تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 4, Winter 2020 (IR-WRR)
۱۴۸-۱۷۰

مطالعه تاریخی سیستم پیوسته انسان- آب از منظر هیدرولوژی اجتماعی، محدوده مورد مطالعه: حوضه آبریز مشهد

شیوا قلی‌زاده سرابی[۱]، کامران داوری[۲*]، بیژن قهرمان[۳] و مجتبی شفیعی[۴]

چکیده

درک روابط پیچیده میان سیستم‌های طبیعی و انسانی و شناخت پویایی هم‌تکاملی انسان و آب، در برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار بسیار پراهمیت است. در دهه اخیر شناخت چنین سیستم‌هایی از طریق مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی محقق شده است. مقاله حاضر با هدف به‌کارگیری ابعاد علم هیدرولوژی اجتماعی و بررسی تاریخ هم‌تکاملی، به‌عنوان نخستین گام در شناخت سیستم پیوسته انسان- آب، طی انجام مطالعه تاریخی، ارائه شده است؛ بدین‌منظور حوضه مشهد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین حوضه‌های آبریز کشور، به‌خصوص در شرق ایران، انتخاب شده است. در این مقاله پس از طبقه‌بندی مراحل مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی، تسلسل تاریخی وقایع طبیعی/فعالیت‌های انسانی و تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد بررسی شده است. طبق نتایج، طی دوره معاصر، سال‌های ۱۳۰۰ تا کنون و ۱۳۴۵ تا کنون، به‌ترتیب به‌عنوان فازهای توسعه و انقباض شناسایی شده‌اند. در واقع به‌رغم وجود شرایط انقباض، توسعه ادامه یافته است؛ مسلماً هنوز حوضه وارد فازهای رکود و بهبود و تعادل جدید نشده است. در نهایت مدلی ادراکی جهت شناخت سیستم هیدرولوژیکی اجتماعیِ حوضه طرح‌ریزی شده که در آن کمیت و کیفیت منابع آبی و تقاضای آب به‌عنوان مهم‌ترین نیروهای محرک داخلی و مؤلفه‌های هیدرواقلیمی به‌عنوان مهم‌ترین نیروی محرک خارجیِ مؤثر بر هم‌تکاملی سیستم پیوسته انسان- آب، عمل می‌کنند.

کلمات کلیدی: هیدرولوژی اجتماعی، مطالعه تاریخی، سیستم پیوسته انسان- آب، هم‌تکاملی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۷/۱۰

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۴- استادیار پژوهشی، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط‌زیست شرق (EWERI).
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Historical Study of Coupled Human-Water System From Socio-Hydrological Perspective, Case Study: Mashhad Basin

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

Abstract

Understanding complex relation between natural and human systems and dynamic co-evolution of human and water, is of great importance in planning for sustainable development. In the last decade, comprehensive recognition of such systems has been achieved through the historical study in socio-hydrology science. This paper aims to apply socio-hydrological aspects and investigate co-evolutionary history through the historical study, as the first step to understand coupled human-water system. To this aim, Mashhad basin was selected as one of the most important and complex basins in Iran, especially in the east of country. In this paper, when the stages of the historical socio-hydrology study had been classified, historical sequence of natural events/ human activities and changes of socio-hydrological components in Mashhad basin were investigated. Based on results, during the contemporary period, we recognized two periods of 1921 up to now, and 1966 up to now as expansion and contraction phases, respectively. Indeed, despite the contraction conditions, development has continued; obviously, the basin has not yet entered recession and recovery and new equilibrium phase. Finally, a perceptual model was developed to understand socio-hydrological system of basin where water resources quality and quantity and water demand are the most important internal forces, and hydro-climatic components are the most important external forces which effect on the coupled human-water system co-evolution.

Keywords: Socio-Hydrology, Historical Study, Coupled Human-Water System, Co-Evolution.

Received: June 12, 2019
Accepted: October 2, 2019

1- Ph.D., Student, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: k.davary@um.ac.ir.
3- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4- Research Assistant Professor, Hydroinformatics Department, East Water and Environmental Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

بدون شک آب کانون اصلی حیات و عاملی کلیدی در تأمین سلامت انسانی، ایجاد امنیت غذایی، حفظ تداوم فعالیت‌های اقتصادی،کاهش فقر، افزایش رفاه اجتماعی و بهبود محیط‌زیست می‌باشد. در تاریخ طولانی تمدن بشر، انسان‌ها در ابتدا در مجاورت رودخانه‌ها ساکن شدند و سپس جوامع انسانی در قالب قبایل، روستاها و شهرها توسعه یافته و هسته بسیاری از تمدن‌های کهن بشری را شکل دادند، که به‌تدریج پیچیدگی ساختار اجتماعی را در پی داشته است. طی این فرایند تکاملی[۱]، وضعیت منابع آبی همواره محدودیت‌های قابل توجهی را بر فعالیت‌های بشری و تکامل اجتماعی تحمیل نموده و در مقابل فعالیت‌های انسانی نیز رژیم آبی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است (Ponting, 1992). در واقع واکنش‌های متقابل انسانی به تغییرات اجتماعی و زیست‌بوم، به نوبه خود بازخوردهایی را به سیستم‌های طبیعی و اقلیمی منعکس می‌نماید که منجر به ایجاد روابطی در هم‌تنیده و چندبُعدی میان این سیستم‌ها در مقیاس‌های مکانی و زمانی گوناگون می‌گردد (Costanza et al., 2007). درک چنین روابط پیچیده‌ای در سیستم پیوسته انسان- آب و شناخت پویایی هم‌تکاملی[۲] مابین آنها، در برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار جوامع انسانی بسیار پراهمیت است. بنابر اعتقاد Sivapalan et al. (2012)، این شناخت در سایه علم نوظهور هیدرولوژی اجتماعی[۳] محقق می‌گردد؛ هیدرولوژی اجتماعی با هدف درک "پویایی و هم‌تکاملی سیستم‌های پیوسته انسان و آب" (Sivapalan et al., 2012) علمی است که در چارچوب‌های اقتصاد و سیاست شکل گرفته (Lane, 2014) و از تحقق این واقعیت ظهور یافته است که امروزه جوامع انسانی مهم‌ترین محرک تغییر چرخه‌های حیاتی از جمله آب، غذا و انرژی به‌شمار می‌آیند (Vitousek et al., 1997; Vorosmarty et al., 2010)؛ از این‌رو مرزهای علم هیدرولوژی را به‌سمت پذیرش انسان به‌عنوان جزیی تفکیک‌ناپذیر و یکپارچه با چرخه هیدرولوژی سوق داده است (Blair and Buytaert, 2016). هم‌تکاملی به‌عنوان مفهومی اساسی در مطالعات هیدرولوژی اجتماعی بدین معناست که، در سیستم‌های پیوسته دو یا چند سیستم تکامل یابنده در طول زمان به‌طور مداوم و پویا با یکدیگر در ارتباط هستند و روند تکاملی هر یک بر تکامل سیستم‌های دیگر تأثیرگذار است (Winder et al., 2005).

