نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۲۸-۳۱۶

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 316-328

مقاله پژوهشی

کاربست مدل‌سازی مبتنی بر عامل به‌منظور شبیه‌سازی اثر سناریوهای قیمتی و انشعاب رایگان بر تقاضای آب

سید فرزاد موسوی[۱]، نرگس صالح‌نیا[۲*]، احمد سیفی[۳]، احمدرضا اصغرپور ماسوله[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

چکیده

افزایش جمعیت شهرها همراه با تمایل به رفاه و بهداشت بهتر باعث افزایش تقاضای آب شده است. از طرف دیگر، قرار گرفتن بسیاری از شهرها در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و پایین بودن میزان بارش‌ها و منابع آبی تجدید پذیر، زمینه بروز یک بحران در تأمین آب موردنیاز را فراهم می‌آورد. شهر شیراز ازجمله کلان‌شهرهایی است که با این مشکل مواجه است و در فصول گرم سال افت فشار و قطعی آب را تجربه می‌کند. افزایش عرضه‌ی آب بدون در نظر گرفتن مدیریت تقاضا، بروز بحران را سخت‌تر خواهد کرد. از طرفی تعیین قیمت از مهم‌ترین دغدغه‌های سیاست‌گذار در مدیریت تقاضا است. با توجه به اهمیت این موضوع و همچنین نقش تعاملات اجتماعی بین مصرف‌کنندگان و شبکه اجتماع هم‌جوار بر رفتار مصرفی آب، مطالعه‌ی حاضر بر تهیه‌ی یک چهارچوب مبتنی بر عامل در بررسی تقاضای آب و تغییرات رفتار مصرفی (فرآیند انتشار) تمرکز می‌کند. مدل برای مصرف آب خانگی شهر شیراز در دوره زمانی ۱۳۹۷-۱۳۸۴ کالیبره و برای سال‌های ۱۴۱۰-۱۳۹۸ سناریوهای افزایش قیمت (برای همه یا فقط بخشی از مصرف‌کنندگان) و نیز اعطای انشعابات رایگان شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش‌های اندک قیمت آب نتایج ملموسی بر مصرف و بهبود رفتار هم کارانه ندارد، همچنین دادن انشعاب رایگان به برخی از مصرف‌کنندگان باعث تشدید رفتار غیرهمکارانه در بین دیگر مصرف‌کنندگان و افزایش شدید مصرف خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: انشعاب رایگان، تقاضای آب، فرآیند انتشار، قیمت‌گذاری آب، مدل‌سازی مبتنی بر عامل

مقدمه

در سال‌های گذشته عوامل زیادی باعث ایجاد مشکلات مرتبط با منابع آب شده‌اند؛ مطالعه مدنی و همکاران، رشد سریع جمعیت، مهاجرت و شهرنشینی، زیرساخت‌های نامناسب توزیع آب، تنزل کیفیت آب، کشاورزی ناکارا، رؤیای خودکفایی در تولید غذا، قیمت پایین آب و انرژی، چاه‌های عمیق و بهبود فنّاوری پمپ آب، خشک‌سالی‌ها و تغییرات آب و هوایی، عطش توسعه و مأموریت‌های هیدرولیکی ناقص، ساختار نامناسب حکمرانی آب و ضعف آگاهی‌های عمومی را به‌عنوان مهم‌ترین مشکلات مرتبط با آب در ایران عنوان کرده است (Madani et al., 2016). برای رسیدن به توسعه پایدار، لزوم مدیریت مصرف فزاینده‌ی منابع آبی، آشکار است. در این راستا از دیدگاه اقتصادی سیاست‌های ممکن برای مدیریت بحران آب در قالب افزایش عرضه و کنترل تقاضا مطرح می‌شوند. در ایران اقدامات سیاست‌گذاران بیشتر معطوف به سمت عرضه و تولید آب بوده و به مدیریت تقاضا کمتر توجه شده است. مطالعاتی ازجمله دی بالداساره و همکاران در مورد آثار مخزن و چرخه عرضه- تقاضا در قالب اثر بازگشتی[5] (معمای جونز[6])، نشان می‌دهند که سیاست‌های عرضه آب مشکلات عدم پایداری را به همراه دارند، به این معنی که باعث

۱- دانشجوی دکتری گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استادیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- استادیار گروه جامعه‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: n.salehnia@um.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.8.0

5 - Rebound effect
6 - Jevons' Paradox

تسریع بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و تخریب محیط‌زیست می‌شوند (Di Baldassarre et al., 2018). لذا ضرورت مدیریت مؤثر تقاضا در کنار جانب عرضه آشکار است. قیمت آب شرب نیز در ایران اندک تعیین می‌شود، به‌طوری‌که طبق گزارش بانک جهانی، قیمت اسمی آب در تهران، ده برابر کمتر از ابوظبی و بیست برابر کمتر از لندن است (World Bank, 2017). لازم به ذکر است که این مقایسه صرفاً یک مقایسه اسمی است و برای بیان واقعیت امر باید به متغیرهای درآمد سرانه‌ی خانوارها در کشورهای مختلف و مفهوم برابری قدرت خرید نیز توجه شود که محاسباتی خارج از حیطه این مقاله را شامل می‌شود. قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب شرب طبق آمار آب و فاضلاب کشور در سال ۱۳۹۸ برابر با ۱۰،۹۶۶ ریال بوده درصورتی‌که متوسط نرخ فروش آن ۶،۲۴۳ ریال بوده است. کارکرد اصلی قیمت، علامت‌دهی[1] به عاملان اقتصادی شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و سرمایه‌گذاران است. قیمت پایین آب در منطقه‌ای با مشخصات جغرافیایی ایران علامتی مبنی بر کمبود آب را به عوامل اقتصادی ارسال نمی‌کند. افزایش قیمت آب، هم می‌تواند کاهش تقاضا را در پی داشته باشد و هم از سوی دیگر با کمک به بازپرداخت هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های تأمین و انتقال آب و افزایش سرمایه‌گذاری در پروژه‌های آبی، عرضه بیشتر را باعث شود. علاوه بر این همواره بحث‌هایی نیز در مورد انشعابات رایگان برای برخی مراکز مانند مدارس مطرح می‌شود. برای اتخاذ یک تصمیم بهینه، سیاست‌گذار باید بتواند آثار سیاست‌های مختلف قیمتی را بر روند تقاضا برآورد کند تا به راه‌حل مناسبی برای کنترل تقاضا دست یابد.

لذا در این مطالعه سعی شده است مدلی برای ویژگی‌های رفتاری مصرف‌کنندگان آب شهری با لحاظ تعاملات اجتماعی (اثرپذیری رفتار مصرفی از شبکه اجتماعی) آنان طراحی شود که به کمک آن بتوان شبیه‌سازی تقاضای آب را انجام داد. ارزیابی رفتار مصرفی مطابق سناریوهای مختلف قیمتی شامل افزایش قیمت آب برای همه، افزایش قیمت برای برخی از مصرف‌کنندگان خاص و اعطای انشعاب رایگان (یا افزایش موارد انشعاب غیرمجاز) از مجرای این شبیه‌سازی میسّر خواهد شد. ابزارهای سنتی شبیه‌سازی تقاضای آب اغلب به شکل ریاضیاتی و متکی به رگرسیون بر روی داده‌های قبلی برای پیش‌بینی روند آتی هستند (House-Peters and Chang, 2011). این مدل‌ها در ادغام عوامل ناهمگن با اهداف و ویژگی‌های متفاوت یا تعاملات اجتماعی میان این عوامل، محدودیت دارند. این کاستی‌ها به‌وسیله‌ی مدل‌سازی مبتنی بر عامل[2] برطرف می‌شود.

درک تأثیرات اجتماعی بر رفتار انسان‌ها و نیز بر رفتار مصرف آب

هنجارهای اجتماعی به‌عنوان عامل مؤثر بر رفتار مصرفی آب خانوارها، در مطالعات زیادی بررسی شده است (Jaeger and Schultz, 2017; Otaki et al., 2017; Bernedo et al., 2014; Ferraro et al., 2011). درک تأثیرات اجتماعی به دو دلیل بسیار مهم است. دلیل اول این‌که بیشتر مردم از بقیه یاد می‌گیرند. دوم این‌که یکی از روش‌های مؤثر هدایت مردم، همین تأثیرات اجتماعی است (Thaler and Sunstein, 2008). سیاست‌گذاران باید بدانند که چگونه رفتارهای اجتماعی سودمند را تشویق کنند و از نوع مضر آن نیز جلوگیری کنند.

