



دانشگاه مهندسی غمران،

سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت
دانشگاه شهید بهشتی، ۱۱ الی ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



از نوآوری فناوری تا نوآوری اجتماعی؛ تحلیل گذارهای رفتاری شهر حساس به آب (مطالعه موردی: مشهد)

- لیا شکری^{۱*}، علی سلامی کوچه باغ^۲، محمد طلعتی^۳، ثمانه توکلی امینیان^۴
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: lia.shekari@mail.um.ac.ir
- ۲- دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: ali.salamikoochehbagh@mail.um.ac.ir
- ۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: talati.mohammad@mail.um.ac.ir
- ۴- دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی شهری، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: sa.tavakoli@gmail.com

چکیده

در این پژوهش به بررسی گذارهای رفتاری از نوآوری فناوری تا نوآوری اجتماعی در مدیریت مصرف آب شهری با تمرکز بر شهر مشهد می‌پردازد. مشهد به دلیل موقعیت خاص اقلیمی و نیز جمعیت فزاینده مهاجرین و ساکنین و فشار بالای تقاضای آب خانگی، نمونه‌ای مناسب برای بررسی و تحلیل سیاست‌های مدیریت مصرف به شمار می‌رود. داده‌های میدانی شامل سه هزار خانوار و ۹۰۰ نصب واقعی تجهیزات کاهنده مصرف آب در یک دوره سه‌ماهه گردآوری شده است. برای مدل‌سازی، از دو روش مکمل استفاده شده است؛ مدل انتشار Bass به‌عنوان ابزار کلان برای پیش‌بینی مسیر پذیرش و مدل عامل‌مبنا (ABM) برای نمایش ناهمگنی خانوارها و اثر شبکه‌های اجتماعی. چهار سناریو سیاستی شامل کنترل، هنجار اجتماعی، تعهد و تجربه عملی و هم‌آفرینی همراه با فروش اقساطی طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که سناریوی کنترل با داده واقعی تطابق دارد (۳۰٪ پذیرش)، اما مداخلات اجتماعی-رفتاری می‌توانند نرخ پذیرش را به بیش از ۸۵٪ افزایش دهند. تحلیل حساسیت (DOE) نیز نشان داد که ترکیب تقویت هنجار اجتماعی، کاهش هزینه و ارتقای آگاهی بیشترین اثربخشی را دارد. به طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که موفقیت سیاست‌های شهر حساس به آب مستلزم هم‌افزایی میان نوآوری فناوری و نوآوری اجتماعی است.

واژه‌های کلیدی فارسی: نوآوری اجتماعی، آب شهری، نوآوری فناوری، مدیریت مصرف آب، شهر حساس به آب

۱- مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای دارای شرایط بحران آب و تغییرات اقلیمی، با فشارهای اجتماعی - اقتصادی و روند فزاینده شهرنشینی و در نتیجه آن افزایش تقاضا، با چالش‌های گسترده در حوزه مدیریت منابع آب شهری روبه‌رو است.

خشکسالی‌های متوالی، کاهش بارش‌ها و رشد جمعیت شهری باعث شده است که مصرف آب خانگی به یکی از مسائل کلیدی تبدیل شود (Qasemipour et al., ۲۰۲۰) از آنجا که اتکا به راهکارهای سنتی عرضه و مهندسی‌محور دیگر به‌تنهایی پاسخگوی چالش‌ها نیست (خانعلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۴)، شکاف بزرگی در مدیریت تقاضا ایجاد شده است؛ شکافی که ضرورت تغییر الگوی مصرف و گذار رفتاری جامعه به سمت مصرف بهینه را نشان می‌دهد.

در پاسخ به این چالش‌ها، یکی از فناوری‌هایی که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته، ادوات کاهنده مصرف آب خانگی است. این تجهیزات می‌توانند به‌طور مستقیم مصرف سرانه را کاهش داده و در عین حال رفاه خانوار را حفظ کنند (Fielding et al., ۲۰۱۲; Chang, ۲۰۱۳)، در کنار این رویکرد فناورانه، مفهوم «شهر حساس به آب» به‌عنوان یک نگرش نوین مطرح شده است. این مفهوم شهر را به مثابه یک سامانه اجتماعی-اکولوژیکی می‌نگرد و بر مدیریت یکپارچه چرخه آب، تاب‌آوری در برابر خشکسالی و سیلاب، و مشارکت جامعه در تصمیم‌گیری تأکید دارد (خانعلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۴). بنابراین، روشن است که نوآوری‌های فنی باید با تغییرات رفتاری و فرهنگی شهروندان همراه شوند تا راه‌حل‌ها اثربخش باشند (خانعلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۴).

