تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۹
Volume 16, No. 3, Fall 2020 (IR-WRR)
۳۶۵-۳۷۵

توسعه یک مدل عامل‌بنیان برای بررسی سیاست مدیریتی اعمال جریمه در سامانه کشاورزی- آبخوان

علیرضا نوری[۱]، بهرام ثقفیان[۲*]، مجید دلاور[۳] و محمدرضا بازرگان-لاری[۴]

چکیده

یکی از عواملی که پایداری منابع زیرزمینی کشور را تهدید می‌کند، برداشت غیرمجاز از آبخوان‌ها است که به‌طور عمده توسط کشاورزان انجام می‌پذیرد. یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده وضع سیاست جریمه توسط مراجع ذی‌صلاح است. از آنجا که کشاورزان تحت شرایط خاص اجتماعی، اقتصادی و کشاورزی منطقه اقدام به‌اضافه برداشت می‌نمایند، سنجش بازخورد الگوهای جریمه بر پایه یک شبیه‌سازی اجتماعی- اقتصادی الزامی است. این تحقیق با ارائه یک چارچوب عامل‌بنیان به بررسی وضعیت سه عامل کشاورزی، زیست‌محیطی و تنظیم‌کننده در محیط کشاورزی پرداخته است. در این تحقیق رفتار بخش کشاورزی در دو لایه یکی کشاورزان به عنوان زیرعامل‌های کشاورزی در راستای بیشینه‌کردن سود فردی تحت قیود فیزیکی و رفتاری که به کمک سیستم استنتاج فازی و برنامه‌ریزی ریاضی شبیه‌سازی‌شده و دیگری شبکه اجتماعی کشاورزان به عنوان گروه عامل‌های کشاورزی در راستای بیشینه نمودن سودبخش کشاورزی تحت قیود مطلوبیت‌های فردی با تلفیق الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و روش شمارش بردا، مدل‌سازی شده است. چارچوب ارائه‌شده در واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد اصفهان به کار رفت. نتایج نشان داد که سطح آبنمود واحد آبخوان در حالتی که جریمه ۲، ۳ و ۴ هزار ریالی به ازای هر متر مکعب اضافه برداشت توسط عامل تنظیم‌کننده وضع شد، به ترتیب ۲۱/۸۲، ۱۷/۱۸ و ۱۰/۵۴ متر از حالتی که به کشاورزان اجازه اضافه برداشت داده نشده بود پایین‌تر قرار گرفت.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عامل‌بنیان، سیستم استنتاج فازی، اعمال الگوی جریمه، اضافه برداشت، روش شمارش بردا.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۲۱

۱- دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۳- استادیار گروه منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ایران.
۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Developing an Agent-Based Model for Reviewing the Management Policy of Imposing Penalty in an Agricultural-Aquifer System

A. Nouri[1], B. Saghafian[2] , M. Delavar[3], and M.R. Bazargan-Lari[4]*

Abstract

Illegal and over exploiting the aquifer is among factors which threaten the country's groundwater stability. One way to deal with this phenomenon is to impose a fine policy by the competent authorities. Since farmers' over-exploitation is under specific socio-economic and agricultural conditions, evaluation of the effects of penalty patterns based on a socio-economic simulation is required. This research has provided an agent based simulation framework to study the status of three agricultural, environmental and regulator agent in agricultural environment. In this research, agricultural sector behavior has been modeled in two layers, one is the agricultural sub-factors in order to maximize individual profit under physical and behavioral constraints by using fuzzy inference system and mathematical programming, and the other is the group-agricultural agents in order to maximize agricultural profitability under the constraints of individual preferences by combining non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) and social chose method. The proposed framework was applied to the Najafabad hydrological unit in Isfahan. The results showed that the level of aquifer unit hydrograph was respectively 21.82, 17.18 and 10.5 lower than no-penalty condition while penalties of 2, 3, and 4 thousand Rials per cubic meter were imposed by regulator agent.

Keywords: Agent Based Modeling, Fuzzy Inference System, Imposing Penalty Pattern, Over-Exploitation, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II, Borda Count Method.

Received: April 2, 2020
Accepted: December 11, 2020

1- Ph.D. Graduate of Civil Engineering, Department Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: b.saghafian@gmail.com
3- Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

در زمان حاضر به دلایل مختلف از جمله خشکسالی و اضافه برداشت مصرف‌کنندگان آب زیرزمینی، سفره‌های آب زیرزمینی با بیلان‌های بزرگ منفی مواجه هستند. یکی از راهکارهای مقابله با اضافه برداشت از سفره‌های زیرزمینی، وضع جریمه در قبال تخطی از مجوز مصرف‌کنندگان است. از سوی دیگر منابع آب زیرزمینی ایران تحت اضافه برداشت مصرف‌کنندگان به‌ویژه کشاورزان قرار دارد در حالی که در قانون توزیع عادلانه آب بر سیاست جریمه تصریح شده است. محققان مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی وضعیت کشاورزان در هنگام تغییر در منابع و محدودیت‌ها پیشنهاد داده‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی سامانه‌ی کشاورزی بر پایه‌ی شبیه‌سازی عامل‌بنیان (ABS)[1] اشاره نمود که ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی آن‌ها است (Voinov and Bousquet, 2010; Levin et al., 2013).

در یک سامانه‌ی عامل‌بنیان، بخش‌های مستقل به صورت عامل‌هایی با تصمیم و رفتار مستقل به دنبال اهداف خاص در نظر گرفته شده و مورد پردازش قرار می‌گیرند (Ng et al., 2011). به‌عبارت‌دیگر یک عامل در سامانه عامل‌بنیان: ۱) موجود فیزیکی یا غیر فیزیکی است که از محیط پیرامون خود تأثیر می‌پذیرد و می‌تواند بر آن تأثیر بگذارد؛ ۲) با سایر عامل‌ها اندرکنش دارد؛ ۳) بر اساس تمایلات خود سعی در بهینه نمودن مطلوبیت‌های خود دارد؛ ۴) دارای منابع مخصوص خود است؛ ۵) قادر به ادراک و اقدام نسبت به محیط پیرامون خود هستند؛ ۶) قدرت و امکان پیشنهاد دارد؛ ۷) امکان تکثیر از خود را دارد؛ ۸) عامل‌ها بر اساس ادراک، منابع و توانایی‌های خود برای بهینه نمودن اهداف خود رفتار می‌نمایند (Ferber, 1999). بنابراین در یک سامانه‌ی آبی، افراد، گروه‌های مصرف‌کننده و آلاینده منابع آب، اجزا زیرساختی نظیر سدها، شهرها و یا حتی تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران می‌توانند به‌عنوان عامل درنظر گرفته شوند (Nikolic and Simonovic, 2013).

یک مدل بر پایه ABS با درنظر گرفتن اندرکنش محیط و عامل‌های موجود در آن و همچنین اندرکنش عامل‌ها با یکدیگر با توجه به قواعد رفتاری آن‌ها سعی در شبیه‌سازی طبیعت اصلی سامانه به‌صورت روابط ریاضی دارد. این رویکرد باعث افزایش استفاده از این نوع مدل‌سازی در سامانه‌های پیچیده منابع آب در سال‌های اخیر شده است (Berglund, 2015). محققان از ABS در موضوعات متنوعی بهره برده‌اند (Nouri et al., 2019) که علت این را می‌توان در بیان تفسیر طبیعی‌تر و شفاف‌تر از سیستم شبیه‌سازی شده (Galán et al., 2009) تمرکز این مدل بر روابط محلی بین تصمیم‌گیرندگان (Gunkel, 2005) درنظر گرفتن سطوح مختلف در تصمیم‌گیری (Berglund, 2015) و امکان درنظر گرفتن ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، منطقه‌ای و فنی در مدل (Akhbari and Grigg, 2013) یافت.