با توجه به آثار تعاملات بر مصرف آب، موس و ادموندز برای تبیین الگوهای تجربی حاصل از بررسی داده‌های تغییرات مصرف آب در بریتانیا، خانوارهایی را در نظر گرفتند که مصرف آب خود را تحت تأثیر همسایگان تنظیم می‌کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با توجه به حضور خانواده‌ها در داخل شبکه‌های اجتماعی، فشار همسایه کارکرد کنترل اجتماعی را داشته است و می‌توانسته مانع از مصرف افراطی آب شود زیرا مردم بر یکدیگر نظارت کرده و مجازات و عدم مطلوبیت‌های اجتماعی را تحمیل می‌کردند (Moss and Edmonds, 2005). مطالعات تجربی زیادی ازجمله مطالعه‌ی تمباتا و تاکیوچی در مورد مدیریت منابع آب ژاپن نیز حاکی از آن است که وقتی یک گروه مصرف‌کننده آب در جامعه برای صرفه‌جویی در مصرف همکاری می‌کند، دیگر گروه‌ها نیز تمایل بیشتری به همکاری برای صرفه‌جویی دارند (Tembata and Takeuchi, 2018).

در مدل به‌کاررفته در این مطالعه مصرف‌کننده در یک محیط اجتماعی در قالب کنش و واکنش با محیط و دیگران، رفتار خود را شکل می‌دهد. تعاملات اجتماعی خانوارها در تابع مطلوبیت مصرف‌کننده وارد شده است و برای انجام این کار از مدل‌سازی مبتنی بر عامل استفاده می‌شود.

مدل‌سازی مبتنی بر عامل

مدل‌سازی مبتنی بر عامل، کنش و واکنش‌های بین عوامل و محیط، همچنین تعاملات بین عوامل در یک محیط را شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۱) و اجازه بررسی تعاملات و پویایی‌های غیرخطی در یک سیستم اجتماعی پیچیده را می‌دهد. در مطالعات اولیه مانند مدل جدایی گزینی[3] شلینگ و مدل شوگراسکیپ[4] اپستین و اکستل رویکرد مبتنی بر عامل برای مدل‌سازی فرآیندهای اجتماعی به کار گرفته شد (Schelling, 1971; Epstein And Axtell, 1996). در اقتصاد،

1 - Signaling
2 - Agent based modeling
3 - Segregation
4 - Sugarscape

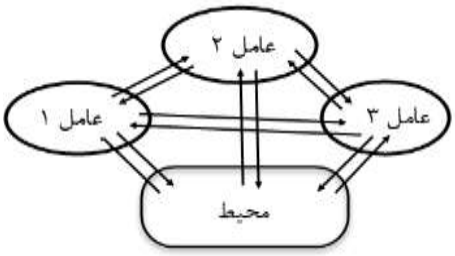
روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، بیشتر از طریق مطالعه اندرسون و همکاران و هالند و میلر مطرح شده است (Anderson et al., 1998; Holland and Miller, 1991). شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، ابزاری برای پاسخ‌دهی به تعاملات عاملان ناهمگن و با عقلانیت محدود را فراهم می‌آورد (خلیلی عراقی و میرزایی قزانی، ۱۳۹۳).

اجزاء یک مدل مبتنی بر عامل به شرح زیر هستند (Wilensky and Rand, 2015).

عامل[1]: شخص، موجود، شیء یا نهادی خودمختار[2] (متمایز) با ویژگی‌ها، اقدامات و اهداف خاص است. عامل‌ها تولیدکننده رفتار هستند و قادر به پذیرش، تعدیل و تغییر رفتارهایشان هستند.

محیط[3]: چشم‌اندازی است که عوامل در آن برهم‌کنش دارند. محیط شامل تمام اجزای سیستم شبیه‌سازی‌شده به‌استثنای عامل‌ها است و می‌تواند هندسی، شبکه‌ای یا مستخرج از داده‌های واقعی باشد.

تعاملات: شامل عمل و عکس‌العمل میان عامل‌ها و نیز میان عامل و محیط است. این تعاملات غیرخطی هستند و لذا رفتار کلی و روی‌هم‌رفته، برابر با مجموع رفتار همه‌ی عامل‌ها نیست. تعاملات از طریق تبادل اطلاعات شکل می‌گیرند.



شکل ۱- ساختار یک مدل ساده‌ی مبتنی بر عامل

شبیه‌سازی مبتنی بر عامل در مدیریت تقاضای آب شهری

به سبب وجود تعاملات و دینامیک‌های غیرخطی موجود در سامانه‌های اجتماعی و اکولوژیکی، مدل‌سازی مبتنی بر عامل، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در میان روش‌های مدل‌سازی مدیریت و پشتیبانی تصمیم‌گیری مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این راستا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مطالعه علی‌مشهدی در مورد شبیه‌سازی و ارزیابی پایداری برنامه‌های مدیریت خشک‌سالی و سناریوهای چندگانه تغییر اقلیم، بارش و تبخیر شهر رالی[4] در کارولینای شمالی، مطالعه بیل در شبیه‌سازی مبتنی بر عامل پاسخ مصرف آب شهری به رشد و توسعه شهری، قانون‌گذاری و اثرات اجتماعی در کلونا[5]ی کانادا، تخصیص بهینه منابع آبی رودخانه فرامرزی نیل در مطالعه دینگ، مدیریت تعارضات منابع آب حوزه سن جواکین[6] در مطالعه اخباری و گریگ، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در مطالعه فرهادی و مقایسه سامانه‌های تخصیص آب در مطالعه ژائو اشاره کرد (Alimashhadi, 2017; Bepple, 2016; Ding et al., 2016; Akhbari and Grigg, 2013; Farhadi et al., 2016; Zhao, 2013). همچنین به‌طور خاص، برخی از مطالعات و پروژه‌ها بر تهیه چهارچوب‌های مبتنی بر عامل در بررسی تقاضای آب خانگی متمرکز بوده‌اند. ازجمله می‌توان به مطالعات آتاناسیادیس و همکاران باهدف تخمین مصرف آب تحت سناریوهای مختلف قیمت‌گذاری، مطالعه لینکولا و همکاران باهدف پرداختن به رفتار پویای ساکنین و فعالیت‌های ساعتی مصرف آب اعضای خانوار، مطالعه چو و همکاران برای ارزیابی پاسخ‌های مصرف‌کنندگان ناهمگن با درنظرگرفتن نفوذ بازارِ فن‌آوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، سیاست‌های تنظیمی، توسعه اقتصادی، آگاهی‌های عمومی و ترجیحات، مطالعه ریکسون و همکاران باهدف اثر شبکه‌ی اجتماعی، ساختار تعرفه‌ها و تقلید فن‌آوری بر رفتار مصرف آب و مطالعه ارنست و همکاران باهدف بررسی مصرف آب خانگی تحت شرایط گرم‌شدن کره زمین اشاره کرد (Athanasiadis et al., 2005; Linkola et al., 2013; Chu, 2009; Rixon et al., 2007; Ernst et al., 2005).

روش‌شناسی تحقیق

دو نوع رفتار مصرفی صرفه‌جویانه یا همکارانه[7] (C) و غیر صرفه‌جویانه یا غیرهمکارانه[8] (NC) برای مصرف‌کنندگان آب خانگی در نظر گرفته می‌شود. محیط اجتماعی فرد و متغیرهای اقتصادی و آب و هوایی به کمک مدل انتشار، تعیین‌کننده میزان مطلوبیت فرد برای گرایش به یکی از این رفتارها است. برای هر فرد یک مصرف بهینه با توجه به محیط اجتماعی وی وجود دارد. فرد متناسب با نوع رفتار خود و میزان مصرف بهینه‌اش، تقاضای خود را در دوره بعد تعدیل می‌کند. نهاد قانون‌گذار نیز قیمت آب را تعیین می‌کند و مایل است که آثار تغییر آن را بر مصرف و نسبت افراد دارای رفتار همکارانه شبیه‌سازی کند. لذا در ادامه، مطلوبیت فرد از انتخاب نوع رفتارش در متن مدل انتشار بحث می‌شود. در قسمت بعد روش محاسبه مصرف بهینه فرد و نحوه تعدیل تقاضای آب وی بیان می‌شود. درنهایت سناریوها و نتایج اجرای مدل تحت هر سناریو بحث می‌شود.

مدل انتشار

در موارد بسیاری، تصمیم‌گیری در مورد پذیرش یک رفتار

1 - Agent
2 - Autonomous
3 - Environment
4- Raleigh
5 - Kelowna

6- San Joaquin watershed
7 - Cooperative, conservative
8 - Non-cooperative, non-conservative

مشخص، شدیداً متأثر از تعداد پذیرندگان هم‌جوار است (Newman, 2003). در مطالعه پیش رو برای مدل‌سازی انتشار رفتار مصرفی آب از مدل انتشار اجتماعی یانگ و مطالعه‌ی ادواردز و همکاران برای مصرف‌کننده آب استفاده شده است (Young, 1999; Edwards et al., 2005).

