نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۵۳۶-۵۱۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 512-536

مقاله علمی-پژوهشی

# توسعه چارچوبی مفهومی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی با رویکرد پویایی سیستم کیفی، محدوده مورد مطالعه: حوضه آبریز مشهد

شیوا قلی‌زاده سرابی[1*]، کامران داوری[2]، بیژن قهرمان[3] و مجتبی شفیعی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

## چکیده

مدیریت پایدار منابع آبی دشوارترین چالشی است که جوامع انسانی با آن رویاروی‌اند و بهبود درک برهمکنش‌های پیچیده در سیستم‌های پیوسته انسان-آب، در تحقق آن بسیار مورد توجه است. در دهه اخیر، مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی اجتماعی از پرکاربردترین روش‌ها در توصیف برهمکنش‌ها و هم‌تکاملی سیستم‌های انسانی-هیدرولوژیکی می‌باشند. در این مطالعه که اولین کوشش به‌منظور تدوین چارچوبی مفهومی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی با هدف درک سیستم‌های پیوسته انسان-آب در ایران است، پس از توسعه چارچوب مفهومی، به‌کارگیری آن مبتنی‌بر رویکرد پویایی سیستم کیفی در حوضه مشهد نشان داده شده است. در چارچوب پیشنهادی اثر تصمیمات مدیریتی بر سیستم طبیعی در قالب متغیر واکنش رفتاری و متأثر از حساسیت اجتماعی تعریف شده است. طبق نتایج، هم‌اکنون آرکتایپ‌های اصلاحات ناموفق، محدودیت رشد و موفقیت برای موفق در حوضه مشهد حاکم می‌باشند. در واقع واکنش رفتاری متأثر از تقاضای آب، منجر به تصمیمات مدیریتی با هدف رشد اقتصادی سودجویانه و بی‌توجه به محدودیت‌های سیستم طبیعی شده است. بدین‌ترتیب بهره‌برداری افسارگسیخته از منابع آبی بی‌توجه به نرخ تجدیدپذیری صورت گرفته و حساسیت اجتماعی با هدف حفظ پایداری سیستم آبی، نقشی در تصمیمات مدیریتی نداشته است. مادامی‌که نقش سایر سطوح اجتماعی حساس به آب در واکنش رفتاری نادیده گرفته شود، حلقه حساسیت اجتماعی به‌عنوان متعادل‌کننده ارتباط سیستم‌های طبیعی-انسانی، همواره مفقود و معلول است.

**واژه‌های کلیدی:** پویایی سیستم کیفی، چارچوب مفهومی، حساسیت اجتماعی، سیستم پیوسته انسان-آب، هیدرولوژی اجتماعی

## مقدمه

آب در هسته دشوارترین چالش‌های پایداری که بشر در دوران مدرن با آن مواجه است قرار دارد و اینک بسیاری معتقدند که آب، نفت قرن ۲۱ خواهد بود (Annin, 2006)، گرچه که آب برخلاف نفت برای بشر هیچ جایگزین دیگری ندارد. در شرایطی که چالش‌های توأمان تأمین نیاز آبی جمعیت جهانی با رشد سریع از یک‌سو و تخریب جبران‌ناپذیر محیط‌زیست و تقلیل مداوم منابع آب شیرین از سوی دیگر در رقابت تنگاتنگ با یکدیگر هستند و یک بحران جهانی آب بی‌سابقه در تاریخ بشر پیش‌بینی شده است، مدیریت بهینه منابع آبی بحث‌برانگیزترین چالش قرن حاضر می‌باشد (Falkenmark, 1997; Fishman, 2011; Vörösmarty et al., 2013a,b). در رویارویی با عصر آنتروپوسن[1] و گسترش مدام فعالیت‌های انسان‌محور، اتخاذ تصمیمات مدیریتی کارآمد مرتبط با منابع آب به‌منظور تأمین پایدار نیاز آبی فزاینده، جز با اتکا بر پیش‌بینی‌های بلندمدت در مقیاس دهه تا قرن، ممکن نخواهد بود. بی‌شک برای پیش‌بینی آینده مبهم منابع آب، به چارچوب‌ها و مدل‌های معقولی برای توصیف چگونگی تقاضا، مصرف و تأمین آب در جوامع انسانی نیازمندیم. دشواری در پیش‌بینی این مسائل همواره با این واقعیت همراه است که به طور معمول جوامع خود را در جهت مصرف بهینه از منابع آبی سازماندهی نمی‌کنند و اغلب تصمیمات

۱- استادیار پژوهشی، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط‌زیست شرق (EWERI)، مشهد، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- استادیار پژوهشی، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط‌زیست شرق (EWERI)، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Shiva.gh.Sarabi@gmail.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.3.5.6

مدیریتی بر ایجاد حداکثر رفاه انسانی معطوف هستند. به‌طور یقین در چنین شرایطی، پیش‌بینی‌های متکی بر مدل‌های هیدرولوژیکی به‌تنهایی قادر به تأمین نتایج قابل‌اعتماد از چگونگی تکامل جوامع بشری و نحوه درک آن‌ها از مسائل آبی در بلندمدت نخواهند بود (Kandasamy et al., 2014).

تا به امروز پیشرفت های بنیادین در علوم هیدرولوژی و مدیریت منابع آب در درک این چالش‌ها مؤثر بوده و برهمکنش میان سیستم‌های انسانی و طبیعی از مدت‌ها قبل مورد توجه قرار گرفته است (Marsh, 1864; Thomas Jr., 1956; Falkenmark, 1979). از جمله، مدیریت یکپارچه منابع آب[۲] که به‌لحاظ تاریخی چارچوبی است که برهمکنش میان جوامع انسانی و منابع آب را مورد کاوش قرار می‌دهد. محدودیت چنین رویکردی در مدل‌سازی یکپارچه این است که بررسی مؤلفه‌های سیستم آبی به‌صورت منفرد و فقط با اعمال راه‌حل‌های مدیریتی سناریومحور به‌عنوان شرایط مرزی بر مدل هیدرولوژیکی، یا اعمال اثرات فعالیت‌های انسانی به‌عنوان نیروی خارجی مؤثر بر چرخه آب مبتنی بر فرضیات ایستایی، برای درک پویایی و برهمکنش‌های تکامل یابنده سیستم‌های پیوسته کافی نیست (قلی‌زاده سرابی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Liu et al., 2008; Sivapalan et al., 2012). از این‌رو چارچوب‌های مبتنی بر مفاهیم میان‌رشته‌ای از جمله مطالعه سیستم‌های پیوسته طبیعی و انسانی[۳] (Liu et al., 2007a, b) و زیست‌محیطی ـ اجتماعی[۴] (Berkes and Folke, 1998) با تمرکز بر بهبود درک برهمکنش‌های پیچیده در سیستم‌های تکامل یابنده[۵] به‌لحاظ بازخوردها[۶]، روابط غیرخطی[۷]، آستانه‌ها[۸]، گذارها[۹] و تأخیرات زمانی[۱۰] سعی بر پر کردن این شکاف داشته‌اند. در دهه اخیر نیز با ظهور هیدرولوژی اجتماعی[۱۱] (Sivapalan et al., 2012)، مدل‌های مفهومی[۱۲] و ریاضی با رویکرد جدیدی جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هیدرولوژی را با تمرکز بر پویایی هم‌تکاملی[۱۳] سیستم‌های انسانی ـ هیدرولوژیکی، به‌طور جامع‌تری از پیش مورد واکاوی قرار داده‌اند.

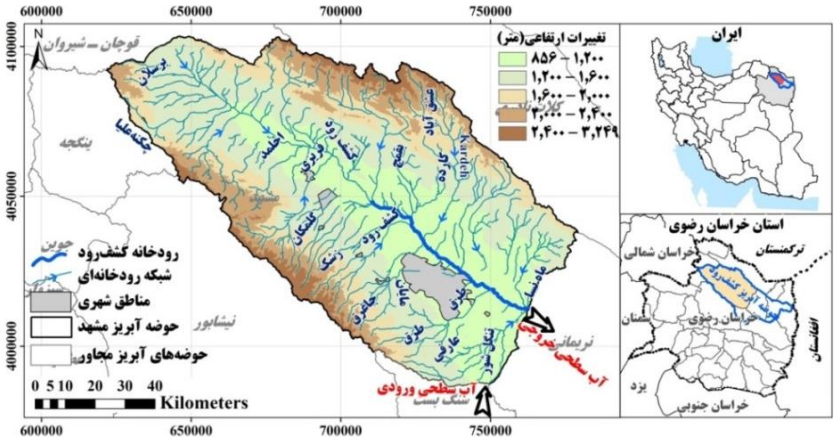
بخش قابل‌توجهی از مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی اجتماعی چه در مرحله توسعه مدل‌های ادراکی[۱۴] و مفهومی کیفی و توصیفی و چه در مرحله توسعه مدل‌های کمی و ریاضی، با هدف ادارک سیستم[۱۵] و بر اساس رویکرد پویایی سیستم[۱۶] می‌باشند (Di Baldassarre et al., 2013b; Elshafei et al., 2014; Carey et al., 2014; Garcia et al., 2015; Liu et al., 2015a,b; Pande and Savenije, 2016; Hanseok and Adamowski, 2016; Elagib et al., 2017; Xu et al., 2018; Qin et al., 2019; Sawada et al., 2020). پویایی سیستم یکی از تکنیک‌های مدل‌سازی است که تشخیص و تحلیل برهمکنش‌های میان زیرسیستم‌های متفاوت اما به‌هم‌پیوسته که منتج به رفتار پویای یک سیستم می‌شوند را تسهیل می‌نماید (Forrester, 1961 and 1969; Richmond, 1993; Sterman, 2000). این رویکرد نمایی بالا به پایین از یک سیستم را در نظر می گیرد و به جای تمرکز بر فرایندهای منفردی که منجر به رفتارهای کلی سیستم می‌شوند، با شناسایی مسیری که سیستم ورودی‌ها را به خروجی‌ها تبدیل می کند، رفتار کلی سیستم را تعیین می‌نماید. در واقع، در پویایی سیستم هدف به‌جای "تعیین ماهیت سیستم"، توصیف "ساز و کار" سیستم از طریق بررسی مؤلفه ها و قوانین فیزیکی که آن‌ها را به یکدیگر مرتبط می‌سازند، می‌باشد (Dooge, 1973). کاربرد پویایی سیستم با هدف درک سیستمی مزایای ویژه‌ای به همراه دارد. نخست اینکه، این رویکرد در مراحل مختلف توسعه یک مدل در یک سیستم پیچیده قابل کاربرد است، به‌طوری‌که از سطح کاملاً کیفی و توصیفی تا سطح کاملاً ریاضی و عددی قابل انجام است و انتخاب این سطوح بسته به هدف مدل سازی متفاوت خواهد بود. ازاین‌رو، با توجه به اینکه تعریف زیرسیستم‌ها و برهمکنش‌های میان آن‌ها بر عهده توسعه‌دهندگان مدل می‌باشد، تعیین میزان پیچیدگی مدل نیز کاملاً در کنترل آن ها خواهد بود. دوم اینکه، رویکرد پویایی سیستم می تواند در شرایطی استفاده شود که اساس فیزیکی روابط میان اجزای سیستم هنوز ناشناخته است و استخراج این روابط مشکل می‌باشد. البته کاربرد پویایی سیستم در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی اجتماعی با دشواری‌های خاصی نیز همراه است، چراکه تغییر هنجارها و ارزش های اجتماعی طی زمان، نقشی کلیدی را در هم‌تکاملی سیستم‌های انسانی و هیدرولوژیکی ایفا می‌نماید. با این حال در میان تمام تکنیک‌های رایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی (شامل پویایی سیستم، شبکه‌های بیزین[۱۷]، ترکیبی پیوسته[۱۸]، عامل‌بنیان[۱۹]، دانش‌محور[۲۰] (Kelly et al., 2013))، پویایی سیستم بیشترین کاربرد را در توسعه مدل های مفهومی و ریاضی با هدف ادراک سیستم داشته است (Blair and Buytaert, 2016).

راندرز معتقد بود که بیشتر دانش بشر توصیفی و غیر کمی است و بنابراین تحلیلگران نباید خود را به داده های عددی محدود کنند که این داده‌ها تنها بخش کوچکی از دانش مناسب برای تجزیه و تحلیل آماری محسوب می‌شوند (Randers, 1980). گرچه توسعه مدل‌های کیفی ممکن است برای واکاوی کامل مسئله کافی نباشد، اما برای انجام یک مدل‌سازی پویایی سیستم موفق ضروری است که پیش از مدل‌سازی کمی، تصویری روشن از سیستم پیوسته در قالب مدلی مفهومی ساده و منطقی، ترسیم گردد. البته این سادگی به معنای نمایش ناقص ساختار سیستم نیست. نمایش این ساختار باید جامع و در عین حال ساده باشد، خصوصاً هنگامی که به مخاطبان غیر فنی ارائه می‌گردد (Stave, 2003). بر خلاف مدل‌سازی‌های مرسوم که ممکن است در ترسیم تصویری مناسب از مشکلات سیستمی در قالب حلقه‌های بازخوردی با شکست مواجه شوند، طی یک مطالعه کیفی پویایی سیستم بنیان قابل‌اعتمادی برای تحلیل ساز و کار سیستمی ایجاد می‌گردد که برای طیف وسیعی از کاربران کارآمد خواهد بود (Mirchi et al., 2012).

این مطالعه اولین کوشش به‌منظور تدوین چارچوبی مفهومی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه‌های آبریز ایران است. در همین راستا طی مطالعات گذشته، مبتنی بر رویکرد هیدرولوژی اجتماعی تاریخی[۲۱] و با هدف درک سیستم پیوسته انسان-آب، مدلی ادراکی برای توصیف هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد طرح‌ریزی گردید (قلی‌زاده سرابی و همکاران، ۱۳۹۸؛Gholizadeh Sarabi et al., 2021). در مطالعه حاضر، بر اساس نتایج مطالعات قبلی و در تکمیل آن‌ها، چارچوبی مفهومی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی با هدف درک سیستم‌های پیوسته انسان-آب توسعه داده شده است؛ سپس چگونگی به‌کارگیری آن با استفاده از رویکرد مدل‌سازی پویایی سیستم کیفی در حوضه مشهد نشان داده شده است. نتایج این مطالعه با ایجاد امکان کاوش بصری در سیستم پیچیده هیدرولوژیکی اجتماعی و در نتیجه شناخت حلقه‌های بازخوردی اصلی، منجر به درک متفاوت و جامعی از ساختار، رفتار و مشکلات موجود در سیستم‌های پیوسته انسان-آب در حوضه‌های آبریز ایران خواهد شد.

## توصیف محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز مشهد با مساحت ۹۹۶۰ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط ۱۴۹۶ متر، در حوضه آبریز قره‌قوم و در شمال‌شرقی کشور واقع شده است. کشف‌رود که از بزرگ‌ترین رودخانه‌های شمال شرق ایران است، زهکش اصلی حوضه بوده و در دره میان رشته‌کوه‌های هزار مسجد و بینالود از شمال غرب به جنوب شرق در دشت مشهد جریان دارد. حوضه مشهد ۶۰٪ از مساحت حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود را پوشش داده است (شکل ۱).




**شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مشهد**

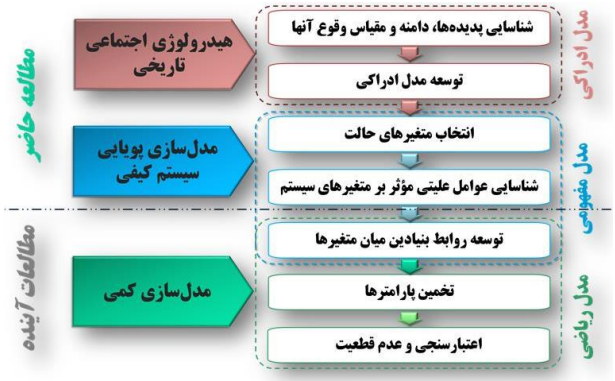
بر اساس نتایج مطالعه هیدرولوژیکی اجتماعی تاریخی در حوضه مشهد (قلی‌زاده سرابی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Gholizadeh Sarabi et al., 2021)، در تاریخ هم‌تکاملی سیستم پیوسته انسان-آب در این حوضه سه فاز طبیعی[۲۲] (پیش از دوره هخامنشیان)، توسعه[۲۳] (توسعه سنتی[۲۴] از دوره هخامنشیان تا اواخر قاجار و توسعه صنعتی[۲۵] از سال ۱۳۰۰ تا کنون) و انقباض[۲۶] (از سال ۱۳۴۵ تا کنون) به‌لحاظ موجودیت آب، شرایط محیط‌زیستی و اجتماعی-اقتصادی و نیز بازخوردها و برهمکنش‌های میان سیستم‌های طبیعی و انسانی شناسایی شده است. طی دوره طبیعی، جوامع انسانی به‌صورت پراکنده در حاشیه رودخانه‌ها به‌عنوان مهم‌ترین منبع آبی مستقر بودند. ارتباط میان سیستم های انسانی و طبیعی بسیار ساده بوده و منابع طبیعی، چرخه هیدرولوژی و سفره آب زیرزمینی در وضعیت بکر قرار داشتند. طی دوره توسعه سنتی با رشد تدریجی جمعیت، توسعه و دخالت سیستم انسانی در سیستم طبیعی از طریق توسعه شهر مشهد، احداث بند گلستان به‌عنوان اولین سازه مهم آبی، انتقال آب چشمه گیلاس به شهر مشهد، احداث نهر بالا خیابان و انتقال آب چندین قنات و بخشی از آب کشف‌رود به شهر مشهد، بیشتر شده است. در این دوره گرچه تأمین آب علاوه بر رودخانه ها تا حدودی به منابع آب زیرزمینی نیز وابسته بود، اما هنوز چرخه هیدرولوژی و سفره آب زیرزمینی در وضعیت متعادل قرار داشتند. طی دوره توسعه صنعتی، با رشد سریع جمعیت و شهرنشینی، با احداث شبکه آبرسانی لوله‌کشی انتقال آب از رودخانه‌ها به شهر مشهد، حفر چاه‌های عمیق، تأسیس شبکه آب و فاضلاب، احداث بندها و سدها، توسعه اقتصادی و در پی آن توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بدون توجه به نرخ تجدید پذیری و محدودیت‌های محیط‌زیستی، بازخوردها و برهمکنش‌های میان سیستم‌های انسانی و طبیعی بسیار پیچیده‌تر شده است. بدین ترتیب تغییر کاربری اراضی، توسعه منابع آبی و احداث سازه های آبی، تغییرات محسوسی را در وضعیت رودخانه ها، چرخه هیدرولوژی، سفره

آب زیرزمینی و بیلان آب ایجاد نموده است. طی دوره انقباض، گرچه کامیابی اقتصادی هنوز می‌تواند افزایش یابد، اما به تدریج به دلیل محدودیت‌های محیط‌زیستی، توسعه کُند یا متوقف خواهد شد. در واقع در این دوره توسعه اقتصادی می‌تواند متکی بر منابع آب موجود ادامه یابد، درحالی‌که در حوضه مشهد توسعه اقتصادی در حین وجود شرایط انقباض کاملاً مبتنی بر توسعه منابع آبی بوده است. در حال حاضر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، نرخ تغذیه کمتر از برداشت، افت مداوم سفره آب زیرزمینی، کاهش آبدهی رودخانه‌ها، آلودگی کشف‌رود، تخریب خاک و نشست زمین از مشکلات جدی در حوضه می‌باشد. همچنین رقابت میان بخش کشاورزی با جمعیت ساکن و تعداد قابل‌توجه زائران و گردشگران شهر مشهد بر سر تأمین پایدار آب، بزرگ‌ترین چالش پیش روست.