هیدرولوژی اجتماعی تاریخی[۴] که یکی از روش‌های اصلی در مطالعات هیدرولوژی اجتماعی است، شامل مطالعه گذشته یک سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی و شناسایی فرایندهای هم‌تکاملی از طریق تجزیه و تحلیل سیستماتیک وقایع فیزیکی و اجتماعی، مکانیزم وقوع و برهمکنش آنها با یکدیگر و سازماندهی آنها در مراحل مجزا می‌باشد (Sivapalan et al., 2012; Liu et al., 2014). در واقع این مطالعات برای تدقیق تئوری‌ها و فرضیه‌های مدل‌سازی سیستم‌های پیوسته انسان- آب، در جستجوی الگوهای تاریخی هستند؛ گرچه اغلب بر این نکته تأکید دارند که یکی از چالش‌های اصلی در تعیین الگوهای تاریخی، تعیین مکان‌هایی است که در مقیاس زمانی دهه تا قرن دارای پایگاه داده مناسب باشند (Kandasamy et al., 2014; Liu et al., 2015a).

پس از شناخت و ادراک کامل سیستم پیوسته انسان- آب، پیش‌بینی آنچه که در آینده رخ خواهد داد با تکیه بر مدل‌سازی امکان‌پذیر می‌گردد. بی‌شک شناخت کامل سیستم، اولین گام اساسی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی محسوب می‌شود و این ادراک از سیستم در مفهومی‌سازی آن نمود پیدا کرده و در نهایت در خروجی‌های مدل ریاضی نمایان می‌گردد. مسلماً پیش از انتخاب هرگونه هدف و رویکردی در مدل‌سازی کمّی، تدوین مدل ادراکی[۵] از اهمیت بسیاری برخوردار است. به‌طوری‌که اولین مرحله در مدل‌سازی هیدرولوژی ارائه مدل ادراکی فرایندهای حاکم بر سیستم می‌باشد (Beven, 2012)؛ در واقع مدل ادارکی ساده‌سازی ذهنی و شخصی هر هیدرولوژیست از نحوه واکنش‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز تحت شرایط مختلف است (Shafiei and Gharari, 2017). در همین راستا، Sivapalan and Blöschl (2015) معتقدند در مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی نیز، پس از شناخت پدیده‌ها، دامنه وقوع و تغییرات زمانی- مکانی آنها در اولین مرحله از مدل‌سازی، مرحله دوم شامل طرح‌ریزی مدل ادراکی با هدف توصیف سیستم است. چنین مدل‌هایی در مطالعات متعدد هیدرولوژی اجتماعی با اهداف مختلفی ارائه شده‌اند؛ از جمله مدل Elshafei et al. (2014) با هدف توصیف سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه‌های آبریز کشاورزی استرالیا، مدل Carey et al. (2014) با هدف شناسایی برهمکنش‌های میان مصرف و موجودیت آب و اثر یخچال‌های طبیعی و تغییر اقلیم بر سیستم هیدرولوژی- انسانی در پرو، مدل Pande and Savenije (2016) با هدف توصیف بازخوردهای میان متغیرهای هیدرولوژیکی اجتماعی در کشاورزی خرده‌مالکی در هندوستان، مدل Westerberg et al. (2017) با هدف بررسی عدم قطعیت در سیستم‌های هیدرولوژیکی اجتماعی در زمان وقوع سیل، و مدل Elagib et al. (2017) با هدف مفهومی‌سازی حلقه‌های بازخوردی هیدرولوژیکی اجتماعی میان کشاورزان و خشکسالی در سودان، نمونه‌هایی از این مطالعات هستند؛ مرور مطالعات داخلی نشان می‌دهد که در ایران تا کنون فقط مقالات محدودی با هدف معرفی موضوع جدید هیدرولوژی اجتماعی و تبیین مفاهیم، اهداف و رویکردهای آن ارائه شده است

Mianabadi et al., 2017; Mianabadi et al., 2018; Gholizadeh sarabi et al., 2019).

یک هدف واحد در تمام مطالعات بررسی شده، تأکید بر ضرورت در نظر گرفتن برهمکنش میان جوامع انسانی و سیستم‌های آبی در توسعه مدل‌ها است؛ گرچه که نویسندگان هر یک نظرات متفاوتی در چگونگی در نظر گرفتن برهمکنش‌ها، حوزه عملکرد و ارزش مدل‌های هیدرولوژیکی اجتماعی دارند. همچنین از جمع‌بندی این مطالعات چنین برمی‌آید که هنوز بسیاری از موارد در هاله‌ای از ابهام بوده و به‌عنوان چالش‌های ویژه مدل‌سازی هیدرولوژی اجتماعی مطرح هستند؛ از جمله اهمیت تدوین مدل‌های ادراکی و مفهومی با رویکردی بسیار عمیق‌تر نسبت به مدل‌سازی هیدرولوژی، تعیین سطح پیچیدگی برای توسعه مدل‌ها در سیستم‌های پیوسته، وجود داده‌های مناسب با سری زمانی طولانی، و تبیین چگونگی بهترین نمایش از یافته‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی در راستای سیاست‌گذاری و تصمیم‌سازی، پاره‌ای از این موارد می‌باشند.

این مقاله اولین کوشش برای انجام مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی با هدف درک سیستم پیوسته انسان- آب و طرح‌ریزی مدلی ادراکی برای توصیف سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه‌های آبریز ایران می‌باشد؛ در این مطالعه حوضه آبریز مشهد به‌عنوان نماینده‌ای از شرایط آبی و اجتماعی پیچیده حاکم بر حوضه‌های آبریز کشور، به‌خصوص در شرق ایران، انتخاب شده است.