مطالعات زیادی بر چگونگی تأثیر ساختار اجتماعی در گسترش یک رفتار یا فن‌آوری جدید بناشده‌اند. ازجمله، جکسون و یاریو به مطالعه توزیع (رفتارهایی مانند فراگیری، انتقال فن‌آوری و نیز اطلاعات) در یک شبکه‌ی اجتماعی می‌پردازد(Jackson and Yariv, 2007). مشابه کار یانگ، این مطالعه یک مدل انتخاب دودویی[1] با دو عمل A و B را در نظر می‌گیرد. عامل‌ها رفتار جدید را می‌پذیرند تنها اگر برای آن‌ها انجام آن ارزشمند به نظر برسد و این به هزینه و فایده‌ی عمل و اینکه چه تعداد از همسایگان عامل، آن رفتار را پذیرفته‌اند، بستگی دارد.

مفروضات

فرض می‌شود تعداد N عامل خانوار وجود دارند که شانس و یا توان انتخاب دو نوع رفتار مصرفی (C و NC) آب را دارند. خانوارهای با رفتار هم کارانه، صرفه‌جو و دلسوز منابع هستند و برعکس نوع دیگر، در مصرف آب دقت بیشتری می‌کنند و در صورت امکان مصرف خود را کاهش می‌دهند. فرض می‌شود که نوع رفتار هر فرد در هر دوره زمانی از سه عامل تأثیر می‌پذیرد: الف) رفتار خانوار در دوره‌ی قبل ب) رفتار همسایگان در دوره‌ی قبل و ج) عوامل برون‌زای دوره‌ی جاری. هر خانوار یک شبکه اجتماعی شامل خانوارهای همسایگی‌اش را دارد که وقتی از رفتار آنان پیروی می‌کند، یک مطلوبیت اجتماعی مثبت دریافت می‌دارد (شکل۲).

نوع رفتار مصرفی

برای تعیین نوع رفتار مصرفی، با توجه به شبکه اجتماعی که عامل در آن قرار دارد، توابع مطلوبیت زیر فرمول‌بندی می‌شوند.

$$U_{i,n+1}\ (C \to C) = a \times V(i,C)_n + MF_{i,n+1} \quad (۱)$$

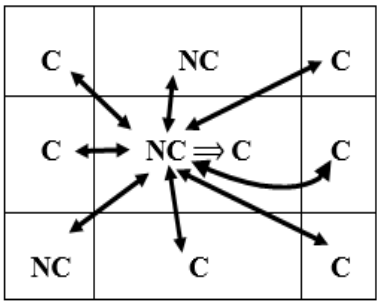
$$U_{i,n+1}\ (C \to NC) = b \times V(i,NC)_n \quad (۲)$$

$$U_{i,n+1}\ (NC \to C) = a' \times V(i,C)_n + MF_{i,n+1} \quad (۳)$$

$$U_{i,n+1}\ (NC \to NC) = b' \times V(i,NC)_n \quad (۴)$$

$$U^*_{i,n+1}(C\ or\ NC \to C) = 1 \quad (۵)$$

معادلات ۱ تا ۴، مطلوبیت‌های ناشی از حفظ یا تغییر رفتار خانوار را نشان می‌دهند. به‌عنوان‌مثال $U_{i,n+1}\ (C \to C)$ مطلوبیت عامل i با رفتار C در دوره‌ی جاری، به سبب حفظ رفتارش در دوره بعد را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تأثیر شبکه اجتماعی (همسایگان) بر حفظ یا تغییر رفتار یک عامل (منبع: نویسنده)

در این معادلات a، b، a' و b' پارامترهای مدل هستند. $V(i,C)_n$ و $V(i,NC)_n$ به ترتیب نسبت همسایگان عامل i با رفتار C و NC هستند که نشانگر اثر رفتار همسایگان بر رفتار یک عامل است. جزء اول سمت راست معادلات فوق، بیانگر فشار اجتماعی است. جزء اصلاح[2] $MF_{i,n+1}$ آثار سایر عوامل بر انتخاب رفتار خانوار است و فشار به سمت رفتار C را اندازه‌گیری می‌کند. در حالاتی که جزء اصلاح مقدار صفر باشد، عامل تنها از طریق شبکه اجتماعی خودش متأثر می‌شود. همچنین معادله ۵ برای زمانی به کار می‌رود که نهاد قانون‌گذار با وضع قانون با هر اهرم دیگری، شخص را ملزم به رفتار C کند (Akhbari and Grigg, 2015). همچنین برای حالاتی مانند افت فشار آب که شخص فارغ از قیمت و دیگر متغیرها، مجبور به انتخاب رفتار C را خواهد شد.

در این مدل رویکرد زیر برای جزء اصلاح پیشنهاد می‌شود.

$$MF_{i,n+1} = \alpha_1 * X_{n+1} + \alpha_2 * Y_{i,n+1} + \alpha_3 * Z_{n+1} \le 1 \quad (۶)$$

$\boldsymbol{X_{n+1}}$: اثر تبلیغات بر رفتار مصرفی خانوار

$\boldsymbol{Y_{i,n+1}}$: نسبت هزینه‌های مصرف آب به درآمد برای خانوار i در دوره n+1 می‌باشد.

$$Y_{i,n+1} = \frac{C_{i,n+1}}{I_{i,n+1}} \quad (۷)$$

$C_{i,n+1}$ هزینه مصرف آب خانوار (تابعی از قیمت و مقدار آب مصرفی) است و $I_{i,n+1}$ نیز درآمد خانوار است.

$\boldsymbol{Z_{n+1}}$: اثر میزان بارش بر رفتار مصرفی خانوار را نشان می‌دهد.

خانوار با رفتار C یا NC در یک دوره، با توجه به حداکثرسازی توابع مطلوبیت ۱ تا ۴ تصمیم به حفظ یا تغییر رفتار می‌گیرد.

$$\begin{cases} \text{Max} \\ U_i\ (C \to C) \\ U_i\ (C \to NC) \end{cases} \qquad \begin{cases} \text{Max} \\ U_i\ (NC \to C) \\ U_i\ (NC \to NC) \end{cases} \quad (۸)$$

ممکن است یک شخص به‌صورت خودکار، نوع رفتار C یا NC را

1 - Binary

2 - Modification Factor

این‌گونه انتخاب نکند. اتخاذ نوع رفتار توسط فرد، علاوه بر مطلوبیت اجتماعی، می‌تواند از وقایع تصادفی نیز متأثر شود. لذا احتمالات پذیرش مؤثر یک رفتار از بین C یا NC برای هر فردی که در ابتدا از رفتار نوع C یا NC پیروی می‌کند، به‌صورت تابعی لجستیکی[1] از تفاوت بین پاداش‌های ناشی از دو رفتار است که از طریق معادلات ۱۲-۹ محاسبه می‌شود (Edwards et al., 2005)، به این صورت که اگر فردی در ابتدا از رفتار C تبعیت کند، احتمال پذیرش رفتار C یا NC مطابق معادلات ۱۰-۹ تعریف می‌شود.

$$P\left(i\ chooses\ \underset{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to C))}}{C/C}\right)= \frac{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to C))}}{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to C))}+e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to NC))}} \quad (۹)$$

$$P\left(i\ chooses\ \underset{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to NC))}}{NC/C}\right)= \frac{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to NC))}}{e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to C))}+e^{(\beta U_{i,n+1}(C\to NC))}} \quad (۱۰)$$

همچنین اگر فردی در ابتدا از رفتار NC تبعیت کند، احتمال پذیرش رفتار C یا NC به‌صورت معادلات ۱۲-۱۱ می‌شود.

$$P\left(i\ chooses\ \underset{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to C))}}{C/NC}\right)= \frac{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to C))}}{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to C))}+e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to NC))}} \quad (۱۱)$$

$$P\left(i\ chooses\ \underset{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to NC))}}{NC/NC}\right)= \frac{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to NC))}}{e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to C))}+e^{(\beta U_{i,n+1}(NC\to NC))}} \quad (۱۲)$$

به کمک این معادلات انتخاب‌های رفتاری هر خانوار برای هر دوره با توجه به‌احتمال پذیرش رفتار C یا NC، بر اساس نوع رفتار دوره قبل تعیین می‌شود. وابستگی بیشتر یا کمتر انتخاب نهایی به مطلوبیت اجتماعی که مربوط به نا اطمینانی در تصمیم است، به‌وسیله پارامتر β لحاظ می‌شود.