## روش‌شناسی

مفهومی سازی[۲۷] سیستم، خواه ذهنی و خواه فیزیکی، تصاویری کیفی و کمی از سیستم به دست می‌دهد و مسیری عالی را برای ادراک سیستم فراهم می‌سازد که در پی آن، چارچوب‌بندی مشکلات سیستمی تسهیل خواهد شد (Blair and Buytaert, 2016). مدل مفهومی، ساده‌سازی مدل ادراکی در قالب روابط توصیفی و ریاضی می‌باشد و طی فرایند تبدیل مدل ادراکی به مدل مفهومی مراحل مهمی وجود دارد (Beven, 2012).

مشابه با سایر مدل‌سازی‌ها، سیواپالان و بلاشل مراحل مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی را در هفت گام طبقه‌بندی کردند، شامل: شناسایی پدیده‌ها، دامنه و مقیاس آن‌ها، توسعه مدل ادراکی، انتخاب متغیرهای حالت[۲۸]، شناسایی عوامل علیتی مؤثر بر متغیرهای سیستم، توسعه روابط بنیادین میان متغیرها، تخمین پارامترها و اعتبارسنجی و عدم قطعیت (Sivapalan and Bloschl, 2015). شناسایی پدیده‌ها، دامنه تأثیر و مقیاس وقوع آن‌ها و سپس توسعه مدل ادراکی، با مطالعه هیدرولوژی اجتماعی تاریخی محقق می‌گردد. پس از طی مراحل اول و دوم، وارد مراحل توسعه مدل مفهومی و سپس مدل کمی خواهیم شد. در این میان، متغیرهای حالت به مثابه ستون فقرات مدل هستند، بنابراین انتخاب آن‌ها مرحله‌ای بسیار پراهمیت در توسعه مدل مفهومی است که بدون شک این انتخاب یک تکنیک و هنر است. به‌عنوان یک استراتژی می‌توان در ابتدای توسعه مدل با انتخاب متغیرهای اصلی شروع کرد و در ادامه برای توصیف پدیده‌های مختلف، متغیرهای بیشتری را به مدل افزود. در مرحله بعد، شناسایی عوامل علیتی مؤثر بر متغیرهای سیستم با کاربرد رویکردهای مختلف مدل‌سازی ممکن خواهد شد که در این مطالعه رویکرد پویایی سیستم به کار گرفته شده است. مرحله پنجم مرتبط با توسعه مدل مفهومی کمی و ورود به مدل‌سازی ریاضی می‌باشد. دو مرحله آخر نیز مرتبط با مدل‌سازی کمی هستند که در مطالعه حاضر با هدف توسعه مدل مفهومی کیفی، به آن‌ها پرداخته نمی‌شود (شکل ۲).




**شکل ۲- مراحل ممکن در مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی**

### پویایی سیستم

مفاهیم پویایی سیستم به‌عنوان زیرشاخه‌ای از تفکر سیستمی (Richmond, 1994; Ford, 1999)، در دهه ۱۹۶۰ شکل گرفت. کاربرد این روش در مهندسی و مدیریت منابع آب طی دو دهه اخیر رشد قابل‌توجهی داشته و در این زمینه سه نوع مدل شامل مدل‌های شبیه‌ساز پیش‌بینی کننده[۲۹]، مدل‌های یکپارچه توصیفی[۳۰] و مدل‌های مشارکتی[۳۱] طبقه‌بندی شده است (Mirchi et al., 2012). در این مطالعه مدل‌های یکپارچه توصیفی مدنظر است؛ در این مدل‌ها حلقه‌های بازخوردی با استفاده از ابزارهایی از جمله حلقه‌های علت و معلولی[۳۲]، روابط انباشت و جریان[۳۳]، حالت های مرجع رفتار پویا[۳۴] و آرکتایپ‌های سیستم[۳۵] شناسایی و توصیف می‌شوند و امکان انتخاب و آزمون سناریوهای مدیریتی در سطح راهبردی ایجاد می‌گردد (Xu et al., 2002; Davies and Simonovic, 2011). در این مطالعه مبتنی بر نتایج هیدرولوژی اجتماعی تاریخی و مدل ادراکی در حوضه

مشهد و مرور تجارب جهانی در خصوص مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی با رویکرد پویایی سیستم (قلی‌زاده سرابی و همکاران، Gholizadeh Sarabi et al., 2021؛۱۳۹۸)، ابتدا یک چارچوب مفهومی عمومی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی با هدف درک سیستم پیوسته انسان ـ آب در مقیاس حوضه آبریز طرح‌ریزی شده است. سپس به‌منظور به‌کارگیری چارچوب پیشنهادی در حوضه مشهد، ابتدا متغیرهای سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی به تفکیک چهار زیرسیستم هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی تعیین شده است. سپس با کاربرد روش پویایی سیستم، روابط علت و معلولی و حلقه‌های بازخوردی میان متغیرهای اصلی در محیط VENSIM PLE 7.3.5 ترسیم شده است. در آخر حلقه‌های بازخوردی اصلی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی حوضه مشهد شناسایی شده و رفتارهای مرجع و آرکتایپ‌های سیستم، تحلیل و توصیف شده است.

## چارچوب مفهومی پیشنهادی

در مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی این سؤال بنیادی مطرح است که چه محرک‌هایی به واکنش‌های انسانی در زیرسیستم‌های انسانی منجر می‌شوند و در مقابل تأثیر این واکنش‌ها بر سیستم هیدرولوژیکی چیست؟ در هر مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی، هدف اصلی شناسایی، مفهومی سازی و در آخر کمی سازی همین محرک‌هاست و در آن دو حلقه اصلی بازخوردی "جمعیتی ـ اقتصادی" و "حساسیت" نقشی کلیدی را در پویایی سیستم پیوسته ایفا می‌کنند (Elshafei et al., 2014).

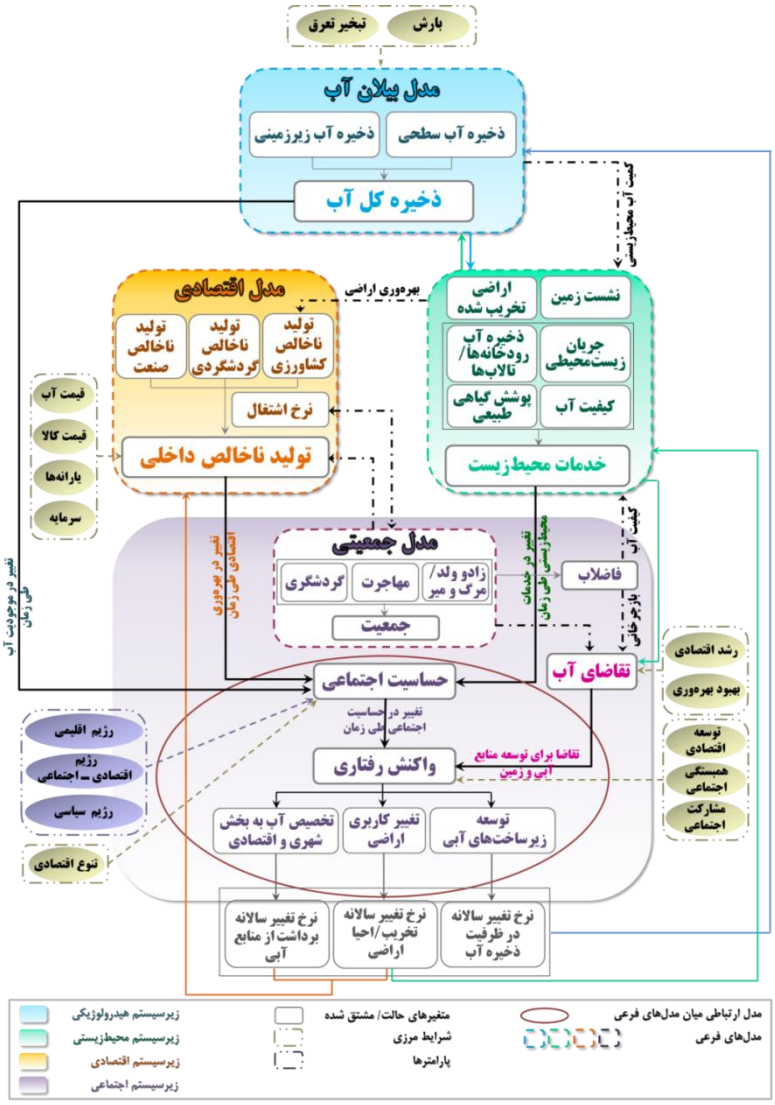
در یک حوضه آبریز بکر، متغیرهای هیدرولوژیکی معینی که حاصل شرایط اقلیمی و ژئوفیزیکی‌اند، قابل مشاهده هستند. در این حالت می‌توان شرایط اولیه کمی و کیفی منابع آب را تا حد زیادی مشخص کرد. نسبت معینی از این آب قابل‌دسترس در جهت منافع اقتصادی مورداستفاده قرار می‌گیرد. این منفعت اقتصادی، به‌صورت سرانه و اغلب نامساوی در جوامع واقع در حوضه توزیع می‌گردد. چنانچه سرانه منفعت اقتصادی افزایش یابد، شیوه‌های زندگی جذاب‌تری ایجاد می‌گردد که منجر به مهاجرت افراد به حوضه خواهد شد و اندازه و نرخ رشد جمعیت در حوضه افزایش می‌یابد. مسلماً رشد جمعیت با سطح بالاتر تقاضای آب و زمین، افزایش مصرف و نیاز فزاینده به توسعه اقتصادی برای حفظ جوامع بزرگ‌تر همراه است (Molle, 2003). به‌علاوه، در حوضه‌های روستایی با فعالیت غالب کشاورزی نیز اقتصاد خرد تقویت شده و تقاضای آب مستقل از رشد جمعیت افزایش خواهد یافت و بنابراین منابع آبی مازاد موردنیاز خواهد بود. این افزایش تقاضای آب در هر دو حوزه شهری و روستایی یکی از محرک‌های کلیدی بازخورد دهنده به تصمیمات مدیریت آب می‌باشد. از این نقطه به بعد، متغیرهای آبی بیشتر می‌توانند به‌عنوان متغیرهای محدودکننده یا شرایط مرزی در نظر گرفته شوند که به‌موجب آن رشد اقتصادی تا زمانی ادامه می‌یابد که کمیت یا کیفیت منابع آبی مانع از رشد بیشتر گردد. به‌هرحال با کاهش منابع آب و تنزل کیفیت آب یا انحطاط اراضی، رشد اقتصادی محدود می شود و در پی آن وخامت شرایط اقتصادی‌ـاجتماعی نیز ایجاد خواهد شد. این مسئله به نوبه خود سبب مهاجرت افراد به خارج از حوضه برای یافتن فرصت‌های اقتصادی خواهد شد و بنابراین با کاهش جمعیت حوضه، مجدداً تقاضا برای آب و زمین کاهش خواهد یافت. این حلقه اولین بازخورد از چارچوب مفهومی است که باید موردبررسی قرار بگیرد (Elshafei et al., 2014).

حلقه حساسیت، الگوی سه‌جانبه تعارض‌ـحساسیت‌ـواکنش است که متأثر از حساسیت اجتماعی[۳۶] می‌باشد. ترنر و همکاران چارچوبی کلی را برای ارزیابی پایداری سیستم‌های پیوسته که دارای جنبه‌های تعارض، حساسیت و تاب‌آوری‌اند، پیشنهاد کردند (Turner et al., 2003). بر این مبنا، الشافی و همکاران نیز چارچوبی مفهومی برای مدل‌های هیدرولوژیکی اجتماعی توسعه دادند که چارچوب پیشنهادی آن‌ها توسط روبوانان و همکاران نیز به‌کار گرفته شد (Elshafie et al. 2014 and 2015; Roobavannan et al., 2017). چارچوب مفهومی پیشنهادی این مطالعه نیز مبتنی بر نتایج هیدرولوژی اجتماعی تاریخی و مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد طی مطالعات پیشین (قلی‌زاده سرابی و همکاران، Gholizadeh Sarabi et al., 2021؛۱۳۹۸) بر اساس دو حلقه جمعیتی ـ اقتصادی و حساسیت طرح‌ریزی شده است (شکل ۳).

بدین ترتیب، بر اساس گزاره تحقیق، چنانچه متغیر حالت حساسیت اجتماعی تغییر نماید، مطابق با آن تغییراتی در تابع واکنش رفتاری[۳۷] نیز ایجاد خواهد شد؛ چنانچه حساسیت افزایش یابد، رفتار و تصمیمات مدیریتی نسبت به کاهش اثرات انسانی بر متغیرهای هیدرولوژیکی حوضه تمایل یابند (مثلاً ایجاد محیطی بِکرتر) و بالعکس نرخ حساسیت اجتماعی پایین‌تر با واکنش‌های رفتاری سلطه‌گرانه‌تری نسبت به تخصیص منابع آب به نیازهای انسانی همراه خواهد بود.

## اجزای کلیدی چارچوب مفهومی پیشنهادی و متغیرهای منتخب

در چارچوب مفهومی پیشنهادی، سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی به چهار زیرسیستم تفکیک‌شده که در هر یک از آن‌ها یکی از متغیرها خروجی اصلی محسوب می‌شود و در ایجاد حلقه‌های بازخوردی اصلی نقشی اساسی دارد. در ادامه این متغیرها به تفکیک هر زیرسیستم معرفی شده است.




**شکل ۳- چارچوب مفهومی پیشنهادی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی در مقیاس حوضه آبریز**

**زیرسیستم هیدرولوژیکی:** روابط علت و معلولی در زیرسیستم هیدرولوژیکی در هر حوضه آبریز، توزیع زمانی و مکانی چهار متغیر اصلی ذخیره آب سطحی، ذخیره آب زیرزمینی، نفوذ و رطوبت خاک را تبیین می‌نمایند (Fernald et al., 2012). در حوضه مشهد در این زیرسیستم ذخیره آب زیرزمینی و آب سطحی و ذخیره کل آب (کل آب قابل‌برداشت) به‌عنوان متغیرهای انباشت و سایر متغیرهایی که در وضعیت بیلان آب نقش کلیدی دارند، به عنوان متغیرهای جریان انتخاب شدند؛ برخی از آن‌ها از جمله بارش، تبخیر ـ تعرق و رواناب، متغیرهای هیدروکلیماتولوژی هستند و برخی دیگر شامل برداشت آب، آب برگشتی از مصارف، آب انتقالی و تخلیه پساب، متغیرهایی هستند که متأثر از سایر زیرسیستم ها بر بیلان آب تأثیرگذارند. سایر متغیرها از جمله آب خاک، نفوذ و دبی پایه متغیرهایی هستند که برهمکنش میان آب های سطحی و زیرزمینی را تبیین می‌نمایند. در این راستا انتخاب یک مدل بیلان مناسب به‌منظور شبیه‌سازی بیلان آب در هر سیستم پیوسته انسان‌ـآب تحت مطالعه، لازم است. این مدل می تواند یک مدل مفهومی ساده یا مدل هیدرولوژیکی پیچیده‌تری باشد. مدل انتخابی باید مجموعه‌ای حداقل از متغیرهای ورودی را بر اساس خصوصیات ژئوفیزیکی و وضعیت هیدرو اقلیمی حوضه و همچنین متغیرهای متأثر از فعالیت‌های انسانی را در خود بگنجاند و پویایی رطوبت خاک، ذخیره آب زیرزمینی و سطحی، رواناب سطحی و تبخیر‌ـتعرق در آن به شکل نیمه توزیعی قابل شبیه‌سازی باشد. همچنین ویژگی‌های آن باید به‌گونه‌ای باشد که بتوان اثر تصمیمات مدیریتی را در مقیاس حوضه آبریز بر پویایی سیستم پیوسته بررسی نمود. بدین ترتیب مدل انتخابی باید قادر باشد

اثر عواملی مانند تغییر در نرخ برداشت آب از منابع آبی برای توسعه فعالیت‌های اقتصادی را در مقیاس زمانی مناسب در نظر بگیرد (Elshafie et al., 2014 and 2015)؛ این مکانیزم ارتباط اصلی میان جمعیت و تغییرات بیلان آب در حوضه را برقرار می‌سازد.

