Archive of SID

اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۷، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص ۴۳۵-۴۲۱

توسعهٔ مدل عامل‌بنیان به منظور شبیه‌سازی رفتار بهره‌برداران بخش کشاورزی در مدیریت آب و اراضی

سیده‌شیما پورعلی‌حسین[۱]، مجید دلاور[۲*]، امینه قربانی[۳]، پیتر فان درزاخ[۴ و ۵]، سعید مرید[۶]، عنایت عباسی[۷]

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. استادیار گروه سیستم‌های مهندسی و خدمات، دانشکدهٔ تکنولوژی، سیاست و مدیریت، دانشگاه تکنولوژی دلفت، دلفت، هلند

۴. استاد گروه مدیریت آب، دانشکدهٔ سیستم‌های یکپارچهٔ آب و حکمرانی، مؤسسهٔ تحقیقات آب یونسکو، دلفت، هلند

۵. استاد گروه مدیریت آب، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تکنولوژی دلفت، دلفت، هلند

۶. استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۷. دانشیار گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۱۲)

چکیده

با توجه به تأثیرات اجتماعی و تفاوت‌های موجود در بخش‌های مختلف سیستم، در نظر نگرفتن ویژگی‌ها و رفتارهای اجتماعی بهره‌برداران و توجه صرف به مدیریت همگن و بالا-پایین، رویکرد موفقی در مدیریت پایدار منابع آب نخواهد بود. مدل‌سازی عامل‌بنیان (Agent-Based Model)، رویکرد تقریباً نوینی است که به دلیل لحاظ کردن این تفاوت‌ها، در زمینهٔ مدیریت منابع آب و اراضی امکانات مفیدی را در تحلیل رفتارهای اجتماعی و مدیریت مؤثر و پایدار منابع ارائه می‌کند. در تحقیق حاضر، سعی شده است تا ویژگی‌های رفتاری و محیطی عوامل تصمیم‌گیرنده در خصوص بهره‌برداری آب در بخش کشاورزی، با ارائهٔ یک چارچوب مفهومی و توسعهٔ مدل عامل‌بنیان شبیه‌سازی شود. به این منظور، برای تدوین مدل مفهومی و فراهم کردن امکان شبیه‌سازی و تحلیل رفتاری عوامل بهره‌بردار (برای تعیین الگوی کشت، روش آبیاری و به تبع آن، میزان آب برداشتی در سه سطح دولت، سازمانی و کشاورزان)، از چارچوب تحلیل و توسعهٔ نهادی MAIA استفاده شده است. بر این اساس، مدل عامل‌بنیان در یک حوضهٔ پایلوت در کشور (حوضهٔ آبخیز حبله‌رود) کدنویسی، صحت‌سنجی، واسنجی و اعتبارسنجی شد. این مدل، در شبیه‌سازی وضعیت حوضه شامل تغییرات جریان آب سطحی، الگو و سطح اراضی زراعی و باغی و برداشت از منابع آب زیرزمینی در دورهٔ تاریخی ۱۹۸۲ـ ۲۰۱۳ عملکرد مناسبی داشته است. درضمن، برای بررسی تأثیر سیاست‌های حفاظتی دستگاه‌های دولتی بر شرایط حوضهٔ آبخیز، سناریوهای دریافت و افزایش آب‌بها در مدل تعریف شده و نتایج بررسی شد (کاهش برداشت آب بین ۸ تا ۳۲ میلیون‌مترمکعب صرفه‌جویی در برداشت آب تحت سناریوهای هزار تا ده‌هزار ریال تعرفهٔ آب‌بها).

کلیدواژگان: تصمیم‌گیری، حوضهٔ آبخیز حبله‌رود، چارچوب MAIA، Agent-Based Model.

* نویسندهٔ مسئول

Email: m.delavar@modares.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

بحران‌های آبی بر اثر فعالیت‌های انسانی و همچنین تغییرات اقلیمی، افزایش یافته و چالش‌های متعددی را در بسیاری از مناطق ایجاد کرده است. از طرفی، تغییر کاربری اراضی و توسعهٔ سطوح زیر کشت و از طرف دیگر، افزایش تقاضا و کاهش دسترسی به آب، منازعات مختلف اجتماعی در بخش کشاورزی (اصلی‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب [۱]) را به دنبال داشته است. بنابراین، مطالعهٔ بخش کشاورزی اهمیت زیاد دارد و تغییر کاربری اراضی و توسعهٔ سطوح کشت که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و محرک‌های اجتماعی- سیاسی و زیست‌محیطی شکل می‌گیرند [۲]، نیازمند توجه ویژه خواهند بود. به طوری که طبق اعلام آژانس برنامهٔ زیست‌محیطی سازمان ملل، توسعهٔ اراضی فاریاب تا سال ۲۰۵۰ میلادی و تحت شرایط ادامهٔ روند فعلی، بیشتر از وسعت تعیین‌شده برای بهره‌برداری ایمن از اراضی خواهد بود [۳].

بنابراین، مدیریت پایدار آب و اراضی، با درک بهتر محرک‌ها و شرایط اقتصادی- اجتماعی و هیدرولوژیکی- اقلیمی، امکان‌پذیر خواهد بود. از طرف دیگر، مشخصات اجتماعی- اقتصادی و سایر پارامترهای مؤثر بر ارتباطات و تصمیم‌گیری ذی‌نفعان، همگن و یا ثابت برای کشاورزان نیست [۴]. بنابراین، مطالعهٔ این مشخصات و تصمیم‌گیری‌ها به صورت توزیعی و بر اساس اطلاعات مکانی، برای محققان و همچنین سیاست‌گذاران اهمیت زیادی دارد. به این منظور، مطالعهٔ چگونگی تصمیم‌گیری عوامل در سطوح تصمیم کوچک‌تر (مانند تصمیم در سطح مزرعه) توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۵].

با توجه به فرض همگنی رفتار عوامل در روش‌های رایج مدل‌سازی متمرکز[1] [۶] مانند برنامه‌ریزی خطی، شبیه‌سازی رفتار تصمیم‌گیرندگان متعدد با ویژگی‌ها و خصوصیات مختلف از این راه مقدور نیست [۲]. بنابراین، در پاسخ به نیاز برای مطالعه و تحلیل تغییرات رفتاری تصمیم‌گیرندگان مختلف و با مشخصات ناهمگن، دیدگاه مدل‌سازی عامل‌بنیان[2] معرفی شده و استفاده می‌شود [۲].

در نظر گرفتن ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، منطقه‌ای و فنی در مدل [۷] و یا سطوح مختلف تصمیم‌گیری [۸] از مزایای مدل‌های عامل‌بنیان است. با توجه به مسائل یادشده، باید دیدگاه‌های بهینه‌سازی که فقط مبتنی بر تئوری اقتصاد خرد هستند، به طور هم‌زمان با سایر دیدگاه‌هایی که مجموعه قوانین تصمیم‌گیری وابسته به مؤلفه‌های رفتاری را در نظر می‌گیرند، تحلیل شوند [۹].

برای مثال، در تحقیقی با در اختیار داشتن مدل بهینه‌ساز مزرعه، انتخاب نوع گیاه، کود و آفت‌کش شبیه‌سازی شده است [۱۰]. در تحقیق دیگری نیز تأثیر تصمیم‌های کشاورزان در مناطق روستایی با به‌کارگیری مدل عامل‌بنیان مطالعه شده است [۱۱]. مدل عامل‌بنیان برای بررسی اثر تغییر اقلیم و تغییرات قیمت با به‌کارگیری راهکارهای سازگاری نیز مطالعه شده است [۱۲]. مدل عامل‌بنیان شبیه‌سازی تصمیم‌گیری دامپروران که در ارتباط با سایر دامپروران در یک شبکهٔ اندرکنش هستند نیز در تحقیق دیگری مطالعه شده است [۱۳].

به‌رغم تنوع و توجه خاص مطالعات جهانی در خصوص طراحی و به‌کارگیری مدل‌های عامل‌بنیان، طیف محدودی از تحقیقات منابع آب در ایران به این رویکرد معطوف شده است. برای مثال، می‌توان به تحقیقات ذیل اشاره کرد: در تحقیقی، یک چارچوب مدل عامل‌بنیان برای مدیریت منابع آب معرفی شده [۶] که منطبق با چارچوب دو تحقیق مشابه دیگر در خارج از کشور است [۱۴ و ۱۵]؛ اما توسعه و چگونگی عملکرد مدل در یک مثال واقعی بررسی نشده است. در تحقیق دیگری نیز با کمک تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر مصرف آب، رفتار مشترکان آبفار استان کرمانشاه در مصارف غیرمجاز آب بر اساس مدل عامل‌بنیان مطالعه شده است [۱۶]. در تحقیق انجام‌شده روی منابع آب زیرزمینی دشت شبستر- صوفیان از طریق مدل‌سازی عامل‌بنیان، تغییر در برداشت آب و درآمد سالانهٔ کشاورزان تحت پنج سناریو ارزیابی شده است [۱۷]. و درنهایت در تحقیقی با تلفیق بهینه‌سازی تخصیص آب و مدل آب زیرزمینی MODFLOW، مقادیر برداشت از آب زیرزمینی در شرایط حاضر با مقادیر بهینه مقایسه شده است [۱۸].