توضیحاتی در مورد پارامتر β

به‌صورت نظری β می‌تواند در بازه $(-\infty,+\infty)$ باشد. ملاک انتخاب این پارامتر فروض محقق در مورد میزان و درجه‌ی عقلانیت مصرف‌کنندگان در انتخاب است. برای درک بهتر، می‌توان یک فرد نوعی را با این فرض در نظر گرفت که در دوره‌ی قبل رفتار هم کارانه داشته است. همچنین فرض شود که مقادیر مطلوبیت ناشی از حفظ رفتارش در دوره‌ی جاری برابر با ۰/۷ (بر اساس معادله ۱) و مطلوبیت ناشی از تغییر رفتارش به غیرهمکارانه در دوره‌ی جاری برابر با ۰/۳ (بر اساس معادله ۲) است. مقادیر احتمال حفظ (بر اساس معادله ۹) یا تغییر رفتار (بر اساس معادله۱۰) این فرد مجازی برحسب مقادیر مختلف β در دامنه $[-25,25]$ در شکل ۳ محاسبه شده است. مقادیر منفی β برای این شخص منطقی نیستند زیرا به این معنی است که انتخاب نهایی شخص در اتخاذ رفتار، با مطلوبیتی که از شبکه‌ی اجتماعی به دست آورده نسبت عکس دارد و تداعی‌گر شخصی اجتماع ستیز و حتی غیر عقلایی است. لذا بازه‌ی منطقی برای β به‌صورت $[0,+\infty)$ است. در حالتی که β برابر با صفر باشد، اتخاذ رفتار در هر دوره، ارتباط مثبت و یا منفی با مطلوبیت اجتماعی کسب‌شده ناشی از هر رفتار ندارد و فرد کاملاً تصادفی با احتمال $1/2$ رفتار هم کارانه و احتمال $1/2$ غیرهمکارانه را در پیش می‌گیرد و در اتخاذ رفتارش، نسبت به محیط اجتماعی خود و سایر متغیرهای اثرگذار بر مطلوبیت رفتاری‌اش بی‌تفاوت عمل می‌کند. با افزایش β فرد با احتمال بیشتری سعی در انتخاب رفتاری دارد که مطلوبیت بیشتری برایش به همراه می‌آورد. برای مقادیر مثبت و بزرگ β فرد رفتار حداکثر کننده مطلوبیت مطابق با معادله ۸ را در پیش می‌گیرد.

مصرف بهینه متأثر از شبکه اجتماعی

با مشخص شدن نوع رفتار خانوار، تقاضای آب او در دوره بعد با توجه به ویژگی‌های رفتاری‌اش، تعدیل می‌شود. قبل از ورود به تقاضای خانوار، مصرف بهینه یک فرد متأثر از شبکه اجتماعی وی تعریف خواهد شد. افراد هرروز تحت تأثیر کسانی هستند که تلاشی برای تأثیر گذاشتن روی آن‌ها نمی‌کنند. همچنین افراد به‌شدت تحت تأثیر هنجارهای مصرفی مربوط به گروه قرار می‌گیرند (Thaler and Sunstein, 2008).

یک فرضیه پیشنهادی با اقتباس از مطالعه یوان و همکاران، به این صورت است که برای هر خانوار، یک مصرف بهینه‌ی D_i^* با توجه به مصرف شبکه اجتماعی‌اش وجود دارد. زمانی که تعداد v همسایه وجود داشته باشد، مصرف بهینه، با حل مسئله کمینه‌سازی زیر به دست می‌آید (Yuan et al., 2014).

$$Min\ \sum_{k=1}^{v} w(k)\sqrt{\left(D_i^*-D_k\right)^2+(I_i-I_k)^2} \quad (۱۳)$$

$$s.t\ \ min\{D_i,D_k\}\le D_i^*\le max\{D_i,D_k\}$$
$$k=1,2,..,v$$

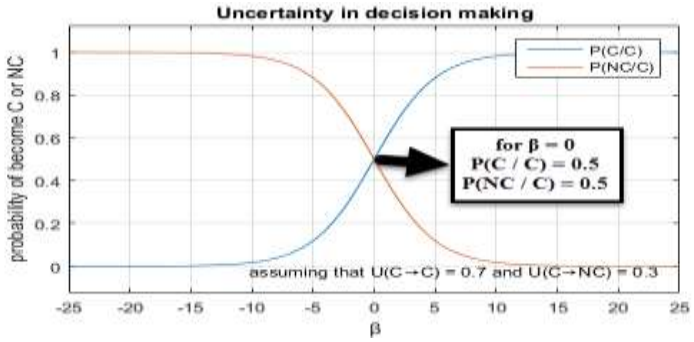
D_k: مصرف سرانه‌ی آب خانوار در همسایگی؛ I_i: درآمد خانوار؛ I_k: درآمد خانوار در همسایگی

$w(k)$ ضریب وزنی است. یک عامل، از همسایه با تفاوت بیشتر در درآمد سرانه، کمتر متأثر می‌شود؛ یعنی خانوار با درآمد بالاتر، آثار ضعیف‌تری بر خانوار با درآمد کمتر دارد ؛ لذا $w(k)$ را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد.

$$w(k)=\frac{max\{|I_j-I_i|\}-|I_k-I_i|}{max\{|I_j-I_i|\}-min\{|I_j-I_i|\}} \quad (۱۴)$$

$$j=1,2,\dots,v$$

1 - Logistic function



شکل۳- نا اطمینانی شخص در انتخاب رفتار(منبع: تحقیق حاضر)

تقاضای آب خانوار

مدل فرض می‌کند که عوامل با توجه به مطلوبیت‌های دریافتی از شبکه اجتماعی خود، در هر دوره درصدی از شکاف بین مصرف خود و مصرف بهینه را جبران می‌کنند. لذا مصرف سرانه خانوار i در هر دوره بسته به C یا NC بودن او در دوره‌ی قبل و تصمیم وی برای اتخاذ رفتار دوره‌ی پیش رو و مطلوبیت ناشی از آن تعدیل می‌شود. این تعدیل به‌صورت معادلات ۲۲-۱۵ در جدول ۱ انجام می‌گیرد.

جدول ۱- توابع تعدیل تقاضا

	تقاضا	شکاف بین مصرف و مصرف بهینه	رفتار اتخاذی خانوار در دوره t+1	رفتار اتخاذی خانوار در دوره t
(۱۵)	$D_i^{t+1} = D_i^t - U_i^{t+1}(C \to C) \times (D_i^t - D_i^{*t}) + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} \geq 0)$	C	C
(۱۶)	$D_i^{t+1} = D_i^t + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} < 0)$	C	C
(۱۷)	$D_i^{t+1} = D_i^t + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} \geq 0)$	NC	C
(۱۸)	$D_i^{t+1} = D_i^t - U_i^{t+1}(C \to NC) \times (D_i^t - D_i^{*t}) + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} < 0)$	NC	C
(۱۹)	$D_i^{t+1} = D_i^t - U_i^{t+1}(NC \to C) \times (D_i^t - D_i^{*t}) + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} \geq 0)$	C	NC
(۲۰)	$D_i^{t+1} = D_i^t + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} < 0)$	C	NC
(۲۱)	$D_i^{t+1} = D_i^t + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} \geq 0)$	NC	NC
(۲۲)	$D_i^{t+1} = D_i^t - U_i^{t+1}(NC \to NC) \times (D_i^t - D_i^{*t}) + \alpha(Tem^{t+1} - Tem^t)$	if $(D_i^t - D_i^{*t} < 0)$	NC	NC

Tem^t دمای هوا در دوره t و α نیز ضریب تعدیل دما است. این معادلات، تغییرات مصرف افراد (برای حالت‌های مختلف رفتاری و میزان مصرف بهینه) را بر اساس مطلوبیت‌های به‌دست‌آمده از تغییر یا حفظ رفتار، مصرف دوره‌ی قبل و تغییرات دما مدل‌سازی می‌کنند. در تفسیر این معادلات، فرد دارای رفتار C در دوره t+1 همواره تمایل به حفظ یا کاهش مصرف خود نسبت به دوره t دارد و درصورتی‌که مصرفش بیشتر از مصرف بهینه باشد، درصدی از این فزونی را جبران خواهد کرد. این جبران متناسب با میزان مطلوبیت کسب‌شده از معادلات ۵-۱ خواهد بود.

به‌عنوان‌مثال معادله‌ی ۱۵ به این معنی است که فردی با رفتار C در دوره‌ی قبل که بنا به معادلات ۵-۱ در دوره جاری تصمیم به حفظ این رفتار گرفته و همچنین میزان مصرفش در دوره قبل بیش از مصرف بهینه‌اش بوده است، سعی در کاهش شکاف مصرف خود با مصرف بهینه را دارد که این کاهش متناسب است با میزان مطلوبیتی که از اتخاذ رفتار C در دوره جاری به دست می‌آورد. همچنین فرد دارای رفتار NC همواره تمایل به حفظ یا افزایش مصرف خود دارد و درصورتی‌که مصرفش کمتر از بهینه باشد، درصدی از این کاهش را جبران خواهد کرد؛ مانند حالت قبل، این جبران نیز متناسب با میزان مطلوبیت کسب‌شده از معادلات ۵-۱ خواهد بود.