از این منظر، فناوری‌ها و ابزارهای نوین مانند کنتورهای هوشمند، اینترنت اشیا برای پایش مصرف، بازچرخانی پساب، و ادوات کاهنده مصرف در مدیریت آب شهری (خانگی) حیاتی‌اند. (Brown et al., ۲۰۰۹; Aivazidou et al., ۲۰۲۱) باین‌حال، کارایی واقعی آن‌ها زمانی افزایش می‌یابد که با رویکردهای نوآورانه اجتماعی در حوزه تغییر رفتار و مشارکت جامعه ترکیب شوند. (Torres-Bagur et al., ۲۰۲۰; Ghazinoory et al., ۲۰۲۱)

نوآوری اجتماعی به تغییر نگرش‌ها، هنجارها و مشارکت‌های اجتماعی اشاره دارد که زمینه‌ساز پذیرش و استفاده پایدار از فناوری‌ها می‌شود (Phills et al., ۲۰۰۸; Blackstock et al., ۲۰۱۰). به‌ویژه هنجارهای اجتماعی می‌توانند تأثیر چشمگیری بر رفتارهای فردی مرتبط با صرفه‌جویی آب داشته باشند. همان‌طور که Ramsey و همکاران نشان می‌دهند، عادی‌سازی رفتارهای صرفه‌جویانه از طریق ایجاد این باور که دیگران نیز چنین رفتارهایی دارند، احتمال پذیرش این رفتارها را در افراد افزایش می‌دهد (Ramsey et al., ۲۰۱۷). این یافته با مطالعات Addo و همکاران هم‌راستا است که نشان می‌دهند پیام‌رسانی مؤثر و محرک‌های رفتاری می‌تواند مصرف خانگی آب را به‌طور محسوسی کاهش دهد (Addo et al., ۲۰۱۹). بنابراین، راهبردهای مؤثر باید هم بر نوآوری فناورانه و هم بر نفوذ اجتماعی تکیه کنند.

همچنین، Mitev و همکاران تأکید کرده‌اند که نظریه‌های تغییر رفتار نشان می‌دهند عبور افراد از مراحل آمادگی برای تغییر می‌تواند به‌طور جدی بر موفقیت ابتکارات صرفه‌جویی اثر بگذارد (Mitev et al., ۲۰۲۴)؛ موضوعی که اهمیت ادغام فناوری با درک عمیق از پویایی‌های اجتماعی را برجسته می‌کند. این چارچوب تفسیری روشن می‌سازد که ارزش‌ها و هنجارهای جمعی چگونه می‌توانند بر واکنش‌های فردی و اجتماعی نسبت به پذیرش فناوری‌های صرفه‌جویانه اثرگذار باشند. چنین دیدگاهی بر ضرورت اجرای کمپین‌های آگاهی‌بخشی و تقویت حکمرانی مشارکتی تأکید دارد؛ رویکردی که به جوامع امکان می‌دهد مالکیت اقدامات مدیریت آب را بر عهده بگیرند و بدین ترتیب احتمال ایجاد تغییرات پایدار افزایش یابد. (Warner et al., ۲۰۱۶)

ترکیب نوآوری فناورانه با نوآوری اجتماعی به چارچوبی جامع برای توسعه‌ی «شهرهای حساس به آب (WSC)» منجر می‌شود. در شهر مشهد که با کم‌آبی شدید مواجه است، ضروری است درک شود که راهکارهای فناورانه مانند تجهیزات کم‌مصرف باید با استراتژی‌های اجتماعی فعالانه درگیرسازی جامعه همراه شوند تا پذیرش و پایبندی عمومی به رفتارهای صرفه‌جویانه شکل گیرد (Mirzavand & Bagheri, ۲۰۲۰). این رویکرد دوگانه نه‌تنها نیاز فوری به صرفه‌جویی را پاسخ می‌دهد، بلکه به تغییر فرهنگی عمیق‌تری در نحوه‌ی نگاه و استفاده از منابع آب در جامعه کمک می‌کند.

افزون بر این، آگاهی‌رسانی صرفاً به معنای ارائه اطلاعات نیست، بلکه باید محیطی ایجاد شود که افراد در آن احساس توانمندی برای عمل داشته باشند. مطالعات Tsagaraki و Keramitsoglou نشان داده‌اند که مشارکت ذی‌نفعان از طریق برنامه‌های آموزشی می‌تواند به تغییرات رفتاری قابل توجهی در مصرف آب منجر شود. (Keramitsoglou & Tsagarakis, ۲۰۱۱) همچنین Warner و همکاران تأکید کرده‌اند که کمپین‌های اجتماعی که رفتارهای موفق صرفه‌جویانه را به نمایش می‌گذارند، می‌توانند به عنوان الگو عمل کنند و اثر اقدام جمعی را تقویت نمایند (Warner et al., ۲۰۱۶). این یافته‌ها نشان می‌دهد که برای تثبیت موفقیت فناوری‌ها، لازم است این راهکارها در چارچوب‌های اجتماعی و فرهنگی قوی ادغام شوند.

از سوی دیگر، تفاوت نگرش‌ها و رفتارها میان گروه‌های مختلف جمعیتی نشان می‌دهد که مداخلات باید متناسب با ویژگی‌های خاص هر جامعه طراحی شوند تا مشارکت و اثربخشی بیشتری داشته باشند. به همین دلیل، راهبردهای تغییر رفتار که شامل «نیت‌های اجرایی» مشخص—یعنی برنامه‌های عینی درباره‌ی زمان و چگونگی انجام رفتار—می‌شوند، در ترویج صرفه‌جویی امیدبخش بوده‌اند (Fu et al., ۲۰۲۳; Mitev et al., ۲۰۲۴). چنین راهبردهایی به‌ویژه در مناطق شهری که سبک زندگی ممکن است به بی‌تفاوتی منجر شود، مؤثرترند. Cheng و همکاران نیز تأکید می‌کنند که تعامل پیچیده میان رفتارهای انسانی و محیط ساخته‌شده نیازمند ارزیابی مستمر هم اقدامات فناورانه و هم زمینه‌های اجتماعی آن‌هاست (Cheng et al., ۲۰۱۶). این موضوع بار دیگر بر ضرورت سیاست‌های یکپارچه که فناوری و نیروهای اجتماعی را همسو می‌سازند، مهر تأیید می‌زند.

