهای بیوفیزیکی مثل رشد گیاه، بیلان آب، سطح آب زیرزمینی و حجم آب در مخزن سد و ... محاسبه و در اختیار بخش اجتماعی قرار گیرد. بدین ترتیب بسته به گام اجتماعی و دقت مورد انتظار، برای به روزرسانی بخش اکولوژیکی از گام‌های سالانه (Mulligan et al., 2014; Castilla-Rho et al., 2015)، فصـــل کشـــت (van Oel et al., 2012)، مـــاهـــانـــه (Giuliani and Castelletti, 2013) و یـــا حتـــی ده‌روزه (Becu et al., 2003) استفاده می‌شود.

۳-۳- مکانی‌کردن مدل

توزیع و تنوع مکانی اطلاعات، دسته‌ای دیگر از چالش‌های پیش رو در مدل‌سازی عامل‌بنیان است که از دو جنبه کلی تغییرات مکانی پارامترها و دقت واحدهای مکانی قابل بررسی می‌باشد.

۳-۳-۱- تغییرات مکانی پارامترهای اجتماعی و اکولوژیکی

متغیرهای اکولوژیکی مثل میزان بارش، میزان و پراکندگی منابع آب، جنس خاک، شیب زمین، دما و ... در بعد مکان تغییر می‌کنند؛ از طرف دیگر، مکان قرارگیری عامل‌ها، موجب بروز رویکردهای متفاوت در تصمیم‌گیری، تنوع تعاملات آن‌ها با سایر عامل‌ها و محیط اطرافشان می‌شود. در سیستم‌های منابع آبی که تأمین‌کننده بخش کشاورزی هستند، کشاورزان عامل‌های اصلی به حساب می‌آیند. بر همین اساس تعریف عامل‌ها در مقیاس مزرعه صورت می‌گیرد و هر عامل در مدل، می‌تواند نماینده یک یا مجموعه‌ای از

www.SID.ir

Archive of SID

کشاورزان باشد. عامل‌ها بر اساس تفاوت‌هایی که در رفتار، الگوهای تصمیم‌گیری، نگرش‌ها و ویژگی‌های خود دارند نیز می‌توانند دسته‌بندی شوند، بطوریکه عامل‌های هر دسته ویژگی‌های رفتاری مشترکی داشته باشند. مقیاس اطلاعات موجود و ذات مسأله، در تعیین بزرگی و تعداد این دسته‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. برای مثال در مدل عامل‌بنیان van Oel et al. (2012)، کشاورزان بر اساس محل قرار گرفتن زمین کشاورزی خود، به سه دسته تقسیم شدند؛ نوع دسترسی عامل‌های هر دسته به منابع آب، مشابه با هم بوده و در نتیجه الگوی رفتاری مشابهی هم دارند. در مدل عامل‌بنیان Mulligan et al. (2014)، عامل‌ها بر مبنای میزان بازدهی تولید، از یکدیگر تفکیک شده‌اند. در هر اجرای مدل، این ویژگی عامل‌ها ثابت و در اجراهای متفاوت متنوع در نظر گرفته شده است. در مدل‌های عامل‌بنیان Becu et al. (2003) و Giuliani and Castelletti (2013)، اثر تصمیمات کاربران بالادست رودخانه بر کشاورزی کاربران پایین‌دست آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این دو مدل، عامل‌ها همان کشاورزان امتداد یک رودخانه هستند، بطوریکه به دلیل محل قرارگیری آن‌ها در امتداد رودخانه، رویکردهای تصمیم‌گیری متفاوتی دارند و تحت تأثیر تصمیمات هم قرار می‌گیرند. برای مثال عامل‌های بالادست رودخانه می‌توانند آزادانه در مورد برداشت آب از رودخانه تصمیم‌گیری کنند، درحالی‌که عامل‌های پایین‌دست ناگزیرند بر مبنای تصمیمات بالادستی‌ها در مورد برداشت آب از رودخانه تصمیم‌گیری کنند.