با توجه به محدودیت‌های مطالعات سایر محققان، در مقالهٔ حاضر سعی شده تا رویکرد متفاوت و نوینی اتخاذ شود:

الف) برای مثال، در برخی مدل‌ها، عوامل به صورت گروهی تجمیع و تصمیم‌گیری آنان با فرض همگنی رفتار آنان مطالعه شده که این موضوع می‌تواند به افزایش عدم قطعیت نتایج مدل منجر شود. بنابراین، در تحقیق حاضر با در

1. Central Methods
2. Agent Based Modeling - ABM

www.SID.ir

Archive of SID

نظر گرفتن عوامل در سه سطح کشاورزان (بدون تجمیع)، سطح سازمانی و سطح دولت و مطالعات اجتماعی و تحلیل قوانین موجود، سعی شده تا این مشکل مرتفع شود.

ب) در تعدادی از تحقیقات، بازه‌هایی برای پارامترها و متغیرهای بخش اجتماعی فرض شده است. بنابراین، در تحقیق حاضر نیز پارامترهای اجتماعی بر اساس اطلاعات استخراج‌شده از پرسش‌نامه‌ها وارد مدل شده‌اند.

ج) تعریف برخی مدل‌ها به صورت تک‌هدفه بوده که در تحقیق حاضر این مسئله با تعریف اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی برای کشاورزان مرتفع شده است.

د) در بعضی تحقیقات گذشته، چارچوب ارائه‌شده، بدون روابط ریاضی و توسعه و اجرای مدل در منطقهٔ پایلوت است [۶].

بنابراین،در تحقیق حاضر ضمن ارائهٔ چارچوب شبیه‌سازی تصمیم‌گیری کشاورزان در مورد آب و اراضی و بهره‌مندی از روابط ریاضی پیشنهادشده، ساختار مدل عامل‌بنیان توسعه داده‌شده برای یک منطقهٔ مطالعاتی اجرا شده و عملکرد آن بررسی شود.

مبانی و روش‌ها

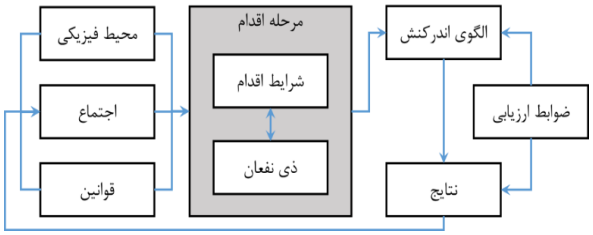
مدل‌های عامل‌بنیان

مدل عامل‌بنیان به عنوان یک روش محاسباتی، محقق را قادر می‌سازد تا مدل‌های متشکل از «عوامل» که در یک محیط در تعامل با یکدیگر هستند را ایجاد، تحلیل و آزمون کند [۱۹]. «عامل» در این مدل‌ها، موجود فیزیکی یا مجازی است که علاوه بر مشخصات فردی، با سایر عوامل تصمیم‌گیرندهٔ دیگر در محیط اندرکنش دارد و با توجه به اهداف تصمیم‌گیری می‌کند [۲۰]. ضمن کاربرد تحقیقاتی مدل‌های چندعاملی، می‌توانند چارچوب حمایتی برای مذاکره و تصمیم‌گیری و ابزار آموزشی کشاورزان باشند [۱۹]. در ادامه، ضمن ارائهٔ چارچوب پیشنهادی، بخش‌های مختلف مدل ارائه می‌شود:

چارچوب مفهومی مدل عامل‌بنیان

برای مدل‌سازی عامل‌بنیان، از مدل مفهومی MAIA[1] [۲۱] استفاده شده است. این رویکرد در واقع چارچوب بهبودیافتهٔ تحلیل و توسعهٔ نهادی[2] [۲۲] و چارچوب اولیه [۲۳] است. این چارچوب ارزیابی شده [۲۴] و مورد توجه محققان زیادی بوده است، به صورتی که بیش از ۵ هزار تحقیق به چارچوب اولیه اشاره کرده و یا آن را اساس کار خود قرار داده‌اند.

جزئیات این چارچوب که در ساختار پیشنهادی [۲۱] نیز از آن بهره گرفته شده، در شکل ۱ ارائه شده است. در محیط فیزیکی، اقدامات گذشته و قوانین اجتماعی موجود، بر جامعه تأثیر گذاشته و ذی‌نفعان بر اساس شرایط فردی و اجتماعی خود و همچنین اطلاعات کسب‌شده از محیط، جامعه و قوانین، دست به عمل می‌زنند. در ادامه، تصمیم‌های ذی‌نفعان، بر اساس ضوابط ارزیابی تعیین‌شده، الگوی ارتباط و تصمیم‌گیری را شکل می‌دهند. این الگو، نتایجی را در محیط فیزیکی، اجتماع و همچنین تغییر یا ثبات قوانین اجتماعی در پی خواهد داشت.



شکل ۱. چارچوب تحلیل و توسعهٔ نهادی [۲۱ و ۲۳]

بر اساس چارچوب یادشده، پنج زیربخش مهم در مدل عامل‌بنیان باید تعیین شود. این پنج زیربخش، شامل: (۱) ساختار اجتماعی[3] (تعریف عوامل و تصمیم‌گیرندگان)، (۲) قواعد رفتاری[4] (ارتباطات اجتماعی تصمیم‌گیران)، (۳) ساختار فیزیکی[5] (بخش‌های فیزیکی و محیط تصمیم‌گیری)، (۴) ساختار عملیاتی[6] (دینامیک مدل) و (۵) ساختار ارزیابی[7] (صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و واسنجی مدل) می‌شود [۲۱]. در ادامه، به‌اختصار، توضیحات مربوط به هر بخش ارائه می‌شود:

ساختار اجتماعی

بر اساس ساختار حکمرانی آب در کشور، پس از تصویب و توزیع قوانین و آیین‌نامه‌ها (اسناد بالادستی)، این دسته مستندات در اختیار عوامل و دستگاه‌های اجرایی، شامل

1. Modelling Agent Systems Based on Institutional Analysis
2. Institutional Analysis and Development Framework – IAD

3. Collective Structure
4. Constitutional Structure
5. Physical Structure
6. Operational Structure
7. Evaluative Structure

www.SID.ir

Archive of SID

سازمان‌ها و نهادهای دولتی که به صورت منطقه‌ای عمل می‌کنند، قرار گرفته است تا توسط کشاورزان و سایر عوامل محلی (مردم) عملی شود. بنابراین، در تحقیق حاضر، با تعریف سه سطح از عوامل تصمیم‌گیرنده، مشخصات و داده‌های مورد نیاز برای تصمیم‌گیری تعیین می‌شود. در تحقیقاتی سایر محققان نیز سطوح مختلف تصمیم‌گیری، هرچند به صورت عامل خارجی در مدل عامل‌بنیان، تعریف شده است [۲۵ـ ۲۸].

قواعد رفتاری

در این ساختار، نقش‌ها، اهداف، روش تصمیم‌گیری، شرایط اولیه و قوانین اجتماعی عوامل تعیین می‌شود [۲۱]. در ارتباطات و اندرکنش‌ها، شبکهٔ اجتماعی کشاورزان تعیین می‌شود که مشخص می‌کند هر عامل کشاورز، با کدام عوامل کشاورزی دیگر در ارتباط است و در تصمیم‌گیری‌های خود، از وی تأثیر می‌پذیرد [۲۹]. برای تعریف شبکهٔ اجتماعی کشاورزان، از مدل Sociometry[1] [۳۰] استفاده شده و ارتباط روستاها، بر اساس پرسش‌نامهٔ طراحی و تکمیل شده، مشخص شد.

سطح کشاورزان، با هدف افزایش سود اقتصادی و اکولوژیکی، در خصوص کشاورزی و نوع آبیاری تصمیم می‌گیرند [۲۸].

ساختار فیزیکی

بر اساس این مدل مفهومی، ساختار فیزیکی، شامل کلیهٔ بخش‌های فیزیکی مدل است و تمامی مواردی که عوامل بر آنها مالکیت دارند (مانند آب و اراضی) را در بر می‌گیرد. محیط تصمیم‌گیری بسته به سطح عوامل، می‌تواند متفاوت باشد [۳۱ و ۳۲]. برای مثال، سطح کشاورزان، روی مزارع خود تصمیم‌گیری می‌کنند که مزارع، خود مشخصاتی همچون مساحت اراضی، مقدار دسترسی به آب، موقعیت مکانی، الگوی کشت، نوع خاک، شیب و... دارند. دیگر محیط تصمیم‌گیری کشاورزان و سایر عوامل، جریان آب و کل حوضهٔ آبخیز است.

ساختار عملیاتی

در بخش دینامیک مدل، قواعد اگر-آن‌گاه و سایر قواعد رفتاری تعریف می‌شوند که نشان‌دهندهٔ شرایط مختلف و چگونگی تصمیم‌گیری عوامل خواهد بود [۳۳].

در تحقیق حاضر، برای سطح دولتی تعیین جهت‌گیری کلی به عنوان فرایند تصمیم‌گیری آن سطح در نظر گرفته شده است [۲۸]. عوامل سطح سازمانی نیز، بر اساس شرایط حاکم و بازخوردهای دریافتی، اولویت استراتژی‌های مختلف مدیریتی را تغییر می‌دهند تا به مدیریت بهتر دست یابند.