شبیه‌سازی و اجرای مدل

داده‌ها و معیار کالیبراسیون[1] مدل

داده‌های مورداستفاده در این مطالعه از مرکز آمار ایران، سالنامه-

1 - Calibration

های آماری شهرداری شیراز، داده‌های دفتر برنامه و بودجه شهرداری شیراز، سازمان هواشناسی کشور و اداره آب و فاضلاب شهر شیراز به‌دست‌آمده‌اند. اطلاعات ۱۰۰۰ مشترک آب خانگی در نواحی مسکونی شهر شیراز استفاده شده است. در هر سلول جغرافیایی مربعیِ ۳۰۰ در ۳۰۰ متری، یک خانوار به‌عنوان یک عامل در نظر گرفته می‌شود و نماینده‌ی تمام مصرف‌کنندگان ساکن در آن جغرافیا است. داده‌های موجود به دلیل کم‌بودن تعداد دوره‌های در دسترس به دو قسمت داده‌های مربوط به کالیبراسیون و داده‌های اعتبارسنجی[1] تقسیم می‌شوند. لذا داده‌های سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۴ برای فرآیند کالیبراسیون و داده‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷ برای بررسی اعتبار یابی و صحت‌سنجی مدل به کار می‌روند.

پس از تعیین و تعریف عامل‌ها و همسایگی، به کمک داده‌های واقعی پارامترهای مدلِ طراحی‌شده برای پیش‌بینی مصرف آب کالیبره می‌شوند. هدف از کالیبراسیون، انتخاب یک بردار از پارامترهای مجهول به گونه ایست که مدل بهترین تطابق با دنیای واقعی را داشته باشد. لذا از معیارهایی برای انتخاب پارامترهای مطلوب استفاده می‌شود. در مدل‌های پیش‌بینی مصارف آب و مدل‌های هیدرولوژیکی یک یا چند تابع هدف که بیانگر شباهت مقادیر شبیه‌سازی و مقادیر مشاهده‌شده است، باید بهینه شوند. رایج‌ترین آن‌ها، مجموع مربعات خطا، ضریب تعیین (R^2)، کارایی ناش-ساتکلیف[2] (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطا و خطای نسبی هستند (Akhbari, 2012). مطالعه‌ی حاضر، حداقل کردن ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را به‌عنوان معیار به کار می‌برد و متوسط مصرف سرانه‌ی آب در یک سال برحسب مترمکعب مبنای محاسبه‌ی خطا است.

پارامترهای مدل:

دو نوع پارامتر در مدل وجود دارد. برخی از آن‌ها (جدول ۲) از مطالعات قبلی شامل ادواردز و همکاران، اخباری و دربندساری و همکاران به دست می‌آیند (Edwards et al., 2005; Akhbari, 2012; Darbandsari et al., 2017) و برخی دیگر (جدول ۳) در فرآیند کالیبراسیون.

کالیبراسیون مدل

با توجه به جدول ۳، چیدمان‌ها و ترکیب‌های زیادی از پارامترهای مجهول وجود دارد. اجرای فرآیند کالیبراسیون و صحت سنجی به کمک کد نویسی در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) صورت گرفته است. الگوریتم تهیه‌شده به گونه ایست که ابتدا هرکدام از ترکیبات مختلف پارامترها را وارد فرآیند شبیه‌سازی می‌کند. لذا در هر دوره مجموعه‌ای از داده‌های مصارف عامل‌ها به دست می‌آید. با میانگین‌گیری از این داده‌ها، مصرف متوسط در هر دوره به دست می‌آید. پس‌ازآن خطای RMSE بین دو سری داده‌های تولیدی مدل و داده‌های واقعی محاسبه می‌شود.

در مرحله بعد، الگوریتم یادشده، ۵۰ مدل با کمترین خطای RMSE را از بین این مدل‌ها انتخاب می‌کند. این مدل‌های منتخب نیز هرکدام برای مجموعه داده‌های صحت سنجی اجرا می‌شوند و RMSE مربوط به آن‌ها محاسبه می‌شود. درنهایت بهترین عملکرد، به‌عنوان مجموعه‌ی پارامتر منتخب نهایی و خروجی الگوریتم نمایش داده می‌شود. به این صورت فرآیند کالیبراسیون و صحت سنجی انجام می‌گیرد و مدلی با پارامترهای تعیین‌شده در جدول ۴ به‌عنوان مدلی که رفتار مصرفی آب شرب شهر شیراز را بهتر از دیگر مدل‌ها توصیف می‌کند (شکل ۴)، حاصل می‌شود.

پیش‌بینی سناریوهای مختلف

نهاد قانون‌گذار (مانند شرکت آب و فاضلاب و وزارت نیرو) می‌تواند با تعیین قیمت آب بر رفتار خانوارها اثر بگذارد. تأثیر و انعکاس هر سیاست مشخص، به‌وسیله دو شاخص «نسبت تعداد خانوارهای با رفتار صرفه‌جویانه به کل» و «میزان صرفه‌جویی در میزان مصرف آب» مشخص می‌شود. لذا با تعیین پارامترهای مدل در بخش قبل، ادامه‌ی این مطالعه به‌صورت پیش‌بینی روند مصرف و درصد افراد دارای رفتار هم کارانه (مطابق با تعریف مدل از این رفتار) برای سال‌های آتی، در سناریوهای مختلف خواهد بود. فرآیند انجام کار به این صورت است که تحت هر سناریوی مشخص، هر عامل با توجه به مقادیر متغیرها و به کمک معادلات ۵-۱ میزان مطلوبیت دریافتی از شبکه‌ی اجتماع خود را محاسبه می‌کند. آنگاه با توجه به معادله ۸، نوع رفتار مصرفی خود در دوره بعد را انتخاب می‌کند. با مشخص شدن نوع رفتار مصرفی عامل و همچنین میزان مصرف بهینه‌اش (معادلات ۱۴-۱۳) تعدیل تقاضا در دوره‌ی بعد صورت می‌گیرد. این تعدیل مطابق با معادلات ۲۲-۱۵ است. لذا مصرف برای دوره‌ی بعد به دست می‌آید. این فرآیند به‌صورت تکراری برای دوره‌های بعد برای هر فرد صورت می‌گیرد. در هر دوره مقادیر مصرفی همه‌ی افراد بر اساس هر سناریوی معین، برآورد و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود.

مدل کالیبره شده، آماده‌ی کارکرد اصلی خود یعنی اجرای سناریوهای مختلف و پیش‌بینی مصرف متوسط خانوارها است.

نتایج و بحث

سناریوی پایه

این سناریو روند پیش‌بینی مصرف آب در سال‌های آتی را برای حالتی محاسبه می‌کند که هیچ‌کدام از متغیرها در طی دوره

1- Validation
2- Nash-Sutcliffe

شبیه‌سازی تغییر نکنند و میزان آن‌ها برابر با مقدار سال پایان کالیبراسیون و تست (سال ۱۳۹۷) تنظیم شده باشد. پیش‌بینی‌ها برای سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۱۰ صورت گرفته است. در این حالت تداوم پویایی رفتار در خلال الگوی انتشار همچنان ادامه می‌یابد و توضیح‌دهنده‌ی تغییرات مصرف خواهد بود. تغییرات تعداد افراد دارای رفتار همکارانه و همچنین پیش‌بینی تغییرات سرانه‌ی مصرف آب برحسب مترمکعب در سال برای کل افراد، گروه افراد دارای رفتار C و نیز گروه افراد دارای رفتار NC در شکل ۵ نشان داده است.

جدول ۲- پارامترهایی که طبق مطالعات قبلی کالیبره شده‌اند

$a = b' = 0.7$;	$b = a' = 0.3$

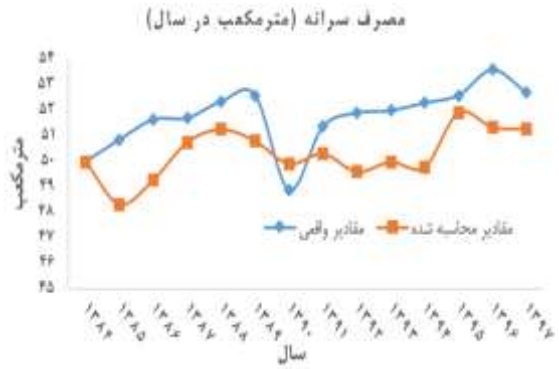
جدول ۳- پارامترهایی که باید در فرآیند کالیبراسیون به دست آیند

پارامتر	دامنه تغییر	مقادیر ممکن
α_1	0–1	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1
α_2	0–10	0, 2, 4, 6, 8, 10
α_3	0–1	0, 0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5
α	0–0.05	0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05
درصد افراد با رفتار C در سال شروع	20–50	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