۳-۳-۲- دقت واحدهای مکانی

واحدهای مکانی در مدل‌های عامل‌بنیان در قالب سلول تعریف می‌شود. در هر سلول، مقدار هر پارامتر ثابت بوده، اما از یک سلول به سلول دیگر متغیر است. در واقع سلول‌ها کوچک‌ترین واحدهای محاسباتی در مدل هستند. هر سلول می‌تواند بسته به مسأله، شامل پارامترهای متفاوتی مانند جنس خاک، ارتفاع، شیب و یا کاربری باشد. هر چند سلول، در کنار یکدیگر می‌توانند تشکیل یک واحد بزرگ‌تر مثل یک مزرعه را بدهند. با این حال الگو یا قاعده تعریف‌شده‌ای برای این منظور وجود ندارد و در هر مدل ابعاد سلول‌های محاسباتی با دلایل و توجیهاتی مشخص شده است. یکی از روش‌های متداول، تعیین ابعاد سلول‌های محاسباتی مدل بر مبنای ابعاد سلول‌های DEM موجود در منطقه مطالعاتی یا ضریبی از آن (برای مثال van Oel et al (2012)) می‌باشد.

۳-۴- کالیبراسیون[۸]، صحت‌سنجی[۹] و اعتبارسنجی[۱۰]

همانند سایر مدل‌ها، لازم است عملیات‌های کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی جهت اطمینان از درستی مدل، تطابق آن با مدل مفهومی و مسأله اصلی انجام گیرد. از آنجایی که مدل‌های عامل‌بنیان در دسته مدل‌های پیچیده قرار می‌گیرند، این بررسی‌ها با اندکی تفاوت با مدل‌های معمول انجام می‌گردد. در ادامه به این چالش‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۱- کالیبراسیون

معمولاً پیش از برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی با بخش اکولوژیکی، زیرمدل‌های مربوط به بخش اکولوژیکی کالیبره می‌شود. فرایند کالیبراسیون مدل، بر خلاف دیگر موارد، فقط برای بخش اکولوژیکی صورت می‌گیرد. منظور از زیرمدل، تمام مدل‌هایی است که فرایندهای اکولوژیکی مورد نظر در مدل را تشکیل می‌دهند. به طور کلی در زمینه سیستم‌های منابع آب، بخش آب زیرزمینی، آب سطحی، رشد گیاه، بارش و رواناب و ... در دسته فرایندهای اکولوژیکی قرار می‌گیرند و لازم است تا فرایند کالیبراسیون برای آن‌ها صورت گیرد. در فرایند کالیبراسیون، ضرایب و ورودی‌های مدل به نحوی تغییر داده می‌شوند تا خروجی‌های مدل با متغیرهای اندازه‌گیری شده، یا به عبارت دیگر مشاهدات، مطابقت پیدا کند (Hill, 1998). کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی (Mulligan, et al., 2014)، توزیع آب آبیاری (Becu et al., 2003)، رشد گیاه (Berger et al., 2007)، جریان آب در رودخانه (Giuliani and Castelletti, 2013) و مجموعه سد و رودخانه (Van Oel et al., 2010 and 2012; Rieker and Labadie, 2012) نمونه‌هایی از بخش‌های اکولوژیکی مدل‌های عامل‌بنیان در زمینه منابع آب هستند که قبل از استفاده در مدل اصلی، فرایند کالیبراسیون برای آن‌ها انجام شده است.

۳-۴-۲- صحت‌سنجی و اعتبارسنجی

از آنجایی که مدل‌های عامل‌بنیان در دسته مدل‌های پیچیده انطباقی قرار می‌گیرند (Liu et al., 2007)، تعداد پارامترها و فرایندهای موجود در آن‌ها بیش‌تر از مدل‌های متداول است (Holland, 2006) و با در نظر گرفتن هم‌زمان بخش اجتماعی و اکولوژیکی و ارتباط بین آن‌ها، به پیچیدگی و حجم کار اضافه می‌شود. در نتیجه صحت‌سنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها با چالش‌هایی روبروست.

پس از کالیبراسیون بخش اکولوژیکی، مدل عامل‌بنیان بر اساس مدل مفهومی سیستم مورد مطالعه توسعه داده می‌شود. در این مرحله لازم است عملیات صحت‌سنجی و اعتبارسنجی برای مدل انجام شود. منظور از صحت‌سنجی بررسی تطابق مدل توسعه داده شده با مدل

www.SID.ir

Archive of SID

مفهومی و منظور از اعتبارسنجی تطابق بین مدل عامل‌بنیان توسعه داده شده با سیستم واقعی است (Feuillette et al., 2003). اما با این حال در تمام مقالات مورد مطالعه در این تحقیق، بین بخش صحت‌سنجی و اعتبارسنجی تمایزی قائل نشده‌اند و با تکیه بر بخش اعتبارسنجی دقت و صحت مدل خود را نمایش داده‌اند.