رشد فزاینده جمعیت، توسعه شهری و گسترش فعالیت‌های اقتصادی در ۵۰ سال اخیر در حوضه آبریز مشهد، افزایش تقاضای آب و بهره‌برداری افسار گسیخته از منابع آبی را در پی داشته است. به‌رغم اینکه آب زیرزمینی حیاتی‌ترین منبع تأمین آب در این حوضه به‌شمار می‌رود، برداشت بی‌رویه و نرخ تغذیه کمتر از برداشت، خسارات جبران‌ناپذیری را به این ذخائر تحمیل نموده است. از طرف دیگر کاهش آبدهی رودخانه‌ها، افت مداوم سفره آب زیرزمینی، آلودگی کشف‌رود، تخریب خاک و نشست زمین از دیگر مشکلات عمده‌ای است که به‌طور جدی در این حوضه مطرح می‌باشد و شرایط هیدرولوژیکی را پیچیده‌تر می‌سازد. در کنار این مسائل رقابت میان بخش کشاورزی با جمعیت عظیم ساکن در شهر مشهد و همچنین تعداد زیاد زائران و گردشگران ورودی به این شهر بر سر تأمین پایدار آب، بزرگ‌ترین چالش پیش رو می‌باشد. از این‌رو، شناخت ساختار سیستم پیوسته انسان- آب و پیچیدگی و رشد آن در طول زمان، می‌تواند در توسعه مدل‌های این سیستم به‌هم‌پیوسته در آینده و همچنین افزایش قدرت پیش‌بینی و اتخاذ استراتژی‌های مناسب در شرایط مدیریت ریسک و بحران در منطقه مورد مطالعه، بسیار مؤثر باشد.

مقاله حاضر با هدف اصلی به‌کارگیری ابعاد علم هیدرولوژی اجتماعی و بررسی تاریخ هم‌تکاملی به‌عنوان نخستین گام در شناخت سیستم پیوسته انسان- آب، طی انجام مطالعه‌ای تاریخی در حوضه آبریز مشهد، ارائه شده است؛ در این راستا پس از توصیف عمومی محدوده مطالعاتی، مراحل انجام مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد طبقه‌بندی شده است. سپس تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی طی مطالعه تاریخی و بر مبنای داده‌های موجود، در صد سال اخیر مورد بررسی و واکاوی قرار گرفته است. همچنین تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد از بدو پیدایش سیستم انسانی تا کنون بررسی شده و تسلسل تاریخی وقایع طبیعی/ فعالیت‌های انسانی، در قالب گاه‌شماری در درازمدت طبقه‌بندی شده است؛ در آخر مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی بر اساس نتایج مطالعه تاریخی و مبتنی بر تاریخ هم‌تکاملی، به‌عنوان جمع‌بندی نتایج این مطالعه و ارائه تصویری ساده از سیستم پیوسته انسان- آب در حوضه، طرح‌ریزی شده است.

۲- توصیف عمومی محدوده مورد مطالعه

قدیمی‌ترین آثار حیات انسانی در ایران، با قدمت تخمینی ۸۰۰ هزار سال، متعلق به دوران پارینه‌سنگی قدیم، در دشت مشهد واقــع در بستر رودخــانه کشف‌رود مشاهده شده است (Malekshahmirzadi, 2012). حوضه آبریز کشف‌رود که حوضه مشهد ۶۰ درصد از مساحت آن را به‌خود اختصاص داده، منطقه‌ای اسطوره‌ای در تاریخ روایی ایران بوده و در شاهنامه فردوسی بارها از آن نـام بـرده شـده است (Seyedi, 2018). واقع شدن شهر مقدس مشهد در این حوضه و وقوع تحولات مهم اجتماعی، فرهنگی- مذهبی و سیاسی در این شهر در دوران مختلف تاریخی، این حوضه را در شرق کشور برجسته می‌سازد. حوضه آبریز مشهد با وسعت ۹۹۶۰/۲ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط ۱۴۹۶ متر، در حوضه آبریز بزرگ قره‌قوم و در شمال‌شرقی ایران واقع شده است. ۶۲ درصد از مساحت این حوضه متشکل از مناطق کوهستانی و مابقی شامل دشت می‌باشد. کشف‌رود که یکی از بزرگ‌ترین رودخانه‌های شمال‌شرق ایران است، زهکش اصلی این حوضه بوده و در دره بین رشته‌کوه‌های هزارمسجد و بینالود در امتداد شمال‌غرب به جنوب‌شرق در دشت مشهد جریان دارد (شکل ۱).

در حوضه مشهد با گسترش شهرها و اراضی کشاورزی، مسیر آبراهه‌ها دچار تغییراتی شده است.

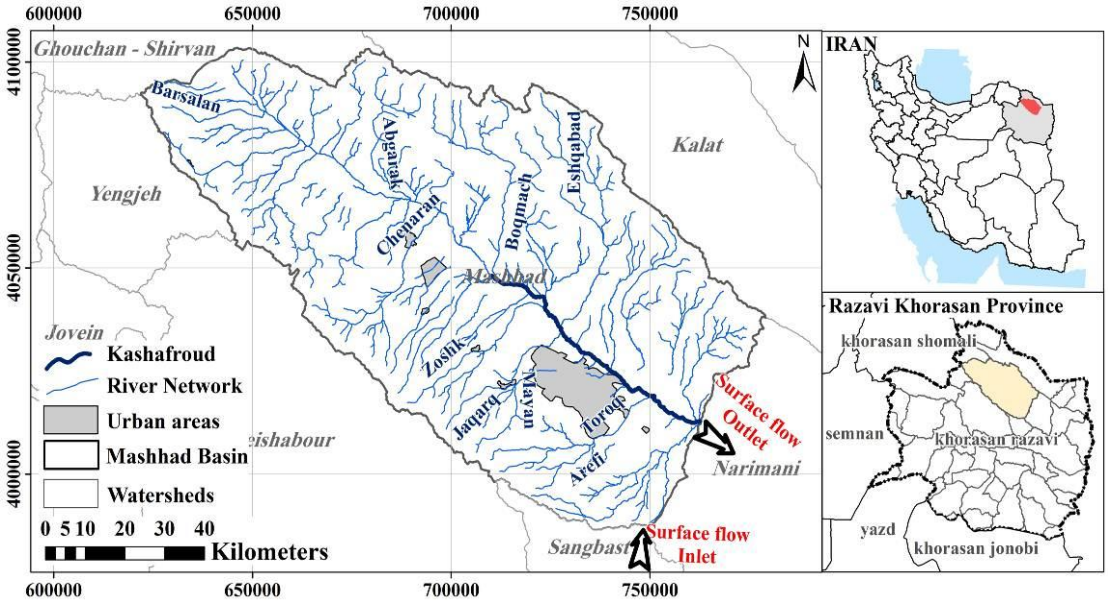

Fig. 1- Overview of Mashhad basin and its river system

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مشهد و سیستم رودخانه‌ای در این حوضه