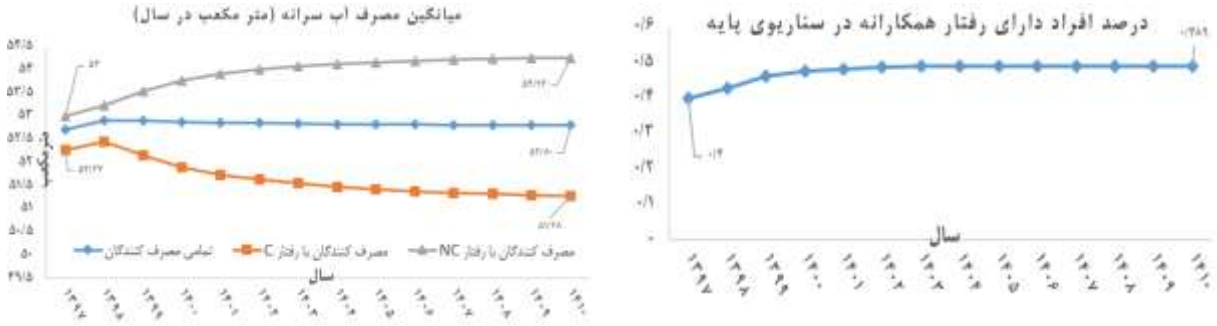
جدول ٤- نتایج فرآیند کالیبراسیون و صحت‌سنجی

$\alpha_1 = 0.2$	$\alpha_2 = 6$	$\alpha_3 = 0.1$	$\alpha = 0.03$
RMSE (validation) = 1.59		RMSE(calibration) = 1.80	

درصد افراد دارای رفتار C در شروع فرآیند کالیبراسیون = ۳۰



شکل ٤- مدل با کمترین خطای کالیبراسیون و صحت سنجی



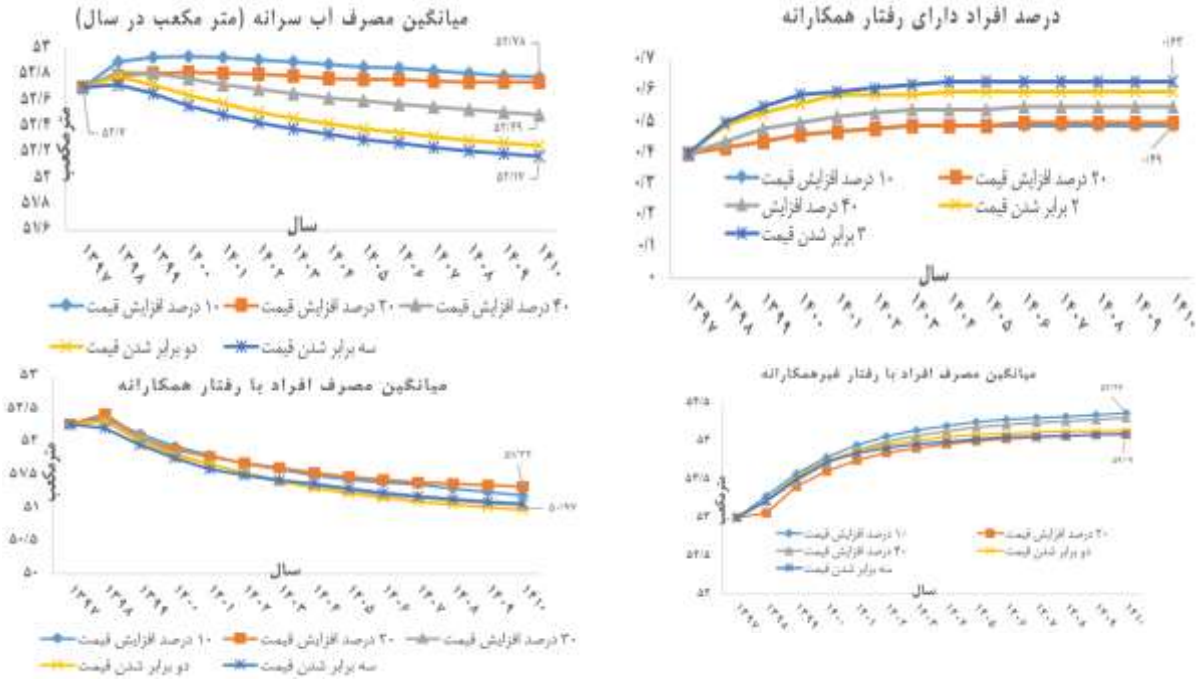
شکل ۵- پیش‌بینی‌های بر اساس سناریوی پایه

آن‌چنان‌که از مدل مشاهده شد، تغییرات مصرف کل برآیند چند عامل است: نسبت افراد با رفتار همکارانه (و به‌تبع آن غیرهمکارانه)، تغییرات مصرف افراد دارای رفتار هم کارانه و همین‌طور تغییرات مصرف افراد دارای رفتار غیرهمکارانه. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، در سناریوی پایه، مصرف افراد دارای رفتار هم کارانه کاهش و مصرف افراد دارای رفتار غیرهمکارانه افزایش خواهد داشت. از طرفی افزایش مصرف افراد غیرهمکارانه بیش از کاهش مصرف افراد با رفتار همکارانه است، بااین‌وجود چون پویایی رفتار بر اساس فرآیند انتشار در جهت بهبود نسبت افراد با رفتار هم کارانه بوده است، میزان میانگین مصرف سرانه تغییرات زیادی ندارد و تا سال ۱۴۰۰ مقدار ۰/۱

مترمکعب (۱۰۰ لیتر) برای هر نفر نسبت به سال ۱۳۹۷ افزایش خواهد یافت. در این سناریو درصد افراد با رفتار همکارانه از ۴۰ درصد در سال ۱۳۹۷ به حدود ۴۹ درصد در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید. میانگین مصرف سرانه‌ی سالیانه برای افراد با رفتار غیرهمکارانه در سال ۱۴۱۰ به میزان ۱/۲۶ مترمکعب (۱۲۶۰ لیتر) بیشتر از سال ۱۳۹۷ خواهد بود. این رقم برای افراد با رفتار همکارانه کاهش تقریباً یک مترمکعب (۱۰۰۰ لیتری) مصرف خواهد بود.

سناریوهای افزایش عمومی قیمت آب

چهارچوب طراحی‌شده، امکان شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت برای هر میزان دلخواه از تغییر قیمت را به سیاست‌گذار می‌دهد. در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای افزایش‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درصدی قیمت نشان داده‌شده است. با افزایش قیمت در شروع فرآیند شبیه‌سازی، درصد افراد دارای رفتار هم کارانه افزایش خواهد یافت به‌گونه‌ای که با افزایش ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درصدی قیمت به ترتیب ۴۹، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۳ درصد خواهند شد. مجدداً یادآوری می‌شود که حتی در صورت عدم‌تغییر قیمت (سناریوی پایه) بازهم افزایش در این رقم اتفاق می‌افتاد اما افزایش قیمت باعث بهبود شاخص فوق به نسبت سناریوی پایه می‌شود. در سناریوی افزایش قیمت ۱۰ درصدی، افزایش افراد دارای رفتار هم کارانه ناچیز و تقریباً برابر با صفر است. بهبود این رقم برای افزایش ۲۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درصدی به ترتیب ۱، ۶، ۱۱ و ۱۴ درصد خواهد بود.



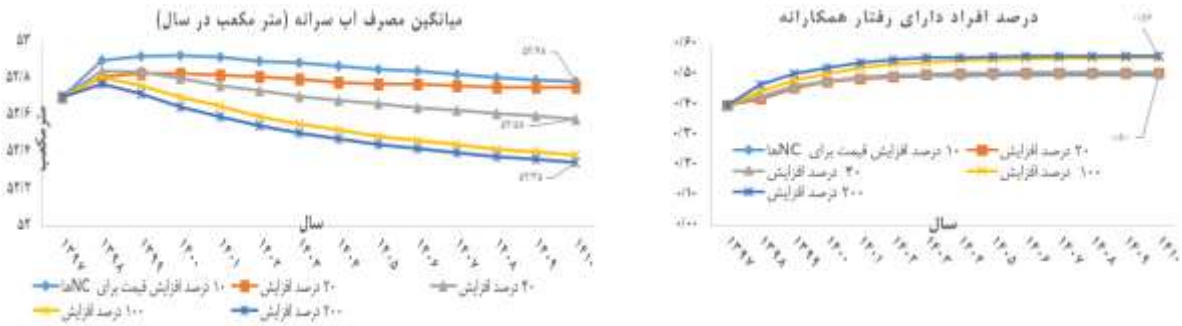
شکل ٦- پیش‌بینی‌های بر اساس سناریوی افزایش قیمت برای همه

مطابق شکل ۹ کاهش میانگین مصرف سرانه نیز برای افزایش‌های ۱۰ و ۲۰ درصدی قیمت در مقایسه با سناریوی پایه ملموس نیست (به ترتیب کاهش ۰/۰۲ و ۰/۰۶ مترمکعب معادل ۲۰ و ۶۰ لیتر در مصرف سال ۱۴۱۰) اما برای درصدهای بالاتر ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درصدی، میزان کاهش مصرف سرانه در سال ۱۴۱۰ در مقایسه با سناریوی پایه به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۵۵، ۰/۶۳ مترمکعب (۳۱۰، ۵۵۰ و ۶۳۰ لیتر) خواهد بود که با توجه با رشد جمعیت کلان‌شهر به بالای ۲ میلیون نفر در سال‌های آتی، این ارقام قابل‌توجه هستند.