ایده اصلی در اعتبارسنجی، بررسی تطابق خروجی‌های مدل با مشاهدات در سیستم واقعی است (Feuillette et al., 2003). بسته به نوع مسأله، اطلاعات موجود و محدودیت‌های تحقیق، از یک یا چند روش برای اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شود. به طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته روش‌های کمی و کیفی (Sun and Muüller, 2013) تقسیم نمود. روش‌های کمی شامل مقایسه خروجی‌های مدل (مثل تغییر کاربری اراضی، میزان مصرف آب، میزان رشد اقتصادی) با مشاهدات (Holtz and Pahl-Wostl, 2012; Berger, 2001) یا مستندات موجود مثل عکس‌های ماهواره‌ای در منطقه مطالعاتی (van Oel et al., 2010; van Oel et al., 2012; Becu et al., 2003)، رفتار مدل در قبال داده‌های حداکثری، آنالیز حساسیت (Feuillette et al., 2003) و آزمون پایداری[11] (Berger, 2001) می‌باشد. در رویکرد کیفی، همانطور که از نام آن پیداست، از اعداد و ارقام برای کنترل صحت و اعتبار مدل استفاده نمی‌شود. بلکه در این رویکرد، ورودی‌ها و خروجی‌های به دست آمده از مدل، از طریق مشورت با کاربران، متخصصان یا آگاهان محلی مورد آزمون قرار می‌گیرد (Barreteau et al., 2004).

در هر حال، راهکارهایی همچون آنالیز حساسیت، پایداری، مقایسه نتایج مدل با عکس‌های ماهواره‌ای، اطلاعات و داده‌های اکولوژیکی تاریخی همچنین مطرح کردن مدل با کاربران محلی و متخصصان، همگی از نمونه راه‌کارهایی هستند که در مقالات مختلف از یک یا تعدادی از آن‌ها استفاده شده است. بدیهی است که هر چه مدل از طرق متنوع‌تری بررسی شود، قابل اطمینان‌تر خواهد بود اما ذات مدل‌های عامل‌بنیان این مسأله را محدود و با چالش‌هایی روبرو می‌سازد.

۴- بحث

همانطور که اشاره شد، استفاده از رویکرد عامل‌بنیان برای مدل‌سازی سیستم‌های مختلف، به خصوص سیستم‌های پیچیده اجتماعی- اکولوژیکی منابع آب، در حال افزایش است. از آنجایی که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد، در مقالات توجه زیادی به مجموعه کشاورزان و برداشت آن‌ها از منابع آب شده است. برای این منظور مدل‌هایی توسعه داده شده‌اند تا تصمیم‌گیران و کاربران بهتر بتوانند در مورد سیاست‌گذاری‌ها و تصمیمات خود در زمینه الگوی کشت، کسب سود، بهره‌برداری از منابع و پایداری آن‌ها تصمیم‌گیری کنند. سیاست‌های قابل اتخاذ در سیستم‌های منابع آب را می‌توان به سه دسته مختلف تقسیم کرد (Feuillette et al., 2003). دسته اول، ابزارهای فنی برای کنترل مصرف آب است. استفاده و یا گسترش استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای (Feuillette et al., 2003) از سیاست‌هایی است که در این دسته قرار می‌گیرد. در دسته دوم ابزارهای اقتصادی قرار دارد. قیمت‌گذاری آب، مالیات، جریمه برداشت و بازار آب از جمله سیاست‌ها در این دسته هستند (مانند Mulligan, et al., 2014) و در نهایت در دسته آخر، سیاست‌های غیر اقتصادی قرار دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به قواعد دسترسی به آب، سهمیه‌بندی آب و آموزش بهره‌برداران اشاره کرد (مانند Mulligan, et al. (2014)، Castilla-Rho et al. (2015)، Berger et al. (2007) و van Oel et al. (2012)) با وجود این که همه این سیاست‌ها به ظاهر می‌توانند در جهت کنترل برداشت و پایدارسازی منابع آب موثر واقع شوند، اما در واقعیت، به دلیل تأثیر چشم‌گیر بخش اجتماعی یا همان کاربران، ممکن است ضمانت اجرایی لازم برای همه آن‌ها وجود نداشته باشد. گاهی ویژگی‌ها و رفتارهای بهره‌برداران منابع آب به گونه‌ایست که برخی سیاست‌ها، انتظارات آن‌ها را برآورده نخواهد کرد و در نتیجه آن سیاست نه تنها به پایداری منابع کمکی نخواهد کرد، بلکه ممکن است منجر به زوال و نابودی منابع شود. در حالی که می‌توان با استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان، با واقع‌بینی بیش‌تر و بر اساس شرایط منطقه مطالعاتی، سیاست‌های برتر را در زمینه مدیریت سیستم‌های منابع آب شناسایی کرد. برای مثال Feuillette et al. (2003) با استفاده از مدل عامل‌بنیان توسعه داده شده خود به این نتیجه رسیدند که شرایط منطقه مطالعاتی به گونه‌ای است که نه تنها دادن یارانه به کشاورزان برای تغییر سیستم آبیاری موجب کاهش برداشت از منابع آب نمی‌شود، بلکه زمینه را برای تحت کشت بردن اراضی بیش‌تر و در نتیجه بهره‌برداری بیش‌تر آن‌ها از منابع آب فراهم می‌آورد.