بنابر آنچه گفته‌شد، یک عامل در ABS قدرت درک دارد و بر اساس ادراک خود رفتار می‌نماید. بنابراین مدنظر قرار دادن ادراک عامل‌ها در ABS در صورتی‌که عامل‌ها دارای سطوح ادراک تفاوت باشند، ضروری خواهد بود (Wolf, 2008). Akhbari and Grigg (2015) سطوح ادراک عامل‌ها را به چهار بخش: فیزیکی، احساسی، عقلانی و معنوی تقسیم نمود. به‌عنوان مثال یک مقدار آب ازنظر موجودیت آن یک ادراک فیزیکی است؛ اما فرد تشنه نسبت به آن ادراک احساسی دارد. این در صورتی است که اگر عامل به نیاز انسان و واکنش‌های آن در بدن انسان توجه کند، آب را به‌صورت عقلانی درک کرده و اگر آب را به‌صورت یک موهبت آسمانی در نظر گیرد به‌صورت معنوی ادراک نموده است (Wolf, 2008). ادراکات فیزیکی و عقلانی ریشه‌های منطقی دارند ولی ادراک معنوی دارای ریشه‌های عاطفی است. ادراک احساسی که مبتنی بر ارزش‌ها هستند ریشه‌های احساسی دارند اما ممکن است در ادراکات منطقی نیز ریشه داشته باشد. در طی روند حل‌وفصل یک مناقشه‌ی آبی، درک دنیای ادراک عامل‌ها زمانی که طرفین مناقشه دارای ادراکات متفاوتی نسبت به آب هستند معنی‌دار می‌گردد. برای مثال سامانه‌ای را درنظر گیرید که یک عامل ادراک احساسی و عامل دیگر ادراک عقلانی نسبت به آب داشته باشد. در این مناقشه عاملی که دارای ادراک عقلانی است احتمال بیشتری دارد که برای حل مناقشه از طریق مذاکره، مشوق‌ها و غیره روی آورد اما این احتمال برای عامل‌هایی که ادراکشان ریشه در احساساتشان دارد کمتر است و انتظار می‌رود تقاضای خود را روز به روز بیشترتر نمایند (Akhbari and Grigg, 2015).

تحقیقات مختلفی بر اساس ABS به‌منظور شبیه‌سازی سامانه‌های آب زیرزمینی- کشاورزی توسعه‌یافته است که از آن میان می‌توان به تحقیق Farhadi et al. (2016) اشاره نمود. آنها به کمک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب[2] (NSGA-II)، رویه نامغلوب را برای سه هدف کاهش کسری آب کشاورزی، افزایش عدالت در تخصیص و کاهش آلودگی آب زیرزمینی به ترتیب برای مطلوبیت کشاورزان، بخش اجرایی دولت و مؤسسات حفاظت از محیط‌زیست، برآورد و به کمک تئوری چانه‌زنی نش[3] (NBT) گزینه مطلوب از میان گزینه‌های نامغلوب انتخاب نمودند. در تحقیق یادشده اندرکنش بین عامل‌های موجود در تحقیق خود را به کمک مدل (Akhbari and Grigg, 2013) شبیه‌سازی شد. تحقیق دیگری که توسط (Ghazali et al.,

2018) انجام شد در یک سامانه آب کشاورزی به کمک مدل تاپسیس[۴] (TOPSIS) بر اساس متغیرهای جمعیتی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی، ضرایب مربوط به مدل بر پایه ABS خود را کالیبره و آب موردنیاز کشاورزان را بر پایه الگوی کشت منطقه در شرایط اقلیمی مختلف تعیین شد.

در تحقیق دیگری، Mulligan et al. (2014) یک MAB به منظور ارزیابی وضعیت مالیات بر برداشت عامل‌های کشاورزی بر بستر یک بهینه‌سازی غیرمتمرکز با تابع هدف بیشینه نمودن سود خالص و قیود فنی توسعه دادند. ایشان با لینک مدل یک مدل بهینه‌سازی غیرمتمرکز با تابع هدف بیشینه نمودن سود خالص و قیود فنی (به عنوان مدل پیش‌بینی رفتار کشاورزان) و مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی خود (به عنوان بخش اکولوژی)، وضعیت برداشت‌ها از آبخوان منطقه را در دوره ۵۰ ساله با مقادیر مختلف مالیات بررسی نمودند. با این وجود MAB ایشان فقط برای یک سال اجرا و نتایج آن عیناً برای دوره ۵۰ ساله در نظر گرفته شد و پویایی رفتار عامل‌های کشاورزی موجود در سیستم در دوره اجرای مدل در نظر گرفته نشد.

Nouri et al. (2019) با توسعه یک مدل عامل‌بنیان برپایه یک مدل برنامه‌ریزی خطی[۵] (LP) با هدف بیشینه کردن درآمد هر کشاورز به شبیه‌سازی سیستم هیدروژئولوژیکی- کشاورزی- اقتصادی مبادرت نمودند. در این تحقیق دو فاکتور یادگیری عامل‌ها از یکدیگر و خودیادگیری هر عامل از بازخورد رفتار خود، توسط قیودی بر پایه سیستم استنتاج فازی[۶] (FIS) مورد بررسی قرار گرفت. در مقابل، رفتار عامل دولت نیز با وضع چند سیاست از جمله احیاء و تعادل بخشی آبخوان، حذف کشت برنج و تغییر در سیستم بهره‌بری آب شبیه‌سازی شد. ایشان کارایی چارچوب ارائه شده خود را به کمک داده‌های واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد بر اساس سه سناریوی هیدرولوژیکی تر، نرمال و خشک سالی و مورد بررسی قرار دادند. ولی علیرغم یافته‌های مؤثر در مورد اضافه برداشت صورت گرفته توسط زیرعامل‌های کشاورزی سخنی به میان نیامد.

تحقیق حاضر کوشیده است تا با ارائه یک چارچوب بر اساس ABS به بررسی رفتار اجتماعی- اقتصادی کشاورزان نسبت به اضافه برداشت آب زیرزمینی تحت سناریوهایی بر اساس سیاست جریمه بپردازد. در ایـــن راستا چارچوب ارائه‌شده بـــر پایه مـــدل ارائه شده توسط Nouri et al. (2019) با بهره‌گیری از FIS و LP به شبیه‌سازی قواعد رفتاری کشاورزان در تعیین الگوی کشت می‌پردازد و با تلفیق NSGA-II و روش شمارش بردا[۷] (BCM)، رفتار کشاورزان نسبت به مقدار اضافه برداشت از مجوز خود را شبیه‌سازی می‌نماید.

۲- توسعه مدل عامل‌بنیان

هدف از این مقاله توسعه یک چارچوب بر پایه ABS است که رفتار کشاورزان در اضافه برداشت آب زیرزمینی شبیه‌سازی شود و حساسیت مقدار تولیدات منطقه، سود کشاورزان و سطح آبخوان نسبت به مقدار جریمه وضع شده برای اضافه برداشت برآورد گردد.

بنابر آنچه گفته شد مدل مفهومی ارائه شده در شکل ۱ به‌منظور روشن شدن رابطه بین عامل‌ها و محیط دربرگیرنده آن‌ها معرفی می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۱ قابل‌مشاهده است، عامل‌های کشاورزی در دو سطح کشاورزان به عنوان زیر عامل‌های کشاورزی و شبکه اجتماعی کشاورزان به عنوان گروه عامل‌های کشاورزی، عامل تنظیم‌کننده و عامل محیط‌زیست را به‌عنوان سه عامل اصلی موجود در محیط سامانه قابل فرض است. هر عاملی دارای توصیفات و قواعد رفتاری مخصوص به خود است. از جمله توصیفات عامل تنظیم‌کننده می‌توان به قدرت اجرایی آن، زیرعامل کشاورزان با توصیفات موقعیت جغرافیایی، نوع محصول و شاخص‌های مربوط به آن، گروه عامل کشاورزی با توصیفات قدرت هماهنگ‌سازی و ایجاد فشار بر زیرعامل‌های کشاورزی و عامل محیط‌زیست با توصیفات، مختصات و پهنای استقرار، حجم مخزن، تغذیه و خروجی از آن اشاره نمود. همچنین هر یک از عامل‌ها بر اساس هدف خود دارای رفتاری هستند که از قواعد رفتاری آن‌ها نشأت می‌گیرد.