در نهایت، عوامل کشاورزان در اندرکنش با یکدیگرند. بر اساس مقالات و مطالعات بررسی‌شده، سه نوع اندرکنش و ارتباط میان عوامل مختلف تعریف شده که شامل رقابت، همکاری و یادگیری می‌شود:

نخستین ارتباط به صورت رقابت تعریف می‌شود که در تحقیق‌های دیگری نیز استفاده شده است [۲۶، ۳۲ و ۳۴]. در این اندرکنش، اگر کشاورز از نظر اهداف خود، در سطح پایین‌تری از همکار خود قرار گرفته باشد، با کشاورز دیگر که شرایط بهتری دارد، رقابت کرده و از وی تقلید می‌کند. اندرکنش دیگر، همکاری است [۷، ۳۵ و ۳۶] و در صورتی که کشاورز قصد تصمیم‌گیری داشته باشد، با کشاورز همکار خود، اطلاعات خود را به اشتراک می‌گذارد و به صورت مشترک تصمیم‌گیری می‌کنند. علاوه بر این، دستهٔ اندرکنش‌ها، فرد کشاورز، خودیادگیری را مد نظر قرار می‌دهد [۲۶، ۳۵ و ۳۶]. به این معنا که تصمیم‌های گذشته خود را لحاظ می‌کند. همچنین، در صورتی که فرد قانونمندی باشد، مجموعه دستورات دولت و سازمان را در تصمیم‌گیری‌های خود در نظر می‌گیرد و در نهایت، بر اساس قیود تعریف‌شده، تصمیم‌گیری نهایی را انجام می‌دهد.

ساختار ارزیابی

در ساختار ارزیابی مدل، صحت‌سنجی مدل بر اساس سه مرحلهٔ بررسی خط‌به‌خط مدل با کمک متخصصان، ارزیابی عملکرد هر واحد (زیرمدل) و اجرای مدل برای تعداد محدودی از عوامل، انجام می‌شود [۳۷]. در ادامه، با ترکیب مجموعه پارامترهای مدل در شرایط مختلف و در تکرارهای زیاد، واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای نزدیک کردن مدل با واقعیت صورت گیرد [۳۶].

طراحی و توسعهٔ مدل عامل‌بنیان پیشنهادی

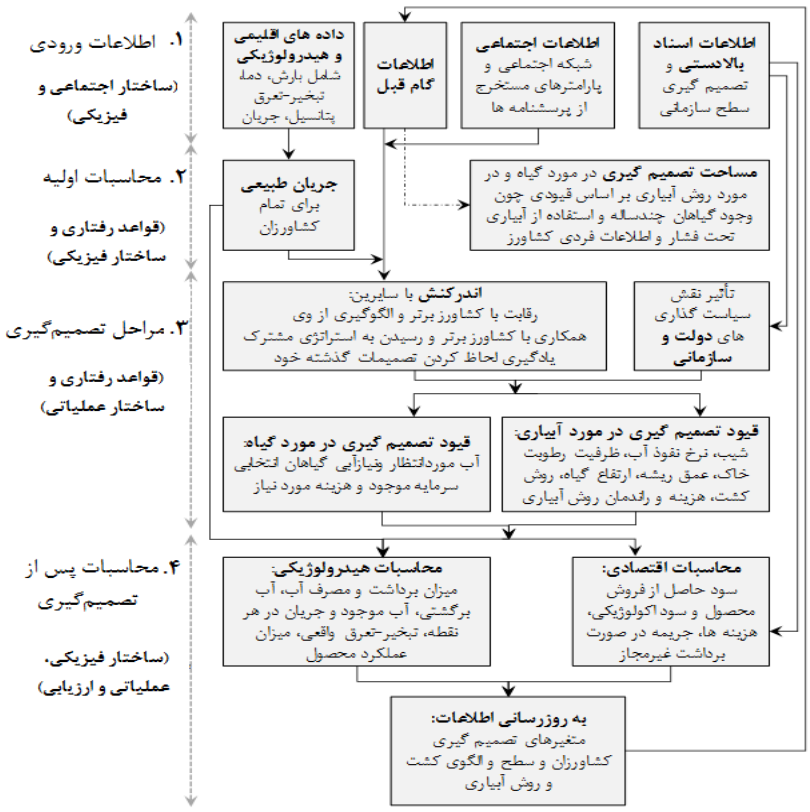
فلوچارت تهیه‌شده برای شبیه‌سازی تصمیم‌گیری عوامل مختلف برای مدیریت آب و اراضی در تحقیق حاضر به صورت شکل ۲ است. در این الگوریتم، چهار بخش: (۱)

۱. مطالعهٔ ارتباطات اجتماعی در یک گروه

www.SID.ir

Archive of SID

اطلاعات ورودی، (۲) محاسبات اولیه، (۳) مراحل تصمیم‌گیری و (۴) محاسبات پس از تصمیم‌گیری تعریف شده است. با توجه به هم‌پوشانی مراحل الگوریتم با چارچوب MAIA، ساختار مربوطه (۱. ساختار اجتماعی، ۲. قواعد رفتاری، ۳. ساختار فیزیکی، ۴. ساختار عملیاتی و ۵. ساختار ارزیابی) در ذیل عنوان هر مرحله در شکل ۲ وارد شده است. در ادامه، توضیحات و روابط ریاضی مربوط به هر بخش ارائه می‌شود.



شکل ۲. مدل مفهومی تصمیم‌گیری ذی‌نفعان در مورد آب و اراضی (توضیحات ذیل هر مرحله: ساختار مربوطه در چارچوب MAIA)

ساختار اجتماعی

در تحقیق حاضر، عوامل در سه سطح کشاورزان (بهره‌برداران آب سطحی و زیرزمینی)، سازمان‌ها و دستگاه‌های محلی و دولت (سیاست‌گذاری‌های کلان) تعریف شده است. البته، به دلیل ساده‌سازی در مدل‌سازی، تأثیر هم‌زمان دولت و سازمان‌های محلی در مدل وارد شده است. به این منظور، بر اساس تحلیل محتوای اسناد بالادستی (شامل قوانین، مصوبات، آیین‌نامه‌ها و اولویت دستگاه‌های محلی) در دورهٔ مشاهداتی و وزن‌دهی نسبی سیاست‌ها، سری زمانی اولویت‌بندی‌ها در مدل وارد می‌شود.

برای عوامل کشاورز نیز پرسش‌نامه‌هایی تنظیم و توزیع شده تا اطلاعات مربوط به ارتباطات اجتماعی و چگونگی تصمیم‌گیری آنان در خصوص آب و اراضی تعیین شود. با توجه به اطلاعات پرسش‌نامه، شبکهٔ اجتماعی کشاورزان (چگونگی ارتباط گروه‌های مختلف کشاورز با یکدیگر و تأثیرگذاری/پذیری آنها) به دست می‌آید (بخش اول الگوریتم شکل ۲).

ساختار قواعد رفتاری

به این منظور، پس از تعریف نقش عوامل در کل شبیه‌سازی‌ها، مشخصات فردی عوامل (شامل اهداف و اولویت آنها در تصمیم‌گیری و چگونگی دخیل کردن تصمیم‌گیری سایرین) بر اساس پرسش‌نامه‌ها استخراج شده و وارد مدل می‌شود. اهداف فردی کشاورزان شامل اهداف اقتصادی- زیست‌محیطی است و برای عوامل مختلف به صورت جداگانه تعریف می‌شود.

ساختار فیزیکی

ساختار فیزیکی در تحقیق حاضر، شامل حوضهٔ آبخیز، مزارع، منابع آب سطحی و زیرزمینی است.

www.SID.ir

Archive of SID

- شبیه‌سازی جریان‌های سطحی:

برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، پس از طبیعی‌سازی جریان رودخانه، مدل هیدرولوژیکی توسعه داده‌شده توسط Savenije در سال ۲۰۰۱ استفاده شد. این مدل با در نظر گرفتن مقدار بارش ماهانه در ماه‌های قبل و تلفات بارش برای محاسبهٔ بارش مؤثر، رابطهٔ رگرسیونی بارش مؤثر ماه حاضر (و ماه‌های گذشته) و جریان طبیعی ماهانه واسنجی می‌شود:

$$R(t) = f\left[P_e(t), P_e(t-1), \ldots, P_e(t-n)\right] \quad (۱)$$

که در آن، $R(t)$ جریان طبیعی ماهانه در ماه t، $P_e(t)$ مقدار بارش مؤثر در ماه t و n تعداد ماه مطالعه‌شده قبل از ماه حاضر است.

- شبیه‌سازی آب زیرزمینی:

برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی و چگونگی تعامل آن با جریان‌های سطحی، از روش استفاده‌شده در مدل هیدرولوژیکی SWAT[1] [۳۸]، استفاده شده است. در این روش، حجم آب زیرزمینی (aq_i) از اختلاف مجموع حجم آب زیرزمینی در گام قبل (aq_{i-1}) و میزان تغذیه (W_{rchrg}) با مجموع جریان آب زیرزمینی به رودخانه (Q_{gw}) و برداشت آب زیرزمینی (W_{pump}) محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۲):

$$aq_i = aq_{i-1} + W_{rchrg} - Q_{gw} - W_{pump} \quad (۲)$$

میزان جریان پایهٔ ناشی از تبادل آب زیرزمینی و سطحی (Q_{gw} جریان آب زیرزمینی به رودخانه (m^3))، بر اساس μ (ضریب ذخیرهٔ ویژهٔ آبخوان) و h_{wtbl} (سطح آب زیرزمینی) بر اساس روابط ۳ و ۴ خواهد بود:

$$Q_{gw} = 800.\mu.\alpha_{gw}.h_{wtbl} \quad (۳)$$

$$h_{wtbl,1} = h_{wtbl,0}.\exp\left[-\alpha_{gw}.\Delta t\right] + \frac{w_{rchrg}.\left(1-exp\left[-\alpha_{gw}.\Delta t\right]\right)}{800.\mu.\alpha_{gw}} \quad (۴)$$

که در آن $h_{wtbl,1}$ سطح آب زیرزمینی در گام زمانی جدید (m)، $h_{wtbl,0}$ سطح آب زیرزمینی در گام زمانی قبل (m)، Δt گام زمانی (روز) و w_{rchrg} تغذیهٔ آبخوان (mm) است.