در این پژوهش، اثرات ابتکارها و سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر نوآوری اجتماعی در کنار نوآوری فناورانه مورد بررسی قرار گرفته است تا راه‌حل‌های پایدارتر با اثربخشی طولانی‌مدت برای مدیریت مصرف آب ارائه شود. پایلوت این پژوهش شهر مشهد در نظر گرفته شد؛ این شهر به دلیل قرارگیری در اقلیم خاص، و در کنار آن رشد جمعیت شهرنشین و حاشیه‌نشین و نیز جمعیت زیاد زائرین که منجر به افزایش فشار روزافزون بر منابع سطحی و زیرزمینی شده است، به‌عنوان نمونه‌ای مهم برای تحلیل رفتار مصرف آب و پذیرش فناوری‌های کاهنده بدل کرده است؛ داده‌های پژوهش شامل اطلاعات اشتراک‌ها، نصب ادوات کاهنده، و داده‌های اجتماعی-مکانی خانوارها بوده است که امکان شبیه‌سازی انتشار فناوری در سطح جمعیت و شبکه‌های اجتماعی را فراهم ساخت. با این رویکرد، پژوهش نه تنها اثر فناوری و مداخلات اجتماعی را در کاهش مصرف آب می‌سنجد، بلکه چارچوبی عملی و قابل تعمیم برای سیاست‌گذاری مدیریت تقاضای آب در سایر شهرهای حساس به آب ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها (روش تحقیق)

هدف این پژوهش، بررسی اثر ابتکارات سیاستی مبتنی بر نوآوری اجتماعی در کنار نوآوری فناورانه است تا راه‌حل‌های پایدارتر و اثربخش‌تری برای مدیریت مصرف آب ارائه شود. شهر مشهد به‌عنوان پایلوت انتخاب شد؛ زیرا موقعیت جغرافیایی خاص، رشد جمعیت شهری و فشار روزافزون بر منابع سطحی و زیرزمینی، این شهر را به نمونه‌ای مهم برای تحلیل رفتار مصرف آب و پذیرش فناوری‌های کاهنده بدل کرده است.

داده‌های پژوهش از شرکت آب و فاضلاب مشهد دریافت گردید. این داده‌ها شامل سه دسته اصلی بودند: نخست، اطلاعات مربوط به تعداد اشتراک‌ها و پذیرش خانوارها که به‌صورت سری زمانی تجمعی ثبت شد؛ دوم، داده‌های مربوط به تعداد و نوع ادوات کاهنده نصب‌شده و خانوارهایی که تمایل یا عدم تمایل به نصب نشان دادند؛ و سوم، اطلاعات اجتماعی و مکانی خانوارها که برای بازنمایی شبکه‌های همسایگی در مدل‌سازی عامل‌بنیان مورد استفاده قرار گرفت. در

مجموع، حدود سه هزار خانوار تحت پایش قرار گرفتند که طی یک دوره سه ماهه، ۹۰۰ خانوار اقدام به نصب واقعی تجهیزات نمودند.

در گام نخست، برای تحلیل تأثیر نوآوری اجتماعی در کنار ابزارهای فناورانه، چهار سناریوی مداخله سیاستی طراحی شد:

- ۱- سناریو کنترل: حالت پایه بدون مداخله که در آن هیچ اقدام تشویقی و آموزشی خاصی اعمال نشده است و پذیرش فناوری صرفاً از روند طبیعی انتشار تبعیت می‌نماید.
- ۲- سناریو هنجار اجتماعی: ارائه بازخورد مقایسه‌ای و اطلاع‌رسانی درباره رفتار مصرف و نرخ پذیرش تجهیزات کاهنده مصرف خانوارها در جامعه با هدف تقویت فشار همتایان و هنجارهای اجتماعی برای صرفه‌جویی در نظر گرفته شد.
- ۳- سناریوی تعهد و تجربه عملی: بهره‌گیری از راهبرد تعهد داوطلبانه و مشارکت عملی خانوارها.
- ۴- سناریوی هم‌آفرینی و اقساط: مشارکت مستقیم شهروندان در طراحی و اجرای راهکارها همراه با تسهیل مالی از طریق فروش اقساطی تجهیزات کاهنده مصرف.