پس از معرفی عامل‌های مؤثر در منطقه باید محیط پیرامون عامل‌ها تبیین گردد. به‌طورکلی، محیط درک عامل‌ها از ساختار و تنظیم فعلی سامانه و اجزا درون آن است (Bandini et al., 2009). هر یک از عامل‌ها با خود و همچنین با محیط پیرامون خود اندرکنش دارند. عامل‌ها می‌توانند با محیط اندرکنش اجتماعی یا فیزیکی داشته باشند (Darbandsari et al., 2017). در این راستا عامل تنظیم‌کننده می‌تواند با وضع سیاست جریمه نسبت به اضافه برداشت از آبخوان به‌عنوان شاخص عامل محیط‌زیست تأثیر بگذارد. عامل‌های کشاورزی هم با برداشت زیرزمینی و رفتارهای همکارانه و غیرهمکارانه نسبت به محیط‌زیست در غالب اضافه برداشت مجوز آب زیرزمینی بر روی عامل محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. در مقابل رفتارهای عامل‌های کشاورزی، این حق برای عامل محیط‌زیست محفوظ خواهد بود که به خاطر آن علیه عامل‌های خاطی اقامه دعوا نماید. مرجع رسمی پیگری این اقامه دعوا، عامل تنظیم‌کننده است که بازخورد خود را به صورت وضع جریمه نشان می‌دهد. اندرکنش دیگری که در بین عامل‌ها وجود دارد، تأثیر متقابل عامل‌های کشاورزی بر یکدیگر است. یکی از این اندرکنش‌ها بر اساس یادگیری عامل‌های کشاورزی از بازخورد سود ناشی از الگوی

کشت دوره قبل خود و دیگر عامل‌ها است. اندرکنش دیگر که بین عامل‌های کشاورزی وجود دارد همکاری آن‌ها برای تنظیم بازار بر اساس تولیدات خود خواهد بود. بنابراین تولیدات نشأت‌گرفته از اضافه برداشت هر عامل به دلیل فشاری که از سمت گروه عامل‌ها وارد می‌شود، به‌گونه‌ای نخواهد بود که موجب کاسته شدن سود دیگر عامل‌ها از حالت بدون اضافه برداشت گردد. در این تحقیق رفتار عامل کشاورزی در سطح گروه عامل‌های کشاورزی در راستای حداکثرسازی سودبخش کشاورزی با مطلوبیت‌های فردی و در سطح زیر عامل‌های کشاورزی بر پایه حداکثرسازی سود فردی مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین با توجه به آنچه در توضیح مدل مفهومی ارائه شده در شکل ۱ گفته شد، در توسعه مدل فقط رفتار بخش کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار عامل تنظیم کننده و عامل محیط‌زیست نیز در جریمه اعمال شده به زیرعامل‌هایی که اضافه برداشت دارند، در راستای حفظ آبخوان و توسعه پایدار مستتر شده است.

۲-۱- شبیه‌سازی قواعد رفتاری زیرعامل‌های کشاورزی

همانطور که گفته شد مدل ارائه شده در این تحقیق برای پیش‌بینی رفتار بخش کشاورزی نسبت به اضافه برداشت و جریمه آن برپایه مدل Nouri et al. (2019) توسعه یافته است. Nouri et al. (2019) رفتار زیرعامل‌های کشاورزی را بر اساس یک LP بر پایه قیود فیزیکی و رفتاری شبیه‌سازی کردند. تابع هدف مدل ایشان مطابق رابطه ۱ شامل جمع جبری کل درآمد ناشی از فروش محصولات (بر اساس رابطه‌ی ۲) و هزینه‌های کشت محصولات در مراحل رشد و منو گیاهان و قیود این LP شامل قیود فیزیکی تعادل آب و زمین (روابط ۳ و ۴) و قیود رفتاری حداقل و حداکثر سطح کشت محصولات (روابط ۵ و ۶) بود.

(۱)

$$\max \quad PurBenefit_{i,t} = \sum_{j=1}^{n} (O_{i,j} * P_{j,t-1} - Cost^{T}_{i,j}) * Area_{i,j} \qquad \forall i$$

$$P_{j,t} = AQ_{j,t} + B \qquad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{n} (Area_{i,j} * Water_{i,j}) \le Water_{i}^{G} + Water_{i}^{S} \qquad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} Area_{i,j} \le Area_{i}^{Ave} \qquad (۴)$$

$$Area_{i,j} \le (\alpha_1 learning_{i,j}^{\beta_1})_{max} \qquad \forall i, j \qquad (۵)$$

$$Area_{i,j} \ge (\alpha_2 learning_{i,j}^{\beta 2})_{min} \qquad \forall i, j \qquad (۶)$$

که در این روابط؛ $PurBenefit_{t,i}$، مقدار تابع هدف زیرعامل کشاورزی i در دوره زمانی t، $O_{i,j}$، عملکرد محصول j توسط زیرعامل کشاورزی i برحسب تن بر هکتار، $P_{j,t}$، قیمت محصول j در دوره زمانی t برحسب میلیون ریال بر تن، $Cost_{i,j}^{T}$، کل هزینه‌هایی که زیرعامل کشاورزی i برای محصول j صرف کرده است برحسب میلیون ریال بر هکتار، $Area_{i,j}$، سطح زیر کشت زیرعامل i از محصول j برحسب هکتار، $Water_{i,j}$، مقدار آب به‌کاربرده شده زیرعامل کشاورزی i برای محصولj برحسب میلیون مترمکعب بر هکتار، $Water_{i,t}^{G}$، مجوز آب زیرزمینی زیرعامل کشاورزی i برحسب میلیون مترمکعب، $Water_{i,t}^{S}$ پروانه آب سطحی زیرعامل کشاورزی i، $Area_{i}^{Ave}$، سطح کل کشاورزی در دسترس زیرعامل کشاورزی i، $Q_{j,t}$، کل عرضه محصول j در دوره t در منطقه، $(learning_{i,j})_{max}$، تابع یادگیری زیرعامـــل i

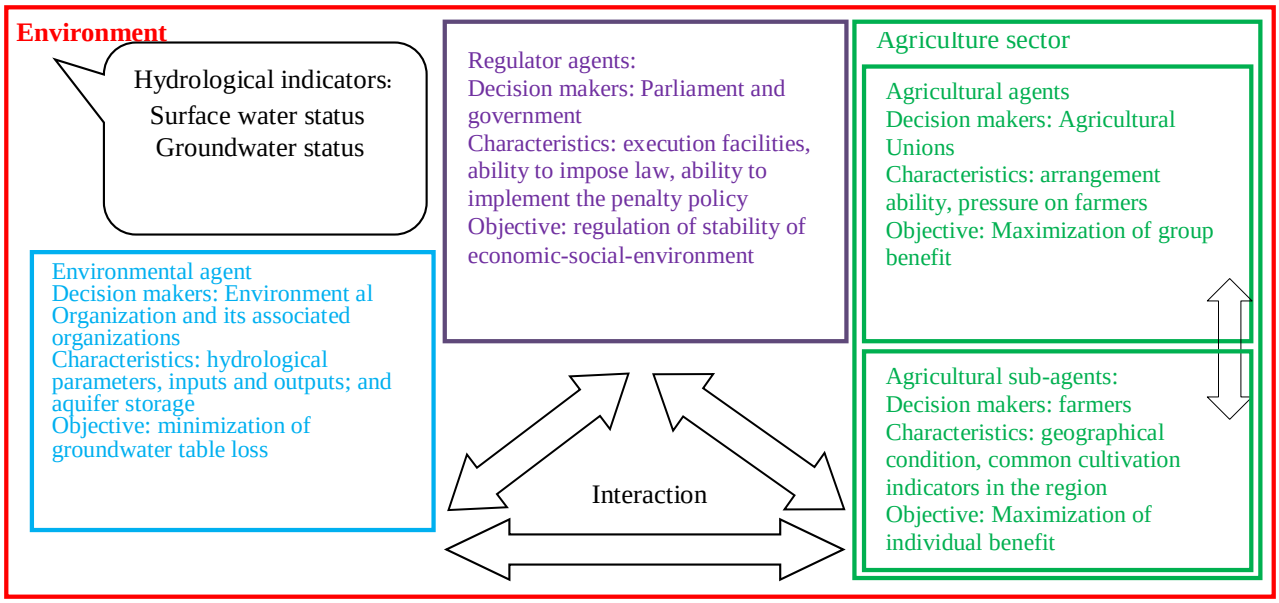

Fig. 1- The conceptual model of the structure presented in the research

شکل ۱- مدل مفهومی ساختار ارائه شده در تحقیق

برای آستانه بالای سطح زیر کشت محصول j، $(learning_{i,j})_{min}$، تابع یادگیری زیرعامل i برای آستانه پایین سطح زیر کشت محصول j، α و β، ضرایب مربوط به کشت و زیر عامل‌های مختلف است. برای مطالعه بیشتر پیرامون تابع هدف و قیود رفتاری این مدل می‌توانید به Nouri et al. (2019) مراجعه نمایید.