- شبیه‌سازی عملکرد محصولات:

مقدار عملکرد محصول بر اساس رابطهٔ تغییریافتهٔ سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (فائو) به دست آمده است (رابطهٔ ۵) [۳۹]:

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y\left(1-\frac{AET}{PET}\right) \quad (۵)$$

که در آن، Y_a عملکرد واقعی محصول، Y_{max} پتانسیل عملکرد محصول در آن منطقه، K_y ضریب تغییر عملکرد محصول نسبت به تبخیر-تعرق، AET تبخیر-تعرق واقعی و PET تبخیر-تعرق پتانسیل (بر اساس روش تورنت‌وایت [۴۰]) است.

ساختار عملیاتی (دینامیک مدل)

پیش از ورود به مرحلهٔ تصمیم‌گیری، کشاورزان اطلاعات مربوط به گام قبلی تصمیم‌گیری را در نظر می‌گیرند. به این منظور، مساحت اراضی که در خصوص الگوی کشت در آن گام زمانی تصمیم‌گیری می‌کنند (A_c) را بر اساس وجود گیاهان چندساله در مزارع و مساحت تصمیم در مورد روش آبیاری و یا راندمان کاربرد آب (A_{ir}) را نیز با توجه به تجربیات مدیریت آب در سال گذشته تعیین می‌کنند، زیرا کشاورزان با گیاه چندساله، تمایل کمتری به تغییر الگوی کشت دارند [۴۱].

در روابط ۶ و ۷ (شرط ورود به تصمیم‌گیری در خصوص سطح و الگوی کشت و روش آبیاری)، A کل اراضی کشاورزی مربوط به آن کشاورز است.

$$A_c = \begin{cases} \text{اگر A: مساحت گیاه چندساله}=0 \\ \text{اگر: مساحت گیاه یکساله مساحت گیاه چندساله}\neq 0 \end{cases} \quad (۶)$$

$$A_{ir} = \begin{cases} \text{اگر A: سطح آبیاری تحت فشار}=0 \\ \text{اگر 0: سطح آبیاری تحت فشار}\neq 0 \end{cases} \quad (۷)$$

کشاورزان در صورت ورود به مرحلهٔ تصمیم‌گیری، طی چند اندرکنش (خودیادگیری، رقابت و همکاری)، اولویت‌بندی گیاهان و روش‌های آبیاری را تغییر می‌دهند و درنهایت، بر اساس قیودی تصمیم‌گیری می‌کنند:

خودیادگیری

در این مرحله، کشاورز با رجوع به گذشتهٔ خود، ابتدا الگوی کشت (گیاه/گیاهان) (C) و روش آبیاری که در گذشته سود بیشتری (B) داشته، تعیین می‌کند (روابط ۸ و ۹).

$$C_{Learn} = \left(\{C_i\} | \max(B_i)\right) \quad (۸)$$

$$Ir_{Learn} = \left(Ir_i | \max(B_i)\right) \quad (۹)$$

1. Soil & Water Assessment Tool (ابزار تحلیل خاک و آب)

www.SID.ir

Archive of SID

در ادامه، وزن و یا اولویت معادل گیاهان و روش آبیاری تعیین‌شده از روابط ۸ و ۹ را در مجموعه اولویت‌های فردی خود به‌روز می‌کند (روابط ۱۰ و ۱۱):

$$w_{C,\,update} = \left\{ w_{C1}, w_{C2}, \ldots, w_{C,\,Learn}, \ldots, w_{C\,n} \right\} \quad (۱۰)$$

$$w_{Ir,\,update} = \left\{ w_{Ir1}, w_{Ir2}, \ldots, w_{Ir,\,Learn}, \ldots, w_{Ir\,m} \right\} \quad (۱۱)$$

که در آنها، w_c وزن و یا اولویت معادل گیاهان مختلف، w_{Ir} وزن و یا اولویت معادل روش‌های مختلف آبیاری، m تعداد روش‌های مختلف آبیاری و n تعداد گیاهان در مجموعه گیاهان موجود در حوضه است. برای به‌روز کردن وزن‌های گیاهان و روش‌های آبیاری و در واقع، محاسبهٔ $w_{c,\,Learn}$ و $w_{Ir,\,Learn}$ نیز از روابط ۱۲ و ۱۳ استفاده می‌شود:

$$w_{c,\,Learn} = w_c \left(1 + \alpha_{Learn}\right) \quad (۱۲)$$

$$w_{Ir,\,Learn} = w_{ir} \left(1 + \alpha_{Learn}\right) \quad (۱۳)$$

که در آنها، α_{Learn} ضریب تغییر اولویت در یادگیری است.

رقابت

در این مرحله، باید کشاورز، در شبکهٔ اجتماعی جست‌وجو کند تا کشاورز همکاری که با وی در ارتباط است و شرایط بهتری از او دارد را انتخاب کند. سپس، وزن‌های معادل گیاهان و روش آبیاری انتخابی کشاورز موفق را افزایش می‌دهد (روابط ۱۴ و ۱۵):

$$C_{Comp} = \left(\{C_i\} | \max\left(\frac{B_i}{A_i} \right) \right) \quad (۱۴)$$

$$Ir_{Comp} = \left(Ir_i \, | \max\left(\frac{B_i}{Ai} \right) \right) \quad (۱۵)$$

که در آنها، $\max\left(\frac{B_i}{A_i}\right)$ در واقع نشان‌دهندهٔ کشاورز شمارهٔ i است که سود در واحد سطح وی بالاتر از سایرین در شبکهٔ اجتماعی کشاورز مد نظر است. در ادامه، وزن معادل تعیین‌شده را افزایش می‌دهد. وزن‌های به‌روزشدهٔ رقابت برای گیاهان و روش آبیاری مشابه روابط ۱۰ تا ۱۳ و با جایگزینی α_{Comp} (ضریب تغییر در رقابت) محاسبه می‌شود.

همکاری

شبیه‌سازی قاعدهٔ رفتاری همکاری مطابق با معادلات ۱۵ و ۱۶ انجام می‌شود. بر این اساس، کشاورز با همکار موفق خود وارد مرحلهٔ همکاری می‌شوند و با به اشتراک گذاشتن اطلاعات و اولویت‌بندی‌های خود، به استراتژی انتخابی می‌رسند:

$$C_{Coop} = \left(\{C_i\} | \max\left(w_C, w_C \left(\max\left(\frac{B_i}{A_i} \right) \right) \right) \right) \quad (۱۶)$$

$$Ir_{Coop} = \left(Ir_i | \max\left(w_{Ir}, w_{Ir} \left(\max\left(\frac{B_i}{A_i} \right) \right) \right) \right) \quad (۱۷)$$

که در آنها، $\max\left(w, w\left(\max\left(\frac{B_i}{A_i}\right)\right)\right)$ در واقع، مجموعه گیاهان و روش‌های آبیاری را مشخص می‌کند که از دیدگاه هم کشاورز مد نظر و هم کشاورز همکار، اولویت و وزن بیشتری را داشته باشد. در ادامه، کشاورز وزن معادل این استراتژی‌ها را مشابه روابط ۱۰ تا ۱۳ و با جایگزینی α_{Coop} (ضریب تغییر در همکاری) افزایش می‌دهد.

تأثیر اولویت‌بندی سطوح بالاتر

پس از به‌روزرسانی مجموعه وزن/اولویت‌ها برای کشاورز در سه مرحلهٔ یادگیری، رقابت و همکاری، در صورتی که وی فردی قانونمند باشد (بر اساس نتایج پرسش‌نامه و با توجه به پاسخ کشاورزان به سؤال مربوط به تبعیت کشاورز از سیاست‌های مدیریت آب و اراضی دولت)، اولویت عوامل سطوح بالاتر (سازمانی و دولت) را در تصمیم خود وارد می‌کند. در این مرحله، وزن گیاهان و روش آبیاری منتخب سطوح بالاتر تصمیم، مشابه روابط ۱۰ تا ۱۳ و با جایگزینی $\alpha_{Law\ abiding}$ (ضریب تغییر قانونمندی) به‌روزرسانی می‌شود.

قیود تصمیم‌گیری

در مورد گیاهان، ابتدا آب مورد نیاز ماهانهٔ گیاهان انتخابی، بر اساس نیاز آبی خالص [۴۲] و بازده آبیاری روش آبیاری محاسبه می‌شود. کشاورز با فرض برابری آب موجودِ مورد انتظار برای سال آبی آتی با آب در دسترس سال گذشته، در خصوص سطوح کشت محصولات تصمیم‌گیری می‌کند. در واقع، با توجه به آب مورد نیاز[1] و آب موجود مورد انتظار[2] و بر اساس ویژگی فردی خاطی[3] یا قانونمند[4] بودن و مقدار آستانهٔ[5] تعریف‌شده توسط عوامل سطوح بالاتر به عنوان حداکثر میزان برداشت، مساحت اراضی تحت کشت را تعیین می‌کند.