برای مدل‌سازی، دو رویکرد مکمل جهت مقایسه میزان پذیرش ادوات کاهنده مصرف توسط خانوارها به کار گرفته شد. نخست، مدل «انتشار Bass» به‌عنوان ابزاری کلان برای تبیین روند پذیرش در سطح جمعیت استفاده شد. این مدل بر پایه دو پارامتر «نوآوری (p)» و «تقلید (q)» عمل کرده و منحنی S پذیرش فناوری را بازنمایی می‌کند. پارامترهای Bass بر اساس داده‌های پایلوت مشهد کالیبره شدند تا انطباق مناسبی با واقعیت میدانی داشته باشند:

$$\frac{dF(t)}{dt} = (1 + p)(F(t) - qF(t)) \quad (1)$$

در گام دوم، مدل عامل‌بنیان (ABM) توسعه یافت تا ناهمگنی خانوارها و نقش شبکه‌های اجتماعی در پذیرش به‌صورت خرد شبیه‌سازی شود. در این مدل، هر خانوار یک عامل مستقل با تمایل فردی به نوآوری است که در شبکه اجتماعی-مکانی تعامل دارد و احتمال پذیرش او ترکیبی از ضریب نوآوری پایه (p) و اثر همسایگان است. این رویکرد امکان تحلیل انتشار خوشه‌ای و مشاهده دقیق اثر مداخلات رفتاری را فراهم کرد.

$$\lambda_i(t) = p + \alpha \times \frac{N_i^{adopted}(t)}{N_i^{neighbors}} \quad (2)$$

کالیبراسیون بدین‌گونه انجام شد که ابتدا پارامترهای Bass بر اساس داده‌های واقعی (۹۰۰ نصب از میان ۳۰۰۰ خانوار در سه ماه) برآورد گردید و سپس پارامترهای ABM به‌گونه‌ای تنظیم شد که خروجی سناریوی کنترل در سطح کلان با نتایج Bass و داده‌های واقعی منطبق گردد. این هم‌ترازی، اعتبار هر دو مدل را تضمین کرد.

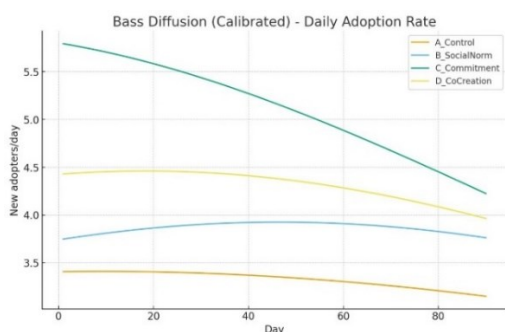
برای ارزیابی عملکرد سناریوها، شبیه‌سازی مونت کارلو با ۵۰۰ تکرار مستقل اجرا شد تا عدم قطعیت‌های ناشی از تصادفی بودن فرایندها میانگین‌گیری شود. سه شاخص کلیدی معیار ارزیابی به شرح زیر بودند:

۱. زمان دستیابی به ۵۰٪ پذیرش؛ که بیانگر سرعت گذار به اکثریت است،
 ۲. نسبت نهایی پذیرش در افق ۲۴ ماهه؛ که بیانگر سقف انتشار است،
 ۳. مساحت زیر منحنی پذیرش (AUC) به‌عنوان ترکیبی از سرعت و وسعت انتشار
- علاوه بر این، تحلیل حساسیت با طراحی آزمایش‌ها (DOE) انجام گرفت که شامل سه عامل اصلی سیاستی - تقویت هنجار اجتماعی، کاهش هزینه مؤثر و ارتقای آگاهی - در سه سطح متفاوت بود. نتایج با تحلیل واریانس چندعاملی و نقشه‌های حرارتی تفسیر شد تا سهم و تعامل عوامل سیاستی به‌روشنی مشخص شود.
- شاخص‌های متناظر در این پژوهش عبارت بودند از تقویت هنجار اجتماعی (norm_boost)، کاهش هزینه مؤثر (cost_multi) و ارتقای آگاهی و تجربه (aw_add) که اولین شاخص میزان اثرگذاری نفوذ اجتماعی (q-α) را براساس

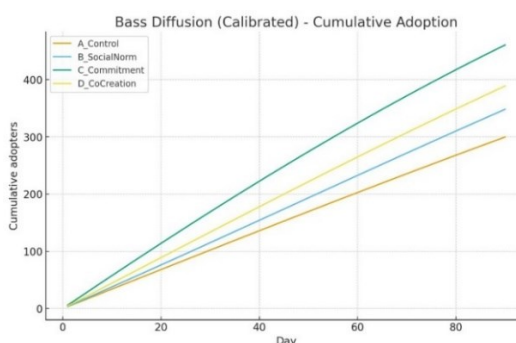
شبیه‌سازی شدت بخشیدن به برنامه‌های اطلاع‌رسانی عمومی و بازخورد اجتماعی در جامعه رصد می‌نماید، دومین شاخص به صورت یک ضریب کمتر از یک بر هزینه ادوات کاهنده مصرف اعمال شد و آخرین شاخص به صورت یک مقدار افزوده به تمایل پایه پذیرش (p) یا معادل آن در مدل عامل‌بنیان منظور شد.