فارغ از اهمیت و نقاط قوت رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان و امکانات قابل توجهی که فراهم می‌سازد، استفاده از این رویکرد با چالش‌هایی روبه روست. با این که در سال‌های اخیر، استفاده از این مدل‌ها در زمینه‌های مختلف و از جمله منابع آب افزایش روبه رشدی داشته است اما همچنان نیاز به مطالعه بیشتر به منظور رویارویی با این چالش‌ها احساس می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

به جرأت می‌توان گفت که چالش‌برانگیزترین بخش مدل‌های عامل‌بنیان، بخش طراحی رفتار عامل‌هاست؛ از همین رو، بخش قابل توجهی از این مقاله به این موضوع اختصاص یافته است. از قضا نقطه قوت این رویکرد مدل‌سازی، یعنی توانایی بالقوه برای نزدیک‌کردن هرچه بیش‌تر مدل به شرایط واقعی، خود به چالش اصلی در این رویکرد مدل‌سازی تبدیل شده است. اطلاعات میدانی، مصاحبه‌ها، پرسشنامه‌ها، آمار کسب شده از جامعه هدف و آمار و اطلاعات کسب شده از ادارات و سازمان‌های مرتبط، همگی می‌توانند در این بخش کمک‌کننده باشند. اما در هر حال محدویت‌های زمانی و مالی موجب می‌شود که گاهی نتوان آمار و اطلاعات مورد نیاز را تا حد مطلوب جمع‌آوری کرد. در نتیجه لازم است تا حد امکان با جمع‌آوری اطلاعات موجود، حداکثر بهره و استفاده را از آن‌ها برد. این نکته موجب شده است که در مقالات مختلف به نوع اطلاعات مورد استفاده و نحوه استفاده از آن‌ها در مدل اشاره شود. از طرفی، نکته قابل توجه دیگر، اهمیت ساده‌سازی در مدل‌هاست. منظور از ساده‌سازی این است که بتوان آمار و اطلاعات موجود از مسأله را طبق هدف و نوع مسأله، در قالب روابط و معادلات در مدل وارد نمود. در هر مسأله بازیگران زیادی وجود دارند که کم یا زیاد در آن نقش دارند اما این که از میان همه بازیگران موجود کدام بازیگران برای مدل‌سازی انتخاب و چه رفتارهایی از آن‌ها در مدل وارد شود از چالش‌های پیش رو در این رویکرد مدل‌سازی است. این بحث از دو دیدگاه قابل بررسی است: اول این که مدل‌ساز می‌بایست عامل‌های شاخص و مهم را با توجه به مسأله در سیستم مورد مطالعه خود شناسایی کند و دوم این که باید ویژگی‌ها و رفتارهای مهم عامل‌های مورد نظر خود را شناسایی و در مدل تعریف نماید. برای مثال در مدل Becu et al. (2003) کشاورزان عامل‌های مدل هستند، در حالی که در مدل Akhbari and Grigg (2013) غیر از کشاورزان، طرفدار حفاظت از محیط زیست نیز به عنوان عامل در نظر گرفته شده است. بدون شک اگر تنوع بازیگران در نظر گرفته شده در مدل بیشتر باشد و رفتارهای آنها به صورت جامع‌تری لحاظ گردد، مدل به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود اما این به شرطی است که بتوان توازن خوبی بین ورود پیچیدگی در مدل و دقت آن برقرار نمود. بنابراین مدل‌ساز باید با دقت نظر فراوان و با توجه به مسأله و اطلاعاتی که در دست دارد در این مورد تصمیم‌گیری کند. نکته بعدی روابط بین عامل‌ها و نوع تأثیرگذاری آن‌ها بر یکدیگر است که به نوع مسأله و مدل بستگی دارد. برای مثال در مدل Mulligan et al. (2013) کشاورزان از منابع آب زیرزمینی برای کشاورزی برداشت نموده و در پایان دوره موجب تغییر در سطح آب زیرزمینی می‌شوند. در نتیجه در این مدل عامل‌ها از طریق تأثیر بر سفره، بر هم اثر می‌گذارند. گاهی نیز عامل‌ها مستقیماً و بدون این که واسطی مثل منابع آب داشته باشند، با یکدیگر ارتباط دارند. برای مثال در مدل Becu et al. (2003) عامل‌ها با یکدیگر برای حفر چاه همکاری دارند. بنابراین نوع ارتباط عامل‌ها بر اساس شرایط مسأله باید تعریف گردد.