1. Demand
2. Available water
3. Free Rider
4. Law Abiding
5. Threshold

www.SID.ir

Archive of SID

$$\{A_C\}=\begin{cases}\{A_C\}\text{if : Demand<Available water}\vee\ \text{Free rider farmer}\\ \dfrac{\min(Demand,Threshold)}{Demand}\{A_C\}\text{if : Demand>Available water}\wedge\ \textit{Law abiding farmer}\end{cases} \quad (۱۸)$$

قید دیگر نیز میزان سرمایهٔ موجود وی[1] برای ادامهٔ کار و هزینه‌های لازم در آن گام تصمیم[2] است که در صورت وجود سرمایه، قادر به کشت‌وکار خواهد بود. در ابتدای شبیه‌سازی، مقداری سرمایهٔ اولیه برای تمامی کشاورزان فرض شده است. هزینهٔ حفاظت و نگهداری و همچنین هزینهٔ اولیهٔ اجرای گیاهان و روش‌های آبیاری و همچنین قیمت فروش محصولات نیز به نسبت معقولی برای سال‌های مختلف فرض شده است. بنابراین، بر اساس تصمیم‌گیری کشاورزان، میزان سرمایه آنها به‌روز شده و هزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$\{A_C\}=\begin{cases}\{A_C\}\ \text{if :Costs<Properties}\\ \dfrac{\text{Properties}}{Costs}\{A_C\}\ \text{if :Costs>Properties}\end{cases} \quad (۱۹)$$

ارزیابی شرایط هیدرولوژیکی و اقتصادی

در این گام، بر اساس تصمیم‌گیری کشاورزان، سطوح و الگوی کشت گیاهان و روش‌های آبیاری انتخابی به‌روزرسانی شده و محاسبات برداشت آب، مصرف، آب برگشتی، جریان و سایر متغیرهای هیدرولوژیکی انجام می‌شود. در ادامه، مقدار عملکرد محصولات برای کشاورزان به‌دست‌آمده و بر اساس قیمت فروش محصولات و هزینه‌های هر کشاورز در هر سال، میزان درآمد (سود) او مشخص می‌شود. در نهایت، با محاسبهٔ هزینه و درآمد کل و همچنین، جریان آب به پایین‌دست (به عنوان مؤلفهٔ نشان‌دهندهٔ اهداف زیست‌محیطی)، پارامتری به نام سود کلی (مجموع وزنی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی) تعریف می‌شود.

ساختار ارزیابی

پس از کدنویسی مدل، صحت‌سنجی مدل طبق ارائهٔ نتایج معقول با توجه به روابط تعریف‌شده بر اساس منطق مورد انتظار، صورت می‌گیرد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز پارامترهای مدل بر اساس ارائهٔ نتایج نزدیک به واقعیت، کالیبره می‌شوند. به این منظور، در تحقیق حاضر، متغیرهای برداشت آب زیرزمینی، جریان آب سطحی به پایین‌دست و سطوح اراضی زراعی و باغی برای این منظور استفاده می‌شوند.

منطقهٔ مطالعاتی و داده‌ها

با توجه به کاهش چشمگیر منابع آبی در حوضهٔ آبخیز حبله‌رود واقع در استان تهران، چالش‌های فراوان و تنش‌های اجتماعی جدی برای کلیهٔ بهره‌برداران منابع آبی در این حوضه ایجاد شده است. بنابراین، مسئلهٔ مهم در این حوضه، تأمین نیاز آبی حقابه‌بران و رعایت حقابهٔ استان پایین‌دست (سمنان) است. بنابراین، طی سال‌های اخیر و با توجه ویژه اولویت‌های تحقیقاتی معرفی‌شده توسط وزارت نیرو، محققان متعددی در کشور تحقیقاتی در خصوص حوضهٔ آبخیز حبله‌رود انجام داده‌اند.

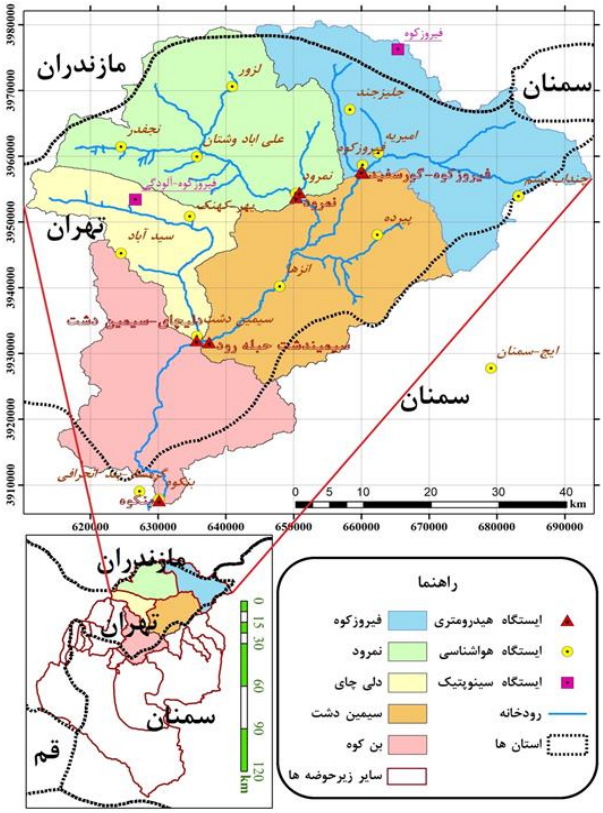
حوضهٔ آبخیز حبله‌رود که از به هم پیوستن رودخانه‌های فیروزکوه، نمرود و دلی‌چای و شاخهٔ اصلی رودخانهٔ حبله‌رود در استان تهران تشکیل شده، وارد دشت وسیع گرمسار در استان سمنان می‌شود و تا کفهٔ نمکی کویر مرکزی ایران ادامه می‌یابد. در واقع، حوضهٔ آبخیز حبله‌رود شمالی (استان تهران) از شمال به مرز استان‌های تهران و مازندران و از شرق و جنوب به مرز استان‌های تهران و سمنان محدود است (شکل ۳).

در تحقیق حاضر، علاوه بر داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی (دما، بارش و جریان)، اطلاعات اقتصادی و اجتماعی مربوطه (شامل اطلاعات عملکرد محصول، قیمت فروش، روابط اجتماعی کشاورزان و...). نقشه‌های کاربری اراضی (سال‌های میلادی ۱۹۸۲، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳) نیز جمع‌آوری شد. برای بخش اجتماعی، در سطح دولت و سازمانی، ضمن مطالعه و تحلیل قوانین و آیین‌نامه‌های تصویب‌شده، نتایج به‌دست‌آمده از مصاحبه با مدیران و کارشناسان بخش آب و کشاورزی استان تهران و شهرستان فیروزکوه، و برای سطح کشاورزان و درک قوانین اجتماعی، پرسش‌نامه‌هایی تنظیم، توزیع و جمع‌آوری شد.

1. Properties
2. Costs

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. منطقهٔ مطالعاتی

نتایج و بحث

توسعه و صحت‌سنجی مدل

بر اساس چارچوب اولیه و روابط ریاضی ارائه‌شده در بخش‌های قبل، مدل عامل‌بنیان در محیط نرم‌افزار NetLogo6.0 کدنویسی و ارتباط آن با لایه‌های GIS برقرار شد. با توجه به قابلیت‌های این نرم‌افزار، لایه‌های حوضهٔ آبخیز، رودخانه و نقاط قرارگیری کشاورزان در حوضه وارد شد. سایر اطلاعات شامل مشخصات کشاورزان، سری زمانی اولویت گیاهان و روش‌های آبیاری توسط سطوح تصمیم بالاتر، شبکهٔ اجتماعی، سطوح و الگوی کشت و روش آبیاری اولیهٔ کشاورزان نیز با استفاده از فایل‌های جدول در این محیط وارد شد. برای نمایش شماتیک شبکهٔ اجتماعی کشاورزان در این شکل، خطوط ارتباطی میان کشاورزان که با نماد آدمک مشخص شده‌اند، ترسیم شده است.

در ادامه، آزمون‌های اولیهٔ صحت‌سنجی مدل، شامل مطالعهٔ گام‌به‌گام مدل و خط به خط آن و بررسی صحت کدنویسی، آزمون بخش به بخش مدل (آزمون هر زیرمدل به صورت جدا)، آزمون برای تعداد محدودی از عوامل و درنهایت، آزمون مقادیر حدی روی مدل بررسی شد. نتایج مربوط به آزمون خط‌به‌خط و بررسی زیرمدل‌ها نشان‌دهندهٔ عملکرد صحیح و مورد انتظار از مدل است.

مدل برای تعداد محدود عوامل نیز اجرا شده و تصمیم‌گیری‌ها بررسی شوند. نتایج مربوط به این بخش نیز منطقی بود. درضمن، نتایج اجرای مدل برای مقادیر حدی (برای مثال، قرار دادن مقدار آب مجاز برداشتی کشاورزان برابر صفر) نیز منطقی بوده و کشاورزان اراضی کشاورزی خود را کاهش می‌دهند و عملکرد محصولات به صفر متمایل می‌شود.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

واسنجی مدل عامل بنیان در دورهٔ ۱۹۸۲ــ ۲۰۰۲ و اعتبارسنجی آن در دوره ۲۰۰۳ـ ۲۰۱۳ بر اساس اطلاعات و داده‌های مشاهداتی در حوضهٔ آبخیز حبله‌رود مربوط به جریان آب سطحی (پنج ایستگاه هیدرومتری فیروزکوه، نمرود، دلی‌چای، سیمین‌دشت و بن‌کوه)، برداشت از منابع آب زیرزمینی (در دو دشت فیروزکوه و گرمسار) و سطوح کشت انجام شد (جدول ۱).