به منظور استفاده از مدل Nouri et al. (2019) در این تحقیق، می‌بایست تابع هدف مدل ایشان برای برآورد مقدار جریمه تعمیم یابد. به این جهت تابع هدف تعمیم یافته با درنظر گرفتن مقدار جریمه اعمال شده به هر زیر عامل کشاورزی به صورت رابطه ۷ و قید ارائه شده در رابطه ۳ نیز به صورت رابطه ۸ به منظور در نظر گرفتن تعادل آب در دسترس هر زیرعامل کشاورزی بازنویسی می‌گردد. قید رفتاری حداکثر اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی نیز به صورت رابطه ۹ ارائه می‌گردد. در حقیقت قید ارائه شده در رابطه ۹ حلقه‌ی اتصال مدل برنامه‌ریزی خطی به عنوان مدل رفتاری زیرعامل‌های کشاورزی (کشاورزان) با مدل آب زیرزمینی به عنوان بخش اکولوژی و محیط فیزیکی پیرامون زیرعامل‌های کشاورزی است. در این تحقیق مقدار اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی تابع وضعیت ادراکی آن‌ها نسبت به وضعیت سطح آب زیرزمینی و مقدار اضافه برداشت سایر زیرعامل‌ها در نظر گرفته شده است. بر این اساس با در دست بودن مقدار اضافه برداشت زیرعامل‌های مختلف و شبیه‌سازی آب زیرزمینی در دوره قبل و ورود نتایج آن به رابطه ۹، بازخورد زیرعامل‌های کشاورزی از محیط فیزیکی و اجتماعی پیرامون خود سنجیده شده و حداکثر اضافه برداشت آن ارزیابی می‌گردد. البته قید ارائه شده در رابطه‌ی ۹ تاجایی قابل اتکا است که مشکلی برای استخراج آب، از قبیل پایین‌تر آمدن سطح آبخوان از عمق چاه پیش نیاید. باقی قیود فیزیک و رفتاری (روابط ۴ تا ۶) نیز بدون تغییر باقی خواهد ماند.

$$\max \quad PurBenefit_{i,t} = \sum_{j=1}^{n}(O_{i,j} * P_{j,t-1} - Cost_{i,j}^{T}) * Area_{i,j} - Penalty_{i,t}^{T} \qquad \forall i \qquad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{n}(Area_{i,j} * Water_{i,j}) \le (1 + NCPA_{i,t})Water_{i}^{G} + Water_{i}^{S} \qquad (۸)$$

$$NCPA_{t,i} \le f(GWS_{i,t-1}, NCPA_{i^{-},t-1}) \qquad \forall i \qquad (۹)$$

که در این آن $Penalty_{i,t}^{T}$، کل جریمه‌ای که زیرعامل کشاورزی i به دلیل اضافه برداشت از مجوز آب زیرزمینی خود از سمت زیرعامل تنظیم‌کننده متحمل می‌گردد برحسب میلیون ریال، $NCPA_{i,t}$، درصد اضافه برداشت از آب زیرزمینی توسط زیرعامل کشاورزی i، f، تابعی که درصد اضافه برداشت زیرعامل i را برآورد می‌نماید و $GWS_{i,t-1}$ وضعیت آبخوان در همسایگی عامل i در دوره زمانی t و i^{-} بیانگر عامل‌ها غیر از عامل i است. در این تحقیق مانند Nouri et al. (2019) که از FIS برای شبیه‌سازی رفتار زیرعامل‌های کشاورزی نسبت به آستانه کشت محصولات، به منظور شبیه‌سازی حداکثر مقدار اضافه برداشت هر زیرعامل کشاورزی، از FIS به دلیل نزدیکی فراوان به نحوه استنتاج انسان استفاده می‌گردد. به‌عنوان‌مثال یک قاعده یادگیری که حاکم بر تصمیم‌گیری در مورد حداکثر اضافه برداشت زیرعامل i با توجه به وضعیت آبخوان و اضافه برداشت عامل‌های دیگر در زمان t-1 است را در رابطه ۱۰ را می‌توان ارائه نمود. تعداد و ورودی‌های قواعد و همچنین مقدار فازی عبارات توصیفی به‌کاررفته در قواعد از قبیل کم، متوسط و زیاد، برای هر مقدار ورودی مانند کشت و هر زیرعامل می‌تواند متفاوت باشد که می‌توان به کمک پرسش‌نامه و رجوع به سری زمانی قیمت محصولات و سطح زیر کشت آن‌ها در منطقه تعیین نمود. برای نحوه عملکرد FIS می‌توانید به Perera and Lahat (2015) مراجعه نمایید.

If $GWS_{i,t-1}$ is $Good_i$ and $NCPA_{i^{-},t-1}$ is $Medium_i$, then $NCPA_{i,t-1}$ is $High_i$ (۱۰)

با توجه به تابع هدف ارائه شده در رابطه ۷، رفتار هر زیرعامل کشاورزی به‌گونه‌ای خواهد بود که سود خالص خود را بیشینه نمایند. سود خالص هر زیرعامل تابع سطح زیر کشت و مقدار اضافه برداشت نسبت به مجوز زیرزمینی زیرعامل است. از آنجا که اضافه برداشت آب زیرزمینی هر یک از زیر عامل‌ها باعث افزایش تولید محصولات در منطقه و به‌تبع آن تغییر در قیمت آن و کاهش سود انتظاری زیر عامل‌ها کشاورزی دیگر می‌گردد، بنابراین اهداف زیر عامل‌های کشاورزی با یکدیگر در تعارض هستند و برنامه‌ریزی ارائه‌شده ذاتاً یک برنامه‌ریزی چندهدفه به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ است:

$$\max \quad PurBenefit_{i,t} = \sum_{j=1}^{n}(O_{i,j} * P_{j,t} - Cost_{i,j}^{T}) * Area_{i,j} - Penalty_{i,t}^{T} \qquad \forall i \qquad (۱۱)$$

$$Sunject \quad to: \quad PurBenefit_{i,t} \ge PurBenefit_{i,t}^{Min} \qquad \forall i \qquad (۱۲)$$

که در آن $PurBenefit_{i,t}^{Min}$ مقدار سود خالص زیرعامل کشاورزی i در دوره t در شرایط معمولی و بدون هیچ سیاستی آبی است. قیمت محصولات در دوره زمانی t نیز از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در این تحقیق به کمک NSGA-II و بر اساس روابط ۱۱ و ۱۲، رویه نامغلوب سود خالص زیرعامل‌ها برآورد می‌شود. NSGA-II نخست کار خود را با یک سری جواب‌های اولیه از درصد عدم همکاری زیرعامل‌ها شروع می‌کند و در ادامه با محاسبه مقدار آب در دسترس، الگوی کشت محصولات سال قبل و سطح ایستابی آبخوان، قیود رفتاری عامل‌های کشاورزی (روابط ۵، ۶ و ۹) تعیین می‌گردد. پس از آن بر اساس قیود

به‌دست آمده، الگوی کشت محصولات در سال جاری و درآمد ناشی از آن محاسبه می‌گردد و سود خالص محصولات با کسر جریمه از سود کشاورزان به‌دست می‌آید. سپس بر پایه عملگرهای مدل NSGA-II، رویه نامغلوب اهداف که بیشینه نمودن سود زیرعامل‌های کشاورزی است برآورد می‌گردد. وقتی در رویه ایجادشده همگرایی مناسبی ایجاد شد حلقه‌ی تکرار نسل‌های NSGA-II شکسته شده در غیر این صورت کار با تعیین جواب‌های جدید بر اساس عملگرهای NSGA-II تکرار می‌شود.