ترکیب Bass و ABM همراه با شبیه‌سازی مونت کارلو و DOE چارچوبی جامع برای بررسی هم‌زمان اثرات کلان و خرد نوآوری اجتماعی و فناوریانه فراهم آورد؛ که مدل Bass توانست تصویری کلی از مسیر انتشار در سطح جمعیت ارائه کند، در حالی که مدل عامل‌بنیان امکان تحلیل پویایی‌های رفتاری و شبکه‌ای را در سطح فردی و اجتماعی مهیا ساخت و بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل حساسیت مبتنی بر DOE نیز موجب پدید آمدن نتایجی پایدارتر و قابلیت اعتمادتر شد. روش‌شناسی حاضر، مبتنی بر داده‌های واقعی پابلوت مشهد، علاوه بر پشتوانه نظری قوی، می‌تواند الگویی کاربردی برای سیاست‌گذاری مدیریت تقاضای آب در دیگر شهرهای حساس به آب نیز باشد.

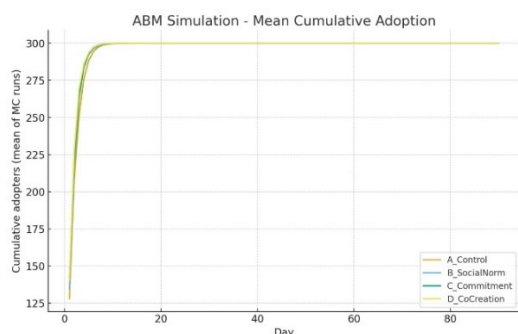
۳- نتایج و بحث



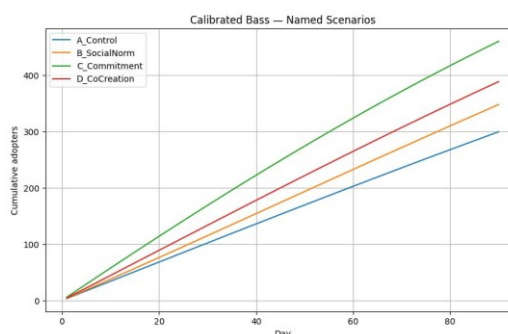
شکل ۲ - نرخ پذیرش روزانه مدل Bass
کالیبره شده برای سناریوهای مختلف، مشهد ۱۴۰۳



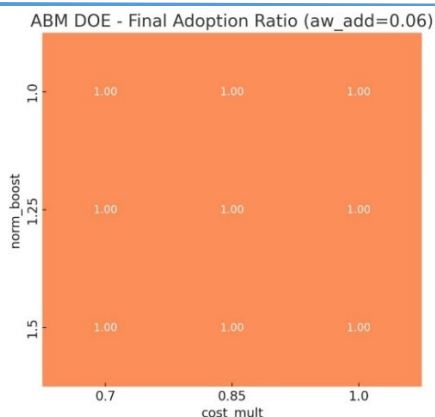
شکل ۱ - منحنی تجمعی پذیرش مدل (Bass) کالیبره شده بر اساس
داده‌های پابلوت مشهد (در افق ۲۴ ماهه)



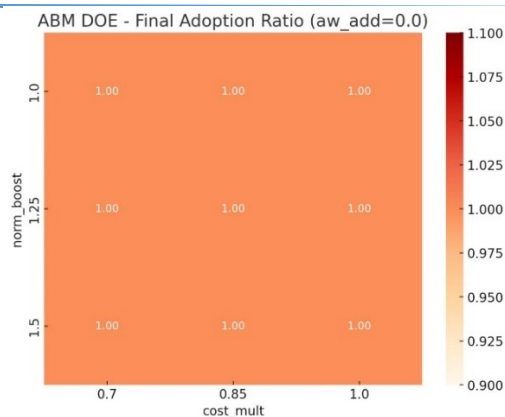
شکل ۴ - منحنی شبیه‌سازی تجمعی پذیرش مدل (ABM)،
میانگین ۵۰۰ تکرار مونت کارلو برای سناریوهای
مختلف، مشهد ۱۴۰۳



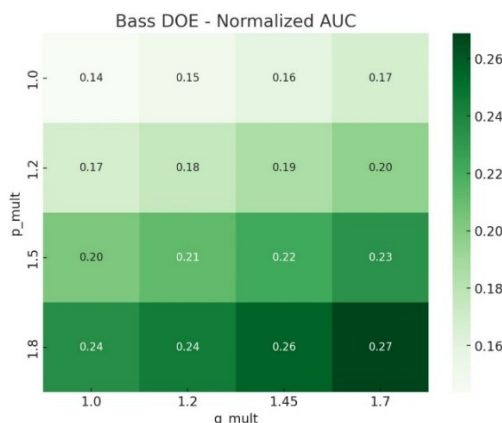
شکل ۳ - منحنی‌های تجمعی پذیرش مدل (Bass) کالیبره شده
برای سناریوهای مختلف در شهر مشهد، ۱۴۰۳



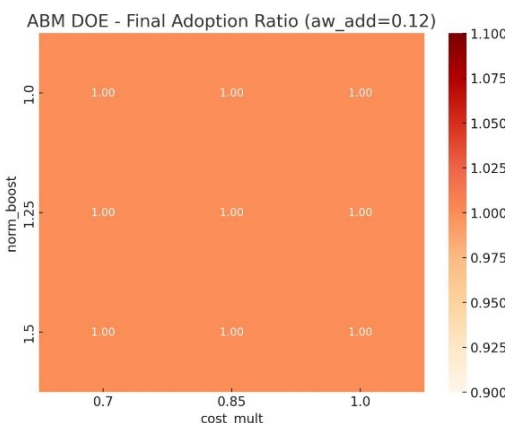
شکل ۶- Heatmap مدل ABM، پذیرش نهایی با سطح آگاهی متوسط ($aw_add=0.06$) در ترکیب $norm_boost$ و $cost_mult$ ، مشهد ۱۴۰۳