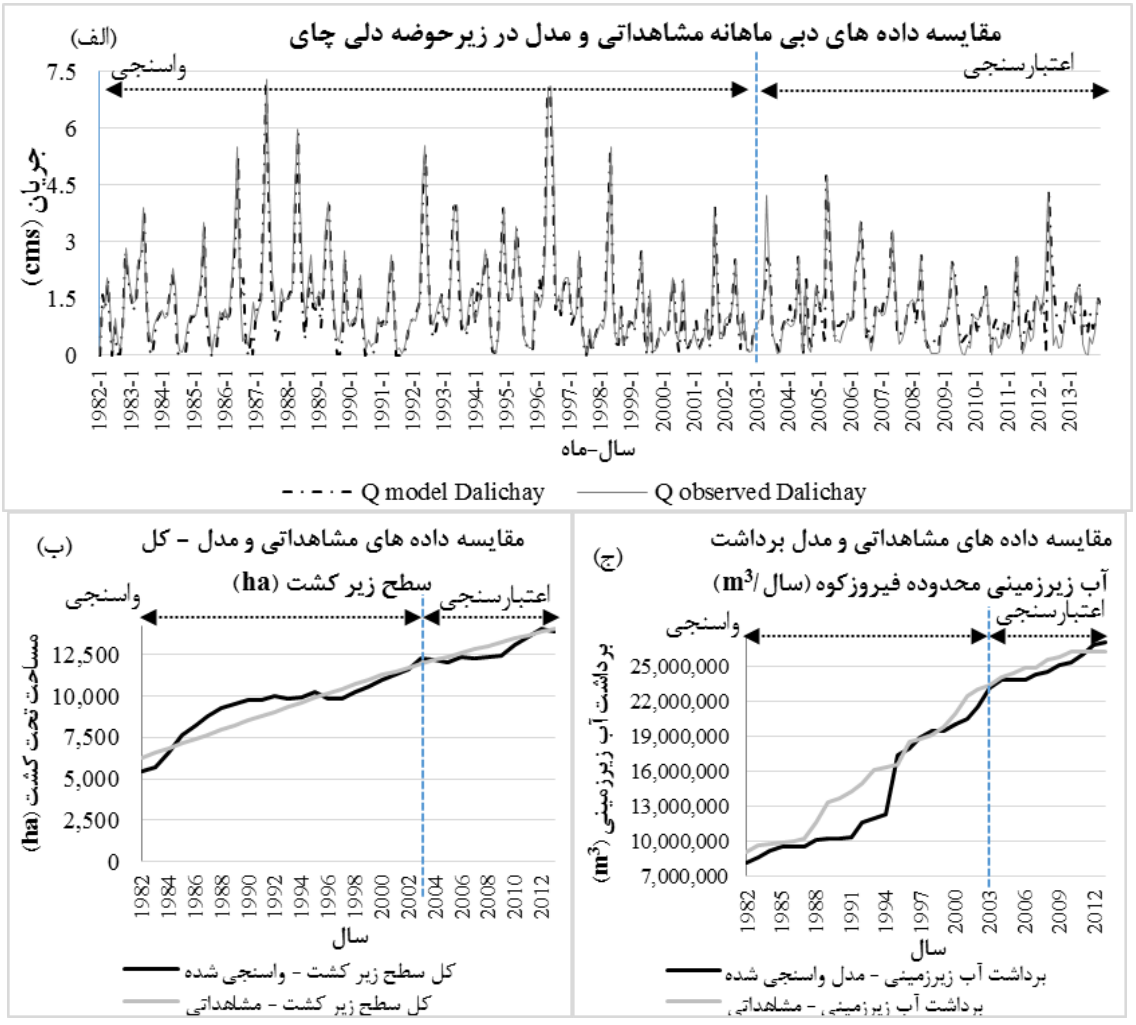
www.SID.ir

Archive of SID

نتایج مربوط به جریان در ایستگاه منتخب (دلی‌چای)، سطوح کل اراضی و برداشت آب زیرزمینی دشت فیروزکوه به صورت شکل ۴ است. بر اساس نتایج، مدل در تخمین متغیرهای وابسته در زیرحوضهٔ دلی‌چای، بهتر از سایر زیرحوضه‌ها عمل کرده و عملکرد آن در برآورد مقادیر متناسب برای سایر زیرحوضه‌ها نیز در حد رضایت‌بخش (متوسط Nash-Sutcliffe و R^2 برابر ۰/۵۹ و ۰/۵۸) بوده است.

جدول ۱. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل در حوضهٔ آبخیز حبله‌رود

متغیر (واحد)	واسنجی (۱۹۸۲ـ ۲۰۰۲)			اعتبارسنجی (۲۰۰۳-۲۰۱۳)		
	R^2	RMSE	Nash-Sutcliffe	R^2	RMSE	Nash-Sutcliffe
جریان (cms)	۰/۶۹	۱/۵۰	۰/۶۶	۰/۶۳	۱/۰۰	۰/۵۸
سطح کل تحت کشت (ha)	۰/۷۲	۶۴۶	۰/۶۵	۰/۸۳	۷۱۳	۰/۶۲
برداشت آب زیرزمینی (سال/m^3 ۱۰۰۰)	۰/۸۶	۱۲۴۳	۰/۷۸	۰/۸۲	۳۷۳	۰/۵۱



شکل ۴. نتایج واسنجی (قبل از خط‌چین) و اعتبارسنجی (بعد از خط‌چین) مدل عامل‌بنیان: (الف) جریان ماهانهٔ ایستگاه دلی‌چای (Q model و Q observed) به‌ترتیب: جریان شبیه‌سازی مدل و جریان مشاهداتی)، (ب) سطوح اراضی تحت کشت و (ج) میزان برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی محدودهٔ فیروزکوه

www.SID.ir

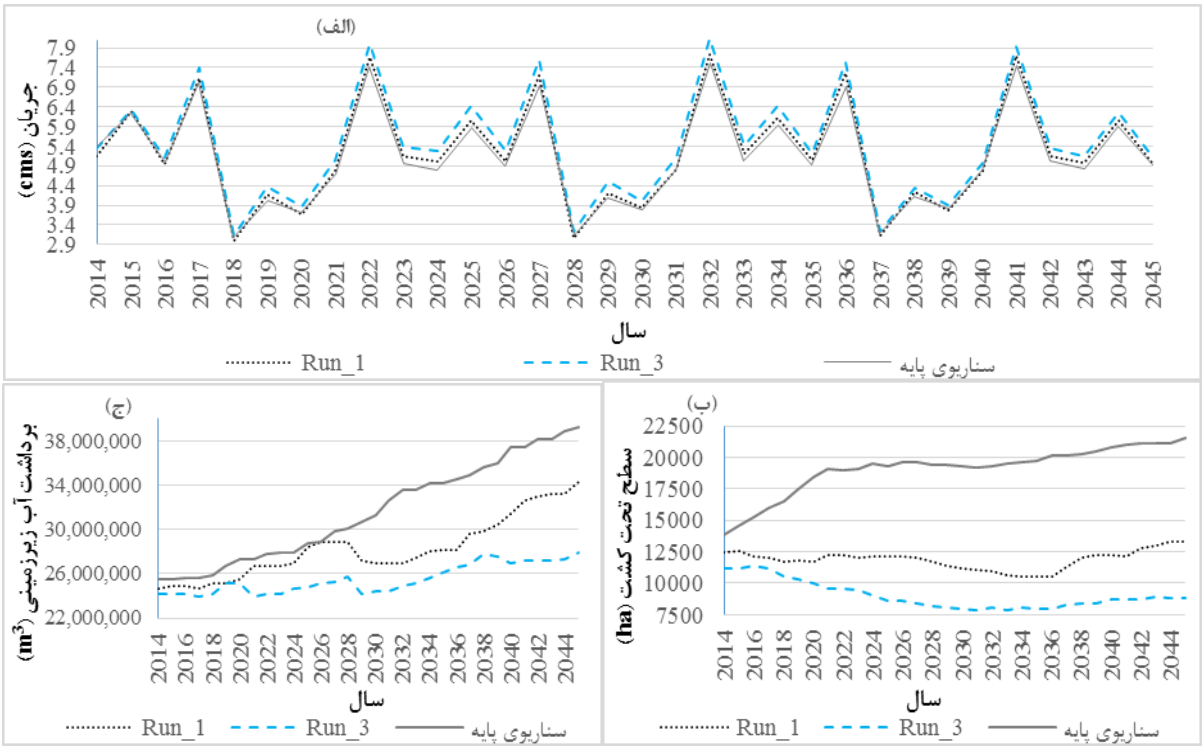
Archive of SID

به طور کلی، مقایسهٔ سری زمانی و بررسی روند تغییرات مقادیر جریان آب سطحی، مساحت اراضی و برداشت آب زیرزمینی نشان‌دهندهٔ کارایی مناسب مدل در ارائه و نمایش روند کلی داده‌هاست.

بررسی اثر دریافت آب‌بها بر رفتار کشاورزان با استفاده از مدل توسعه‌یافته

به منظور بررسی کارایی مدل در سناریوسازی و شبیه‌سازی رفتاری کشاورزان، بر اساس اسنادی همچون قانون تثبیت آب‌بهای زراعی، آیین‌نامهٔ بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی، قانون اصلاح الگوی مصرف آب، افزایش بهره‌وری و تعیین تکلیف چاه‌های بدون پروانه و همچنین سند توسعهٔ منابع آب، سناریویی به منظور بررسی تأثیر سیاست‌گذاری حفاظتی دستگاه‌های دولتی مبنی بر دریافت آب‌بها از بهره‌برداران بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضهٔ آبخیز تعریف شد (مطابق با اسناد). به این منظور، با توجه به دورهٔ ۳۲ ساله مشاهداتی، دورهٔ ۳۲ ساله پس از سال ۲۰۱۳ (۲۰۱۴-۲۰۴۵) مطالعه شد. به این منظور، فرض شده است که اطلاعات اقلیمی-هیدرولوژیکی دههٔ اخیر مشاهداتی، در دورهٔ آتی ادامه یابد. پس از اجرای مدل تحت سناریوی پایه که در واقع اجرای مدل در دورهٔ آتی و بدون تعریف آستانه و قید جدید است، با نتایج مدل تحت سه سناریوی مقدار تعرفهٔ آب‌بها (۱، ۵ و ۱۰ هزار ریال به ازای برداشت یک مترمکعب آب به‌ترتیب: Run1,2,3)، مقایسه شد. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده، تا کنون هیچ قرارداد کشاورزی‌ای با شرکت آب منطقه‌ای که متولی انعقاد قرارداد بهره‌برداری و فروش آب کشاورزی است، منعقد نشده است. بنابراین، تعرفه‌های در نظر گرفته‌شده در این سناریوها، به صورت فرضی لحاظ شده است.