خروجی NSGA-II، یک رویه در ابعاد تعداد عامل‌های کشاورزی است که کلیه جواب‌های متعلق به آن از نظر ریاضی نامغلوب هستند و نشان‌دهنده‌ی مناقشه بین عامل‌های کشاورزی بر سر سود بیشتر از طریق اضافه برداشت بیشتر است. در این میان آنچه مانع از اضافه برداشت یک زیرعامل که باعث کاهش سود باقی زیر عامل‌ها می‌گردد، وجود شبکه اجتماعی کشاورزان دارای قدرت متقاعدگری است که برای افزایش سود کلی بخش کشاورزی، زیرعامل‌های کشاورزی را نسبت به اتخاذ سیاستی که باعث زیان دیگر زیر عامل‌های کشاورزی می‌گردد تحت‌فشار اجتماعی قرار می‌دهد. در این تحقق فشار یاد شده به صورت انتخاب گزینه برتر بر اساس امتیازدهی گزینه‌های نامغلوب خروجی از مدل NSGA-II به کمک BCM، بر اساس روابط ۱۳ و ۱۴ شبیه‌سازی شده است:

$$B_j = mn - \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \qquad (۱۳)$$

$$B_{j^*} = \max\{B_j\} \qquad (۱۴)$$

که در آن m تعداد گزینه‌ها، n تعداد رأی‌دهندگان، B_j امتیاز بردای گزینه j و B_{j^*} امتیاز مربوط به گزینه‌ی برتر با حداکثر امتیاز بردا است.

همچنین a_{ij} رتبه گزینه j از دیدگاه رأی دهنده i در حالتی که بهترین گزینه رتبه ۱ و بدتری گزینه رتبه m را اخذ می‌نماید (Zarghami and Szidarovszky, 2011). به دلیل متفاوت بودن تعداد کشاورزان در هر عامل و قدرت چانه‌زنی بیشتر عاملانی که مجوز بیشتری برای تخلیه آب زیرزمینی دارند، در این تحقیق برای هر عامل کشاورزی به مقدار مجوز تخلیه آن حق امتیازدهی درنظر گرفته شد. در حقیقت هر زیرعامل کشاورزی به ازای هر مقدار مجوز تخلیه امکان رأی پیدا می‌نماید. همچنین در این تحقیق اینگونه فرض شد که زیرعامل‌های کشاورزی گزینه‌های موجود را بر اساس سود خود امتیازدهی می‌نمایند. برای مطالعه بیشتر درباره‌ی سازوکار و فرمول‌بندی BCM می‌توانید به Zarghami and Szidarovszky (2011) مراجعه نمایید.

شایان ذکر است برای توسعه قسمت اجتماعی مدل عامل‌بنیان، از محیط MATLAB R2017a استفاده شد. همچنین برای بهینه‌سازی ارائه شده در رابطه ۷ و FISهای به کار رفته، از توابع آماده آن محیط بهره برده شد. از طرف دیگر چون آبخوان تحت تأثیر فاکتورهای موجود در محیط و برداشت و اضافه برداشت آب قرار دارد، بنابراین شبیه‌سازی آبخوان متناسب با رفتار مختلف عامل‌های کشاورزی و اتصال آن به قسمت اجتماعی مدل تحت رابطه ۹، ضروری است. به این منظور در ابتدای دوره شبیه‌سازی، مقدار اضافه برداشت کشاورزان و عمق آب به صورت ورودی بخش اجتماعی (مدل توسعه داده شده در MATLAB) وارد می‌شود. بعد از محاسبه قیود رفتاری در روابطه ۵، ۶ و ۹ و اجرای LP، مقدار اضافه برداشت هر زیرعامل متناظر با هر گزینه رویه نامغلوب برآورد می‌گردید و با اعمال BCM گزینه برتر انتخاب می‌شود. در این مرحله اضافه برداشت برآورد شده از مدل عامل‌بنیان به صورت دستی به مدل شبیه‌ساز کمی آبخوان وارد و عمق آبخوان در انتهای دوره مورد بررسی محاسبه می‌گردد. در نهایت همین عمق به عنوان ورودی به بخش اجتماعی برای شبیه‌سازی دوره بعد به صورت دستی وارد می‌شود. در این تحقیق شبیه‌سازی کمی آبخوان به کمک مدل MODFLOW که توسط (Heydari et al., 2016) کالیبره شده صورت گرفته است.

۳- مطالعه موردی

واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد به وسعت بالغ بر ۱۷۴۲ کیلومترمربع در حوضه آبریز زاینده‌رود واقع گردیده است. این واحد دارای آبخوانی آبرفتی به وسعت ۱۰۶۵ کیلومترمربع است که به همراه شبکه آبیاری سطحی محدوده مصارف آب کشاورزی، شرب، صنعت و غیره منطقه را تأمین می‌نمایند. باران و بازگشت آب از طریق کشاورزی مهم‌ترین منابع تغذیه آبخوان نجف‌آباد است. میانگین افت سالانه آبخوان این واحد هیدرولوژیکی برابر با ۸۰ سانتی‌متر است که بخش اعظم آن براثر ۴۰ میلیون مترمکعب اضافه برداشت از آبخوان این واحد هیدرولوژیکی است.

با توجه به اینکه بیش از ۹۵٪ مصارف آب این محدوده به بخش کشاورزی اختصاص دارد، مجموعه عامل‌های کشاورزی مهم‌ترین نقش را در احیاء آبخوان ایفا می‌نمایند. منطقه موردمطالعه ازنظر تقسیمات کشوری بین ۵ شهرستان تقسیم شده است. ازآنجاکه هر شهرستان ازنظر امور مربوط به کشاورزی تحت مدیریت واحد همان شهرستان است، بنابراین در این تحقیق کشاورزان هر شهرستان به‌عنوان یک عامل واحد در نظر گرفته شد. شکل ۲ محدوده‌ی منطقه موردمطالعه و چگونگی استقرار عامل‌های کشاورزی و جدول ۱ مشخصات کلی عامل گزارش‌شده است.

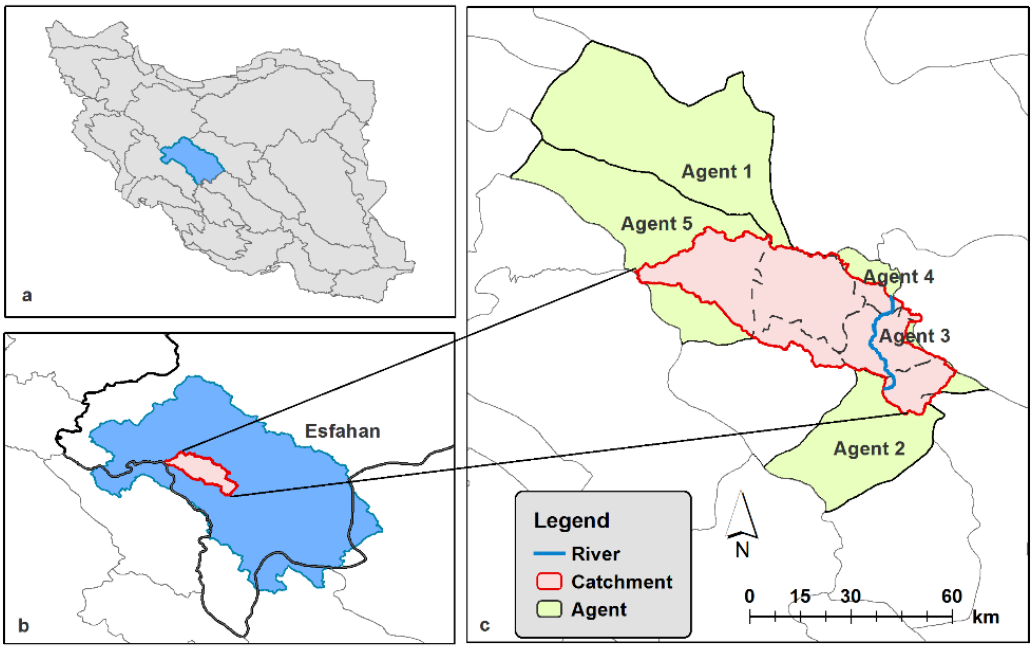

Fig. 2- Study area and status of agents (Nouri et al., 2019)
شکل ۲- منطقه موردمطالعه و وضعیت عامل‌ها (Nouri et al., 2019)

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تنظیمات مدل شبیه‌ساز رفتار عامل‌های کشاورزی

کارایی چارچوب ارائه‌شده در قسمت قبل به کمک داده‌های هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و کشاورزی منطقه نجف‌آباد در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا لازم بود تا قیود رفتاری مدل شبیه‌ساز رفتار عامل‌های کشاورزی که در قسمت ۲-۱ تشریح شد تعیین گردد. آن دسته از قیود رفتاری که به آستانه پایین و بالای کشت محصولات مربوط می‌شود (روابط ۵ و ۶) قبلاً در تحقیق (Nouri et al., 2019) به کمک الگوریتم ژنتیک[۸] (GA) کالیبره شده بود. ایشان به کمک پرسشنامه، پارامترهای مربوط به FIS برای هر کشت و زیرعامل را تنظیم نمودند و به کمک داده‌های مشاهداتی واحد هیدرولوژیکی نجف آباد، ضرایب موجود در مدل خود را با تابع هدف کمینه نمودن RMSE به کمک GA کالیبره کردند. نتایج بدست آمده نشان داده بود که مدل ایشان به طرز خوبی کالیبره شده و قابل اعتماد برای اجرای سناریوهای مدیریتی است.