افزایش قیمت‌ها صرفاً برای افراد با رفتار غیرهمکارانه

اگر سیاست افزایش قیمت به صورتی اجرا شود که فقط افراد با رفتار غیرهمکارانه (NC) مشمول آن شوند، اثربخشی آن بر میزان کاهش مصرف نسبت به حالتی که همه‌ی مصرف‌کنندگان مشمول افزایش قیمت باشند، کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که با افزایش ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درصدی قیمت‌ها، میزان صرفه‌جویی در مصرف در سال ۱۴۱۰ نسبت به سناریوی پایه در همان سال، به ترتیب ۰/۰۱۶، ۰/۰۴۸، ۰/۲۱۷، ۰/۴۱۲، ۰/۴۵۳ مترمکعب (۱۶، ۴۸، ۲۱۷، ۴۱۲ و ۴۵۳ لیتر) خواهد بود. همچنین درصد افراد دارای رفتار همکارانه نیز

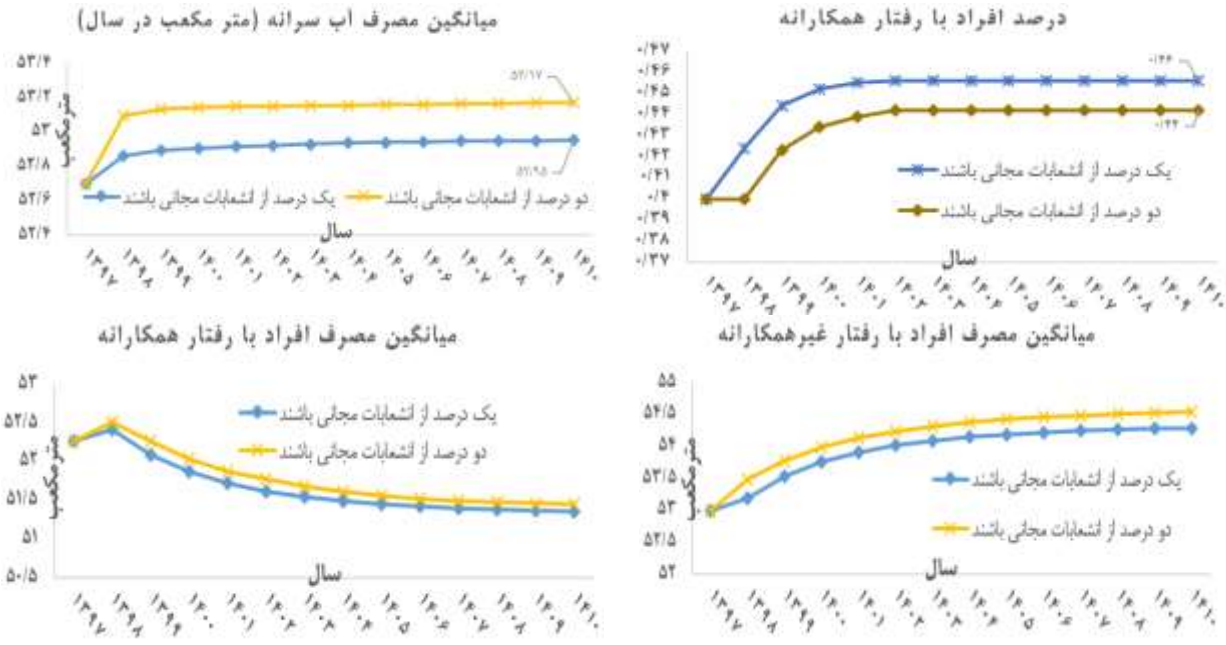
به ترتیب به ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۵ و ۵۶ تمایل پیدا می‌کند. مقادیر متوسط مصرف و روند نسبت افراد با رفتار همکارانه در این سناریو در شکل ۷ قابل‌مشاهده است. همچنین در شکل ۹ میزان صرفه‌جویی در این سناریو نسبت به سناریوی پایه قابل‌مشاهده است.



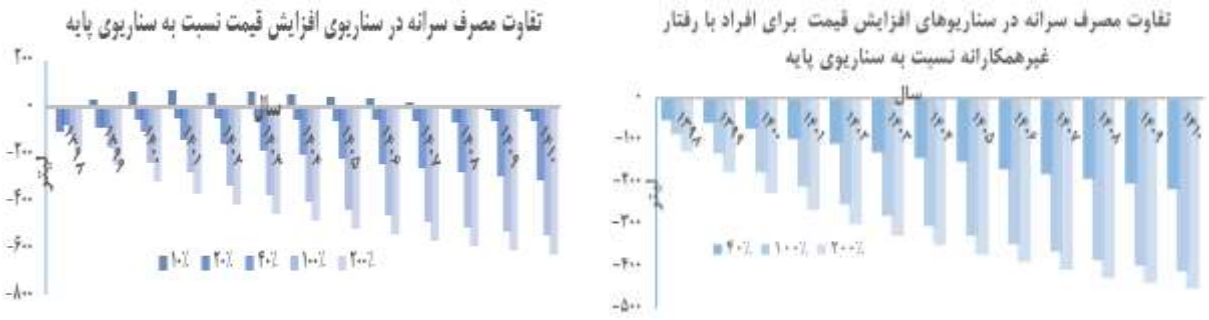
شکل ۷- پیش‌بینی‌های بر اساس سناریوی افزایش قیمت برای افراد با رفتار غیرهمکارانه

انشعابات رایگان

در ایران همواره برخی از گروه‌ها مانند مدارس از پرداخت قبوض آب (و نیز برق و گاز) معاف می‌شوند. همچنین آب‌دزدی و انشعابات غیرمجاز از تخلفاتی است که تأثیر زیادی در هدر رفت آب دارد. مطابق شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، تغییرات یک یا دو درصدی افزایش انشعابات رایگان، میانگین مصرف سرانه‌ی سال ۱۴۱۰ را به ترتیب ۰/۲۵۰ و ۰/۴۷۰ مترمکعب (۲۵۰ و ۴۷۰ لیتر) افزایش خواهد داد. دلیل این امر این است که علاوه بر افزایش مصرف در گروهی که آب رایگان دریافت می‌کنند، در خلال فرآیند انتشار، درصد افراد با رفتار هم کارانه نیز افزایش کمتری نسبت به سناریوی پایه خواهد یافت و از طرف دیگر مصرف افراد هم‌جوار به تبعیت از معادله‌ی مصرف بهینه اجتماعی و تعدیل تقاضا افزایش می‌یابد. لذا لحاظ قیمت صفر برای گروه اندکی از مصرف‌کنندگان منجر به افزایش مصرف سایرین به‌تبع آن گسترش رفتار اسراف‌کارانه در کل سیستم می‌شود. این نتیجه با مطالعاتی مانند مطالعه‌ی تمباتا و تاکیوچی همخوانی دارد (Tembata and Takeuchi, 2018). شکل ۸ روند پیش‌بینی‌ها بر اساس این سناریوها را نشان می‌دهد.



شکل ۸- پیش‌بینی‌های بر اساس سناریوی افزایش انشعابات رایگان (یا آب‌دزدی)



شکل ۹- میزان صرفه‌جویی نسبت به سناریوی پایه

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به شبیه‌سازی اثرات افزایش قیمت برای همه‌ی مصرف‌کنندگان یا بخشی از آن‌ها و همچنین افزایش انشعابات رایگان، بر اساس یک مدل مبتنی بر عامل برای رفتار مصرفی آب خانگی می‌پردازد. همچنین از فرآیند انتشار برای پویایی رفتار مصرفی هم کارانه و غیرهمکارانه استفاده می‌شود. مدل برای مصرف‌کنندگان شهر شیراز کالیبره شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به پایین بودن قیمت فعلی آب و اندک بودن سهم مخارج آب در هزینه‌های خانوار، افزایش‌های اندک (۱۰ و ۲۰ درصدی) قیمت آب نمی‌تواند به تغییر تعداد افراد دارای رفتار هم کارانه کمک چندانی داشته باشد، همچنین اثرات قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش مصرف نخواهند داشت. درصدهای بالاتر افزایش قیمت باعث بهبود دو شاخص ذکرشده خواهند شد. همچنین شبیه‌سازی‌های مربوط به افزایش قیمت فقط برای گروه مصرف‌کنندگان دارای رفتار غیرهمکارانه نشان می‌دهد که اگرچه این سیاست جنبه تنبیهی مناسبی دارد اما اثرگذاری آن بر میزان صرفه‌جویی، در مقایسه با افزایش عمومی قیمت آب کمتر است. همچنین نتایج شبیه‌سازی انشعابات رایگان نشان می‌دهد که افزایش یک و دو درصدی تعداد انشعابات رایگان، منجر به افزایش ۳ و ۵ درصدی تعداد افراد با رفتار هم کارانه نسبت به سناریوی پایه خواهد شد. لذا هرچند در معاف شدن برخی از مصرف‌کنندگان مانند مدارس از پرداخت‌های آب (و برق و گاز) برخی وزارتخانه‌ها مانند وزارت نفت و وزارت نیرو منابع مالی لازم را در اختیار آموزش‌وپرورش می‌گذارند تا در عمل رایگان بودن آن پوشش داده شود، اما این مطلب از جنبه مدل انتشار منجر به بسط رفتار غیرهمکارانه در کل جغرافیای شهر خواهد شد و به‌تبع آن مصرف کل افزایش خواهد یافت. لذا بهتر این است که در این امر بازنگری صورت گیرد.