حداکثر و حداقل مقادیر به‌دست‌آمده تحت سناریوهای یادشده (Run1,3) و سناریوی پایه برای تغییرات جریان آب به سمت پایین‌دست در ایستگاه بن‌کوه (خروجی حوضهٔ آبخیز)، سطوح اراضی تحت کشت و مقدار برداشت آب زیرزمینی در دشت فیروزکوه در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۵. (الف) جریان متوسط سالانهٔ سناریوهای حفاظتی و سناریوی پایه در ایستگاه بن‌کوه، (ب) تغییرات سطوح اراضی تحت کشت سناریوهای حفاظتی و سناریوی پایه و (ج) میزان برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی محدودهٔ فیروزکوه تحت سناریوهای حفاظتی و سناریوی پایه (Run1 و Run3 به‌ترتیب تعرفهٔ آب‌بها برابر هزار و ده‌هزار ریال)

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد که کشاورزان ابتدا از سطح اراضی تحت کشت خود کاسته و در ادامه، با توجه به کسب درآمد و توانایی پرداخت آب‌بهای بیشتر، توسعهٔ اراضی را از سر می‌گیرند. البته، افزایش سطوح اراضی در این سناریوها در مقایسه با سناریوی پایه (بدون محدودیت) کمتر است. در واقع، با توجه به نیاز آبی کمتر اراضی تحت سناریوهای یادشده نسبت به سناریوی پایه، جریان آب در رودخانه بیشتر پیش‌بینی شده است.

بر اساس مقایسهٔ صورت‌گرفته سناریوها با سناریوی پایه، کاهش در برداشت از منابع آب سطحی تحت سناریوهای ۱ و ۳، به‌ترتیب ۶ و ۲۷ میلیون مترمکعب و کاهش در برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت این دو سناریو، ۲ و ۵ میلیون مترمکعب (درمجموع، ۸ و ۳۲ میلیون مترمکعب) است.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت اجبار بهره‌برداران آب به پرداخت آب‌بها، با گذشت زمان کشاورزان در انتخاب الگوی کشت اراضی کشاورزی خود، مقدار آب کمتری را برداشت می‌کنند که این امر به صرفه‌جویی در منابع آب و جلوگیری از توسعه اراضی منجر خواهد شد. بنابراین، تشکیل جلسات توجیهی با هدف آموزش کشاورزان و ترویج روش‌های نوین، در رویکرد کشاورزان نسبت به بهره‌برداری از منابع آب تأثیرگذار خواهد بود، چراکه کشاورزان، خواهان حداقل کردن هزینه‌ها و افزایش سود کلی هستند.

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی عامل‌بنیان به عنوان یک روش موفق و تقریباً نوین در زمینهٔ شبیه‌سازی رفتارهای جوامع انسانی در خصوص مدیریت آب و اراضی به شمار می‌رود. این رویکرد قابلیت تحلیل مشکلات به‌وجودآمده در مدیریت منابع آب حوضهٔ آبخیز دارد و از این‌رو می‌تواند در تحلیل رفتارهای اجتماعی ناشی از سیاست‌های مدیریتی نظیر طرح تعادل‌بخشی آبخوان، ممنوعیت کشت محصولاتی همچون برنج و غیره سودمند باشد. در مطالعهٔ حاضر، تلاش شد تا با بررسی مطالعات مختلف در این زمینه، ضمن ارائهٔ چارچوب مناسب برای شبیه‌سازی رفتاری عوامل کشاورزی در حوزه‌های مدیریت آب و زمین، به توسعه و ارزیابی مدل عامل‌بنیان در یک حوضهٔ پایلوت پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعهٔ حاضر به شرح زیر قابل جمع‌بندی است:

- با توجه به اهمیت انتخاب چارچوب مناسب مدل‌سازی [۴۳]، در تحقیق حاضر به منظور لحاظ سطوح مختلف تصمیم‌گیری و ارتباط رفتاری بین عوامل از چارچوب مفهومی MAIA[1] استفاده شد. مدل عامل‌بنیان توسعه‌یافته بر مبنای این چارچوب، شامل بخش‌های هیدرولوژیکی- اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی بوده و با تعریف سطوح عوامل تصمیم‌گیرنده و نقش آنها، چگونگی ارتباط و قوانین و الگوهای اجتماعی در تصمیم‌گیری عوامل تعریف شده است.
- با توجه به حکمرانی آب کشور و با توجه به سلسله‌مراتب عملیاتی کردن سیاست‌های مدیریت آب و زمین، با تعریف سه سطح مدیریتی شامل مدیریت کلان کشوری، مدیریت سازمانی و دستگاه‌های محلی و مدیریت عوامل محلی (مردم) امکان شبیه‌سازی و تحلیل واکنش‌های رفتاری ذی‌نفعان تحت سیاست‌های مختلف مدیریت آب و زمین فراهم شده است.
- با توجه به اهمیت زیاد مطالعات اجتماعی در مدل‌سازی عامل‌بنیان و پرهیز از فرضیات و یا ورود اطلاعات بر اساس تحلیل حساسیت مانند [۱۶]، اطلاعات اولویت‌های فردی در خصوص اهداف اقتصادی- زیست‌محیطی و اندرکنش با سایرین در قالب رقابت، همکاری و یادگیری و ارتباط با سایر کشاورزان از طریق پرسش‌نامه استخراج شد.
- ارزیابی و واسنجی مدل عامل‌بنیان توسعه‌یافته در حوضهٔ آبخیز حبله‌رود و با استفاده از طیف متنوعی از داده‌های مشاهداتی موجود در منطقه شامل داده‌های هیدرومتری، برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی و نقشه‌های کاربری اراضی انجام گرفت. بر این اساس، مدل توسعه‌یافته به‌خوبی روند کاهشی جریان خروجی از حوضهٔ آبخیز، توسعهٔ اراضی، تغییر کاربری اراضی از زراعی به باغی و افزایش میزان برداشت آب سطحی و

1. Modelling Agent systems based on Institutional Analysis

www.SID.ir

Archive of SID

زیرزمینی را با توجه تعامل محیط فیزیکی با ویژگی‌ها و تغییرات رفتاری عوامل شبیه‌سازی کرده است.

- برای بررسی قابلیت مدل در تحلیل تأثیر سیاست‌های بالادستی بر تصمیم‌گیری کشاورزان و چگونگی تغییر شرایط هیدرولوژیکی نیز سناریوهای حفاظتی تعرفه‌های مختلف آب‌بها شبیه‌سازی و ارزیابی شد. این سناریو بر اساس اطلاعات دریافتی در خصوص سیاست‌های اتخاذشده برای اعمال در کشور در نظر گرفته شده است. نتایج اجرای مدل تحت این سناریوها با شرایط پایه (بدون لحاظ محدودیت و شرایط جدید در مدل) مقایسه شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، کاهش در برداشت از منابع آب سطحی تحت سناریوهای هزار و ده‌هزار ریالی، به‌ترتیب ۶ و ۲۷ میلیون مترمکعب و کاهش در برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت این دو سناریو، ۲ و ۵ میلیون مترمکعب (درمجموع، ۸ و ۳۲ میلیون مترمکعب) است. بر این اساس، سیاست حفاظتی دریافت آب‌بها از کشاورزان در این حوضهٔ آبخیز، می‌تواند در حفاظت از منابع آب موفق عمل کند، ولی به منظور عملیاتی کردن آن و همکاری کشاورزان با دستگاه‌های دولتی، باید جلب رضایت و اعتماد بهره‌برداران صورت پذیرد. به این منظور، تشکیل جلسات توجیهی آموزش و ترویج در این خصوص ضروری است.
- به علاوه با توجه به قابلیت چارچوب پیشنهادی و مدل توسعه‌یافته، می‌توان سناریوهای مدیریتی و رفتاری کشاورزان را در منطقه ارزیابی کرد و نتایج سناریوهای سیاستی، مدیریتی و رفتاری مختلف را با یکدیگر مورد مقایسه قرار داد. در تحقیق بعدی محققان، نتایج مربوطه ارائه خواهد شد.