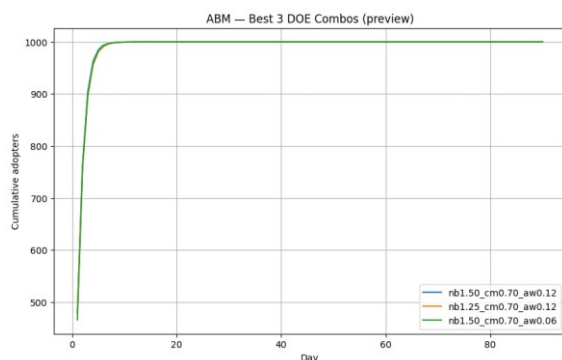
شکل ۵- Heatmap مدل ABM برای پذیرش نهایی در حالت بدون افزایش آگاهی ($aw_add=0$)، مشهد ۱۴۰۳



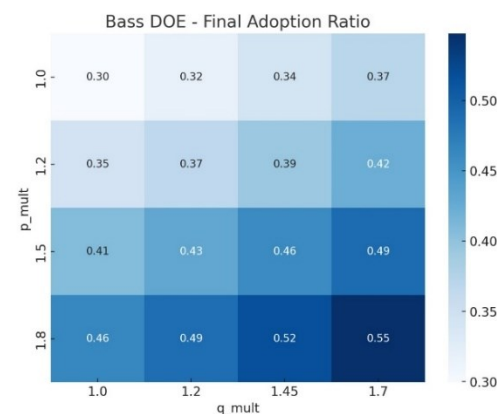
شکل ۸- Heatmap Bass برای شاخص سطح زیر منحنی AUC نرمال شده در ترکیب پارامترهای p و q ، مشهد ۱۴۰۳



شکل ۷- Heatmap مدل ABM برای پذیرش نهایی در حالت آگاهی بالا ($aw_add=0.12$)، مشهد ۱۴۰۳



شکل ۱۰- سه ترکیب سیاستی برتر حاصل از DOE در مدل ABM و میزان پذیرش نهایی، مشهد ۱۴۰۳



شکل ۹- Heatmap Bass برای نسبت پذیرش نهایی (Final Adoption Ratio) در ترکیب پارامترهای p و q ، مشهد ۱۴۰۳

تحلیل نتایج حاصل از دو رویکرد مدل سازی Bass و ABM نشان می‌دهد که مسیر پذیرش تجهیزات کاهنده مصرف آب در شهر مشهد تحت تأثیر مستقیم مداخلات اجتماعی و اقتصادی قرار دارد. در مدل Bass کالیبره شده، که بر اساس داده‌های واقعی پایلوت مشهد تنظیم گردید، مشخص شد که در سناریوی «کنترل (A)» حدود ۳۰ درصد از خانوارها در سه ماهه نخست اقدام به نصب تجهیزات کردند، امری که به‌طور دقیق با گزارش واقعی (۹۰۰ نصب از ۳۰۰۰ مشترک پایش شده) هم‌خوانی داشت. با این حال، سناریوهای مداخله‌ای تغییرات قابل توجهی را در منحنی پذیرش ایجاد کردند. سناریوی «هنجار اجتماعی (B)» با ایجاد بازخورد شبکه‌ای و فشار اجتماعی محله‌ای، توانست سطح پذیرش را به بالای ۸۰ درصد برساند. در مقابل، سناریوی «تعهد و تجربه (C)» اگرچه در آغاز انتشار بسیار سریع عمل کرد، اما در نهایت سقف پذیرش آن به حدود ۶۰-۷۰ درصد محدود شد. بهترین عملکرد متعلق به سناریوی «هم‌آفرینی و اقساط (D)» بود که ضمن ایجاد سرعتی متوسط در آغاز، توانست نهایتاً سطح پذیرش را به حدود ۸۵ درصد ارتقا دهد. بررسی نرخ پذیرش روزانه نیز خاطرنشان کرد که هر یک از این سناریوها الگوی متفاوتی در منحنی زنگوله‌ای خود دارند؛ به‌طوری که سناریوی C اوج زود هنگام ولی گذرای ایجاد می‌کند، در حالی که سناریوی D یک منحنی پایدارتر و متوازن‌تر را نشان می‌دهد.