همانطور در تشریح مدل پیشنهادی گفته شد، برای شبیه‌سازی تابع حداکثر اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی که در رابطه ۹ آمده است مانند آستانه بالا و پایین کشت محصولات از FIS استفاده شده است. تنظیمات توابع عضویت FIS به کار رفته در مقاله با مراجعه به کشاورزان برای هر زیرعامل‌های کشاورزی به کمک پرسشنامه انجام پذیرفت. توابع عضویت درصد عدم همکاری زیرعامل‌های همسایه در دوره قبل و مقدار تغییر سطح آب زیرزمینی به عنوان دو ورودی FIS در شکل ۳ به نمایش در آمده است. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، توابع عضویت مقدار تغییر سطح آب زیرزمینی به عنوان ورودی نخست به صورت سه عدد فازی: تغییر سطح منفی (“N”)، بدون تغییر سطح (“non”) و تغییر سطح مثبت (“P”)، ورودی دوم که

Table 1- Agricultural information of agricultural agents (Isfahan Organization of Agriculture Jihad , 2015)
جدول ۱- اطلاعات کشاورزی مربوط به عامل‌های کشاورزی (سازمان جهاد کشاورزی اصفهان ۱۳۹۴)

Agents No.	Maximum Area in last decade (ha)	Area in 2014(ha)	Dominant Crop *
1	10113	4485	1, 2, 4, 7, 9
2	17286	11580	1, 2, 3, 7, 9
3	15638	12810	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9
4	4544	2341	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9
5	8192	4990	1, 2, 4, 6, 7, 9

*1-Wheat, 2-Barley, 3-Millet, 4-potato, 5-onion, 6-vegetables, 7-alfalfa, 8-Clover & 9-Corn

نشان‌دهنده درصد اضافه برداشت همسایگان زیرعامل کشاورزی در دوره قبل به صورت پنج عدد فازی: خیلی کم (“VL”)، کم (“L”)، متوسط (“M”)، زیاد (“H”) و خیلی زیاد (“VH”) و در نهایت توابع عضویت مقدار اضافه برداشت زیرعامل در دوره حاضر به عنوان خروجی در پنج کلاس همانند ورودی دوم تنظیم گردید.

بر پایه پرسشنامه‌ها و تحقیقاتی که از مراجع محلی صورت گرفت، سهم تأثیر وضعیت آبخوان بر اضافه برداشت را کمتر از درصد اضافه برداشت زیرعامل‌های دیگر دانست. منتها این تأثیر به صورت غیر خطی بود که خود را در قواعد و اعداد فازی FIS تهیه شده نشان داد. به طور مثال وقتی اضافه برداشت همسایه‌ی یک عامل ”L“ بود، در حالتی که وضعیت آبخوان ”N“، ”M“ و ”P“ بود به ترتیب ”L“، ”L“ و ”M“ برآورد گردید. همانطور که در شکل ۳–الف قابل مشاهده است، اختلاف سطح بخوان تا ۲/۵ متر برای کشاورزان حساس بود و با افزایش اختلاف عمق از این مقدار تغییری در رفتار کشاورزان ایجاد نشد. بر اساس جمع‌بندی پرسشنامه‌ها، حداکثر اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی برابر با ٪۳۰، در حالتی که عمق آبخوان ۲/۵ متر افزایش داشت و همسایگان زیرعامل‌های کشاورزی در حالت حداکثر اضافه برداشت بودند برآورد گردید. در حالتی که آبخوان با افت تا ۲/۵ متر مواجه بود و اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی در حالت حداقل بود، اضافه برداشتی برای زیرعامل‌ها کشاورزی دیده نشد.

۴-۲- اجرای مدل عامل‌بنیان

پس از تنظیم قیود رفتاری، مدل عامل‌بنیان توسعه داده شده با چند مقدار جریمه به منظور تحلیل حساسیت اثر مقدار جریمه بر وضعیت آب زیرزمینی، تولیدات منطقه و سود زیرعامل‌های کشاورزی، به مدت ۱۰ سال اجرا گردید. تعداد جمعیت اولیه به کار رفته در NSGA-II برای سناریوهای جریمه عامل تنظیم‌کننده ۱۰۰ عدد و تعداد نسل‌های آن برای هرسال به مقداری تعیین شد که حداقل در ۳۰ نسل، رویه نامغلوب یکسانی برآورد شود. پس از اطمینان از همگرایی رویه نامغلوب به‌دست‌آمده، از میان جمعیت موجود در لایه نامغلوب، بر اساس سود خالص هر زیرعامل کشاورزی به کمک BCM گزینه موردتوافق زیرعامل‌های کشاورزی در آن سال به کمک روابط ۱۳ و۱۴ تعیین و سود عامل‌های کشاورزی، مقدار تخطی از مجوز آب زیرزمینی، وضعیت آبخوان و الگوی کشت زیرعامل‌های کشاورزی ذخیره گردید. این فرآیند با بازخوانی نتایج ذخیره شده از دوره قبل برای مقدار جریمه‌های مختلف برای ۱۰ سال تکرار گردید. در شکل ۴–الف مقدار اضافه برداشت زیرعامل‌های کشاورزی طی ده سال و در ۴–ب میانگین

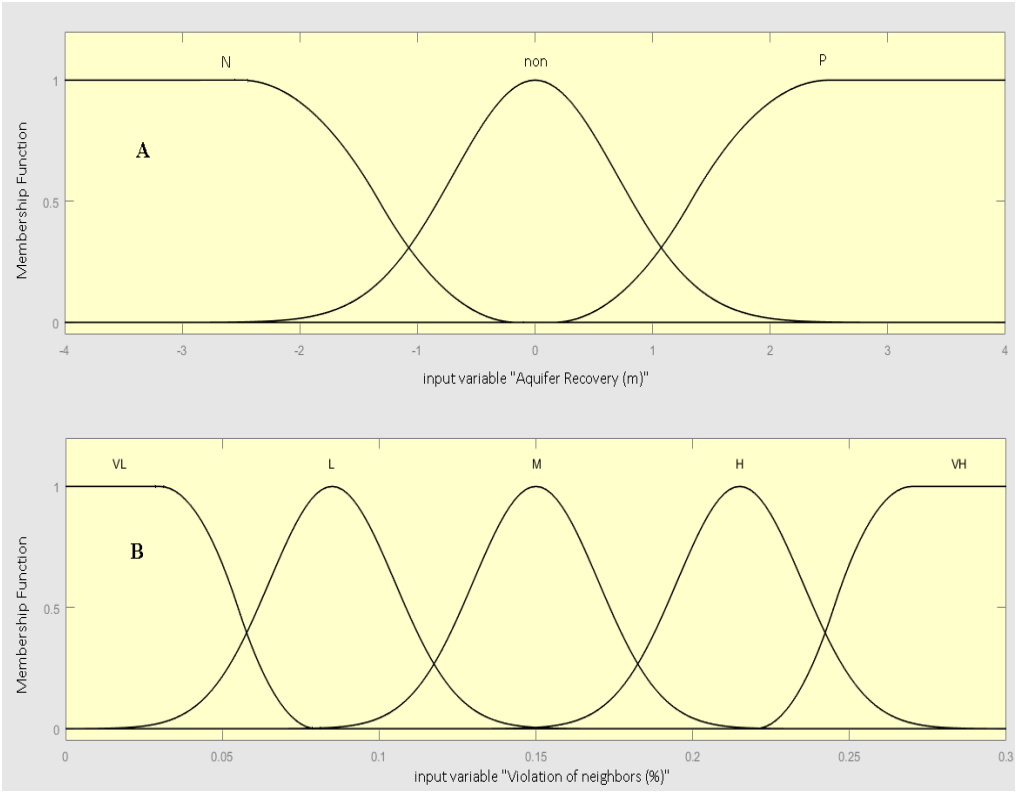

Fig. 3- Membership Function of Fuzzy Inference System Inputs A) Changing Aquifer Level (m), B) Neighboring violation (٪)