دومین چالش پیش‌رو در زمینه استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان، برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی است. اجتماع و اکولوژی دو بخش اصلی مدل‌های عامل‌بنیان هستند که می‌بایست ارتباط مناسبی بین این دو برقرار نمود. اولین بعد از این چالش، نحوه به کارگیری بخش اکولوژیکی در مدل می‌باشد. در بعضی از موارد بسته به نیاز، می‌توان از توانایی مدل‌های موجود به طور مستقیم در مدل عامل‌بنیان بهره گرفت. استفاده از مدل‌هایی همچون مادفلو (Mulligan, et al., 2014) و سوات (Ng et al., 2011) مثال‌هایی از کاربرد مدل‌های توسعه داده شده در مدل‌های عامل‌بنیان است. در این دسته از مدل‌های عامل‌بنیان، در هر گام زمانی، اطلاعات لازم به زیرمدل‌های اکولوژیکی منتقل شده و اجرا می‌شوند. سپس نتایج به دست آمده، در مدل اصلی وارد و در واقع مدل عامل‌بنیان به روزرسانی می‌شود. البته گاهی استفاده مستقیم از مدل‌های از پیش توسعه داده شده موجب بروز پیچیدگی‌هایی در زمینه کدنویسی و زمان‌بر شدن اجرای مدل می‌شود که در این موارد می‌توان از راه‌های میان‌بر استفاده کرد. برای مثال Kock (2008) برای گریز از پیچیدگی‌های برقراری ارتباط بین مدل عامل‌بنیان و مدل مادفلوی سفره آب زیرزمینی، از یک کتابخانه استفاده نمود. برای این منظور، او با اجرای مدل آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی برای تمامی حالات ممکن، ورودی‌ها و خروجی‌های متناظر را در کتابخانه‌ای ذخیره کرد. به این ترتیب، مدل برای به روز رسانی وضعیت آب زیرزمینی در هر گام با جستجوی متغیرهای فعلی سیستم (مقدار برداشت از چاه‌های بهره‌برداری) در کتابخانه، خروجی متناظر (سطح آب زیرزمینی) را یافته و در مدل اصلی استفاده می‌کند. در برخی از مدل‌ها نیز به جای استفاده از مدل‌های از پیش توسعه داده‌شده، روابط حاکم بر بخش اکولوژیکی مستقیماً در مدل وارد می‌شود. این رویکرد در مورد سیستم‌های منابع آب سطحی به دلیل پیچیدگی‌های کم‌تر، متداول‌تر است (Giuliani and Castelletti, 2013). با این حال از این رویکرد در مسأله آب زیرزمینی هم استفاده شده است، بطوریکه Castilla-Rho et al. (2015) برای اجتناب از بروز پیچیدگی در مدل خود، مستقیماً معادلات حاکم بر آب زیرزمینی را در مدل عامل‌بنیان وارد کردند. در هر حال، نوع برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی به امکانات، مدل‌های مورد استفاده و زمان اجرا و پیچیدگی مدل اصلی بستگی دارد. گام‌های زمانی اجرا و به روز رسانی بخش‌های اجتماعی و اکولوژیکی نیز به شرایط و نوع

www.SID.ir

Archive of SID

مسأله بستگی دارند اما به طور کلی از آن جایی که بخش اجتماعی بر اساس بخش اکولوژیکی تصمیم‌گیری کرده و با تصمیمات خود بر آن اثر می‌گذارد لازم است تا بخش اکولوژیکی در گام‌های حداکثر برابر با گام‌های بخش اجتماعی اجرا و به روز رسانی شود. تبعاً این که گام‌های بروزسانی ماهانه، فصلی و یا سالانه باشد به نوع مسأله و مقدار اطلاعات موجود و پیچیدگی مدل بستگی دارد.