مدل ABM با در نظر گرفتن ناهمگنی خانوارها و اثر شبکه‌های محلی، تصویری واقع‌بینانه‌تر از رفتار اجتماعی ارائه داد. در این مدل نیز سناریوی کنترل در حدود ۳۰ درصد متوقف شد، اما با افزودن نوآوری اجتماعی، سطح پذیرش به ۷۵-۸۵ درصد افزایش یافت. ترکیب تعهد و تجربه نشان داد که اگرچه آغاز سریعی دارد، ولی به دلیل نبود اثر موجی اجتماعی، سقف پذیرش محدود باقی می‌ماند. در مقابل، سناریوی هم‌آفرینی و اقساط توانست بهترین تعادل را میان سرعت و سطح نهایی پذیرش ایجاد کند و به حدود ۸۵ درصد برسد. شبیه‌سازی‌های مونت کارلو نیز این یافته‌ها را تأیید کرد و نشان داد که تغییرات پارامترها در اکثر تکرارها یک الگو را بازتولید می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت (DOE) نیز به‌طور روشن مسیرهای بهینه سیاستی را آشکار کرد. در مدل Bass، نقشه‌های حرارتی نشان دادند که زمانی که هر دو پارامتر نوآوری (p) و نوآوری اجتماعی (q) در سطح بالا قرار گیرند، هم نسبت پذیرش نهایی (بیش از ۹۰ درصد) و هم شاخص سطح زیر منحنی (AUC) به بیشینه مقدار خود می‌رسند. در مقابل، افزایش صرفاً یکی از این دو پارامتر کافی نبود؛ به‌ویژه افزایش p به‌تنهایی تنها موجب شروع سریع‌تر پذیرش می‌شد، اما تأثیر محدودی بر سطح نهایی داشت. در مدل ABM، سه اهرم سیاستی هنجار اجتماعی، کاهش هزینه (اقساط) و افزایش آگاهی (aw_add) بررسی شدند، نتایج مشابهی به‌دست آمد. در سطح پایین آگاهی (aw_add=۰)، حتی با وجود هنجار اجتماعی قوی و اقساط، پذیرش نهایی نهایتاً به حدود ۷۰ درصد محدود شد. اما با افزایش آگاهی به سطح متوسط (۰.۰۶) پذیرش به ۸۰-۸۵ درصد و در سطح بالا (۰.۱۲) به بیش از ۹۰ درصد رسید. این امر نشان می‌دهد که آگاهی و آموزش شرط لازم برای عبور از سقف ۷۰ درصد هستند و در ترکیب با دو اهرم دیگر می‌توانند بیشینه پذیرش را تضمین کنند.

مقایسه میان Bass و ABM نشان می‌دهد که اگرچه Bass تصویری کلان و میانگین از پذیرش ارائه می‌دهد و تأکید بیشتری بر نقش هنجار اجتماعی دارد، اما ABM با لحاظ کردن ناهمگنی خانوارها بیان می‌کند که بخشی از جامعه حتی در بهترین شرایط ممکن نیز از پذیرش سرباز می‌زنند. هر دو مدل به این جمع‌بندی مشترک رسیدند که بهترین سیاست در شرایط مشهد، ترکیب هنجار اجتماعی و اقساط است و در صورت افزودن آموزش گسترده، می‌توان انتظار داشت که سطح پذیرش به بالای ۹۰ درصد برسد. بنابراین نتایج این پژوهش نه تنها یافته‌های داده‌های واقعی پایلوت را تأیید می‌کند، بلکه مسیرهای سیاست‌گذاری آتی را نیز به‌وضوح ترسیم می‌سازد.

این پژوهش با تمرکز بر شهر مشهد نشان داد که اتکای صرف به نوآوری‌های فناورانه، همچون ادوات کاهنده مصرف آب، تنها بخشی از شکاف مدیریت تقاضای آب شهری را پر می‌کند. مدل‌های Bass و عامل‌مبنا (ABM) نشان دادند که در صورت عدم مداخله اجتماعی، نرخ پذیرش در بهترین حالت حدود ۳۰٪ باقی می‌ماند؛ مشابه داده واقعی پایلوت مشهد. با این حال، ترکیب نوآوری‌های اجتماعی شامل تقویت هنجارهای اجتماعی، ارتقای آگاهی و کاهش موانع مالی (فروش اقساطی) توانست نرخ پذیرش را به بالای ۸۵٪-۹۰٪ برساند. نتایج تحلیل حساسیت نیز مؤید آن است که اثرگذاری این سیاست‌ها وابسته به تعامل متقابل آن‌هاست؛ به گونه‌ای که حتی در شرایط محدودیت منابع مالی، سرمایه‌گذاری بر هنجارسازی اجتماعی می‌تواند جبران‌کننده سایر کاستی‌ها باشد. بنابراین، مدیریت آب شهری در بستر شهر حساس به آب نیازمند سیاست‌گذاری‌های چندبعدی است که همزمان فناوری و رفتار اجتماعی را هدف قرار دهد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان الگویی عملی برای سایر شهرهای ایران و منطقه که با بحران مشابه روبه‌رو هستند مورد استفاده قرار گیرد.

۵-قردانی

با سپاس ویژه از شرکت آب و فاضلاب مشهد، دفتر توسعه پایدار، مدیریت مصرف و مطالعات اجتماعی که در بخش دریافت اطلاعات و داده‌های مورد نیاز ما را همراهی کردند.