بررسی مسیر آبراهه‌ها در سال ۱۳۳۴ بر اساس نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (بر مبنای عکس‌های هوایی سال‌های ۱۹۵۷– ۱۹۵۵ میلادی) و در سال ۱۳۹۶ بر اساس تصاویر گوگل‌ارث ۲۰۱۷ (شکل ۲)، نشان می‌دهد که مسیر آبراهه‌ها در ارتفاعات و در محل سرشاخه‌ها تغییری نداشته و بیشترین تغییر در دشت و در محل توسعه شهر مشهد و اراضی کشاورزی حاشیه کشف‌رود رخ داده که منجر به قطع شدن مسیر بسیاری از آبراهه‌ها قبل از پیوستن به این رودخانه شده است؛ در واقع فعالیت‌های انسانی عمده‌ترین عامل تغییر مسیر آبراهه‌ها بوده است. بررسی تغییرات کاربری اراضی (شکل ۳) نیز به‌عنوان عاملی مؤثر بر رفتار هیدرولوژیک، در سال‌های ۱۳۶۳ (۱۹۸۴ میلادی) (Nezamkhah et al., 2015)، ۱۳۸۲ (۲۰۰۳ میلادی) (نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰۰ سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور) و ۱۳۹۶ (۲۰۱۷ میلادی) (Pareeth et al., 2019) نشان می‌دهد که سطح اراضی کشاورزی کاهش و در مقابل سطح اراضی بایر افزایش یافته است؛ در واقع بخش زیادی از اراضی بایر همان اراضی کشاورزی هستند که دیگر تحت کشت قرار نمی‌گیرند. همچنین مساحت پوشش جنگلی به صفر رسیده، در مقابل سطح کاربری شهری افزایش یافته، و سطح مراتع نیز نسبتاً ثابت مانده است.