بعد مکان در مدل‌های عامل‌بنیان از نظر تغییرات و دقت اهمیت بالایی دارد. تغییرات پارامترهای اجتماعی و اکولوژیکی در بعد مکان به اطلاعات موجود و نوع مسأله بستگی دارد. منظور از تغییرات پارامترهای اجتماعی در بعد مکان، تغییراتی است که در اثر موقعیت مکـــانی عامل‌ها، در ویژگی‌ها و رفتارهای آن‌ها اتفاق می‌افتد. اطلاعات موجود و هدف مدنظر در مدل عامل‌بنیان، تعیین‌کننده ویژگی‌ها و رفتارهای عامل‌هایی است که در موقعیت‌های مختلفی در منطقه مطالعاتی قرار می‌گیرند. برای مثال در مدل Giuliani and Castelletti (2013) کشاورزان بالادست بر اساس نیاز خود تصمیم گرفته در حالی که کشاورزان پایین‌دست آن‌ها بر اساس تصمیمات کشاورزان بالادست در باره کشت محصول و آبیاری آن تصمیم‌گیری می‌کنند. در مقابل، منظور از تغییرات مکانی پارامترهای اکولوژیکی، تغییرات جنس خاک، عمق سطح آب زیرزمینی، حاصلخیزی و... در بعد مکان می‌باشد. مشابه با پارامترهای اجتماعی، تغییرات مکانی پارامترهای اکولوژیکی نیز بسته به اطلاعات موجود و نوع مسأله در نظر گرفته می‌شود. دقت اطلاعات موجود تعیین‌کننده اندازه حداقل سلول‌های اکولوژیکی است. با این وجود نوع مسأله خود تعیین کننده دقت مورد نیاز خواهد بود که بسته به آن می‌توان سلول‌هایی برابر یا بزرگتر از اندازه سلول‌های داده‌های موجود (مانند سلول‌های DEM) برای پارامترهای اکولوژیکی در نظر گرفت.

با وجود تلاش‌های بسیاری که در زمینه کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی این دسته از مدل‌ها انجام گرفته است اما همچنان نیاز به تلاش بیش‌تری می‌باشد. پیچیدگی مدل‌های عامل‌بنیان و تنوع آن‌ها از جهت نوع مسأله موجب می‌شود که نتوان یک نسخه واحد برای این دسته از مدل‌ها نوشت. بلکه لازم است متناسب با اطلاعات در دسترس، روشی مناسب را برای کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی، انتخاب نمود. کالیبراسیون عمدتاً مربوط به بخش اکولوژیکی مانند مدل رشد گیاه، آب سطحی، آب زیرزمینی و... می‌باشد. اما صحت‌سنجی و اعتبارسنجی باید برای مدل عامل‌بنیان توسعه داده شده مورد استفاده قرار گیرد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی به دو صورت کمی و کیفی صورت می‌گیرد. در حالت کمی خروجی‌های مدل با اطلاعات، آمار و عکس‌های ماهواره‌ای مقایسه شده در حالی که در حالت کیفی خروجی‌های مدل با متخصصان و افراد آگاه و حتی محلی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بی شک، بهترین نوع صحت‌سنجی و اعتبارسنجی ترکیبی از روش‌های کمی و کیفی می‌تواند باشد.