**زیرسیستم محیط‌زیستی:** در زیرسیستم محیط‌زیستی در یک حوضه آبریز، پوشش گیاهی طبیعی، تنوع جانوری، جریان طبیعی و ذخائر آب رودخانه‌ها و کیفیت آب سطحی از اصلی‌ترین متغیرهایی هستند که در ارتباط با مسائل آبی، سلامت این زیرسیستم را تبیین می‌کنند. بسته به شرایط متفاوت در حوضه‌ها و هدف از مدل‌سازی، هر یک از این متغیرها می‌تواند نسبت به دیگری در اولویت قرار گیرد. در این خصوص در بسیاری از مدل‌سازی‌ها، متغیر خدمات محیط‌زیستی[۳۸] به‌عنوان نماینده‌ای از سلامت محیط‌زیست مورداستفاده قرار گرفته است. از جمله فرنالد و همکاران خدمات محیط‌زیستی را به‌عنوان متغیری از وضعیت پوشش گیاهی و تنوع جانوری حوضه، کلیدی‌ترین خروجی این زیرسیستم دانسته‌اند. الشافی و همکاران نیز این متغیر را یکی از مؤثرترین متغیرها بر شیوه زندگی و حساسیت اجتماعی دانسته‌اند و آن‌را به‌عنوان تابعی از متغیرهای مختلف محیط‌زیستی تعریف نموده‌اند که توسط روبوانان و همکاران نیز در مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی به کار گرفته شده است (Fernald et al, 2012; Elshafie et al. 2014 and 2015; Roobavannan et al., 2017).

در حوضه مشهد وضعیت بحرانی کیفیت آب رودخانه کشف‌رود یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی می‌باشد. از این‌رو بار آلودگی در کشف‌رود به عنوان متغیر انباشت در نظر گرفته شده است که تحت تأثیر مستقیم ورود آلودگی در پی تخلیه فاضلاب و پساب قرار دارد. از طرف دیگر تصفیه آلودگی متأثر از بهبود زیرساخت‌های آب و فاضلاب بر انباشت بار آلودگی در کشف‌رود اثر عکس دارد. با توجه به اینکه سایر رودخانه‌های کوهستانی حوضه از کیفیت نسبتاً مناسبی برخوردارند، بار آلودگی در کشف‌رود به‌عنوان رودخانه اصلی می‌تواند مبین وضعیت کیفیت آب به لحاظ محیط‌زیستی باشد. دو متغیر محیط‌زیستی دیگر جریان باقیمانده طبیعی و ذخیره آبی در رودخانه‌های حوضه می‌باشند که تحت تأثیر برداشت از جریان‌های سطحی قرار دارد و بر بقای رودخانه‌ها و ذخائر آب سطحی مؤثر هستند. متغیر پوشش طبیعی حوضه که تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی قرار دارد نیز از دیگر متغیرهای محیط‌زیستی حوضه است. مبتنی بر مرور مطالعات پیشین (قلی‌زاده سرابی و همکاران، ۱۳۹۸؛Gholizadeh Sarabi et al., 2021)، در این مطالعه نیز تأثیر توأم این چهار متغیر در متغیر خدمات محیط‌زیستی در نظر گرفته شده که خود بر حساسیت اجتماعی تأثیرگذار است (Elshafie et al., 2014). سه متغیر جریان باقیمانده و ذخیره آبی در رودخانه‌ها و تراکم پوشش طبیعی گیاهی، مستقیماً بر میزان تقاضای آب محیط‌زیستی نیز مؤثرند. از دیگر متغیرهای محیط‌زیستی مهم در حوضه مشهد نشست زمین می‌باشد که تحت تأثیر کسری مخزن و افت قابل‌توجه سطح سفره آب زیرزمینی ایجاد شده است. علاوه بر این، فرسایش و اراضی/ خاک تخریب‌شده نیز از دیگر متغیرهای زیرسیستم محیط‌زیستی در حوضه مشهد می‌باشند.

**زیرسیستم اقتصادی:** در زیرسیستم اقتصادی طیف وسیعی از متغیرها وجود دارد که به‌شدت به زیرسیستم اجتماعی وابسته هستند و متأثر از تصمیمات مدیریتی مرتبط با آب و زمین می‌باشند. در این زیرسیستم در چرخه توسعه اقتصادی، تولید ناخالص داخلی[۳۹]، درآمد و سرمایه‌گذاری از متغیرهای اصلی هستند (Button, 2002; Odhiambo, 2008). از طرف دیگر یکی از ورودی‌های اصلی به هر چرخه اقتصادی آب می باشد؛ از این رو متغیرهای تقاضا و مصرف آب نیز لازم است مدنظر قرار گیرد.

با توجه به اینکه بخش اقتصادی در حوضه مشهد می‌تواند به تفکیک بخش‌های کشاورزی، صنعت و توریسم موردتوجه قرار گیرد، متغیرهای تولید ناخالص داخلی، درآمد، سرمایه‌گذاری، تقاضا و مصرف آب نیز در هر یک از آن‌ها جداگانه در نظر گرفته شده است. با توجه به چیرگی اقتصاد گردشگری در شهر مشهد، همبستگی خاصی میان بخش‌های مختلف اقتصاد شهری در زمینه خدمات‌دهی به زائران و گردشگران وجود دارد، به‌گونه‌ای که کارکرد اقتصادی شهر مشهد در جهت تأمین خدمات توریسم توسعه یافته است (مافی و همکاران، ۱۳۸۹). از این‌رو توریسم در حوضه مشهد می‌تواند به‌عنوان یک بخش اقتصادی مستقل و مؤثر موردتوجه قرار گیرد. متغیرهای تقاضای آب برای فعالیت های اقتصادی و سرانه تولید ناخالص داخلی، از مجموع این متغیرها در هر سه بخش اقتصادی حاصل می شود و میانگین سرانه تولید ناخالص داخلی در این زیرسیستم می‌تواند به‌عنوان متغیر انباشت مدنظر قرار گیرد. در بخش کشاورزی، تخصیص زمین نیز حائز اهمیت است و از این‌رو متغیر اراضی تخصیص‌یافته به کشاورزی نیز مدنظر قرار گرفته است. البته مطابق با نتایج مطالعه تاریخی، در حوضه مشهد به بخش کشاورزی اراضی جدید تخصیص داده نشده و حتی سطوح زیر کشت کاهش نیز یافته است (قلی‌زاده سرابی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Gholizadeh Sarabi et al., 2021)، اما این متغیر می تواند در سناریوسازی ها استفاده شود. علاوه بر این، متغیر نرخ استخدام نیز به عنوان نماینده ای از وضعیت اشتغال در حوضه منظور شده است. با توجه به اینکه یکی از عوامل مهاجرت افراد به شهر مشهد اشتغال می باشد، این متغیر اهمیت بسیاری می‌یابد. متغیر دیگر در حوضه مشهد استفاده مجدد از پساب می‌باشد که بیانگر حجم پسابی است که می تواند در برخی از فعالیت های اقتصادی استفاده شود. در مجموع در خصوص انتخاب مدل های

اقتصادی، مدل های متنوعی با سطوح پیچیدگی متفاوتی وجود دارد و اینکه کدام عوامل اقتصادی و با چه سطحی از دقت و پیچیدگی در چارچوب مفهومی گنجانده شوند، بسته به هدف مدل‌سازی متفاوت خواهد بود. در ساده‌ترین شکل ممکن، عوامل اقتصادی می‌توانند در قالب مؤلفه‌های سود و هزینه در نظر گرفته شوند؛ اما آنچه در حوضه مشهد اهمیت می‌یابد این است که برای هر یک از بخش‌های کشاورزی، صنعت و توریسم، مدل اقتصادی جداگانه‌ای انتخاب شود.

**زیرسیستم اجتماعی:** اثرات متغیرهای زیرسیستم اجتماعی در دامنه وسیعی در تمام زیرسیستم‌های دیگر نمود می‌یابند. اصلی‌ترین متغیر در این زیرسیستم جمعیت است که به‌عنوان متغیر انباشت مدنظر قرار دارد. مدل‌های گذار جمعیتی به‌منظور مدل‌سازی روابط میان جمعیت و توسعه، به‌طور گسترده‌ای در جغرافیای انسانی مورداستفاده قرار می‌گیرند (Jones, 2012) و می‌توانند در برآورد جمعیت در حوضه‌های آبریز نیز به کار گرفته شوند. پویایی جمعیت بر مبنای نرخ زاد و ولد و مرگ و میر، همچنان‌که حوضه‌ای مراحل مختلف توسعه را سیر می‌نماید، قابل‌بررسی است. علاوه بر این، نرخ خالص مهاجرت دائمی به حوضه به‌عنوان متغیری مؤثر بر رشد جمعیت نیز در حوضه مشهد از متغیرهای مهم می‌باشد. با توجه به نقش پررنگ توریسم بر تغییرات پیک جمعیتی شهر مشهد و تأثیر مستقیم آن بر اقتصاد و مصرف آب در حوضه، تأثیر این متغیر نیز در تغییرات جمعیتی بایستی لحاظ شود. متغیر دیگری که تحت تأثیر مستقیم رشد جمعیت است، تقاضا و مصرف آب می‌باشد که با توجه به رقابت شدید میان تخصیص آب به شهر مشهد و کشاورزی، در این زیرسیستم جداگانه لحاظ شده‌اند. به‌علاوه، فاضلاب تولیدی از جمعیت شهری نیز با توجه به نقش آن در بازچرخانی آب مدنظر قرار گرفته است. توسعه شهری نیز به‌عنوان متغیر دیگری که متأثر از رشد جمعیت می‌باشد و در تقویت توریسم نقش بسزایی دارد، منظور شده است. همچنین، دو متغیر جدید حساسیت اجتماعی و واکنش رفتاری که تمایزدهنده مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی از سایر مدل‌سازی‌های سیستم پیوسته انسان-آب می‌باشند نیز در تحلیل رفتارهای این زیرسیستم گنجانده شده‌اند که در ادامه مفهوم و اثرات آن‌ها شرح داده شده است.

الشافی و همکاران متغیر حساسیت اجتماعی را تابعی از شش مؤلفه معرفی نموده‌اند؛ سه مورد از این مؤلفه‌ها شامل رژیم اقلیمی، توسعه اقتصادی ـ اجتماعی و رژیم سیاسی در مقیاس کلان ملی و منطقه‌ای و سه مؤلفه دیگر شامل مقدار ذخیره آب، خدمات محیط‌زیستی و سرانه تولید ناخالص داخلی به پویایی حوضه آبریز در سطح محلی مربوط می‌باشند (Elshafie et al., 2014). اولین پارامتر بزرگ‌مقیاس، ویژگی‌های اقلیمی حوضه را منعکس می‌سازد و انتظار می‌رود که در حوضه‌هایی با اقلیم خشک‌تر در مقایسه با حوضه‌هایی با منابع آبی فراوان، تغییری یکسان در وضعیت آبی واکنشی شدیدتر را در حساسیت اجتماعی ایجاد نماید (Cumming et al., 2005; Simane et al., 2012). دومین پارامتر بزرگ‌مقیاس، اثر رژیم اقتصادی ـ اجتماعی را بر حساسیت اجتماعی در حوضه منعکس می‌سازد. در جایی‌که سیستم اقتصادی ثروتمندتری توسعه یافته است، توانایی پاسخ به استرس آبی بیشتر است و بنابراین در چنین جوامعی حساسیت کمتری به این‌گونه فشارها وجود خواهد داشت. شاخص توسعه انسانی[۴۰] که از سال ۱۹۹۰ به‌منظور مقایسه توسعه اقتصادی میان ملل مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد، در تعیین اثر رژیم اقتصادی ـ اجتماعی بر حساسیت اجتماعی نیز قابل‌استفاده است. سومین پارامتر بزرگ مقیاس، رژیم سیاسی حاکم بر حوضه است. این پارامتر در واقع به عنوان متغیری تعدیل کننده است که چگونگی پاسخگویی و واکنش دولت به تمایلات و احساسات جامعه را نشان می‌دهد. به‌طورکلی در جامعه‌ای با نظام دموکراسی، احساسات و تمایلات جامعه در نظر گرفته می‌شود و انتظار می‌رود که واکنش‌های رفتاری، به خصوص در سطح حکومتی، نسبت به احساسات جامعه پاسخگوتر باشد. در مقابل، در رژیمی استبدادی، انتظار می‌رود که به دلیل منافع و انتخاب‌های دیکتاتوری حکومت، بسیاری از این تمایلات نادیده گرفته شود (Molle, 2003). بدین ترتیب، هرچه رژیم سیاسی دموکرات تر باشد، احتمال اینکه میان حساسیت اجتماعی و واکنش‌ها مانعی وجود داشته باشد کمتر خواهد بود. همچنین میان پایداری رژیم سیاسی و آسیب‌پذیری اجتماعی این ارتباط وجود دارد که هرچه پایداری و چارچوب قانونی رژیم سیاسی قوی تر باشد، آسیب‌پذیری اجتماعی کمتر خواهد بود (Forbes et al., 2004). در واقع، توزیع قدرت و منافع و اثرات آن بر رفتار کنشگران متأثر از رژیم سیاسی و متعاقباً آثاری که از این منظر بر منابع آب وارد می‌شود، حائز اهمیت می‌باشد. از این‌رو، پیشنهاد شده است که شاخصی مانند شاخص احساس فساد[۴۱] در این خصوص ممکن است مناسب باشد، گرچه شاخص‌های دیگری نیز بسته به شرایط می‌تواند استفاده شود.

در خصوص سه پارامتر در مقیاس حوضه آبریز که در این مطالعه نیز نشان داده شده است، میان مقدار آب قابل‌دسترس (ذخیره آب) برای مصرف و سطح درک از تهدید، رابطه مستقیمی وجود دارد. به‌این‌ترتیب چنانچه مقدار ذخیره آب کاهش یابد، درک اجتماعی افراد از تهدید کیفیت زندگی‌شان افزایش خواهد یافت و حساسیت اجتماعی بیشتر می‌شود و بالعکس. در خصوص متغیر خدمات محیط‌زیستی، شواهد زیادی وجود دارد که تغییرات جریان و کاهش کیفیت آب، به‌طور عکس بر خدمات محیط‌زیستی تأثیرگذار است (Walker and Thoms, 1993; Arthington and Pusey, 2003)؛ به‌طوری‌که با بدتر شدن خدمات محیط‌زیستی (به دلایلی از قبیل کاهش گونه‌های گیاهی و جانوری، کاهش کیفیت آب، زوال ارزش‌های زیبایی‌شناسی و تفریحی، افزایش بیماری‌های ناشی از آب و غیره)، انتظار می‌رود که

حساسیت اجتماعی افزایش یابد (Odum, 1989; Daily, 1997; Bunch et al., 2011). در واقع این حالت، انعکاسی از یک تهدید در حال رشد است که اثر مستقیم و قابل‌مشاهده‌ای بر کیفیت زندگی اجتماعی دارد. مقدار سرانه تولید ناخالص داخلی در جوامع حوضه نیز، بر درک از آسیب‌پذیری و تاب‌آوری آن تأثیر خواهد گذاشت. میان سرانه تولید ناخالص داخلی و حساسیت اجتماعی رابطه معکوسی وجود دارد که به‌موجب آن افزایش در مقدار سرانه تولید ناخالص داخلی با کاهش حساسیت اجتماعی همراه خواهد شد و بالعکس. در واقع این واکنشی است به تغییر در ثروت خالص جامعه و توانایی جامعه برای لذت بردن از بهبود یا تنزل کیفیت زندگی و هرچه جامعه‌ای کامیاب‌تر باشد، حساسیت اجتماعی کمتر است (Folke, 2003; Briguglio et al., 2009; Sherrieb et al., 2010).

اثر تغییر حساسیت اجتماعی در تابع واکنش رفتاری نمود می‌یابد. دو محرک کلیدی در تابع واکنش رفتاری، متغیرهای حساسیت اجتماعی و تقاضای آب می‌باشند که درجه و جهت انگیزه‌های کلی برای واکنش را تعیین می‌کنند. سپس این انگیزه‌ها به‌طور بالقوه به تغییر رفتاری در مؤلفه‌های نرخ استخراج آب، تخصیص اراضی به توسعه اقتصادی و شهری و توسعه زیرساخت‌های آبی جهت افزایش آبی منجر می‌شوند. در واقع تمام این متغیرها در مطالعات مختلف به‌عنوان نمایشگر تغییرات انسانی در حوضه‌های آبریز معرفی شده و مستقیماً به مدل هیدرولوژیکی تغذیه می‌شوند (Falkenmark, 1979; Gregory, 2006). تابع واکنش رفتاری که انگیزه کلی برای کُنش را تعیین می نماید، برای نمایش محرک‌هایی نسبت به اقدامات محیط‌محور (در جهت حفظ و سلامت محیط‌زیست) مقدار مثبت و برای نمایش محرک‌هایی نسبت به اقدامات انسان‌محور (در جهت توسعه فعالیت‌های اقتصادی با هدف کسب منفعت اقتصادی) مقداری منفی را به‌خود اختصاص می‌دهد. به‌عنوان فرضیه‌ای عمومی، با کاهش حساسیت اجتماعی افزایش نرخ استخراج آب، تسطیح اراضی و احداث زیرساخت‌های آبی مورد انتظار است و بالعکس. به بیان دیگر چنانچه تابع واکنش رفتاری تحت تأثیر حساسیت اجتماعی باشد منجر به کنش‌هایی در راستای اقدامات محیط‌محور و چنانچه متأثر از تقاضای آب باشد منجر به اقدامات انسان‌محور خواهد شد (Elshafie et al., 2014).