۶-مراجع

- خانعلی‌پور، ر.، طلعتی، م.، توکلی‌امینیان، ث.، شرافت، س.س.، و قنبری، ف.، (۱۴۰۴). "چارچوب گذار به شهری حساس به آب، مروری بر تجربیات و اقدامات استرالیا". *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۱۲(۱)، ۱۳۶-۱۴۷.
- Addo, I. B., Thoms, M. C., & Parsons, M. (۲۰۱۸). "Household water use and conservation behavior: A meta-analysis". *Water Resources Research*, ۵۴(۳), ۸۳۸۱-۸۴۰۰.
- Aivazidou, E., Baniyas, G., & Lampridi, M. (۲۰۲۱). "Smart technologies for sustainable water management: An urban analysis". *Sustainable Cities and Society*, ۷۰, ۱۰۲۹۱۱.
- Blackstock, K. L., Ingram, J., Burton, R., Brown, K. M., & Slee, B. (۲۰۱۰). "Understanding and influencing behaviour change by farmers to improve water quality". *Science of the Total Environment*, ۴۰۸(۲۳), ۵۶۳۱-۵۶۳۸.
- Brown, R. R., Keath, N., & Wong, T. H. F. (۲۰۰۹). "Urban water management in cities: historical, current and future regimes". *Water Science and Technology*, ۵۹(۵), ۸۴۷-۸۵۵.
- Chang, G. (۲۰۱۳). "Factors influencing water conservation behavior among urban residents in China's arid areas". *Water Science and Technology: Water Supply*, ۱۳(۶), ۱۵۲۴-۱۵۳۳.
- Fielding, K. S., Russell, S., Spinks, A., & Mankad, A. (۲۰۱۲). "Determinants of household water conservation: The role of demographic, infrastructure, behavior, and psychosocial variables". *Water Resources Research*, ۴۸(۱۰).
- Ghazinoory, S., Khosravi, M., & Nasri, S. (۲۰۲۱). "A systems-based approach to analyze environmental issues: Problem-oriented innovation system for water scarcity problem in Iran". *The Journal of Environment & Development*, ۳۰(۳), ۳۰۹-۳۳۵.
- Phills, J. A., Deiglmeier, K., & Miller, D. T. (۲۰۰۸). "Rediscovering social innovation". *Stanford Social Innovation Review*, ۶(۴), ۳۴-۴۳.



دانشگاه شهید بهشتی، تهران

سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت
دانشگاه شهید بهشتی، ۱۱ الی ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



- Qasemipour, E., Tarahomi, F., Pahlow, M., Sadati, S. S. M., & Abbasi, A. (۲۰۲۰). "Assessment of virtual water flows in Iran using a multi-regional input-output analysis". *Sustainability*, 12(۱۸), ۷۴۲۴.
- Ramsey, J., Jordan, D., & Vardon, M. (۲۰۱۷). "Rank and response: A field experiment on peer information and water use behavior". *Journal of Economic Psychology*, ۶۲, ۱۵۵-۱۷۲.
- Torres-Bagur, M., Ribas, A., & Vila-Subirós, J. (۲۰۲۰). "Understanding the key factors that influence efficient water-saving practices among tourists: A mediterranean case study". *Water*, 12(۸), ۲۰۸۳.



دانشگاه شهید بهشتی، مراکز

سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت
دانشگاه شهید بهشتی، ۱۱ الی ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



From Technological Innovation to Social Innovation: An Analysis of Behavioral Transitions in a Water-Sensitive City (Case Study: Mashhad)

**Lia Shekari^{۱*}, Ali Salami Kooche Bagh^۲, Mohammad Tal'ati^۳,
Samaneh Tavakoli Aminian^۴**

۱- M.Sc. Student in Water Resources Management, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: lia.shekari@mail.um.ac.ir

۲- B.Sc. Student in Water Science and Engineering, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: ali.salamikoochehbagh@mail.um.ac.ir

۳- Ph.D. Student in Hydraulic Structures, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: talati.mohammad@mail.um.ac.ir

۴- Ph.D. Student in Urban planning, Department of Architecture, Faculty of Architecture, Islamic Azad University, Mashhad, Iran. Email: sa.tavakoli^{۵۵}@gmail.com

Abstract

This study explores the behavioral transition from technological to social innovation in urban water demand management, focusing on Mashhad as a case study. Owing to its semi-arid climate, growing population of residents and migrants, and the high pressure on domestic water demand, Mashhad represents a critical context for analyzing water-saving policies. Field data were collected from ۳,۰۰۰ households, including ۹۰۰ actual installations of water-saving devices during a three-month period. To model adoption dynamics, two complementary approaches were applied: the Bass diffusion model as a macro-level forecasting tool and an agent-based model (ABM) to capture household heterogeneity and the influence of social networks.

Four policy scenarios were simulated: baseline (control), reinforcement of social norms, commitment and experiential learning, and co-creation combined with installment financing. The baseline scenario aligned closely with observed outcomes ($\approx 30\%$ adoption), while social-behavioral interventions increased adoption to over 80% . Sensitivity analysis (DOE) further indicated that the most effective strategy integrates social norm reinforcement, cost reduction, and awareness enhancement.

The findings demonstrate that water-sensitive city policies cannot rely solely on technological innovation; rather, their effectiveness depends on synergies with social innovation. By combining financial incentives with community-based engagement and awareness programs, urban water utilities can accelerate adoption and achieve more sustainable behavioral change

Keywords: Social Innovation, Urban Water, Technological Innovation, Water demand management, water-sensitive city