منابع

خلیلی عراقی، م. و میرزایی قزانی، م .۱۳۹۳. روش‌های مدل‌سازی تطوری در اقتصاد (با تأکید بر عناصر مشترک سازنده آن‌ها). فصلنامه برنامه‌ریزی و بودجه. ۱۹ (۲): ۷۲-۴۷.

Akhbari, M. 2012. Models for Management of Water Conflicts: A Case Study of the San-Juaquin Watershed, California. Ph.D. dissertation. Colorado State.

Akhbari, M. and Grigg, N.S. 2013. A Framework For an Agent-based Model to Manage Water Resources Conflicts. Water Resour Manage. 27 (11): 4039-4052.

Akhbari, M. and Grigg, N.S. 2015. Managing Water Resources Conflicts: Modelling Behavior in a Decision Tool. Water Resour Manage. 29 (14): 5201-5216.

Alimashhadi, A., Shafiee, M.E, Berglund, E. Z. 2017. Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages. Sustainable Cities and Society. 28: 420-434.

Anderson, P. W., Arrow, K. J. and Pines, D. (Eds.) .1988. The Economy as an Evolving Complex System II. Addison-Wesley. Reading. MA.

Athanasiadis, I. N., Mentes, A. K., Mitkas, P. A. and Mylopoulos, Y. A. 2005. A Hybrid Agent-Based Model for Estimating Residential Water Demand. SIMULATION. 81(3):175-187.

Barthelemy, O., Moss, S., Downing, T. and Rouchier, J. 2001. Policy modelling with ABSS: The case of water demand management. Centre for Policy Modelling. Manchester Metropolitan University. Manchester. CPM Report.

Bepple, J. 2016. The application of agent based modeling to simulate residential water use responses to urban growth, regulation, and social influence in Kelowna British Columbia. Canada. (T). University of British Columbia.

Bernedo, M., Ferraro, P.J. and Price, M. 2014. The Persistent Impacts of Norm-Based Messaging and Their Implications for Water Conservation. Jounal of Consum Policy. 37(3): 437-452.

Jackson, MO. and Yariv, L. 2007. Diffusion of Behavior and Equilibrium Properties in Network Games. American Economic Review. 97 (2): 92-98.

Jaeger, C.M. and Schultz, P. W. 2017. Coupling social norms and commitments: Testing the under detected nature of social influence, Journal of Environmental Psychology. 51: 199-208.

Linkola, L., Andrews, C.J. and Schuetze, T. 2013. An Agent Based Model of Household Water Use. Water. 5(3): 1082-1100.

Madani, K., AghaKouchak, A. and Mirchi, A. 2016. Iran's Socioeconomic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. Iranian Studies. 49(6): 997-1016.

Moss, S. and Edmonds, B. 2005. Sociology and Simulation: Statistical and Qualitative cross validation. American Journal of Sociology. 110(4): 1095–1131.

Otaki, Y., Ueda, K. and Sakura, O. 2017. Effects of feedback about community water consumption on residential water conservation. Journal of Cleaner Production. 143: 719-730.

Rixon A., Moglia, M. and Burn, S. 2007. Exploring water conservation behaviour through participatory agent-based modelling .Topics on System Analysis and Integrated Water Resources Management. 73-96.

Schelling, T.1971. Dynamic models of segregation. Journal of Mathematical Sociology. 1: 143-186.

Tembata, K. and Takeuchi, K. 2018. Collective decision making under drought: An empirical study of water resource management in Japan. Water Resources and Economics. 22: 19-31.

Thaler, R.H. and Sunstein, C.R. 2008. Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness. New Haven: Yale University Press.

Wilensky, U., and Rand, W. 2015. An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. Cambridge, MA: MIT Press.

World Bank. 2017. Iran Economic Monitor, spring 2017: Oil-Driven Recovery. Washington, DC .

Young, H.P. 1999. Diffusion in Social Networks. Work. Pap. 2, Brookings Inst. Washington D.C.

Yuan, X.C., Wei, Y.M., Pan, S.Y. and Jin, J.L. 2014. Urban household water demand in Beijing by 2020: an agent-based model. Water Resour Manage. 28 (10): 2967-2980.

Zhao, J., Cai, X. and Wang, Z. 2013. Comparing administered and market-based water allocation systems through a consistent agent-based modeling framework. Journal of Environmental Management. 123: 120-130

Chu, J., Wang, C., Chen, J. and Wang, H. 2009. Agent-based residential water use behaviour simulation and policy implications: A case-study in Beijing city. Water resources management. 23(15): 3267-3295.

Darbandsari, P., Kerachian, R. and Malakpour Estalaki, S. 2017. An Agent-based Behavioral Simulation Model for Residential Water Demand Management: A Case-Study of the Tehran City. Simulation Modelling Practice and Theory. 78:51-72.

Di Baldassarre, G., Wanders, N., AghaKouchak, A., Kuil, L., Rangecroft, S., Veldkamp, T. I. E. and Van Loon, A. F. 2018. Water shortages worsened by reservoir effects. Nature Sustainability. 1(11): 617-622.

Ding, N., Erfani, R., Mokhtar, H. and Erfani, T. 2016. Agent Based Modelling for Water Resource Allocation in the Transboundary Nile River. Water. 8(4): 139.

Downing, T.E., Moss, S. and Pahl-Wostl, C. 2000. Understanding Climate Policy Using Participatory Agent-Based Social Simulation. Lect Notes Comput Sci 1979:198–213

Edwards, M., Ferrand, N., Goreaud, F. and Huet, S. 2005. The relevance of aggregating a water consumption model cannot be disconnected from the choice of information available on the resource. Simul. Model. Pract. Theory. 13 (4): 287-307.

Epstein, J. M. and Axtell, R L. 1996. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. The MIT Press.

Ernst, A., Schulz, C., Schwarz, Nina. and Janisch, S. 2005. Shallow and deep modeling of water use in a large. Spatially explicit coupled simulation system. 3rd Conference of the European Social Simulation Association (ESSA). Koblenz. Germany.

Farhadi, S., Nikoo, M.R., Rakhshandehroo, Gh. R., Akhbari, M. and Alizadeh, M.R. 2016. An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. Agricultural Water Management. 177: 348-358.

Ferraro, P.J., Miranda, JJ. And Price, MK. 2011. The Persistence of Treatment Effects with Norm-Based Policy Instruments: Evidence from a Randomized Environmental Policy Experiment. American Economic Review. 101 (3): 318-22.

Holland, J.H. and Miller, J. H. 1991. Artificial adaptive agents in economic theory. American Economic Review. 81(2): 365-371.

House-Peters, L. a. and Chang, H. 2011. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles. Water Resources Research. 47(5): 5.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 316-328

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۲۸-۳۱۶

Using Agent-Based Modeling to Simulate the Effect of Price Scenarios and Free Branching on the Water Demand

S.F. Moosavi[1], N. Salehnia[2]*, A. Seifi[3], A.R. Asgharpour Masouleh[4]
Recived: Nov.04, 2020 Accepted: Feb.13, 2021

Abstract

Growing population of the cities along with the desire for better welfare and health has increased the water demand. On the other hand, many cities are located in the arid and semi-arid regions with the low rainfall and renewable water resources. Therefore it causes the water crisis. Shiraz is one of the metropolises that is facing this problem and in the warm seasons of the year experiences the drop in water pressure and water outages. Increasing the water supply, regardless of demand management, will exacerbate the crisis. Water pricing has been also one of the most important concerns of policymakers in demand management. Given the importance of this issue and also the role of social interactions among the consumers and the neighboring community network on the water consumption behavior, the present study concentrates on providing an agent-based framework for examining the water demand and changes in consumption behavior (diffusion process). The model has been calibrated for domestic water consumption in Shiraz for the years 2005-2019. Price increase scenarios (for all or only part of the consumers) as well as granting free branches have been simulated for the years 2020-2032. The results show that small increases in water prices do not have significant effect on consumption and cooperative behavior trend. Also, giving free branching to some consumers will intensify non-cooperative behavior among other consumers and increase the consumption sharply.

Keywords: Agent-based modeling, Diffusion process, Free branching, Water demand, Water pricing

1- Ph.D. Candidate, Department of Economics, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran
2 - Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran
3- Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran
4- Assistant Professor, Department of Social Sciences, Faculty of Literature and Humanities, Department of Social Sciences Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran
(*- Corresponding Author Email: n.salehnia@um.ac.ir)