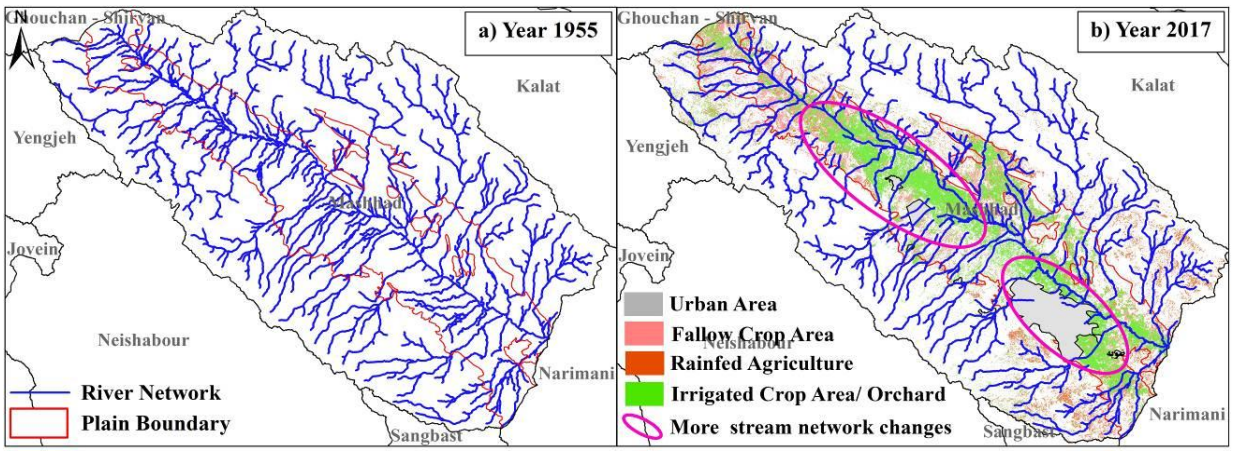

Fig. 2- Stream network changes in Mashhad basin

شکل ۲- تغییرات شبکه آبراهه‌ای در حوضه آبریز مشهد

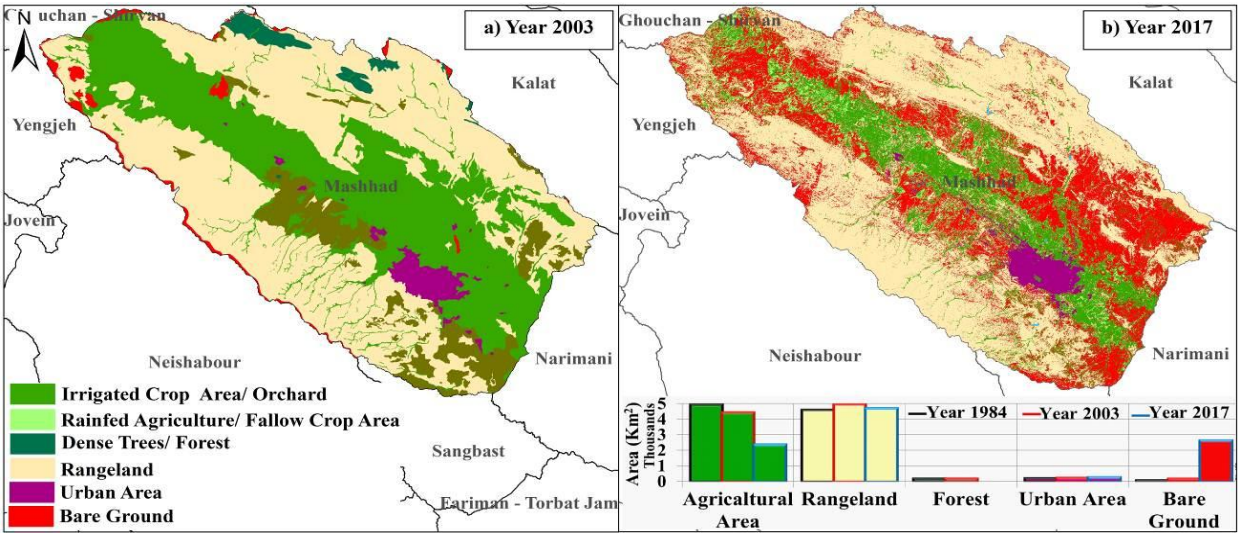

Fig. 3- Land use changes in Mashhad basin

شکل ۳- تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز مشهد

۳- مواد و روش‌ها

این مطالعه در چهار گام اصلی انجام شده است. در گام اول مراحل کلی شناسایی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد طبقه‌بندی شده است. در گام دوم، پس از جمع‌آوری بانک داده‌های موجود و بررسی دقیق کیفیت داده‌ها، مطالعه تاریخی تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی در دوره آماری موجود انجام شده است. پس از بررسی تاریخی تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی، در گام سوم تاریخ هم‌تکاملی در حوضه آبریز مشهد تبیین شده و تسلسل وقوع پدیده‌های طبیعی/ فعالیت‌های انسانی در قالب گاهشماری[۶] نمایش داده شده است. در نهایت در گام چهارم، مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی حوضه مشهد طرح‌ریزی و ارائه شده است.

۳-۱- طبقه‌بندی مراحل شناسایی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی

طبقه‌بندی مراحل شناسایی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد، در شکل ۴ ارائه شده است. از جنبه هیدرولوژی اجتماعی، هر حوضه آبریزِ دارای جوامع انسانی، از دو سیستم اصلی طبیعی و انسانی تشکیل شده و عموماً به چهار زیرسیستم هیدرولوژیکی، محیطزیستی، اجتماعی و اقتصادی قابل تفکیک است (Liu et al., 2014). متناسب با شرایط سیستم‌های اصلی به‌لحاظ موجودیت آب، مشکلات آبی، شرایط محیطزیستی و اجتماعی- اقتصادی و نیز بازخوردها و برهمکنش‌های میان سیستم‌ها، مطالعه برخی از زیرسیستم‌ها اهمیت بیشتری می‌یابد؛ در حوضه مشهد هر چهار زیرسیستم قابل تفکیک است و با توجه به وضعیت پیچیده حوضه، مطالعه آنها حائز اهمیت می‌باشد. پس از تفکیک زیرسیستم‌ها، مؤلفه‌های هر زیرسیستم از میان مؤلفه‌های شناسایی شده با مرور مطالعات هیدرولوژیکی اجتماعی موجود، بر مبنای میزان اهمیت و تأثیرگذاری‌شان بر آب قابل دسترس در حوضه، انتخاب شده است؛ البته وجود داده‌های بلندمدت، از کلیدی‌ترین معیارها و نیز عامل محدود کننده در انتخاب مؤلفه‌های مؤثر است.

۳-۲- بررسی بانک داده، دوره آماری، و انجام مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی در زیرسیستم‌ها

همان‌طور که اشاره شد، در این مطالعه با توجه به وضعیت پیچیده حوضه مشهد، هر چهار زیرسیستم هیدرولوژیکی، محیطزیستی، اجتماعی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه هر زیرسیستم، پس از شناسایی و انتخاب مؤلفه‌های مؤثر، بانک داده‌های موجود مرتبط با مؤلفه‌های منتخب شناسایی شده و پس از دریافت آمار و اطلاعات از مراجع موجود، دوره آماری و کیفیت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تغییرات هر مؤلفه در طول زمان طی دوره آماری موجود مطالعه شده است که در ادامه در خصوص هر زیرسیستم جزییات کار ارائه می‌گردد.

سیستم طبیعی- زیرسیستم هیدرولوژیکی: در زیرسیستم هیدرولوژیکی تغییرات مسیر آبراهه‌ها، کاربری اراضی، مؤلفه‌های هیدرواقلیمی و سطح آب زیرزمینی طی زمان به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر انتخاب شده است.