## نتایج و بحث

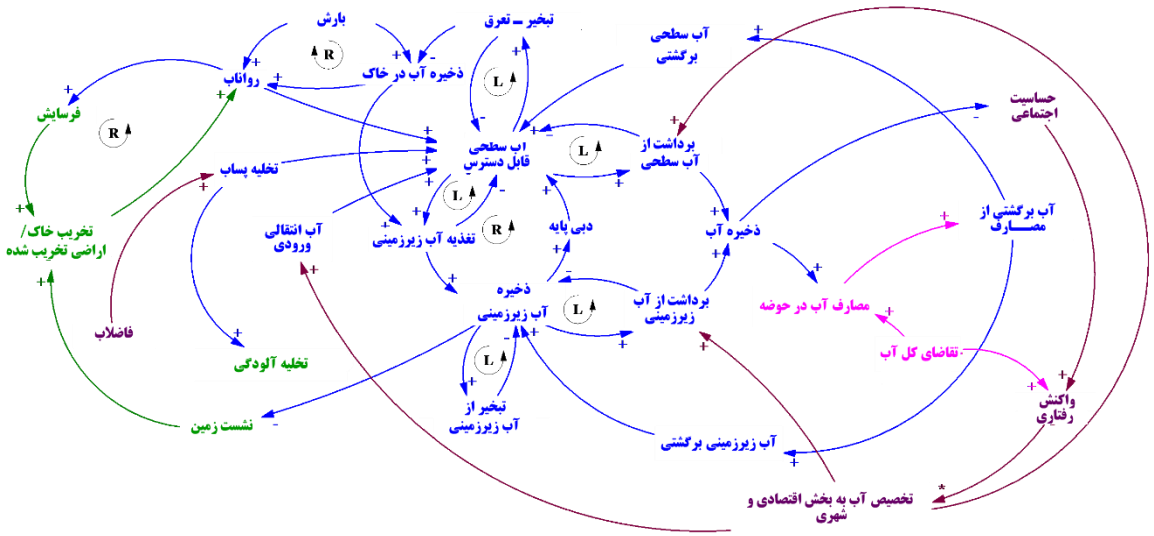
### به‌کارگیری چارچوب مفهومی پیشنهادی در حوضه آبریز مشهد

#### حلقه‌های علت و معلولی در زیرسیستم‌های مختلف

پس از انتخاب متغیرهای کلیدی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد، با به‌کارگیری چارچوب پیشنهادی، ارتباط میان متغیرها در زیرسیستم‌های مختلف تعیین شد و روابط علت و معلولی میان متغیرها ترسیم گردید. بر اساس این روابط، حلقه‌های بازخوردی اصلی شناسایی شدند و رفتارهای مرجع و آرکتایپ‌های سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه تحلیل گردید. در این روابط علامت (+) بیانگر رابطه تقویتی و علامت (−) بیانگر رابطه تعادلی میان دو متغیر می‌باشد. از طرفی در روابطی که با علامت (*) مشخص شده‌اند، بسته به تصمیمات مدیریتی ممکن است حالت متفاوتی ایجاد گردد. همچنین حروف (R) و (L) در حلقه‌ها، به‌این‌ترتیب نمایانگر حلقه‌های تقویتی و تعادلی می‌باشند. در روابط گرافیکی، متغیرها، پیکان‌ها و علائم، در زیرسیستم‌های هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی به ترتیب با رنگ‌های آبی، سبز، قرمز و بنفش نشان داده شده است. همچنین متغیرهایی که متأثر از تمام زیرسیستم‌ها هستند نیز با رنگ صورتی مشخص شده است.

**زیرسیستم هیدرولوژیکی:** روابط علت و معلولی حاکم در زیرسیستم هیدرولوژیکی در حوضه مشهد در شکل (۴) نشان داده شده است. در این زیرسیستم، در بیلان هیدروکلیماتولوژی (بیلان آب سطحی) مهم‌ترین متغیر ورودی بارش است که منشأ ایجاد رواناب به‌عنوان اصلی‌ترین جریان ورودی به ذخائر آب سطحی می‌باشد. همچنین جریان آب انتقالی به حوضه مشهد (از سد دوستی)، جریان سطحی برگشتی از مصارف (پساب یا رواناب کشاورزی) و تخلیه پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر مشهد به کشف‌رود نیز سایر جریان‌های ورودی به ذخیره آب سطحی هستند. در مقابل تبخیر-تعرق، نفوذ از بستر رودخانه‌ها و بارش و مصارف از آب سطحی، به‌عنوان جریان های خروجی از ذخیره آب سطحی محسوب می‌شوند. در بیلان آب زیرزمینی، تغذیه آب زیرزمینی از طریق نفوذ جریان های سطحی و بارش و همچنین نفوذ از جریان های برگشتی حاصل از مصارف، جریان‌های ورودی به ذخیره آب زیرزمینی هستند. در مقابل تبخیر مستقیم از سطح آب زیرزمینی (در صورت وجود) و مصارف از آب زیرزمینی، جریان‌های خروجی از ذخیره آب زیرزمینی می‌باشند. در واقع ارتباط و برهمکنش میان ذخائر آب سطحی و زیرزمینی از طریق تغذیه آب زیرزمینی از نفوذ جریان‌های سطحی و در مقابل تأمین دبی پایه رودخانه‌ها از سفره آب زیرزمینی، صورت می گیرد. در این خصوص ذخیره رطوبتی لایه خاک سطحی (آبِ خاک) یکی از تأثیرگذارترین مؤلفه ها بر این برهمکنش می باشد. در نهایت حجم برداشت از ذخائر آب سطحی و زیرزمینی، ذخیره کل آب قابل استحصال در حوضه را تعیین می‌نماید. به‌طور کلی بین متغیرهای جریان ورودی و خروجی با ذخائر آب سطحی و زیرزمینی به ترتیب ارتباط تقویتی و تعادلی برقرار است. علاوه بر این، میان زیرسیستم هیدرولوژیکی با سایر زیرسیستم‌ها نیز ارتباطی متقابل وجود دارد (شکل ۴). به‌طور خلاصه متغیرهای پساب، حساسیت اجتماعی، واکنش رفتاری و تخصیص آب به بخش شهری و اقتصادی

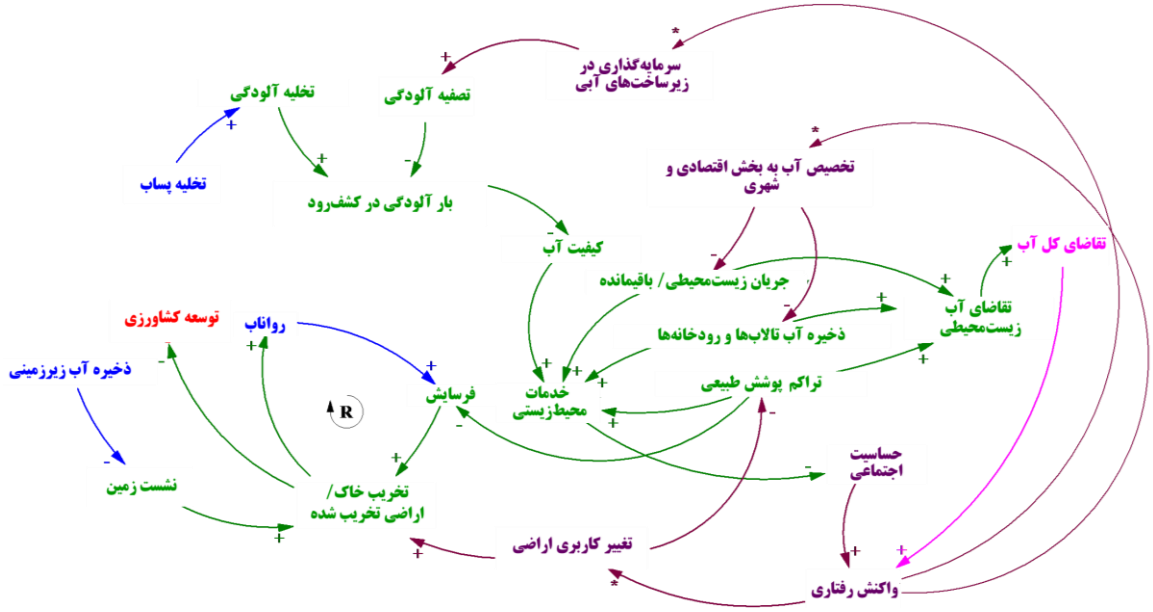
از زیرسیستم اجتماعی بر این زیرسیستم اثرگذارند. همچنین میان متغیرهای فرسایش، تخلیه آلودگی به رودخانه‌ها، نشست زمین و تخریب خاک از زیرسیستم محیط‌زیستی نیز با این زیرسیستم ارتباطی متقابل وجود دارد. تقاضا و مصارف کل آب در حوضه نیز به‌عنوان متغیرهای مشترک میان تمام زیرسیستم‌ها می‌باشند. همین ارتباط‌ها حلقه‌های بازخوردی اصلی را در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی حوضه ایجاد می‌کنند که در بخش‌های بعد موردبررسی قرار خواهند گرفت.




**شکل ٤- روابط علت و معلولی در زیرسیستم هیدرولوژیکی در حوضه آبریز مشهد**

**زیرسیستم محیط‌زیستی:** روابط علت و معلولی حاکم در زیرسیستم محیط‌زیستی در حوضه مشهد در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با شکل، بار آلودگی در رودخانه کشف‌رود به‌طور مستقیم متأثر از متغیر تخلیه آلودگی و به‌طور غیرمستقیم متأثر از تصفیه آلودگی می‌باشد. با افزایش بار آلودگی در کشف‌رود کیفیت آب آن کاهش می یابد. کیفیت آب خود یکی از متغیرهایی است که با متغیر خدمات محیط‌زیستی ارتباط مستقیم دارد و کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها بیانگر کاهش خدمات محیط‌زیستی می‌باشد. علاوه بر کیفیت آب، سه متغیر جریان باقیمانده در رودخانه ها، ذخیره آبی در رودخانه ها و تراکم پوشش طبیعی گیاهی نیز مستقیماً بر متغیر خدمات محیط‌زیستی تأثیرگذار هستند. افزایش این سه متغیر به معنای افزایش تقاضای آب محیط‌زیستی می‌باشد. علاوه بر ارتباط میان متغیرهای محیط‌زیستی در این زیرسیستم، بین آن‌ها با سایر متغیرها از زیرسیستم‌های دیگر نیز رابطه متقابلی وجود دارد. از جمله متغیر خدمات محیط زیستی که با متغیر حساسیت اجتماعی از زیرسیستم اجتماعی دارای رابطه تعادلی است و از همین طریق برهمکنش میان زیرسیستم‌های محیط‌زیستی و اجتماعی ایجاد خواهد شد. متغیر دیگری که ارتباط میان این زیرسیستم را با زیرسیستم‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی برقرار می کند، اراضی/خاک تخریب‌شده می‌باشد که می‌تواند به‌صورت نرخ تخریب سالانه اراضی موردتوجه قرار گیرد و دو متغیر فرسایش و نشست زمین نیز با آن ارتباط مستقیم دارند.

به‌طورکلی، در حوضه مشهد تمام برهمکنش‌های میان زیرسیستم محیط زیستی با سایر زیرسیستم‌ها، متأثر از فعالیت‌های انسانی می‌باشد. در این زیرسیستم متغیرهای تخلیه آلودگی به کشف رود، تصفیه آلودگی، خدمات محیط زیست و اراضی/خاک تخریب‌شده، متغیرهایی هستند که در ارتباط متقابل با زیرسیستم اجتماعی قرار دارند و مهم‌ترین حلقه های بازخوردی میان این دو زیرسیستم نیز از طریق همین متغیرها ایجاد می گردند. این حلقه‌ها جزء حلقه‌های بازخوردی اصلی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه محسوب می شوند که در بخش تحلیل حلقه های بازخوردی اصلی به آن‌ها پرداخته می‌شود. علاوه بر این، متغیر اراضی/خاک تخریب‌شده از یک سو بر شدت رواناب (در زیرسیستم هیدرولوژیکی) و از سوی دیگر بر تخصیص اراضی به فعالیت های کشاورزی (در زیرسیستم اقتصادی) نیز اثرگذار است. در خصوص ارتباط میان این متغیر با فرسایش و رواناب، همواره یک حلقه تقویتی وجود خواهد داشت که متعادل شدن این حلقه تحت تأثیر واکنش رفتاری بر تغییرات کاربری اراضی رخ خواهد داد؛ البته این حلقه جزو حلقه های بازخوردی اصلی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه نمی‌باشد.



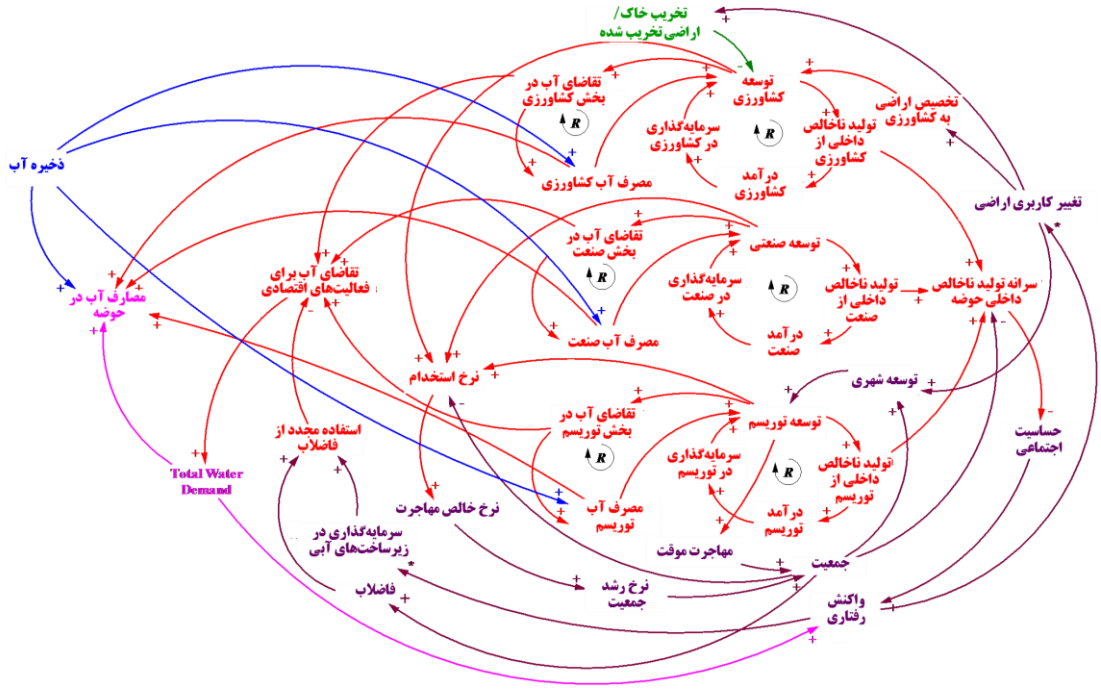

**شکل ۵- روابط علت و معلولی در زیرسیستم محیط‌زیستی در حوضه آبریز مشهد**

**زیرسیستم اقتصادی:** روابط علت و معلولی حاکم در زیرسیستم اقتصادی در حوضه مشهد، در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق با شکل، ارتباط میان توسعه اقتصادی با تولید ناخالص داخلی، درآمد و سرمایه‌گذاری همواره یک حلقه تقویتی می‌باشد؛ به‌طوری‌که با توسعه اقتصادی، تولید ناخالص داخلی و سپس درآمد افزایش می‌یابد. با افزایش درآمد، میل به توسعه افزایش یافته و با سرمایه گذاری در بخش های مختلف اقتصادی مجدداً توسعه اقتصادی رخ می دهد. این حلقه برای هر سه بخش اقتصادی جداگانه منظور شده است. از طرف دیگر، در چرخه اقتصادی با تأمین تقاضای آب ناشی از توسعه اقتصادی از طریق تخصیص و سپس مصرف آب، مجدداً توسعه اقتصادی ایجاد خواهد شد و به این ترتیب همواره یک حلقه تقویتی توسعه، تأمین و مصرف آب و مجدداً توسعه نیز وجود خواهد داشت. این حلقه نیز برای هر سه بخش اقتصادی جدا در نظر گرفته شده است؛ چراکه میزان تقاضا و تخصیص آب به بخش های مختلف دارای اختلاف زیادی است و کشاورزی به‌عنوان بزرگ ترین مصرف‌کننده آب در حوضه، در رقابت با سایر بخش‌ها می‌باشد. با توسعه اقتصادی و ایجاد اشتغال، نرخ استخدام نیز افزایش می یابد که این متغیر نیز با جمعیت و مهاجرت مرتبط است. استفاده مجدد از پساب نیز منجر به تأمین بخشی از آب موردنیاز در فعالیت‌های اقتصادی خواهد شد و با متغیر تقاضای آب دارای رابطه تعادلی است. علاوه بر ارتباط میان متغیرهای اقتصادی، بین آن‌ها با سایر متغیرها از سایر زیرسیستم‌ها نیز رابطه متقابلی وجود دارد. با توجه به وجود بخش کشاورزی، زیرسیستم اقتصادی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در حوضه می‌باشد و بیشترین برداشت از منابع آب در راستای تأمین نیاز آبی این زیرسیستم است.