شکل ۳- تابع عضویت ورودی‌های FIS الف) تغییر سطح آبخوان (متر) ب) اضافه برداشت همسایگان (٪)

اضافه برداشت در دوره ده ساله‌ی اجرای مدل بر اساس جریمه‌های ۲، ۳ و ۴ هزار ریال به ازای هر متر مکعب اضافه برداشت ارائه شده است. همچنین در مدل توسعه‌یافته، در هر دوره بر اساس برداشت انجام شده، آبخوان منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. برای مقایسه چهار سناریوی اجرا شده در این تحقیق، نتایج آبنمود واحد آبخوان منطقه در سال آخر اجرای مدل در ستون دوم جدول ۲ گزارش شده است. در جدول ۲ برای مقایسه بهتر سناریوهای جریمه با حالتی که هیچ اضافه برداشتی وجود ندارد[9] (WOE)، اختلاف ارتفاع آبنمود واحد آبخوان در سناروهای جریمه نسبت به WOE در ستون سوم برحسب متر ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۴–ب قابل و جدول ۲ مشاهده است، مطابق آنچه قابل پیش‌بینی بود، با افزایش مقدار جریمه از ۲۰۰۰ به ۳ و ۴ هزار ریال، مقدار میانگین اضافه برداشت از حدود ۴۴ میلیون متر مکعب به ترتیب به حدود ۲۸ و ۱۴ میلیون متر مکعب اضافه برداشت کاهش یافت. بر همین اساس وضعیت آبخوان نیز در حالت بهتر در مقایسه با سناریوهای با جریمه کمتر قرار گرفت بگونه‌ای که افت سطح آبخوان که در حالتی که جریمه ۲۰۰۰ ریالی وضع شده بود ۲۱/۸۲ متر پیش‌بینی شده بود ولی با افزایش مقدار جریمه به ۳ و ۴ هزار ریال، این مقدار به ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱۰/۵۴ متر شبیه‌سازی شد. با این وجود اضافه برداشت در همه سال‌های اجرای مدل وجود داشت و در کل دوره با نوسان انجام پذیرفت. این نوسانات که مخصوصا در مورد مقدار جریمه ۲۰۰۰ ریالی بسیار شدید بود را می‌توان بر اثر حساسیت تصمیم‌گیری زیرعامل‌های کشاورزی بر اساس مقدار اضافه برداشت همسایه‌ها و وضعیت آبخوان دانست. وقتی اضافه برداشت زیاد صورت می‌گیرد، آبخوان در دوره بعد وضعیت نامناسبی خواهد داشت و این مسأله باعث کاهش مقدار اضافه برداشت توسط زیرعامل‌های کشاورزی می‌گردد. در مقابل، برای مقدار جریمه‌های بیشتر، به دلیل اضافه برداشت کمتر، نوسانات یاد شده کمتر دیده شد. نکته قابل توجه دیگری که در شکل ۴–الف قابل مشاهده است، در مقدار جریمه ۳ و ۴ هزار ریالی (مخصوصاً ۴ هزار ریال) مقدار اضافه برداشت نسبت به مقدار جریمه ۲ هزار ریالی از نوسان کمتر برخوردار بود و در سال‌های آخر به مقدار معین در حال همگرا شدن است. این وضعیت برای جریمه ۴ هزار ریال تقریباً در حال همگرایی به مقدار صفر (بدون اضافه برداشت) است که منجر شدن به وضعیت همکاری کامل با عامل محیط‌زیست است.

زیرعامل‌های کشاورزی با اضافه برداشتی که نسبت به مجوز برداشت خود انجام می‌دهند به افزایش سطح کشت محصولات خود مبادرت می‌نمایند. اینکه زیرعامل‌های کشاورزی مقدار آب در دسترس خود را (اعم از مقدار آب حاصل از مجوز و اضافه برداشت) برای کشت چه محصولاتی صرف می‌نماید به قیمت محصولات، تجربه و خصوصیات رفتاری آن‌ها که در قیود مدل توسعه یافته پنهان شده مرتبط است. بر این اساس مقدار میانگین کشت محصولات در منطقه برای سه گروه محصول غلات، سبزیجات و نباتات علوفه‌ای در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است با اضافه برداشت آب نسبت به مجوز، سطح کلیه کشت‌ها افزایش یافته و با کاهش اضافه برداشت که نتیجه افزایش مقدار جریمه بود، سطح کشت محصولات کاهش یافت. با این وجود درصد تغییرات سطح گروه سبزیجات بسیار بیشتر دو گروه غلات و نباتات علوفه‌ای بود به گونه‌ای که با تغییر جریمه از ۲ به ۳ و ۴ هزار ریال، سطح زیر کشت هر بار حدود ۶۰۰ هکتار کاهش یافت. در مقابل سطح غلات و نباتات علوفه‌ای تقریبا ثابت و به طور میانگین در سه سناریو به ترتیب حدوداً برابر با ۲۳۷۰۰ و ۶۱۰۰ هکتار بود. تغییرات کم کشت غلات و نباتات علوفه‌ای نشان‌دهنده این مطلب است که عامل‌های کشاورزی ســـود

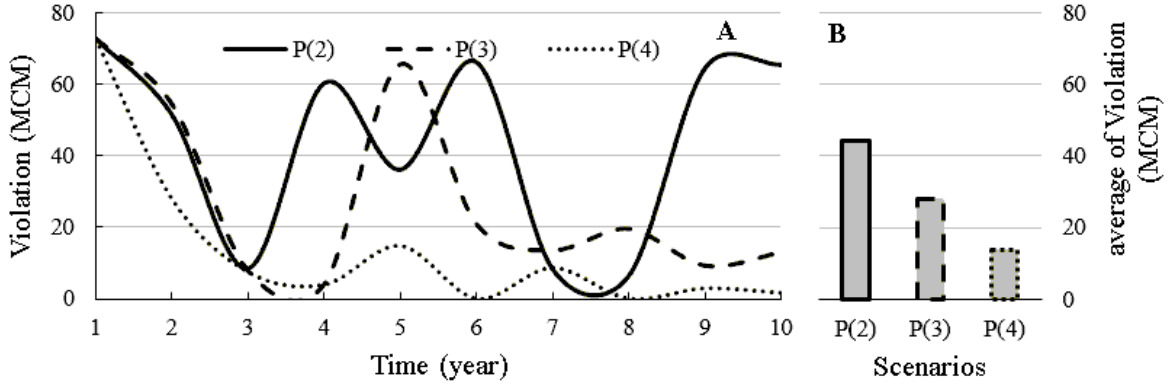

Fig. 4- A) Violation pattern during model execution (MCM), B) Average violation during harvest period (MCM)

شکل ۴- الف) الگوی اضافه برداشت در طول اجرای مدل (MCM) ب) میانگین اضافه برداشت در طول دوره برداشت (MCM)

بیشتری از کشت سبزیجات کسب می‌نمایند، در حدی که با توجه به جریمه‌ای که می‌پردازند، کشت سبزیجات نسبت به کشت سایر گروه‌ها به صرفه‌تر است. از آنجا که هدف اصلی زیرعامل‌های کشاورزی از اضافه برداشت و به تبع آن توسعه سطح کشت محصولات و افزایش سود از طریق فروش محصولات است، به منظور مقایسه سناریوهای اجرا شده از این دیدگاه در جدول ۳ میانگین سود خالص زیرعامل‌های کشاورزی برای هر سناریو گزارش شده است. همان طور که در جدول قابل مشاهده است، روند تغییرات سود خالص عامل‌های کشاورزی متناسب با اضافه برداشتی است که صورت گرفته است. با این وجود، این روند برای عامل‌های ۱ الی ۳ به دلیل آنکه مصرف آب زیرزمینی آنها از باقی زیرعامل‌ها بیشتر بود به صورت مشهودتر قابل مشاهده است. در دو زیرعامل دیگر (زیرعامل‌های ۴ و ۵) با افزایش مقدار جریمه، افزایش جزئی سود خالص مشاهده شد که دلیل این امر را می‌توان در ساز و کار انتخاب گزینه برتر از میان گزینه‌ها نامغلوب به کمک BCM دانست. از طرف دیگر مقایسه ستون WOE با ستون p(4) در جدول ۳ نشان می‌دهد ۱۴ میلیون متر مکعب اضافه برداشتی که در جریمه ۴ هزار ریالی به وجود آمده است موجب افزایش سود خالص به اندازه‌ی ۱۰/۵ میلیارد ریال شده است.