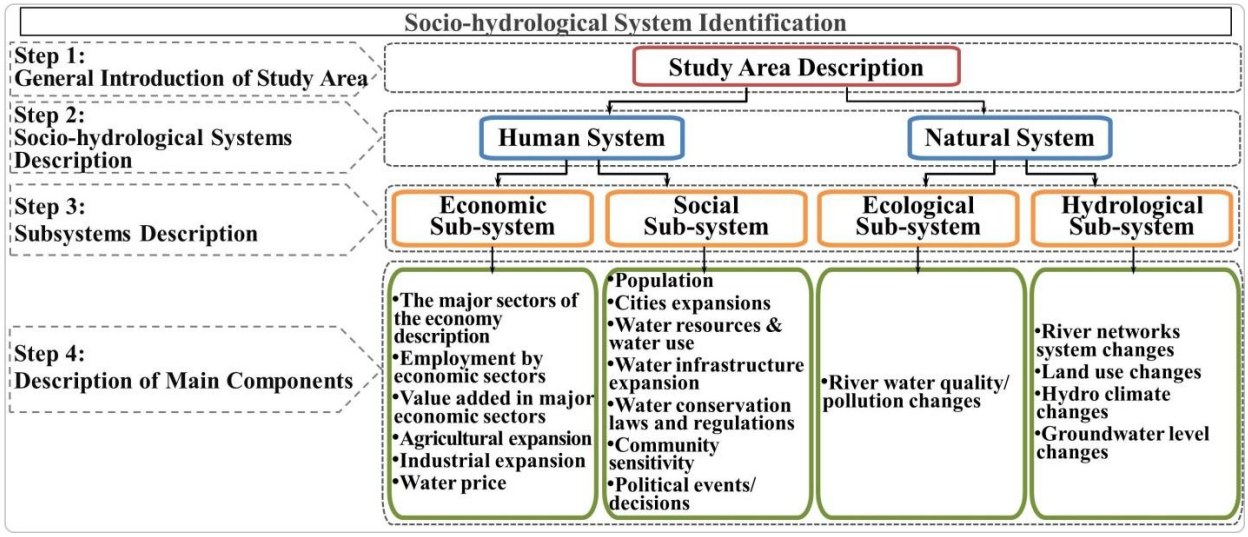

Fig. 4- Steps of socio- hydrological system identification in Mashhad basin

شکل ۴- مراحل شناسایی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

روش بررسی تغییرات مسیر آبراهه‌ها و کاربری اراضی در بخش دوم مقاله ارائه گردید. در بررسی مؤلفه‌های هیدرواقلیمی، تغییرات بارش، دما و آبدهی رودخانه‌ها در مقیاس سالانه با استفاده از داده‌های دریافتی از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تغییرات بارش بر مبنای آمار ایستگاه سینوپتیک مشهد به‌عنوان معرف دشت در دوره ۱۳۹۵ـ۱۳۳۰ و ایستگاه تبخیرسنجی زشک به‌عنوان معرف ارتفاعات در دوره ۱۳۹۵–۱۳۵۲، انجام شده است؛ برای ارزیابی معنی‌داری تغییرات و بررسی وقوع خشکسالی نیز به‌ترتیب از آزمون من- کندال (Mann, 1947; Kendall, 1975) و شاخص استاندارد بارش سالانه (SIAP) (Tomar, 2014) استفاده شده است. تغییرات دمای سالانه نیز بر اساس آمار ایستگاه سینوپتیک مشهد در دوره ۱۳۹۵ـ۱۳۳۰ بررسی شده و معنی‌داری آن با آزمون من- کندال مورد سنجش قرار گرفته است. در تکمیل این بخش تغییرات آبدهی رودخانه‌ها بر اساس آمار ایستگاه‌های هیدرومتری در دوره ۹۵ـ۱۳۵۰ بررسی شده و معنی‌داری تغییرات نیز با آزمون من- کندال ارزیابی شده است. همچنین به‌منظور بررسی وضعیت آب زیرزمینی، تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی طی دوره ۱۳۹۵ـ۱۳۶۳، بر اساس آمار شبکه چاه‌های مشاهده‌ای (آمار دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی) مطالعه شده است.

سیستم طبیعی- زیرسیستم محیطزیستی: در زیرسیستم محیطزیستی، منابع آلاینده کشف‌رود و تغییرات کیفی رودخانه‌ها، به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در حوضه آبریز مشهد در خصوص منابع آلاینده و تغییرات کیفی رودخانه‌ها به‌لحاظ سلامت محیطزیستی، داده‌های کافی با سری زمانی مناسب موجود نمی‌باشد. در این مطالعه شناسایی منابع آلاینده کشف‌رود و بررسی وضعیت دفع فاضلاب/ پساب‌های صنعتی و شهری بر اساس آمار دریافتی از شرکت آب و فاضلاب مشهد و مطالعات موجود (Mohammadi and Babaei, 2011; Service and Environment Deputy of the municipality of Mashhad, 2018) انجام شده است. همچنین تغییرات میزان اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD: Biological Oxygen Demand) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD: Chemical Oxygen Demand) در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ و غلظت برخی از فلزات سنگین در سال ۱۳۹۲ در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز بر اساس اطلاعات ارائه شده در گزارشات موجود بررسی شده است (Service and Environment Deputy of the municipality of Mashhad, 2018). علاوه بر این، کیفیت آب کشف‌رود و سایر سرشاخه‌های اصلی به‌لحاظ مصارف کشاورزی و شرب نیز بر اساس معیارهای طبقه‌بندی ویلکاکس و شولر و بر مبنای آمار کیفی در ایستگاه‌های هیدرومتری در دوره ۱۳۹۶ـ۱۳۶۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. ارزیابی محیطزیستی سدهای حوضه نیز مبتنی بر مطالعات پیشین مد نظر قرار گرفته است (Toosab Consulting Engineers Company, 2009).

سیستم انسانی- زیرسیستم اجتماعی: در زیرسیستم اجتماعی تحولات جمعیتی و شهرنشینی، تغییرات برداشت از منابع آبی و مصارف آب، توسعه زیرساخت‌های آبی، تغییرات تعداد قوانین مصوب، وقایع/ تصمیمات سیاسی و حساسیت اجتماعی به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر انتخاب شده است. تغییرات جمعیتی بر اساس سالنامه‌های آماری (Statistical Center of Iran, 2018)، در دوره ۱۳۹۵–۱۳۳۵ مورد

بررسی قرار گرفته است؛ تعداد مهاجرین، زائران و گردشگران ورودی به حوضه نیز به‌عنوان عاملی مؤثر بر تحولات جمعیتی در دوره ۱۳۹۵–۱۳۶۵ بر اساس سالنامه‌های آماری و مطالعات موجود (Saghaei and Javanbakht, 2012; Foroughzadeh et al., 2013) بررسی شده است. توسعه شهرها نیز طی دوره ۱۳۹۵–۱۳۳۵ بر اساس گزارشات موجود (Farnahad Consulting Engineers Company, 2009) و تصاویر گوگل‌ارث ۲۰۱۷ مطالعه شده است. به‌منظور مطالعه تغییرات برداشت از منابع آبی و مصارف آب، بانک اطلاعاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی مورد استفاده قرار گرفته است؛ در این راستا توسعه برداشت از منابع آب زیرزمینی بر اساس نتایج آماربرداری‌های سراسری و گزارشات مصوب (Toosab Consulting Engineers Company, 2009) طی دوره ۱۳۸۹–۱۳۳۵ و وضعیت چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز در دهه ۹۰ (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2017) مورد مطالعه قرار گرفته است. در خصوص منابع آب سطحی، برداشت آب در ۱۵ سال اخیر بر اساس نتایج آماربرداری‌های سراسری، و همچنین انتقال آب از خارج به حوضه بررسی شده است. میزان مصارف از کل منابع آبی در بخش‌های مختلف نیز بر اساس نتایج آماربرداری‌های سراسری سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۹–۱۳۸۷ مطالعه شده است؛ همچنین تغییرات دقیق‌تر مصارف آب زیرزمینی بر اساس مطالعات موجود (Hatami, 2016) در دوره ۱۳۹۰–۱۳۶۰ مورد بررسی قرار گرفته است. به‌علاوه، توسعه زیرساخت‌های آبی از جمله سدهای مخزنی، بندهای انحرافی، احداث خطوط انتقال آب و فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز در دوره ۱۳۹۵–۱۳۴۵ بر اساس بانک اطلاعاتی شرکت آب و فاضلاب مشهد و گزارشات موجود (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2017) مطالعه شده است.