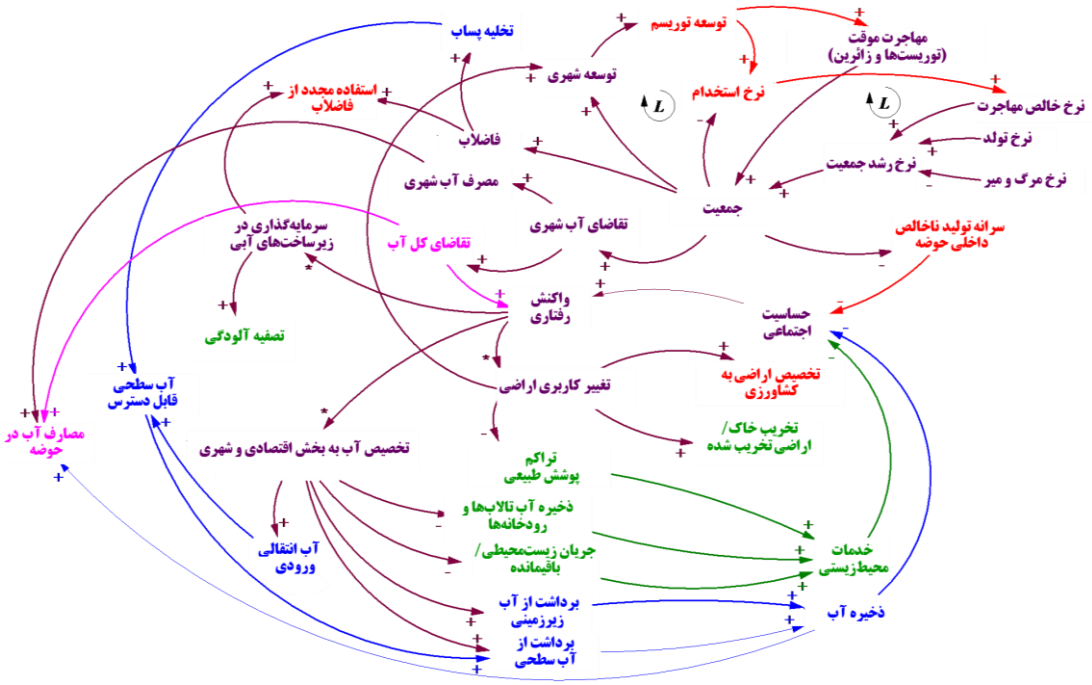
از طرفی بیشترین برهمکنش میان زیرسیستم‌های اجتماعی و هیدرولوژیکی نیز به‌واسطه زیرسیستم اقتصادی رخ می‌دهد. از سوی دیگر توسعه اقتصادی و افزایش اشتغال، منجر به افزایش مهاجرت افراد به حوضه خواهد شد که افزایش جمعیت حوضه را در پی خواهد داشت. در مقابل افزایش جمعیت حوضه منجر به کاهش سرانه تولید ناخالص داخلی خواهد شد که خود عاملی است که به شکلی منفی در حساسیت اجتماعی نمود می‌یابد. تغییر حساسیت اجتماعی نیز با تأثیر بر واکنش رفتاری، مجدداً از طریق تصمیمات مدیریتی در خصوص تخصیص آب و زمین در این زیرسیستم نمود می‌یابد. این موارد مهم‌ترین حلقه‌های بازخوردی را میان این زیرسیستم با زیرسیستم‌های اجتماعی و هیدرولوژیکی ایجاد می‌نمایند که جزء حلقه‌های بازخوردی اصلی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد محسوب شده و در بخش بعد به آن‌ها پرداخته می‌شود.

**زیرسیستم اجتماعی:** روابط علت و معلولی حاکم در زیرسیستم اجتماعی در حوضه مشهد، در شکل (۷) نشان داده شده است. در این زیرسیستم، سه متغیر نرخ تولد، مرگ و میر و مهاجرت خالص به حوضه با نرخ رشد جمعیت دارای رابطه تقویتی هستند. با افزایش نرخ رشد جمعیت، جمعیت حوضه نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ارتباط نرخ مهاجرت موقت نیز با جمعیت حوضه مستقیم می‌باشد. رشد جمعیت با توسعه شهری و افزایش تقاضا و مصرف آب همراه است و به دنبال آن تولید فاضلاب نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر دو متغیر حساسیت اجتماعی و واکنش رفتاری نیز بر متغیرهای تغییر کاربری اراضی، توسعه زیرساخت های آبی و تخصیص آب

مؤثرند که نوع این ارتباط نیز بسته به اینکه واکنش رفتاری منجر به اقدامات محیط‌محور یا انسان‌محور شود، متفاوت می‌باشد. در مجموع بیشترین حلقه های علت و معلولی در این زیرسیستم با متغیرهایی از سایر زیرسیستم‌ها تشکیل شده است. اغلب برهمکنش‌های اصلی موجود میان زیرسیستم اجتماعی با سایر زیرسیستم‌ها، ناشی از حساسیت اجتماعی و به دنبال آن واکنش رفتاری می‌باشد.




**شکل ٦- روابط علت و معلولی در زیرسیستم اقتصادی در حوضه آبریز مشهد**




**شکل ۷- روابط علت و معلولی در زیرسیستم اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

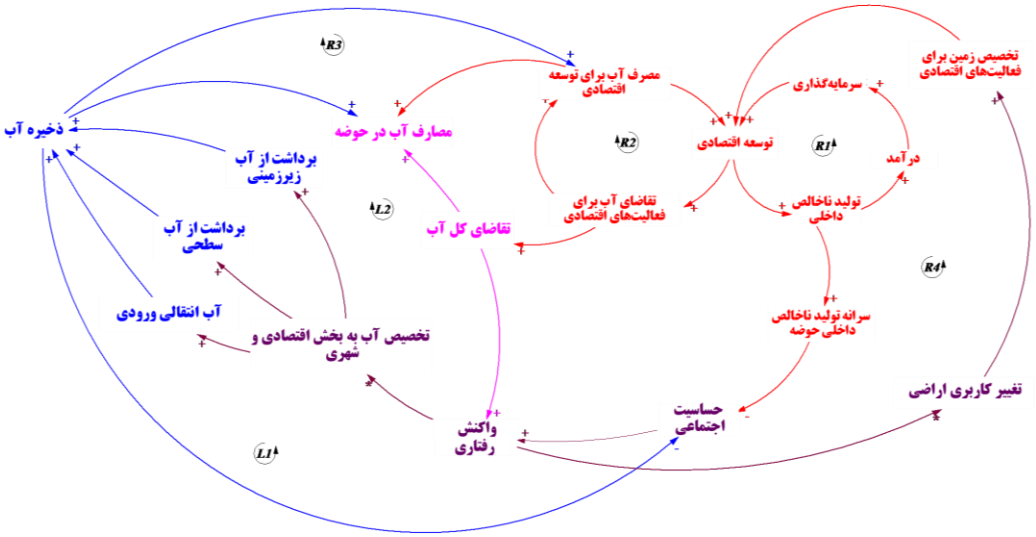
مطابق با شکل (۷)، حساسیت اجتماعی به‌واسطه تولید ناخالص داخلی، خدمات محیط‌زیستی و ذخیره آب به ترتیب متأثر از سه زیرسیستم اقتصادی، محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی می‌باشد. از طرف دیگر تأثیر آن بر واکنش رفتاری و در پی آن بر تصمیمات مدیریتی، در قالب سه متغیر تغییر کاربری اراضی، توسعه زیرساخت‌های آبی و تخصیص آب به سه زیرسیستم دیگر منتقل می‌شود. از این‌رو اصلی‌ترین حلقه‌های بازخوردی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد ایجاد می‌شود که در بخش بعدی به آن‌ها پرداخته می‌شود. در خصوص سایر متغیرها نیز برهمکنش‌هایی با سایر زیرسیستم‌ها ایجاد می‌گردد؛ به‌عنوان مثال با افزایش جمعیت و به دنبال آن توسعه شهری، پتانسیل جذب توریست در حوضه افزایش می‌یابد و از این‌رو با ایجاد موقعیت‌های شغلی جدید، نرخ استخدام نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش جمعیت از سوی دیگر می‌تواند بر نرخ استخدام اثر عکس داشته باشد (حلقه تعادلی). همچنین توسعه توریست منجر به افزایش مهاجرت موقت می‌شود که با افزایش جمعیت مرتبط می‌باشد. در مقابل افزایش جمعیت با تأثیر منفی بر نرخ استخدام، منجر به کاهش مهاجرت خالص به حوضه می‌شود که این عامل خودکنترل کننده افزایش جمعیت خواهد شد (حلقه تعادلی).

## حلقه‌های بازخوردی اصلی، آرکتایپ‌ها و رفتارهای مرجع در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

علاوه بر ارتباط میان متغیرها در هر زیرسیستم، ارتباط متغیرهای سایر زیرسیستم‌ها با یکدیگر نیز برهمکنش‌ها و بازخوردهایی را میان زیرسیستم‌ها ایجاد می‌نماید. برخی از بازخوردها تأثیر قابل توجهی بر کل سیستم دارند و به‌عنوان حلقه‌های بازخوردی اصلی عمل کرده و آرکتایپ‌ها و رفتارهای مرجع را ایجاد می‌نمایند. در واقع اثر همین حلقه‌های بازخوردی اصلی است که پایداری و بقا، یا فروپاشی سیستم را در درازمدت تعیین می‌نماید. در ادامه حلقه‌های بازخوردی اصلی، آرکتایپ‌ها و رفتارهای مرجع در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد بررسی و تحلیل شده است.

### مکانیزم توسعه اقتصادی و ارتباط آن با تقاضا و تأمین آب

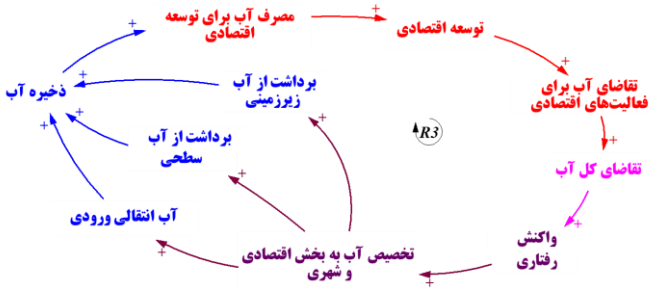
در زیرسیستم اقتصادی، دو حلقه تقویتی R1 و R2 همواره در جهت توسعه اقتصادی عمل می‌کنند. بدین ترتیب که با تخصیص زمین، آب و سرمایه همواره توسعه اقتصادی وجود خواهد داشت (شکل ۸). توسعه اقتصادی منجر به افزایش تولید ناخالص داخلی و به دنبال آن افزایش درآمد خواهد شد که افزایش درآمد نیز منجر به افزایش سرمایه‌گذاری و مجدداً توسعه اقتصادی می‌شود (حلقه تقویتی R1). از طرف دیگر تخصیص آب به فعالیت‌های اقتصادی نیز (خصوصاً در بخش کشاورزی) منجر به توسعه اقتصادی خواهد شد که این توسعه تقاضای آب برای فعالیت‌های اقتصادی را افزایش می‌دهد و در صورت تخصیص آب بیشتر مجدداً مصرف آب و در پی آن توسعه اقتصادی افزایش می‌یابد (حلقه تقویتی R2).




**شکل ۸- حلقه‌های بازخوردی اصلی توسعه اقتصادی ـ تأمین آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

در حوضه مشهد تصمیمات مدیریتی مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده مقدار برداشت از منابع آبی و تخصیص آن به بخش‌های مختلف مصرف می‌باشد (Gholizadeh Sarabi et al., 2020 and 2021). مطابق با تعاریفی که در خصوص واکنش رفتاری به‌عنوان مهم‌ترین

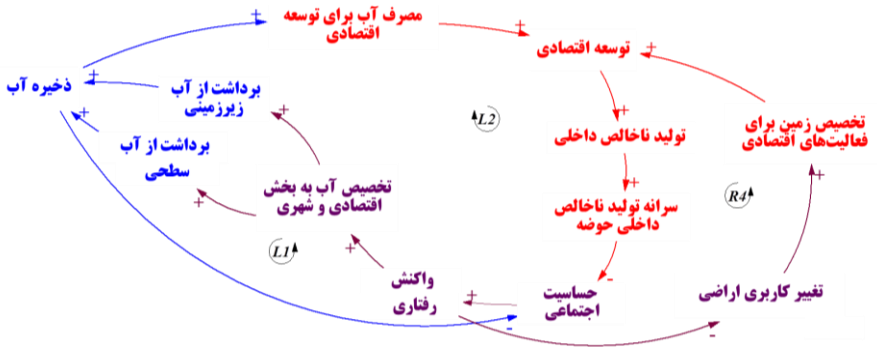
عامل مؤثر بر تصمیمات مدیریتی ارائه شد، چنانچه واکنش رفتاری تحت تأثیر افزایش تقاضای آب رخ دهد، تصمیمات مدیریتی به سمت تخصیص آب بیشتر در جهت تقویت فعالیت‌های انسان‌محور سوق می‌یابد. در این شرایط، افزایش تخصیص آب به بخش اقتصادی موردتوجه مدیران قرار می‌گیرد و در این راستا تصمیماتی از قبیل افزایش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی و انتقال آب از خارج به داخل حوضه اخذ می‌گردد. بدین ترتیب با افزایش برداشت از منابع آبی و انتقال آب، ذخیره آب افزایش یافته و آب بیشتری به فعالیت‌های اقتصادی اختصاص می‌یابد و مجدداً توسعه اقتصادی بیشتر می‌شود و به دنبال آن تقاضای آب در بخش اقتصادی نیز بیشتر خواهد شد (حلقه تقویتی R3، شکل ۹). این‌گونه تصمیمات مدیریتی در جهت توسعه یا بقای زیرسیستم اقتصادی بدون توجه به محدودیت منابع آب، نشان‌دهنده وجود آرکتایپ اصلاحات ناموفق (راه‌حل‌هایی که شکست می‌خورند) در حوضه می‌باشد. به‌عنوان مثال انتقال آب به حوضه، نمونه بارزی از آرکتایپ اصلاحات ناموفق است.




**شکل ۹- آرکتایپ اصلاحات ناموفق در حلقه‌های بازخوردی تقویتی توسعه اقتصادی ـ تأمین آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

اتخاذ چنین تصمیمات مدیریتی در کوتاه‌مدت منجر به رشد فعالیت‌های اقتصادی می‌گردد، اما در درازمدت منجر به افزایش تقاضای آب می‌شود و این در حالی است که منابع کافی جهت تأمین پایدار نیاز آبی فزاینده موجود نیست. بدین ترتیب محدودیت منابع آبی، به‌عنوان عاملی متعادل‌کننده بر سیستم تحمیل خواهد شد. تحت شرایط محدودیت آب، با کاهش ذخیره آبی حساسیت اجتماعی افزایش یافته و واکنش رفتاری منجر به اخذ تصمیمات مدیریتی در راستای اقدامات محیط‌محور خواهد شد. از این‌رو در جهت حفظ و بقای ذخائر آبی موجود، عدم تخصیص آب بیشتر به بخش اقتصادی موردتوجه مدیران قرار می‌گیرد. البته باید توجه داشت که این حالت زمانی رخ خواهد داد که توسعه اقتصادی به‌صورت یکپارچه مدنظر باشد؛ حال آنکه در وضعیت فعلی که به‌صورت بخشی عمل می‌شود، هر بخش اقتصادی صرف‌نظر از میزان بهره‌وری آن و اثری که ممکن است روی دیگر بخش‌ها داشته باشد به دنبال رشد حداکثری است. در این راستا تصمیماتی از قبیل ثابت ماندن برداشت از منابع آبی و عدم تعریف گزینه‌های جدید انتقال آب به حوضه اخذ می‌گردد. بدین ترتیب با ثابت ماندن برداشت از منابع آبی و عدم تعریف منابع آبی جدید، ذخیره آبی نیز کاهش یافته یا ثابت می‌ماند. کاهش یا ثابت ماندن ذخائر آبی مجدداً سبب افزایش حساسیت اجتماعی می‌شود که خود منجر به تقویت تصمیمات محیط‌محور خواهد شد (حلقه تعادلی L1)؛ البته که اثر تأخیری این فرایندها نیز بایستی مدنظر قرار گیرد. از طرف دیگر در راستای تصمیمات مدیریتی محیط‌محور، تغییر کاربری و تخصیص اراضی جدید به فعالیت‌های اقتصادی (عمدتاً کشاورزی) نیز کاهش می‌یابد که این کاهش خود عامل دیگری در تشدید کاهش توسعه فعالیت‌های اقتصادی خواهد بود. بدین ترتیب با کاهش توسعه اقتصادی، سرانه تولید ناخالص داخلی نیز کاهش می‌یابد که این کاهش منجر به افزایش حساسیت اجتماعی و در نتیجه تقویت واکنش رفتاری در راستای اقدامات محیط‌محور خواهد شد. در واقع در این شرایط یک حلقه تقویتی در جهت تقویت واکنش رفتاری در راستای اقدامات محیط‌محور ایجاد می‌گردد (حلقه تعادلی R4). در مجموع کاهش توسعه اقتصادی تحت تأثیر حلقه‌های تعادلی و تقویتی L1 و R4، منجر به ایجاد حلقه تعادلی L2 نیز خواهد شد (شکل ۱۰).