Table 2- Elevation of Najafabad Aquifer's unit hydrograph

جدول ۲- ارتفاع آبنمود واحد آبخوان نجف‌آباد

Scenario	Elevation (m)	Δh (m)
P(2)	1596.73	-21.82
P(3)	1601.36	-17.18
P(4)	1608.01	-10.54

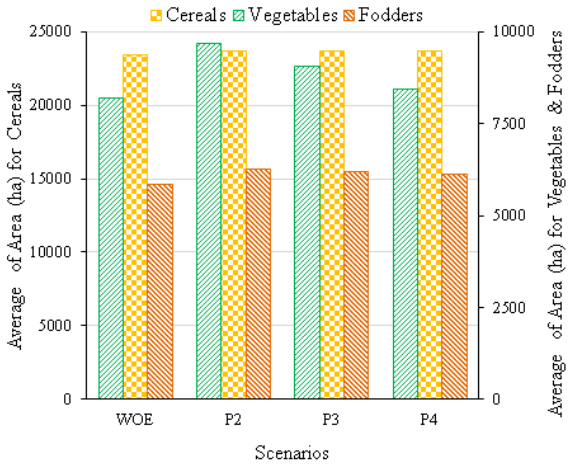

Fig. 5- Average cultivation area of crops in different scenarios (ha)

شکل ۵- میانگین سطح کشت گروه محصولات در سناریوهای مختلف (هکتار)

Table 3- Annually average net profit of sub-agents (billion Rials)

جدول ۳- میانگین سود خالص زیرعامل‌ها سالانه (میلیارد ریال)

Scenario	WOE	P(2)	P(3)	P(4)
Agent 1st	168.8	171.9	170.5	169.3
Agent 2nd	225.1	229.7	227.3	225.5
Agent 3rd	1836.4	1856.2	1849.1	1844.6
Agent 4th	159.1	162.2	154.7	160.4
Agent 5th	99.2	99.2	99.3	99.3

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با ارائه یک رویکرد عامل‌بنیان، سعی در شبیه‌سازی بازخورد سیاست جریمه کشاورزان دارای اضافه برداشت از آب زیرزمینی بر اساس خصوصیات و قواعد رفتاری‌شان داشت. عامل‌های اصلی موردبررسی در محیط آبخوان شامل عامل‌های کشاورزی، تنظیم‌کننده و محیط‌زیست بود. بخش کشاورزی در دو سطح زیر عامل‌های کشاورزی شامل کشاورزان و گروه عامل‌های کشاورزی شامل شبکه‌ی اجتماعی کشاورزان موردبررسی قرار گرفت. رفتار زیرعامل‌های کشاورزی به کمک یک LP با تابع هدف بیشینه نمودن سود خالص هر زیرعامل کشاورزی تحت قیود فیزیکی و رفتاری که به کمک FIS کالیبره شده بود و رفتار گروه عامل‌های کشاورزی به کمک تلفیق مدل NSGA-II و BCM تحت قیود مطلوبیت‌های فردی زیرعامل کشاورزی در راستای بیشینه نمودن سود کلی بخش کشاورزی موردبررسی قرار گرفت. در این تحقیق آستانه بالای اضافه برداشت هر زیرعامل کشاورزی تابع تغییر وضعیت سطح ایستابی آبخوان و درصد اضافه برداشت همسایگان زیرعامل‌های در نظر گرفت شد و این تابع با یک FIS شبیه‌سازی شد. قوانین و توابع عضویت FIS یاد شده با مراجعه به کشاورزان تنظیم گردید.

مدل توسعه‌یافته توانایی برآورد مقدار اضافه برداشت، الگوی کشت و سود ناشی از آن را برای هر یک زیرعامل‌های کشاورزی و همچنین بازخورد آن‌ها بر آبخوان را دارد. به این منظور مدل ارائه شده توسط داده‌های آبخوان نجف‌آباد در یک دوره ده ساله اجرا گردید و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. مطابق آنچه در قسمت مطالعه موردی بیان شد، در دشت نجف‌آباد سالانه بالغ بر ۴۰ میلیون متر مکعب اضافه برداشت صورت می‌گیرد که بر اساس مدل توسعه‌یافته با اعمال سیاست جریمه این مقدار دستخوش تغییر گردید. همانطور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش جریمه به طور کلی مقدار اضافه برداشت از آبخوان کاهش یافت. در میان سه مقدار جریمه که آنالیز حساسیت شد،

مقدار جریمه ۲ هزار ریال بر متر مکعب نتوانست زیرعامل‌های کشاورزی را به رفتار بدون اضافه برداشت سوق دهد و در مقابل جریمه ۴ هزار ریال بر متر مکعب تقریباً موجب شکل‌گیری رفتار بدون اضافه برداشت شد. در الگوی اضافه برداشت زیرعامل‌ها در دوره اجرای مدل نوساناتی که با افزایش مقدار جریمه روند کاهشی داشت مانند تغییرات سطح کشت محصولات همانطور که Nouri et al. (2019) گزارش دادند دیده شد. این نوسانات را می‌توان با خصوصیات رفتاری کشاورزان بر پایه تناوب بهبود و تخریب وضع آبخوان و تأثیر آن بر تصمیم دوره بعد آن‌ها و سازوکار BCM توضیح داد.

پی‌نوشت‌ها

1- Agent Based Simulation (ABS)
2- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)
3- Nash Bargaining Theory (NBT)
4- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
5- Linear Programming (LP)
6- Fuzzy Inference System (FIS)
7- Borda Count Method (BCM)
8- Genetic Algorithm (GA)
9- Without any Over-Exploitation (WOE)

۶- مراجع

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

Akhbari M and Grigg NS (2015) Managing water resources conflicts: Modelling behavior in a decision tool. Water Resources Management 29(14):5201–5216

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

Darbandsari P, Kerachian R, and Malakpour-Estalaki S (2017) An Agent-based behavioral simulation model for residential water demand management: The case-study of Tehran, Iran. Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier B.V. 78:51–72

Farhadi S, Nikoo MR, Rakhshandehroo GR, Akhbari M and Alizadeh MR (2016) An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. Agricultural Water Management, Elsevier B.V. 177:348–358

Galán JM, López-Paredes A, and Del Olmo R (2009) An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area. Water Resources Research 45(5):1–17

Ghazali M, Honar T, and Nikoo MR (2018) A hybrid TOPSIS-agent-based framework for reducing the water demand requested by stakeholders with considering the agents' characteristics and optimization of cropping pattern. Agricultural Water Management, Elsevier B.V. 199:71–85

Heydari F, Saghafian B, and Delavar M (2016) Coupled quantity-quality simulation-optimization model for conjunctive surface-groundwater use. Water Resources Management 30(12):4381–4397

Levin S, Xepapadeas T, Crépin A-S, Norberg J, de Zeeuw A, Folke C, Hughes T, Arrow K, Barrett S, Daily G, … Walker B (2013) Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications. Environment and Development Economics 18(2):111-132

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

Nouri A, Saghafian B, Delavar M, and Bazargan-Lari MR (2019) Agent-based modeling for evaluation of crop pattern and water management policies. Water Resources Management 33(11):3707-3720

Perera EDP and Lahat L (2015) Fuzzy logic based flood forecasting model for the Kelantan River basin, Malaysia. Journal of Hydro-Environment Research, Elsevier B.V. 9(4):542–553

Voinov A and Bousquet F (2010) Modelling with stakeholders. Environmental Modelling and Software 25(11):1268–1281

Wolf AT (2008) Healing the enlightenment rift: rationality, spirituality and shared waters. Journal of International Affairs 61(2):51–73

Zarghami M, and Szidarovszky F (2011) Multiceritera analysis: Application of water and environment management: Springer