در مسائل مربوط به منابع آب، ابعاد مختلفی همچون ابعاد سیاسی، اقتصادی، فرهنگی، قومی و قبیله‌ای و از همه مهم‌تر، ساختار حکمرانی دخالت دارند. با توجه به اهمیت و تأثیرگذاری این ابعاد، لازم است که آن‌ها را در بررسی مسائل منابع آب در نظر گرفت و از قـــابلیـــت‌های مدل‌های عامل‌بنیان بـــرای درک و تحلیل بیش‌تر این ابعاد استفاده نمود. اما در عمل در مقالات موجود تنها به بخشی از این ابعاد، آن هم به صورت اجمالی، پرداخته شده است. لـــذا پیشنـــهاد می‌شود در پژوهش‌های آتـــی، از قابلیت‌های مدل‌های عامل‌بنیان برای وارد نمودن این ابعاد استفاده شود. در این زمینه استفاده از پروتکل ODD[۱۲] (Grimm et al. (2012); Grimm et al. (2006)) که یک پروتکل عمومی برای تعریف و تبیین اجزای مختلف یک مدل عامل‌بنیان است، می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. در این پروتکل به تمامی اجزای قابل تعریف در این نوع از مدل‌ها اشاره شده است که عبارتند از: پیش‌بینی، ظهور رفتارهای جدید، انطباق اهداف، یادگیری، تعاملات، رفتارهای مشارکتی، مشاهدات، دقت مکانی، گام‌های زمانی، ارتباطات بخش‌های مختلف با یکدیگر و ... . لذا با توجه به این که پروتکل ODD به طور جامع به چهار چالش مذکور در این مقاله پرداخته و راهنمای مناسبی برای تعریف اجزا و ابعاد مختلف است، استفاده از آن به عنوان الگویی کارامد برای توسعه مدل‌های عامل‌بنیان توصیه می‌گردد.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله سعی شد تا با بررسی تعدادی از مقالات معتبر و با ارجاعات بالا در زمینه بهره‌برداری از منابع آب برای کشاورزی، چهار چالش پیش رو در زمینه مدل‌سازی عامل‌بنیان مورد بحث و بررسی قرار گیرد: طراحی رفتار عامل‌ها، برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و بخش اکولوژیکی، مکانی کردن مدل و در آخر کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی. در همین راستا، ضمن معرفی چالش‌ها، نحوه برخورد با آن‌ها در مقالات مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- تشکر

بدینوسیله از قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی بابت حمایت مالی قدردانی می‌شود.

پی نوشت‌ها

1- Social-ecological Systems or Socio-ecological Systems
2- Socio-environmental Systems
3- Coupled Human–environment System
4- Agents
5- Relationship
6- Environment
7- Mixed-integer Mathematical Programming
8- Calibration
9- Verification
10- Validation
11- Robustness
12- Overview, Design Concepts, and Details

۷- مراجع

Akhbari M, Grigg NS (2013) A Framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. Water Resources Management 27(11): 4039-4052

Anderies JM, Janssen MA, Ostrom E (2004) A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. Ecology and Society 9(1): 18

Barreteau O, Bousquet F, Millier C, Weber J (2004) Suitability of multi-agent simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. Agricultural Systems 80(3): 255-275

Becu N, Perez P, Walker A, Barreteau O, Le Page C (2003) Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand Description of the CATCHSCAPE model. Ecological Modelling 170(2): 319-331

Berger T (2001) Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. Agricultural Economics 25(2-3): 245-260

Berger T, Birner R, McCarthy N, Díaz J, Wittmer H (2007) Capturing the complexity of water uses and water users within a multi - Agent framework. Water Resources Management 21(1): 129-148

Berglund E (2015) Using agent-based modeling for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management 141(11): 04015025

Castilla-Rho JC, Mariethoz G, Rojas R, Andersen MS, Kelly BFJ (2015) An agent-based platform for simulating complex human–aquifer interactions in managed groundwater systems. Environmental Modelling & Software 73: 305-323

Davidsson P, Holmgren J, Kyhlbäck H, Mengistu D, Persson M (2007) Applications of agent based simulation. Multi-agent-based simulation VII. Antunes L, Takadama K, Springer Berlin Heidelberg. 4442: 15-27

Feuillette S, Bousquet F, Le Goulven P (2003) SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. Environmental Modelling & Software 18(5): 413-427

Filatova T, Polhill JG, van Ewijk S (2016) Regime shifts in coupled socio-environmental systems: Review of modelling challenges and approaches. Environmental Modelling & Software 75: 333-347

Filatova T, Verburg PH, Parker DC, Stannard CA (2013) Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. Environmental Modelling & Software 45: 1-7

Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J (2005) Adaptive governance of social-ecological systems. Annual Review of Environment and Resources 30(1): 441-473

Giuliani M, Castelletti A (2013) Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources systems by agent-based optimization. Water Resources Research 49(7): 3912-3926

Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, Goss-Custard J, Grand T, Heinz SK, Huse G, Huth A, Jepsen JU, Jørgensen C, Mooij WM, Müller B, Pe'er G, Piou C, Railsback SF, Robbins AM, Robbins MM, Rossmanith E, Rüger N, Strand E, Souissi S, Stillman RA, Vabø R, Visser U, DeAngelis DL (2006) A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Ecological Modelling 198(1-2): 115-126

Grimm V, Berger U, DeAngelis DL, Polhill JG, Giske J, Railsback SF (2010) The ODD protocol: A review and first update. Ecological Modelling 221(23): 2760-2768

Hill MC (1998) Methods and guidelines for effective model calibration, US Geological Survey Denver, CO, USA.