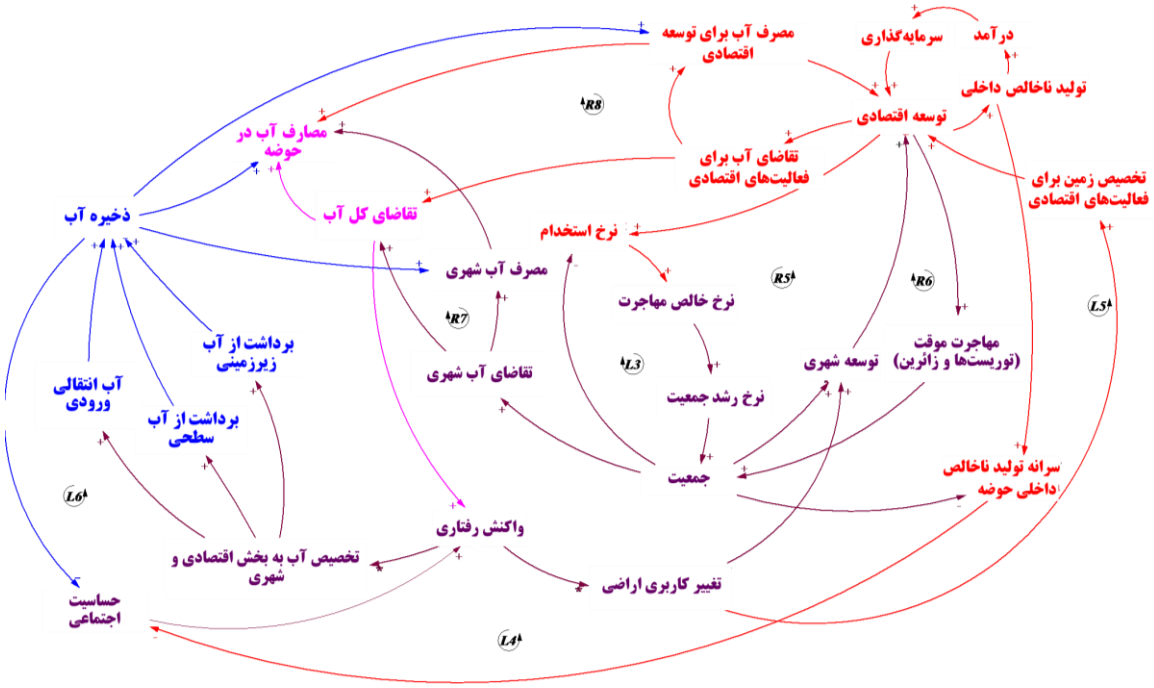
بنابراین در صورت توجه مدیران به محدودیت‌های آبی، این محدودیت همواره به‌صورت یک عامل متعادل‌کننده بر سیستم تحمیل خواهد شد و منجر به ایجاد آرکتایپ محدودیت رشد در سیستم شده و بدین ترتیب توسعه اقتصاد آب‌محور محدود می‌گردد. تحت چنین شرایطی احتمالاً رفتار جهش نوسانی در توسعه اقتصادی مشاهده خواهد شد. بدین‌صورت که در ابتدا بدون توجه به محدودیت‌های موجود، توسعه اقتصادی به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد و سپس با تحمیل شرایط محدودکننده به سیستم، رفتاری نوسانی در زمان وقوع محدودیت‌ها شکل می‌گیرد. چنانچه بدون توجه به این محدودیت آبی، همچنان توسعه اقتصادی با تخصیص هرچه بیشتر آب و زمین ادامه یابد، با به اتمام رسیدن منابع موجود سیستم دچار فروپاشی خواهد شد.




**شکل ۱۰- آرکتایپ محدودیت رشد در حلقه‌های بازخوردی تعادلی توسعه اقتصادی ـ تأمین آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

## مکانیزم رشد جمعیت و ارتباط آن با توسعه اقتصادی ـ تقاضا و تأمین آب

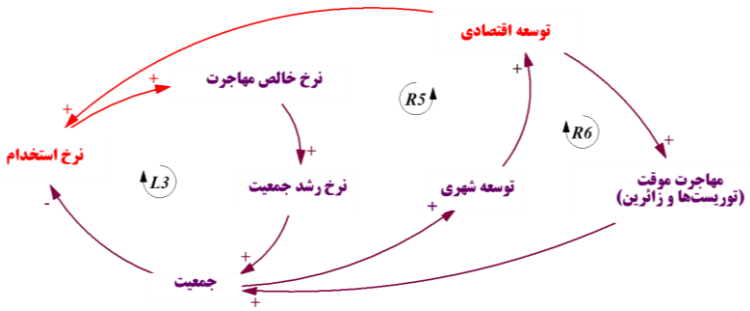
رشد جمعیت در حوضه مشهد تحت کنترل چندین حلقه مختلف می‌باشد. ارتباط میان متغیرهای مؤثر بر مکانیزم رشد جمعیت با متغیرهای زیرسیستم‌های اقتصادی و هیدرولوژیکی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.




**شکل ۱۱- حلقه‌های اصلی بازخوردی رشد جمعیت و ارتباط آن با توسعه اقتصادی و تأمین آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

از یک‌سو رشد جمعیت در شهر مشهد با توسعه شهرنشینی همگام است که توسعه مشهد، با توجه جایگاه آن به‌عنوان دومین کلان‌شهر و مهم‌ترین مقصد زیارتی-گردشگری در ایران، منجر به توسعه فعالیت‌های اقتصادی خصوصاً در بخش توریسم می‌گردد. به دنبال توسعه فعالیت‌های اقتصادی، نرخ اشتغال و استخدام نیز افزایش می‌یابد که این عامل یکی از تأثیرگذارترین عوامل بر مهاجرت دائمی افراد به حوضه مشهد می‌باشد. بدین‌صورت که جذب سرمایه‌گذاری و تخصیص منابع بیشتر به شهر مشهد، منجر به ایجاد امکانات رفاهی، جذابیت شهری و امکان اشتغال بیشتر شده است که شیوه‌های زندگی جذاب‌تری را نیز ایجاد می‌نماید و سبب افزایش نرخ مهاجرت دائمی افراد به شهر مشهد می‌شود که نتیجه آن رشد جمعیت می‌باشد (حلقه تقویتی R5). از سوی دیگر توسعه فعالیت‌های اقتصادی در بخش

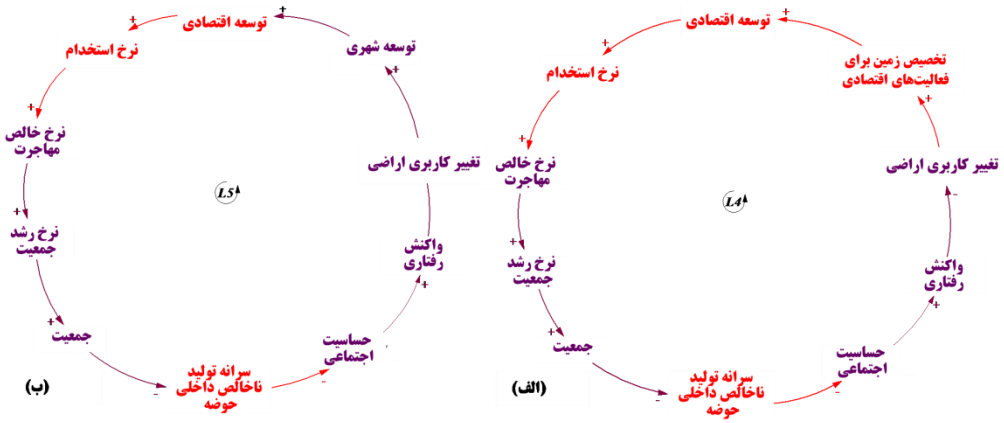
توریسم، منجر به جذب زائران و گردشگران بیشتری می‌گردد که این مهاجران موقتی نیز بر جمعیت مشهد در فصول مختلف بسیار مؤثر هستند. افزایش جمعیت موقت مشهد نیز بر توسعه شهری در جهت تقویت صنعت توریسم در بخش اقتصادی تأثیرگذار است که خود مجدداً سبب جذب گردشگران بیشتر خواهد شد (حلقه تقویتی R6). از طرفی رشد بیش از حد جمعیت بر نرخ استخدام اثر منفی خواهد داشت و کاهش نرخ استخدام منجر به کاهش مهاجرت دائمی به حوضه و در نتیجه کنترل جمعیت حوضه خواهد شد (حلقه تعادلی L3) (شکل ۱۲).




**شکل ۱۲- حلقه‌های بازخوردی رشد جمعیت متأثر از توسعه اقتصادی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

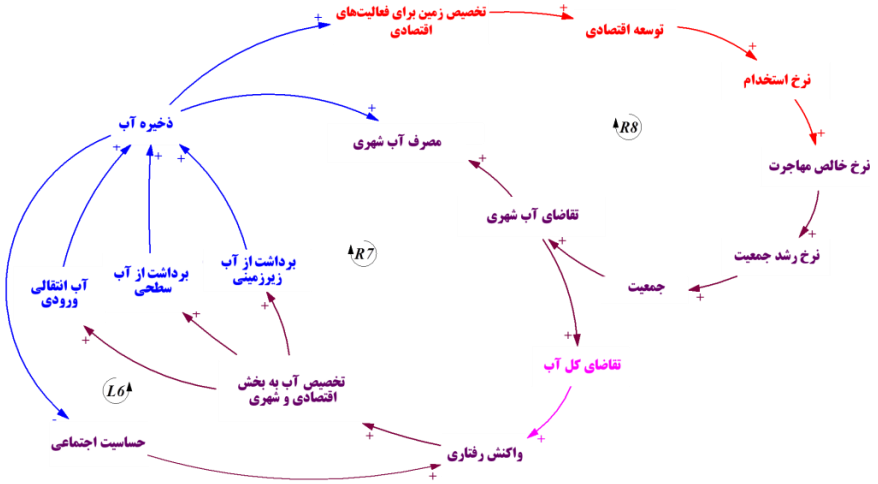
از طرف دیگر گرچه افزایش جمعیت منجر به توسعه شهری و اقتصادی می‌شود، با فرض ثابت ماندن درآمد سبب کاهش سرانه تولید ناخالص داخلی نیز می‌گردد که اثر آن بر حساسیت اجتماعی انعکاس می‌یابد. با افزایش حساسیت اجتماعی، واکنش رفتاری از طریق اخذ تصمیمات مدیریتی مرتبط با تخصیص زمین به توسعه اقتصادی و شهری، بر کنترل جمعیت اثرگذار خواهد بود. بدین‌صورت که از یک‌سو با کاهش تغییرات کاربری اراضی و تخصیص زمین به فعالیت‌های اقتصادی، توسعه اقتصادی محدود می‌شود و در نتیجه اشتغال‌زایی و نرخ استخدام ثابت مانده یا کاهش می‌یابد و بدین ترتیب نرخ مهاجرت دائمی به حوضه نیز کم شده و جمعیت حوضه کنترل خواهد شد (حلقه تعادلی L4). البته ممکن است بخشی از جمعیت مهاجر در صورت عدم تحقق امکانات و اشتغال نیز به مبدأ بازنگردند و به‌صورت حاشیه‌نشین باقی‌مانده و به مشاغل کاذب روی آورند که این مسئله نیز باید مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر با کاهش توسعه شهری و اثر آن بر محدودیت اقتصادی نیز همین روند در کنترل جمعیت حوضه تکرار می‌شود (حلقه تعادلی L5) (شکل ۱۳).

با رشد جمعیت، تقاضای آب در بخش‌های شهری و اقتصادی نیز افزایش می‌یابد. چنانچه واکنش رفتاری و در پی آن تصمیمات مدیریتی در خصوص تخصیص آب به مصارف شهری متأثر از تقاضای آب باشد، تصمیماتی از قبیل افزایش برداشت از منابع آبی و انتقال آب به حوضه اخذ می‌گردد. با افزایش ذخیره آبی، آب بیشتری نیز به مصارف شهری اختصاص می‌یابد. بدین ترتیب هیچ عامل کنترل‌کننده‌ای بر تقاضای آب شهری ناشی از رشد جمعیت، وجود نخواهد داشت (حلقه تقویتی R7). چنانچه این تخصیص در بخش اقتصادی نیز به همین ترتیب ادامه یابد، بر توسعه اقتصادی نیز عامل کنترل‌کننده‌ای وجود نخواهد داشت. از این‌رو رشد جمعیت متأثر از افزایش مهاجرت به حوضه با هدف اشتغال نیز تقویت خواهد شد (حلقه تقویتی R8).




**شکل ۱۳- حلقه‌های بازخوردی تعادلی رشد جمعیت تحت تأثیر تصمیمات مدیریتی مرتبط با (الف) تغییر کاربری اراضی و (ب) توسعه شهری، در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

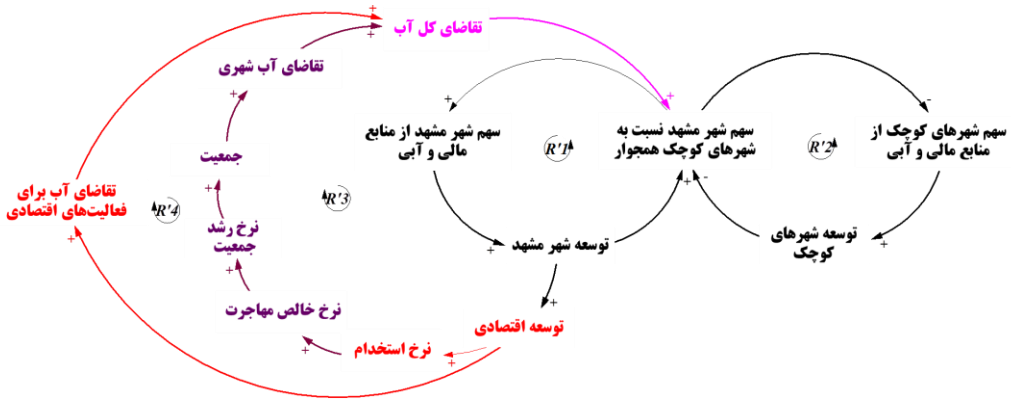
در چنین شرایطی که واکنش رفتاری و تصمیمات مدیریتی بی‌توجه به محدودیت منابع آب تجدید پذیر و فقط مبتنی بر سیاست عرضه آب است، با به اتمام رسیدن منابع آبی سیستم دچار فروپاشی خواهد شد. در مقابل چنانچه واکنش رفتاری با توجه به محدودیت منابع آب و متأثر از افزایش حساسیت اجتماعی منجر به تصمیمات مدیریتی در راستای کاهش یا ثابت ماندن بهره‌برداری از منابع آبی شود، با محدود شدن ذخائر آبی، تخصیص آب به مصارف شهری و اقتصادی نیز کاهش یافته یا ثابت می‌ماند. بدین ترتیب از یک‌سو با توجه به محدودیت آب برای مصارف شهری الگوهای مصرف آب تحت تأثیر قرار گرفته و تقاضای آب شهری کنترل خواهد شد و از سوی دیگر تحت تأثیر توقف توسعه اقتصادی، رشد جمعیت ناشی از مهاجرت افراد به حوضه جهت اشتغال نیز کنترل خواهد شد. بدین‌صورت حلقه تعادلی L6 رشد جمعیت ناشی از مهاجرت دائمی را کنترل خواهد کرد (شکل ۱۴).




**شکل ۱۴- حلقه‌های تقویتی و تعادلی رشد جمعیت تحت تأثیر تصمیمات مدیریتی مرتبط با تخصیص آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

در حوضه مشهد هشت نقطه شهری شامل مشهد، طرقبه، شاندیز، گلبهار، رضویه، چناران، گلمکان و چکنه وجود دارد. به دلیل موقعیت خاص شهر مشهد به لحاظ اهمیت مذهبی و گردشگری، تأمین منابع مختلف در این شهر نسبت به سایر شهرها در اولویت است. همچنین مسئله بحران آب شهری و کشاورزی در شهرهای کم‌جمعیت و روستاهای اطراف آن‌ها نسبت به شهر مشهد نیز با اهمیت کمتری موردتوجه قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که سایر شهرهای حوضه چه به لحاظ تأمین آب و چه به لحاظ جذب سرمایه‌گذاری در توسعه اقتصادی، همواره در اولویت‌های بعد از شهر مشهد قرار دارند. این اختلاف بیشترین تأثیر را بر چناران داشته است که پس از مشهد بزرگ‌ترین شهر حوضه می‌باشد. شهرهای طرقبه، شاندیز و گلبهار نیز که به‌نوعی به شهر مشهد وابسته‌اند، به لحاظ تخصیص منابع نسبت به شهرهای چناران، گلمکان و چکنه از جایگاه بهتری برخوردارند. در مجموع با تخصیص منابع مالی و آبی بیشتر به شهر مشهد، رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و جذب نیروی انسانی و در نتیجه پتانسیل توسعه در این شهر همواره افزایش می‌یابد و مادام نسبت به سایر شهرهای حوضه در جایگاه برتر قرار دارد. این قدرت منجر به جذب منابع بیشتر برای شهر مشهد می‌شود. در مقابل سهم شهرهای کوچک همسایه از منابع کاهش می‌یابد و مانع از توانایی آن‌ها برای توسعه بیشتر و کسب منابع لازم در جهت توسعه می‌شود. این مکانیزم که در پی رقابت برای کسب منابع محدود، از جمله منابع آبی، ایجاد شده است، نشان‌دهنده آرکتایپ موفقیت برای موفق در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد می‌باشد (شکل ۱۵).