در تکمیل این بخش، قانون‌گذاری، وقایع/ تصمیمات سیاسی و حساسیت اجتماعی به‌عنوان سه مؤلفه مؤثر در حوزه مدیریت آب مورد توجه قرار گرفته است. قوانین آبی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده میزان بهره‌برداری و حفاظت کمی و کیفی از منابع آب می‌باشند. با توجه به این اهمیت، قوانین، آیین‌نامه‌ها و اسناد بالادستی در حوزه آب بر اساس اطلاعات موجود در پایگاه ملی اطلاع‌رسانی قوانین و مقررات کشور بررسی شده است. همچنین وقایع و تصمیمات سیاسی کلان که بر مدیریت آب و زمین طی دوره معاصر (از سال ۱۳۰۰ تا کنون) مؤثر بوده‌اند نیز بر اساس اسناد تاریخی موجود و جستجو در پایگاه‌های معتبر اینترنتی مورد مطالعه قرار گرفته است.

علاوه بر قوانین و شرایط سیاسی، رفتار و واکنش جوامع انسانی نیز بر مدیریت منابع آبی مؤثر است؛ این واکنش به درک جامعه از شدت مشکلاتی که با آن مواجه‌اند بستگی دارد (Zilberman et al., 2011) و در مطالعات هیدرولوژی اجتماعی از آن با عنوان حساسیت اجتماعی[۷] یاد شده است (Elshafei et al., 2014) که از سطح آگاهی و درک جامعه نسبت به آنچه که کیفیت زندگی را تهدید می‌کند نشأت می‌گیرد (Kinzig et al., 2013). در سیستم پیوسته انسان– آب، حساسیت اجتماعی به چگونگی بروز تأثیر تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژی در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی در جوامع انسانی مرتبط است و وابستگی مستقیمی به کیفیت زندگی اجتماعی دارد. با توجه به اینکه قدرت درک جامعه خصیصه‌ای ذهنی است، عموماً با استفاده از ابزارهای کیفی مانند نظرسنجی قابل بررسی است (Broderick, 2007; Tolun et al., 2012)؛ اگرچه که تا کنون روش مشخصی به‌منظور مدل‌سازی ادراک جوامع انسانی از میزان و نحوه تغییرات محیطی ارائه نشده است (Jones et al., 2011; Lynam and Brown, 2012). در این تحقیق جهت شناخت اولیه از حساسیت اجتماعی نسبت به مسائل آبی، به بررسی اخبار رسمی در این خصوص پرداخته شده است (Wei et al., 2017). به این منظور در دوره ۱۳۹۶–۱۳۷۲ تعداد اخباری که از سوی خبرگزاری‌های رسمی مرتبط با حوضه و شهر مشهد در پایگاه‌های اینترنتی خبری با عناوینی از جمله بحران و کمبود آب انتشار یافته، مطالعه شده است.

سیستم انسانی– زیرسیستم اقتصادی: در زیرسیستم اقتصادی، توسعه بخش‌های عمده اقتصادی، اشتغال، ارزش افزوده و قیمت آب به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر انتخاب شده است. آمار مورد نیاز از سالنامه‌های آمری مرکز آمار ایران استخراج شده است (Statistical Center of Iran, 2018)؛ در بخش کشاورزی، تغییرات اراضی زراعی و باغی و الگوی کشت در دوره ۱۳۹۳–۱۳۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است؛ توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار نیز بر اساس آمار دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی مشهد مطالعه شده است. در بخش صنعت و معدن، تعداد واحدها و شهرک‌های صنعتی و معادن در دوره ۱۳۹۵–۱۳۵۰، و تغییرات ارزش افزوده و اشتغال در بخش‌های عمده اقتصادی نیز طی دوره ۱۳۹۰–۱۳۶۵، بر اساس آمار استخراج شده از سالنامه‌های آماری، مورد مطالعه قرار گرفته است. قیمت آب نیز بر اساس مطالعات موجود (Amani, 2017) بررسی شده است.

۳-۳- تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی و گاهشمار وقایع طبیعی/فعالیت‌های انسانی در حوضه آبریز مشهد

بر اساس تغییرات تاریخی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی، چهار فاز توسعه، انقباض، رکود و بهبود و تعادل جدید در یک سیستم پیوسته انسان– آب قابل تفکیک است. در فاز توسعه[۸] نقش رفتارهای

انسان‌محور بسیار پر رنگ است، به‌طوری‌که تغییر کاربری اراضی، استخراج آب و احداث سازه‌های آبی تغییر محسوسی را در بیلان آبی ایجاد می‌نماید؛ در این فاز افزایش کامیابی اقتصادی و تغییرات محیط‌زیستی قابل توجه است. فاز انقباض[9] با کاهش توسعه به‌دلیل محدودیت‌های محیط‌زیستی قابل تشخیص است. در این فاز کامیابی اقتصادی هنوز می‌تواند افزایش یابد، اما به‌طور تدریجی به‌دلیل عواقب منفی تغییرات محیط‌زیستی، توسعه کُند یا متوقف خواهد شد. فاز رکود[10] با کاهشی تجمعی و سریع در وضعیت منابع طبیعی قابل تشخیص است و با رکودی اقتصادی ناشی از زوال این منابع همراه است. فاز بهبود و تعادل جدید[11] از طریق وقوع تغییر در الگوی رفتاری نسبت به مدیریت محیط‌زیست‌محور و سیاست‌های متمرکز بر کاهش عواقب منفی توسعه شناخته می‌شود و سیستم به سمت تعادل جدیدی تغییر می‌یابد (Elshafei et al., 2014). این دوره‌ها در جوامع توسعه یافته راحت‌تر قابل شناسایی هستند، اما در جوامع در حال توسعه، تفکیک فازها به‌شکل دقیق مشکل است؛ خصوصاً که آمار بلندمدت هیدرولوژیکی اجتماعی نیز مورد نیاز است.