Holland JH (2006) Studying complex adaptive systems. Journal of Systems Science and Complexity 19(1): 1-8

Holtz G, Pahl-Wostl C (2012) An agent-based model of groundwater over-exploitation in the Upper

www.SID.ir

Archive of SID

markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop. Water Resources Research 47 (9)

Ostrom E (2007) A diagnostic approach for going beyond panaceas. Proceedings of the National Academy of Sciences 104(39): 15181-15187

Redman CL, Grove JM, Kuby LH (2004) Integrating social science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. Ecosystems 7(2): 161-171

Rieker JD, Labadie JW (2012) An intelligent agent for optimal river-reservoir system management. Water Resources Research 48(9)

Schlüter M, Pahl-Wostl C (2007) Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: An agent-based model of water use in a river basin. Ecology and Society 12(2): 4

Sun Z, Müller D (2013) A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. Environmental Modelling & Software 45: 15-28

Turner II, B. L., P. A. Matson, J. J. McCarthy, R. W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, G. K. Hovelsrud-Broda, J. X. Kasperson, R. E. Kasperson, A. Luers, M. L. Martello, S. Mathiesen, R. Naylor, C. Polsky, A. Pulsipher, A. Schiller, H. Selin and N. Tyler (2003) Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100(14): 8080-8085

van Oel PR, Krol MS, Hoekstra AY (2012) Application of multi-agent simulation to evaluate the influence of reservoir operation strategies on the distribution of water availability in the semi-arid Jaguaribe basin, Brazil. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 47–48: 173-181

van Oel PR, Krol MS, Hoekstra AY, Taddei RR (2010) Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach. Environmental Modelling & Software 25(4): 433-443

Voinov A, Bousquet F (2010) Modelling with stakeholders. Environmental Modelling & Software 25(11): 1268-1281

Wooldridge M. (1997) Agent-based software engineering. In Proc. of IEE- Software Engineering, 144(1), pp.26-37

Guadiana, Spain. Regional Environmental Change 12(1): 95-121

Jennings NR (2000) On agent-based software engineering. Artificial Intelligence, 117, 277-296

Kelly RA, Jakeman AJ, Barreteau O, Borsuk ME, ElSawah S, Hamilton SH, Henriksen HJ, Kuikka S, Maier HR, Rizzoli AE, van Delden H, Voinov AA (2013) Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling and Software 47: 159-181

Kock BE (2008) Agent-based models of socio-hydrological systems for exploring the institutional dynamics of water resources conflict. Massachusetts Institute of Technology. MS thesis. 192p

Kotz C, Hiessl H (2005) Analysis of system innovation in urban water infrastructure systems: An agent-based modelling approach. Water Science and Technology: Water Supply 5(2): 135-144

Le Bars M, Attonaty JM, Pinson S, Ferrand N (2005) An agent-based simulation testing the impact of water allocation on farmers' collective behaviors. Simulation 81(3): 223-235

Levin S, Xepapadeas T, Crépin AS, Norberg J, De Zeeuw A, Folke C, Hughes T, Arrow K, Barrett S, Daily G, Ehrlich P, Kautsky N, Mäler KG, Polasky S, Troell M, Vincent JR, Walker B (2013) Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications. Environment and Development Economics 18(2): 111-132

Liu J, Dietz T, Carpenter SR, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell AN, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z, Provencher W, Redman CL, Schneider SH, Taylor WW (2007) Complexity of coupled human and natural systems. Science 317(5844): 1513-1516

MacAl CM, North MJ (2010) Tutorial on agent-based modelling and simulation. Journal of Simulation 4(3): 151-162

Madani K, Dinar A (2012) Cooperative institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. Water Resources Research 48(9)

Mulligan KB, Brown C, Yang YCE, Ahlfeld DP (2014) Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling. Water Resources Research 50(3): 2257-2274

Ng TL, Eheart JW, Cai X, Braden JB (2011) An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under

www.SID.ir