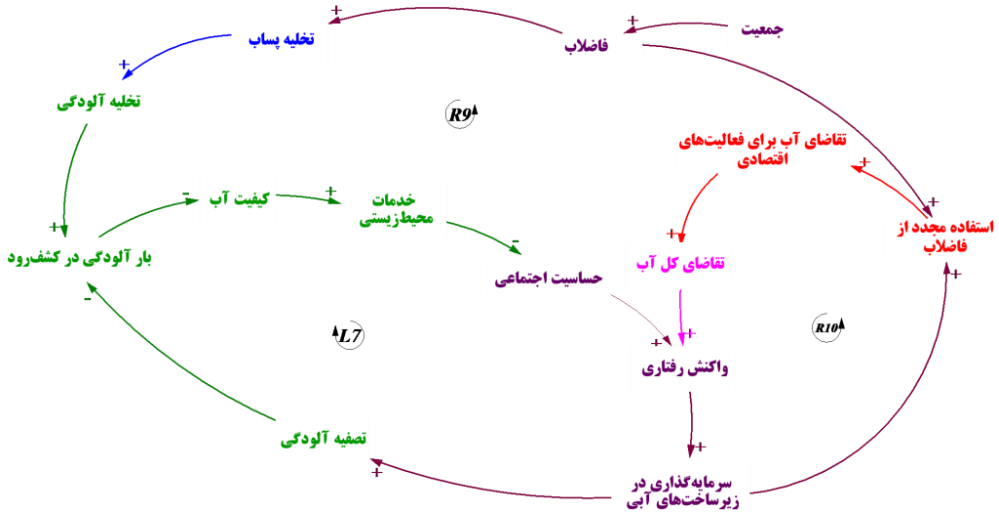
تسلط این آرکتایپ می تواند رقبای ضعیف تر را از منابع موردنیاز برای بهبود شرایط و رقابتی تر شدن محروم کند. در نتیجه، بخش موفق و قدرتمند مداوماً رشد می‌کند، در حالی‌که سایر بخش‌ها به‌تدریج ضعیف می‌شوند. تأثیر این آرکتایپ بر توزیع نامتوازن جمعیت در حوضه قابل‌توجه است و منجر به رشد نامتوازن تقاضای آب نیز می‌گردد. این آرکتایپ در نهایت منجر به نابرابری قابل‌توجهی بین کلان‌شهر مشهد و سایر شهرهای حوضه می‌شود و بقای شهرهای کوچک را به خطر خواهد انداخت. تجمع تمام جمعیت حوضه در شهر مشهد و رشد کنترل نشده آن، علاوه بر اینکه بر سلامت اجتماعی و کیفیت زندگی شهری تأثیر به سزایی خواهد داشت، با رشد فزاینده تقاضای آب فشار قابل‌توجهی نیز در جهت تأمین نیاز آبی ایجاد خواهد کرد که در صورت عدم تعادل میان تخصیص با موجودیت آب، تهدیدی برای پایداری سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه محسوب می‌شود.




**شکل ۱۵- آرکتایپ موفقیت برای موفق و تأثیر آن بر توزیع نامتوازن جمعیت ـ توسعه اقتصادی ـ تقاضای آب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

### مکانیزم رشد جمعیت و تولید فاضلاب/ پساب

مطابق با نتایج مطالعات پیشین (Gholizadeh Sarabi et al., 2020 and 2021)، یکی از مهم‌ترین منابع آلاینده رودخانه کشف‌رود در حوضه مشهد تخلیه فاضلاب خام و پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در آن می‌باشد. پساب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد از دو جهت اهمیت می‌یابد؛ از یک‌سو به لحاظ ایجاد آلودگی و از سوی دیگر بازچرخانی و استفاده مجدد از آن. رشد جمعیت با افزایش مصرف آب و در پی آن افزایش تولید فاضلاب و پساب همراه است. با تخلیه پساب به کشف‌رود، کیفیت آب رودخانه کاهش می‌یابد. به‌دنبال آن متغیر خدمات محیط‌زیستی نیز کاهش می‌یابد که در پی آن حساسیت اجتماعی افزایش خواهد یافت. با افزایش حساسیت اجتماعی، واکنش رفتاری منجر به اتخاذ تصمیمات مدیریتی در راستای حفظ محیط‌زیست می‌شود. از این‌رو اقداماتی از قبیل سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های آبی، از جمله احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یا بهبود وضعیت تصفیه‌خانه‌های موجود انجام خواهد شد. بدین ترتیب تصفیه فاضلاب با استانداردهای بالاتری جهت تخلیه به رودخانه انجام خواهد شد و آلودگی در کشف‌رود کاهش خواهد یافت (حلقه تعادلی L7). از طرف دیگر، طی همین روند، با افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یا بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های موجود و ایجاد زیرساخت‌های بازچرخانی آب، امکان استفاده از پساب بیشتر خواهد شد (حلقه تقویتی R9). با افزایش امکان استفاده از پساب در فعالیت‌های اقتصادی (صنعت و کشاورزی)، قسمتی از تقاضای آب در این بخش‌ها تأمین خواهد شد و به دنبال آن تقاضای کل آب کاهش می‌یابد که این خود منجر به افزایش واکنش رفتاری در راستای تصمیمات محیط‌محور خواهد شد (حلقه تقویتی R10) (شکل ۱۶).




**شکل ۱۶- حلقه‌های بازخوردی اصلی ارتباط جمعیت با تولید فاضلاب/پساب در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

## نتیجه‌گیری

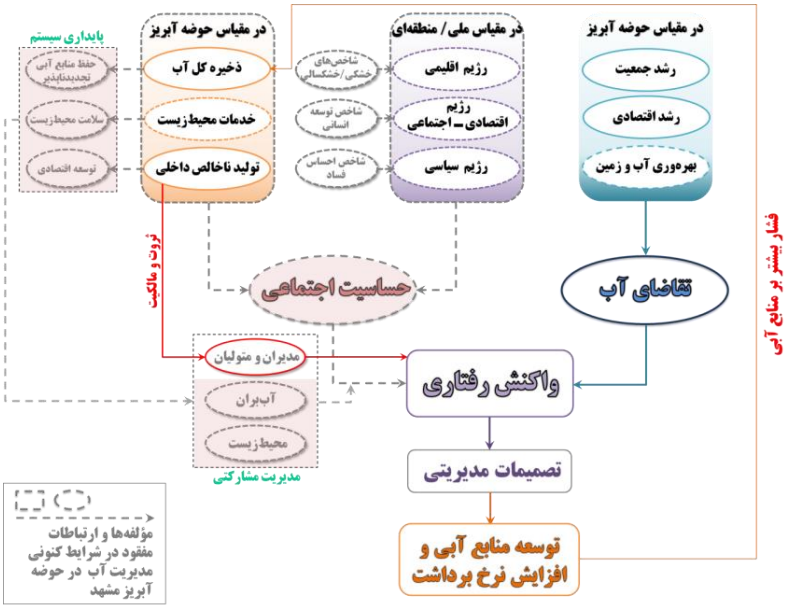
بر اساس نتایج مطالعات پیشین (قلی‌زاده سرابی و همکاران، Gholizadeh Sarabi et al., 2021؛۱۳۹۸)، شرایط بسیار پیچیده کنونی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد صرفاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و تصمیمات مدیریتی بدون توجه به ظرفیت سیستم طبیعی در ۵۰ سال اخیر است. گرچه مدیران حوزه آب عواملی از قبیل تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی‌های مکرر و تحریم‌های بین‌المللی را علت اصلی این شرایط بغرنج دانسته‌اند.

در این مطالعه اثر تصمیمات مدیریتی در قالب متغیر واکنش رفتاری، به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه از سیستم انسانی، بر سیستم طبیعی نشان داده شد. با قبول این فرضیه که واکنش رفتاری متأثر از دو متغیر تقاضای آب برای توسعه بیشتر و حساسیت اجتماعی می‌باشد، نشان داده شد که چگونه نقش تصمیمات مدیریتی در حوزه آب از طریق سه مؤلفه تخصیص آب، تغییر کاربری اراضی و سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های آبی بر زیرسیستم‌های مختلف تأثیرگذار است. نتایج مدل‌سازی کیفی هیدرولوژیکی اجتماعی با رویکرد پویایی سیستم در حوضه مشهد نشان می دهد که در حال حاضر هر سه آرکتایپ سیستمی غالب در حوضه شامل اصلاحات ناموفق، محدودیت رشد و موفقیت برای موفق، تنها ناشی از واکنش رفتاری متأثر از تقاضای فزاینده آب می‌باشد که منجر به اخذ تصمیمات مدیریتی انسان‌محور با هدف کسب ثروت و رشد اقتصادی سودجویانه، بدون توجه به محدودیت‌های سیستم طبیعی شده است. در این راستا بهره‌برداری افسارگسیخته از منابع آبی بدون توجه به نرخ تجدید پذیری این منابع صورت گرفته و حساسیت اجتماعی با هدف حفظ سلامت و پایداری سیستم طبیعی هیچ‌گونه نقشی در تصمیمات مدیریتی نداشته است. تحلیل حلقه‌های بازخوردی و آرکتایپ‌های غالب و رفتارهای مرجع در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد نشان می‌دهد که در این حوضه سیستم هیدرولوژیکی در آستانه فروپاشی قرار دارد که بدون شک سیستم اجتماعی نیز به‌شدت از این فروپاشی متأثر خواهد شد. مادامی‌که واکنش رفتاری تنها تحت تأثیر تقاضای فزاینده آب و بی‌توجه به محدودیت منابع آبی منجر به اخذ تصمیمات مدیریتی در حوضه گردد، عدم تعادل سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی به‌طور مداوم بیشتر و بیشتر خواهد شد و سرانجام کل سیستم دچار شکست و فروپاشی می‌گردد.

همان طور که اشاره شد، متغیر حساسیت اجتماعی تابعی از سه مؤلفه کلان در مقیاس ملی شامل رژیم اقلیمی، توسعه اقتصادی ــ اجتماعی و رژیم سیاسی و سه مؤلفه خُرد در مقیاس حوضه شامل ذخیره آب، خدمات محیط زیستی و سرانه تولید ناخالص داخلی می‌باشد. در یک سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی متعادل و پایدار، تصمیمات مدیریتی مرتبط با تخصیص آب و تعیین نرخ برداشت سالانه از منابع آبی، مبتنی بر شاخص‌های تجدید پذیری و پایایی منابع آبی و نه غارت منابع آب، اتخاذ می‌گردد. زمین و سایر منابع طبیعی نیز مبتنی بر شاخص‌های حفظ سلامت محیط‌زیستی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. همچنین گسترش دامنه و تنوع فعالیت‌های اقتصادی نیز نه صرفاً با هدف کسب ثروت و رشد اقتصادی سودجویانه، بلکه با هدف توسعه اقتصادی خردمندانه صورت می‌گیرد. به‌علاوه، در چنین سیستمی، ارزش‌ها و هنجارهای اجتماعی، رضایت و برابری اجتماعی، توافق جمعی، همبستگی و مشارکت اجتماعی نهادهای گوناگون نیز به‌عنوان محرک‌های قدرتمندی بر حساسیت اجتماعی و متعاقباً واکنش رفتاری موردتوجه قرار می‌گیرند که در نهایت اثرات آن در سطوح بالای جامعه بر تصمیمات مدیریتی انعکاس می‌یابد. در واقع، در یک سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی متعادل، کاهش سه متغیر مقدار ذخائر آبی، سطح خدمات محیط‌زیستی و سرانه تولید ناخالص داخلی در مقیاس حوضه آبریز، همواره با افزایش حساسیت اجتماعی در واکنش رفتاری نمود می یابند و منجر به تقویت تصمیمات مدیریتی محیط‌محور در راستای حفظ پایداری سیستم خواهند شد. حال آنکه در حوضه مشهد اتخاذ تصمیمات مدیریتی، فقط در راستای افزایش ذخائر آبی و تنها با هدف تأمین تقاضای فزاینده آب بوده است. همچنین بهره‌برداری از منابع طبیعی و گسترش فعالیت‌های اقتصادی نیز بدون توجه به معیارهای پایداری و سلامت محیط‌زیستی و تنها با هدف تولید ثروت و رشد اقتصادی منفعت‌طلبانه صورت گرفته است. از طرف دیگر تنها گروه بازخورد دهنده به تابع واکنش رفتاری مدیران دولتی هستند که متأثر از رژیم اقتصادی ـ اجتماعی و رژیم سیاسی در مقیاس ملی می‌باشند. این در حالی است که آب‌بران و حوزه محیط‌زیست نیز دو بخش کاملاً تأثیرگذار بر سیستم هیدرولوژیکی هستند که بر سطوح حساسیت اجتماعی نیز به‌شدت تأثیرگذارند، اما در واکنش رفتاری و تصمیمات مدیریتی در مقیاس حوضه دخیل نمی‌باشند.

در نگاهی کلی، وابستگی آب‌بران در زیرسیستم اقتصادی، شامل بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات، به سیستم هیدرولوژیکی عمدتاً با هدف تأمین آب در جهت تحقق اهداف اقتصادی و تولید ثروت و کسب مالکیت می‌باشد. در مقابل وابستگی آب‌بران در زیرسیستم اجتماعی، شامل بخش شهری، به سیستم هیدرولوژیکی با هدف بقای جوامع انسانی است. در واقع وابستگی دو زیرسیستم اقتصادی و اجتماعی در سیستم انسانی به زیرسیستم هیدرولوژیکی برای بقا، یک وابستگی یک‌سویه است و فروپاشی این دو زیرسیستم نه تنها آسیبی به زیرسیستم هیدرولوژیکی وارد نمی‌کند، بلکه شرط تعادل و بقای آن نیز می‌باشد. از این‌رو حساسیت اجتماعی و واکنش رفتاری آب‌بران در جهت حفظ بقای آن‌ها، نقشی کلیدی را در سیستم

هیدرولوژیکی اجتماعی ایفا می‌نماید. از سوی دیگر میان زیرسیستم هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی در سیستم طبیعی رابطه‌ای کاملاً دوسویه برقرار است که پایداری هر دوی آن‌ها از اهداف حوزه محیط‌زیست می‌باشد. از این‌رو اهمیت نقش مدافعان محیط‌زیست در تقویت حساسیت اجتماعی و اثرات آن بر واکنش رفتاری نیز بسیار تعیین‌کننده خواهد بود. بدین ترتیب، بدون دخالت این دو بخش در مدیریت منابع آب، تصمیمات مدیریتی مدیران دولتی به‌عنوان صاحبان قدرت و متولیان حوزه آب، همواره منجر به توسعه منابع آبی و افزایش نرخ برداشت آب در جهت تأمین تقاضا بوده است (شکل ۱۷).




**شکل ۱۷- حلقه گمشده حساسیت اجتماعی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد**

در شرایط کنونی حوضه مشهد، گرچه که آب‌بران و حوزه محیط‌زیست از جایگاهی رسمی و قانونی در خصوص تصمیم‌گیری‌های مدیریتی آبی برخوردار نیستند، اما می‌توانند به‌واسطه متغیر حساسیت اجتماعی به‌طور غیرمستقیم بر واکنش رفتاری مدیران تصمیم‌گیرنده در سطوح بالای جامعه تأثیرگذار باشند که روندی رو به رشد می‌باشد. در یک طبقه‌بندی کلی میان آب‌بران مختلف، به نظر می‌رسد که کشاورزان آسیب‌پذیرترین گروه آب‌بر می‌باشند، چراکه به لحاظ اقتصاد معیشتی، فرهنگی، ارزش‌ها و باورهای اجتماعی بقای آن‌ها کاملاً به آب وابسته است. در مقابل، شهروندان نسبت به بحران‌های آبی حساسیت کمتری دارند، چراکه از خدمات محیط‌زیستی، رفاه و امنیت آبی بیشتری برخوردارند. همچنین صاحبان صنایع نیز علاوه بر اینکه به‌طورکلی نسبت به دو گروه کشاورزان و بخش شهری نیاز آبی بسیار کمتری دارند، به‌واسطه ثروت، سرمایه‌گذاری و قدرت ناشی از آن، به طرق مختلف قانونی یا غیرقانونی می‌توانند به منابع آبی موردنیاز دست یابند؛ از این‌رو با وقوع بحران‌های آبی، آسیب بسیار کمتری به این گروه وارد می‌شود. بدین ترتیب، کشاورزان به‌عنوان آسیب‌پذیرترین گروه آب‌بر، می‌توانند تأثیرگذارترین گروه در سطوح حساسیت اجتماعی نیز باشند که چنین نیز هست. با این حال، به دلایل متعددی نسبت به وضعیت بحرانی سیستم آبی از سطوح حساسیت آن‌ها کاسته شده است و به‌رغم اینکه از شرایط کمیابی منابع آبی رنج می‌برند، نسبت به بهره‌برداری از منابع آبی نگرشی فردگرایانه و خودمحور در میان آن‌ها شکل یافته است. این نگرش در واکنش‌هایی از قبیل حفر چاه‌های غیرمجاز و نیز بهره‌برداری بیشتر از حد مجاز و متعاقباً منازعات آبی میان کشاورزان و غیره، نمود یافته است. حساسیت پایین‌تر از انتظار این گروه را می‌توان متأثر از چهار عامل اصلی دانست. اول اینکه، در دسترس نبودن آمار و اطلاعات برای عموم و عدم شفافیت وضعیت منابع آب، منجر به درک نادرست یا بی‌اطلاعی کشاورزان از میزان وخامت شرایط آبی شده است. دوم اینکه، بیش از ۹۰٪ از نیاز آبی کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود، درحالی‌که افت مدام و ذخیره رو به اتمام سفره آب زیرزمینی برای کشاورزان قابل‌مشاهده نیست. عدم مشاهده فیزیکی وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی، منجر به عدم باور کشاورزان از وخامت وضعیت این منابع شده است. عامل سوم، مرتبط با عدم شفافیت قوانین آبی و عدم نظارت بر اجرای صحیح قوانین می‌باشد. بدین‌صورت که عدم اعتماد و سستی در اجرای قوانین آبی و عدم نظارت سخت‌گیرانه و عادلانه بر اجرای آن، منجر به کاهش

مشروعیت مدیران و متولیان بخش آب نزد کشاورزان شده است. عامل چهارم و مهم‌ترین عامل، استمرار بی‌عدالتی در خصوص احقاق حقوق کشاورزان است که منجر به رشد سرخوردگی ایشان شده است. این سرخوردگی موجب عدم پیگیری حق توسط کشاورزان شده که ایشان را به‌جای حافظان منابع آب، در زمره غارتگران آب قرار داده است. بدیهی است که چنانچه سرخوردگی ایشان با جلب اعتماد و مشارکت دادن و شفافیت رفع گردد، ذاتاً به هویت اصلی خود که حافظان آب هستند، بر خواهند گشت. بدین ترتیب، در بررسی چالش‌های اساسی مدیریت آب و در راستای رفع شکاف میان متولیان بخش آب و آب‌بران، توجه به سرمایه اجتماعی[۴۲] و ایجاد انگیزه در اقدام جمعی، امری حیاتی در بهبود مدیریت منابع آبی محسوب می‌شود. بدون شک، از دست دادن سرمایه اجتماعی و عدم حساسیت اجتماعی، فقط به رابطه میان دولت و گروه‌های آب‌بر محدود نمی‌شود، بلکه در نهایت سبب ایجاد چرخه معیوب رشد بی‌اعتمادی میان تمام اعضای جامعه در تمامی سطوح خواهد شد. مادامی‌که کنش‌گری و واکنش رفتاری تنها متأثر از نقش مدیران دولتی در حوزه آب باشد و نقش سایر سطوح اجتماعی حساس به آب در آن نادیده گرفته شود، حلقه حساسیت اجتماعی به‌عنوان متعادل‌کننده ارتباط سیستم طبیعی و انسانی، همواره یک حلقه مفقود باقی خواهد ماند.