درضمن، با توجه به فرضیات اتخاذشده و محدودیت اطلاعات در دسترس، برای بهبود مدل توسعه داده‌شده پیشنهاد می‌شود:

- بر اساس نتایج تحقیق حاضر و با در اختیار داشتن چارچوب ارائه‌شده، مدل عامل‌بنیان برای سایر حوضه‌های آبریز توسعه داده شده و اعتبارسنجی شود. به این منظور، قابلیت استفاده از محیط‌های مختلف شبیه‌سازی عامل‌بنیان [۴۴] شامل RePast (مانند پژوهش [۴۵])، NetLogo (مانند پژوهش [۴۶])، AnyLogic (مانند پژوهش [۴۷])، StarLogo و... و یا هرگونه محیط کدنویسی دیگر همچون MATLAB (مانند پژوهش [۴۸])، Python (مانند پژوهش [۴۹]) و... برای توسعهٔ مدل وجود دارد.
- با ایجاد ارتباط مستقیم و برخط[1] مدل اجتماعی و هیدرولوژیکی توزیعی، برای استفاده از روابط ریاضی با جزئیات بیشتر، می‌توان تدقیق نتایج و بهبود عملکرد مدل را انتظار داشت.
- از آنجا که در تحقیق حاضر، روابط سیستم هیدرولوژیکی برای آب سطحی و زیرزمینی به صورت جداگانه و در دو زیرمدل تعریف شده، ایجاد ارتباط بهتر و استفاده از روابط دقیق‌تر و یا مدل‌های هیدرولوژیکی با قابلیت زیاد، می‌تواند نتایج مدل را بهبود بخشد.
- برای ارتقای مدل، استفاده از روابط و ساختارهای رفتار اجتماعی که در علوم اجتماعی توسعه داده‌شده نیز پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1].Maes D, Van Passel S. An agent-based model of farmer behaviour to explain the limited adaptability of Flemish agriculture. Environmental Innovation and Societal Transitions. 2017 Mar 1;22:63-77.

[2].Guillem EE, Murray-Rust D, Robinson DT, Barnes A, Rounsevell MD. Modelling farmer decision-making to anticipate tradeoffs between provisioning ecosystem services and biodiversity. Agricultural Systems. 2015 Jul 1;137:12-23.

[3].Bringezu S, Schütz H, Pengue W, O'Brien M, Garcia F, Sims R, et al. Assessing global land use: balancing consumption with sustainable supply. United Nations Environment Programme; 2014.

[4].Daloğlu I, Nassauer JI, Riolo RL, Scavia D. Development of a farmer typology of agricultural conservation behavior in the American Corn Belt. Agricultural Systems. 2014 Jul 1;129:93-102.

1. Online

www.SID.ir

Archive of SID

[5].Kremmydas D, Athanasiadis IN, Rozakis S. A review of agent based modeling for agricultural policy evaluation. Agricultural systems. 2018 Jul 1;164:95-106.

[6].Qalehban Tokmehdash M, Taheri Tizro A, Zare Abyaneh H. Agent-Based models in simulating the stakeholders' behavior in water resources management. Water and Sustainable Development. 2015;2(1): 87-94. [Persian]

[7].Akhbari M, Grigg NS. A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. Water resources management. 2013 Sep 1;27(11):4039-52.

[8].Berglund EZ. Using agent-based modeling for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management. 2015 May 12;141(11):04015025.

[9].Marvuglia A, Rege S, Gutierrez TN, Vanni L, Stilmant D, Benetto E. A return on experience from the application of agent-based simulations coupled with life cycle assessment to model agricultural processes. Journal of cleaner production. 2017 Jan 20;142:1539-51.

[10]. Malawska A, Topping CJ. Evaluating the role of behavioral factors and practical constraints in the performance of an agent-based model of farmer decision making. Agricultural Systems. 2016 Mar 1;143:136-46.

[11]. Valbuena D, Verburg PH, Veldkamp A, Bregt AK, Ligtenberg A. Effects of farmers' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: An agent-based approach. Landscape and Urban Planning. 2010 Aug 30;97(2):98-110.

[12]. Wossen T, Berger T, Haile MG, Troost C. Impacts of climate variability and food price volatility on household income and food security of farm households in East and West Africa. Agricultural systems. 2018 Jun 1;163:7-15.

[13]. Zheng C, Liu Y, Bluemling B, Chen J, Mol AP. Modeling the environmental behavior and performance of livestock farmers in China: An ABM approach. Agricultural systems. 2013 Nov 1;122:60-72.

[14]. Murray-Rust D, Robinson DT, Guillem E, Karali E, Rounsevell M. An open framework for agent based modelling of agricultural land use change. Environmental modelling & software. 2014 Nov 1;61:19-38.

[15]. Akhbari M, Grigg NS. Managing water resources conflicts: modelling behavior in a decision tool. Water resources management. 2015 Nov 1;29(14):5201-16.

[16]. Sobhani AA. Simulating the behavior of users in water application using an Agent-Based Model. New Researches in Management and Accounting. 2017;21:49-56. [Persian]

[17]. Anbari MJ, Zarghami MZ. An Agent-Based Model to improve groundwater resources conditions with a participatory approach in the Shabestar-Sofian Plain, Iran. Iran-Water Resources Research. 2019;15(2):73-87. [Persian]

[18]. Najjar Ghabel S, Zarghami MZ, Akhbari M, Nadiri A. Groundwater management in Ardabil Plain using Agent-Based Modeling. Iran-Water Resources Research. 2019;15(3):1-16. [Persian]

[19]. Gilbert N. Agent-based models. Sage; 2008.

[20]. Ferber J, Weiss G. Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence. Reading: Addison-Wesley; 1999 Feb 25.

[21]. Ghorbani A, Bots P, Dignum V, Dijkema G. MAIA: a framework for developing agent-based social simulations. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2013 Mar 31;16(2):9.

[22]. Ostrom E. Understanding institutional diversity Princeton University press. New Jersey. 2005:393-432.

[23]. Ostrom E, Gardner R, Walker J, Walker J. Rules, games, and common-pool resources. University of Michigan Press; 1994.

[24]. Ostrom E. A diagnostic approach for going beyond panaceas. Proceedings of the national Academy of sciences. 2007 Sep 25;104(39):15181-7.

[25]. Castella JC, Trung NH, Boissau S. Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system. Ecology and Society. 2005;10(1):1-32.

[26]. Mialhe F, Becu N, Gunnell Y. An agent-based model for analyzing land use dynamics in response to farmer behaviour and environmental change in the Pampanga delta (Philippines). Agriculture, ecosystems & environment. 2012 Oct 15;161:55-69.

[27]. Valbuena D, Bregt AK, McAlpine C, Verburg PH, Seabrook L. An agent-based approach to explore the effect of voluntary mechanisms on land use change: A case in rural Queensland, Australia. Journal of environmental management. 2010 Dec 1;91(12):2615-25.

[28]. Zhang H, Zeng Y, Jin X, Shu B, Zhou Y, Yang X. Simulating multi-objective land use

www.SID.ir

Archive of SID

optimization allocation using Multi-agent system—A case study in Changsha, China. Ecological modelling. 2016 Jan 24;320:334-47.

[29]. Bellaubi F, Pahl-Wostl C. Corruption risks, management practices, and performance in water service delivery in Kenya and Ghana: an agent-based model. Ecology and Society. 2017 Apr 18;22(2).

[30]. Moreno JL. Sociometry, experimental method and the science of society.

[31]. An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. Ecological Modelling. 2012 Mar 24;229:25-36.

[32]. Mena CF, Walsh SJ, Frizzelle BG, Xiaozheng Y, Malanson GP. Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent-based model. Applied Geography. 2011 Jan 1;31(1):210-22.

[33]. Ali AM, Shafiee ME, Berglund EZ. Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages. Sustainable Cities and Society. 2017 Jan 1;28:420-34.

[34]. Ciampolini A, Lamma E, Mello P, Toni F, Torroni P. Cooperation and competition in ALIAS: a logic framework for agents that negotiate. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2003 Jan 1;37(1-2):65-91.

[35]. Janssen M, Ostrom E. Empirically based, agent-based models. Ecology and society. 2006 Dec 18;11(2).

[36]. Sun Z, Müller D. A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. Environmental modelling & software. 2013 Jul 1;45:15-28.

[37]. Bert FE, Podestá GP, Rovere SL, Menéndez ÁN, North M, Tatara E, et al. An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the argentine pampas. Ecological Modelling. 2011 Oct 10;222(19):3486-99.

[38]. Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute; 2011.

[39]. Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water. Rome: fao; 2012.

[40]. Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review. 1948 Jan 1;38(1):55-94.

[41]. Kim I, Poppenborg P, Park SJ, Koellner T. Simulation of agricultural land-use changes and ecosystem services in a mountainous agricultural region using an agent-based model (ABM). Development of integrated modeling framework of land use changes and ecosystem services in mountainous watersheds. 2017 Mar 29:109.

[42]. Iran Meteorological Organization, Ministry of Agriculture-Jihad. National Water Document of Iran; Net irrigation water demand for arable farming and fruit trees in Iran; 1999. [Persian]

[43]. Vakili Fard HR, Khoshnoud M, Foroughnezhad H, Osoulian M. Agent-Based Modeling in financial markets. Investigation Science. 2014;12:139-158. [Persian]

[44]. Crooks AT, Castle CJ. The integration of agent-based modelling and geographical information for geospatial simulation. InAgent-based models of geographical systems 2012 (pp. 219-251). Springer, Dordrecht.

[45]. Mena CF, Walsh SJ, Frizzelle BG, Xiaozheng Y, Malanson GP. Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent-based model. Applied Geography. 2011 Jan 1;31(1):210-22.

[46]. Valbuena D, Verburg PH, Bregt AK, Ligtenberg A. An agent-based approach to model land-use change at a regional scale. Landscape ecology. 2010 Feb 1;25(2):185-99.

[47]. Swinerd C, McNaught KR. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. Simulation Modelling Practice and Theory. 2012 Jun 1;25:118-33.

[48]. Yu Q, Wu W, Chen Y, Yang P, Meng C, Zhou Q, et al. Model application of an agent-based model for simulating crop pattern dynamics at regional scale based on MATLAB. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2014 Jan 1;30(12):105-14.

[49]. Ligmann-Zielinska A. Spatially-explicit sensitivity analysis of an agent-based model of land use change. International Journal of Geographical Information Science. 2013 Sep 1;27(9):1764-81.

www.SID.ir