## پی‌نوشت

1. The Anthropocene
2. Integrated Water Resources Management (IWRM)
3. Coupled Human and Nature Systems (CHANS)
4. Social-Ecological Systems (SES)
5. Evolutionary systems
6. Feedbacks
7. Nonlinearities
8. Thresholds
9. Transformations
10. Time lags
11. Socio-hydrology
12. Conceptual model
13. Co-evolution
14. Perceptual model
15. System understanding
16. System dynamics
17. Bayesian networks
18. Coupled component
19. Agent-based
20. Knowledge-based
21. Historical socio-hydrology
22. Natural phase
23. Expansion phase
24. Traditional development
25. Industrial development
26. Contraction phase
27. Conceptualization
28. State Variable
29. Predictive simulation models
30. Descriptive integrated models
31. Participatory and shared vision models
32. Causal Loop Diagrams: CLDs
33. Stock and Flow Diagrams: SFDs
34. Reference Modes
35. System Archetypes
36. Community Sensitivity
37. Behavioral Response
38. Ecosystem services
39. Gross domestic product: GDP
40. Human Development Index: HDI
41. Corruption Perception Index: CPI
42. Social capital

## منابع


قلی‌زاده سرابی، ش.، داوری، ک.، قهرمان، ب. و شفیعی، م. ۱۳۹۸. مطالعه تاریخی سیستم پیوسته انسان ـ آب از منظر هیدرولوژی اجتماعی، محدوده موردمطالعه: حوضه آبریز مشهد. تحقیقات منابع آب ایران. ۴ (۱۵): ۱۴۸ ـ ۱۷۰.

قلی‌زاده سرابی، ش.، قهرمان، ب. و شفیعی، م. ۱۳۹۷. علم جدید هیدرولوژی اجتماعی: در جستجوی درک مفهوم هم‌تکاملی انسان و آب. تحقیقات منابع آب ایران. ۵ (۱۴): ۳۵۱ ـ ۳۵۹.

مافی، ع.ا. و سقایی، م. ۱۳۸۹. نگاهی به اقتصاد گردشگری در کلان‌شهرها (مطالعه موردی: کلان‌شهر مشهد). جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای. ۱۵: ۲۶۷ ـ ۲۹۲.

Annin, P. 2006. The Great Lakes water wars. Island Press, Washington DC, 384 p.

Arthington, A. H. and Pusey, B. J. 2003. Flow restoration and protection in Australian rivers. River Research and Applications. 19:377–395.

Bagheri, A. and Hosseini, S. A. 2011. A system dynamics approach to assess water resources development scheme in the Mashhad plain, Iran, versus sustainability. ASCE Conference on the 4th International Perspective on Water Resources & the Environment, 4-6 January, Singapore.

Berkes, F. 2007. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: Lessons from resilience thinking. Natural Hazards. 41:283–295.

Beven, K. J. 2012. Rainfall-runoff modelling: the primer. Wiley Chichester, 457 p.

Water Resources Research. 51:6442–6471.

Elshafei, Y., Sivapalan, M., Tonts, M. and Hipsey, M. R. 2014. A prototype framework for models of socio-hydrology: identification of key feedback loops and parameterisation approach. Hydrology and Earth System Sciences. 18: 2141–2166.

Falkenmark, M. 1977. Water and mankind: A complex system of mutual interaction. Ambio. 6:3-9.

Falkenmark, M. 1979. Main problems of water use and transfer of technology. GeoJournal. 3: 435-443.

Fernald, A., Tidwell, V., Rivera, J., Rodríguez, S., Guldan, S., Steele, C., Ochoa, C., Hurd, B., Ortiz, M., Boykin, K. and Cibils, A. 2012. Modeling sustainability of water, environment, livelihood, and culture in traditional irrigation communities and their linked watersheds. Sustainability. 4: 2998–3022.

Fishman, C. 2011. The Big Thirst: The secret life and turbulent future of water. Simon and Schuster, New York, 418 p.

Folke, C. 2003. Freshwater for Resilience: A Shift in Thinking. Philosophical Transactions of the Royal Society B. 358: 2027–2036.

Forbes, B. C., Fresco, N., Shvidenko, A., Danell, K. and Chapin, F. S. 2004. Geographic variations in anthropogenic drivers that influence the vulnerability and resilience of social–ecological systems. Ambio. 33:377–382.

Ford, A. 1999. Modeling the environment. Island Press, Washington, 401 p.

Forrester, J. 1961. Industrial dynamics. MIT Press, Cambridge, 464 p.

Forrester, J. 1969. Urban dynamics. MIT Press, Cambridge, 290 p.

Garcia, M., Portney, K. and Islam, S. 2015. A question driven sociohydrological modeling process. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 12:8289–8335.

Gholizadeh Sarabi, S. H., Davary, K., Ghahraman, B. and Shafiei, M. 2021. A perceptual socio-hydrological model of co-evolutionary coupled human–water system based on historical analysis, Mashhad basin, Iran. Hydrological Sciences Journal. 66(3): 355-372.

Gregory, K. J. 2006. The human role in changing river channels. Geomorphology. 79:172–191.

Hanseok, J. and Adamowski, J. 2016. A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. Agricultural Water Management. 171: 89-107.

Jones, A. 2012. Human geography: The basics.

Blair, P. and Buytaert, W. 2016. Socio-hydrological modelling: a review asking “why, what and how?”. Hydrology and Earth System Sciences. 20: 443-478.

Briguglio, L., Cordina, G., Farrugia, N. and Vella, S. 2009. Economic vulnerability and resilience: Concepts and measurements. Oxford Development Studies. 37:229–247.

Bunch, M. J., Morrison, K. E., Parkes, M. W. and Venema, H. D. 2011. Promoting Health and Well-Being by Managing for SocialEcological Resilience: the potential of integrating ecohealth and water resources management Approaches. Ecology and Society. 16:6–23.

Button, K. 2002. City Management and Urban Environmental Indicators. Ecological Economics. 40(2): 217–233.

Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R. and McKenzie, J. M. 2014. Toward hydro-social modeling: Merging human variables and the social sciences with climateglacier runoff models (Santa River, Peru). Journal of Hydrology. 518: 60–70.

Cumming, G., Barnes, G., Perz, S., Schmink, M., Sieving, K., Southworth, J., Binford, M., Holt, R., Stickler, C. and Holt, T. 2005. An Exploratory Framework for the Empirical Measurement of Resilience. Ecosystems. 8: 975–987.

Daily, G. C. 1997. Nature’s services: societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington DC, 412 p.

Davies, E. G. R. and Simonovic, S. P. 2011. Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. Advances in Water Resources. 34: 684–700.

Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L. and Blöschl, G. 2013b. Socio-hydrology: conceptualising human flood interactions. Hydrology and Earth System Sciences. 17: 3295–3303.

Dooge, J. C. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Technical Bulletin No. 1468. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, 337 p.

Elagib, N. A., Musa, A. A. and Sulieman, H. M. 2017. Socio-hydrological Framework of Farmer-Drought Feedback: Darfur as a Case Study. Water Resources in Arid Areas: The Way Forward: 461-479.

Elshafei, Y., Coletti, J. Z., Sivapalan, M. and Hipsey, M. R. 2015. A model of the socio-hydrologic dynamics in a semiarid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system.

Problems. Water Resources Management. 26:2421–2442.

Molle, F. 2003. Development trajectories of river basins: a conceptual framework, Research Report, International Water Management Institute, 72, Colombo, Sri Lanka.

Odhiambo, N. M. 2008. Financial Depth, Savings and Economic Growth in Kenya: A Dynamic Causal Linkage. Economic Modelling. 25(4): 704–713.

Odum, E. P. 1989. Ecology and our endangered life-support systems. Sinauer Associates, Massachusetts, 283 p.

Pande, S. and Savenije, H. H. G. 2016. A sociohydrological model for smallholder farmers in Maharashtra, India. Water Resources Research. 52: 1923-1947.

Qin, H., Zheng, C., Xin, H. and Refsgaard, J. C. 2019. Analysis of Water Management Scenarios Using Coupled Hydrological and System Dynamics Modeling. Water Resources Management. 33: 4849–4863.

Randers, J. 1980. Guidelines for model conceptualization. In: Randers J (ed) Elements of the system dynamics method. MIT Press: Cambridge, Massachusetts, pp 117–139.

Richmond, B. 1993. Systems thinking: critical thinking skills for the 1990ies and beyond. System Dynamics Review. 9(2): 113–133.

Richmond, B. 1994. Systems thinking/system dynamics: let's just get on with it. System Dynamics Review. 10(2/3): 135–157.

Roobavannan, M., Kandasamy, J., Pande, S., Vigneswaran, S. and Sivapalan, M. 2017. Role of Sectoral Transformation in the Evolution of Water Management Norms in Agricultural Catchments: A Sociohydrologic Modeling Analysis. Water Resources Research. 53: 8344–8365.

Saeed, K. 1998. Defining a problem or constructing a reference mode. In: Proceedings of the 16th International Conference of the System Dynamics Society Quebec '98, Quebec City, Canada.

Sawada, Y. and Hanazaki, R. 2020. Socio-hydrological data assimilation: analyzing human–flood interactions by model–data integration. Hydrology and Earth System Sciences. 24(10): 4777–4791.

Senge, P. 1990. The Fifth Discipline: the art & practice of the learning organization. Doubleday/Currency, New York, 412 p.

Sherrieb, K., Norris, F. H. and Galea, S. 2010. Measuring Capacities for Community Resilience. Social Indicators Research. 99: 227–247.

Routledge: Taylor and Francis, tandfonline.com, New York, NY, 224 p.

Kandasamy, J., Sounthararajah, D., Sivabalan, P., Chanan, A., Vigneswaran, S. and Sivapalan, M. 2014. Socio-hydrologic drivers of the pendulum swing between agricultural development and environmental health: a case study from Murrumbidgee River basin, Australia. Hydrology and Earth System Sciences. 18: 1027-1041.

Kelly, R. A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., ElSawah, S., Hamilton, S. H., Henriksen, H. J., Kuikka, S., Maier, H. R., Rizzoli, A. E., van Delden, H. and Voinov, A. A. 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling and Software. 47: 159-181.

Liu, D., Tian, F., Lin, M. and Sivapalan, M .2015a. A conceptual sociohydrological model of the co-evolution of humans and water: case study of the Tarim River basin, western China. Hydrology and Earth System Sciences. 19: 1035-1054.

Liu, H., Benoit, G., Liu, T., Liu, Y. and Guo, H. 2015b. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale. Journal of Environmental Management. 155: 11–23.

Liu, J. G., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H. and Taylor, W.W. 2007b. Complexity of coupled human and natural systems. Science. 317: 1513–1516.

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., Alberti, M., Redman, C. L., Schneider, S. H., Ostrom, E., Pell, A. N., Lubchenco, J., Taylor, W. W., Ouyang, Z., Deadman, P., Kratz ,T. and Provencher, W. 2007a. Coupled human and natural systems. Ambio. 36: 639–649.

Liu, Y., Gupta, H., Springer, E. and Wagener, T. 2008. Linking science with environmental decision making: experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. Environmental Modelling and Software. 23: 846-858.

Madani, K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. Journal of Environmental Studies and Sciences. 4(4): 315-328.

Marsh, G. P. 1864. Man and Nature. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, 504 p.

Mirchi, A., Madani, K., Watkins, Jr. D. and Ahmad, S. 2012. Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources

McGraw-Hill, Boston, 1008p.

Thomas, Jr. W. L. 1956. Man's Role in Changing the Face of the Earth. University of Chicago Press, Chicago, USA, 1236 p.

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky C, Pulsipher, A. and Schiller, A. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 100: 8074–8079.

Vörösmarty, C. J., Pahl-Wostl, C. and Bhaduri, A. 2013a. Water in the anthropocene: New perspectives for global sustainability. Current Opinion in Environmental Sustainability. 5(6): 535–538.

Vörösmarty, C. J., Pahl-Wostl, C., Bunn, S. E. and Lawford, R. 2013b. Global water, the anthropocene and the transformation of a science. Current Opinion in Environmental Sustainability. 5(6): 539–550.

Walker, K. and Thoms, M. 1993. Environmental effects of flow regulation on the lower River Murray, Australia. Regulated Rivers Research & Management. 8:103–119.

Wolstenholme, E. F. 2003. Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. System Dynamics Review. 19(1): 7–26.

Xu, L., Gober, P., Wheater, H. S. and Kajikawa, Y. 2018. Reframing socio-hydrological research to include a social science perspective. Journal of Hydrology. 563: 76–83.

Xu, Z. X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Qhang, X. W. 2002. Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. Water Resources Management. 16(3): 239–261.

Simane, B., Zaitchik, B. F. and Mesfin, D. 2012. Building Climate Resilience in the Blue Nile/Abay Highlands: A Framework for Action. International Journal of Environmental Research and Public Health. 9: 435–461.

Simonovic, S. P. 2009. Managing water resources: methods and tools for a systems approach. UNESCO, Paris and Earthscan James & James, London, 680 p.

Sivapalan, M. and Bloschl, G. 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. Water Resources Research. 51: 6988–7022.

Sivapalan, M., Konar, M., Srinivasan, V., Chhatre, A., Wutich, A., Scott, C. A., Wescoat, J. L. and Rodríguez-Iturbe, I. 2014. Sociohydrology: Use inspired water sustainability science for the Anthropocene. Earth's Future. 2: 225–230.

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G. and Blöschl, G. 2012. Sociohydrology: A new science of people and water. Hydrology and Earth System Sciences. 26: 1270-1276.

Smith, J., Moore, R., Anderson, D. and Siderelis, C. 2012. Community Resilience in Southern Appalachia: A Theoretical Framework and Three Case Studies. Human Ecology. 40: 341–353.

Srinivasan, V. 2015. Reimagining the past – use of counterfactual trajectories in socio-hydrological modelling: the case of Chennai, India. Hydrology and Earth System Sciences. 19: 785–801.

Stave, K. A. 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. Environmental Management. 67(4): 303–313.

Sterman, J. D. 2000. Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 512-536

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۵۳۶-۵۱۲

# Development of a Conceptual Framework for Socio-hydrological Modeling Using Qualitative System Dynamics Approach, Case Study: Mashhad Masin

**SH. Gholizadeh Sarabi[1*], K. Davary[2], B. Ghahraman[3], M. Shafiei[4]**

Recived: Feb.04, 2022 Accepted: Mar.14, 2022

## Abstract

Sustainable water resources management is the hardest challenge facing human communities, and improvement of understanding complex interactions in coupled human-water systems is very important in achieving it. In recent decade, socio-hydrological modelling is of the most widely used methods for description of interactions and co-evolution of human-hydrological systems. In this study which is the first attempt to develop a conceptual framework for socio-hydrological modelling in Iran with the aim of understanding coupled human-water systems, after development of the conceptual framework, its application in Mashhad basin based on the qualitative system dynamics approach has been shown. In the proposed framework, the impact of managerial decisions on the natural system has been defined as the behavioural response variable, influenced by community sensitivity. Results showed that, now, fixes that fail, limits to growth, and success to the successful are dominant archetypes in Mashhad basin. In fact, behavioural response influenced by water demand has resulted in managerial decisions aiming at profit-oriented economic growth with no consideration for the natural system limitation. Accordingly, overexploitation of water resources regardless of the renewal rate of water resources has occurred, and community sensitivity with the aim of maintaining the water system sustainability has played no role in managerial decision-making. As long as the role of other water-sensitive social levels in behavioural response is ignored, the community sensitivity loop as a balancer balancing the human-nature relationship remains missing and defective forever.

**Keywords:** Community sensitivity, Conceptual framework, Coupled human-water system, Qualitative system dynamics, Socio-hydrology

1- Research Assistant Professor, Department of Hydroinformatics, East Water and Environmental Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran
2- Professor, Departmentof Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Professor, Departmentof Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Research Assistant Professor, Department of Hydroinformatics, East Water and Environmental Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: Shiva.gh.Sarabi@gmail.com)