اساساً هم‌تکاملی یک سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی با تکامل دو سیستم طبیعی و انسانی هدایت می‌شود و ماهیت رابطه انسان- آب میان ایـــن دو سیستم تکامل یـــابنده، مستقیماً بـــا تقاضا و مصرف آب در مقیاس‌هـــای زمـــانـــی- مکانـــی گـــوناگـــون در ارتباط است (Liu et al., 2014). در واقع هم‌تکاملی یک سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی با ورود انسان به یک سیستم هیدرولوژیکی آغاز می‌شود و در مقیاس‌های زمانی بسیار طولانی تداوم می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد، تاریخ فعالیت‌های انسانی در حوضه آبریز مشهد بالغ بر ۸۰۰ هزار سال پیش است که در حدود ۲۵۰۰ سال پیش اولین هسته‌های شهرنشینی در حوضه شکل یافت (Frye, 1975). از این‌رو در این مطالعه در بررسی تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد، تا پیش از توسعه شهرنشینی به‌عنوان دوره طبیعی در نظر گرفته شده و پس از آن به دوره‌های مختلف تقسیم شده است. بر همین مبنا و بر اساس بررسی تاریخی تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی، گاهشمار وقایع طبیعی/ فعالیت‌های انسانی در حوضه نیز تهیه شده است.

۳-۴- طرح‌ریزی مدل ادراکی

سیستم‌های هیدرولوژیکی دارای پیچیدگی‌هایی هستند و هر هیدرولوژیست برداشت و تصوری شخصی از یک سیستم معین خواهد داشت که ممکن است لزوماً با یکدیگر یکسان نیز نباشند؛ همان‌طور که اشاره شد، مدل ادارکی ساده‌سازی ذهنی هیدرولوژیست از چگونگی واکنش‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز تحت شرایط مختلف است و تمام روابط ریاضی که بعداً برای پیش‌بینی‌ها استفاده خواهند شد، بر مبنای همین ساده‌سازی‌ها قابل تعریف می‌باشند (Beven, 2012). یک مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی نیز، برداشتی ساده و کیفی از ارتباط، برهمکنش‌ها و بازخوردهای هیدرولوژیکی اجتماعی میان سیستم انسانی و طبیعی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد. از آنجاکه ارتباط و بازخوردهای میان فرایندها بسیار پر اهمیت است، طرح‌ریزی مدل ادراکی در قالب حلقه‌های علّت ـ معلولی در مطالعات هیدرولوژی اجتماعی روشی مفید خواهد بود (Sivapalan and Blöschl, 2015). این حلقه‌ها به دو صورت ساده و فقط مبتنی بر توصیف کیفی وضع موجود و یا بر اساس تجزیه و تحلیل اولیه بر مبنای داده‌های موجود قابل تعریف هستند. در این تحقیق نیز مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی با هدف شناخت و توصیف سیستم پیوسته انسان- آب در حوضه آبریز مشهد به‌صورت نمایشی ساده از سیستم‌های اصلی، زیرسیستم‌های موجود و ارتباط اولیه میان مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی طرح‌ریزی شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تاریخی تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

مطابق با آنچه که در قبل توضیح داده شد، نتایج مطالعه تاریخی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی به تفکیک هر زیرسیستم در ادامه ارائه شده است.

زیرسیستم هیدرولوژیکی: همان‌طور که اشاره شد، در این زیرسیستم تغییرات مسیر آبراهه‌ها، کاربری اراضی، مؤلفه‌های هیدرواقلیمی و سطح آب زیرزمینی طی زمان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی تغییرات شبکه آبراهه‌ای و کاربری اراضی در بخش‌های قبلی در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. در خصوص تغییرات مؤلفه‌های هیدرواقلیمی، مطابق با شکل ۵، مقدار بارش طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۳۰(۲۰۱۶-۱۹۵۱ میلادی) در محدوده دشت و طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۵۲ (۲۰۱۶-۱۹۷۳ میلادی) در ارتفاعات، کاهش یافته است که البته این کاهش به‌لحاظ آماری معنادار نیست؛ همچنین در محدوده دشت متوسط بارش در ۱۰ سال اخیر به میزان ۱۳٪ نسبت به متوسط درازمدت کاهش داشته و از طرفی در ارتفاعات تغییری وجود ندارد. از سوی دیگر به‌رغم عدم کاهش معنادار بارش در ارتفاعات، آبدهی رودخانه‌ها در بلندمدت (۱۳۹۵-۱۳۵۰؛ ۲۰۱۶-۱۹۷۱ میلادی) در سرشاخه‌های اصلی دارای کاهش معنادار است و این در حالی‌است که آبدهی کشف‌رود در خروجی حوضه کاهش معناداری نشان

نمی‌دهد. از این‌رو به نظر می‌رسد عواملی از قبیل تغییر نوع و الگوی بارش و همچنین افزایش برداشت از رودخانه‌ها، بر کاهش آبدهی در سرشاخه‌های اصلی تأثیر گذاشته است؛ از طرفی ورود پساب و فاضلاب به کشف‌رود نیز سبب شده است که کاهش معناداری در آبدهی رودخانه در خروجی حوضه مشاهده نشود. در تکمیل مطالعه مؤلفه‌های هیدرواقلیمی، بررسی تغییرات دما نشان می‌دهـد که طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۳۰ تغییرات دما دارای روند افزایشی معنادار بوده و در ۲۰ سال اخیر متوسط دمای سالانه با افزایش معنادار بیش از میانگین درازمدت (۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

در تکمیل این بخش، در بررسی تغییرات وضعیت سطح آب زیرزمینی (شکل ۱۵، بند ۴-۳) مشاهده می‌شود که به‌رغم اینکه در سال ۱۳۴۵ بهـره‌بـرداری جدید از آبخوان مشهد ممنوع اعلام شده، طی سال‌های ۱۳۶۴-۱۳۴۹ سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط سالانه ۰/۸ متر افت داشته است؛ همچنین طی ۳۲ سال بعدی (۱۳۹۵_۱۳۶۳)، متوسط افت سطح آب زیرزمینی ۰/۶۸ متر گزارش شده است. آمار گزارش شده در سال‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که در سال آبی ۱۳۹۵_۱۳۹۴، ۶۶/۷ میلیون‌متر مکعب کسری مخزن و ۰/۵ متر افت سطح آب زیرزمینی وجود داشته است.

زیرسیستم محیط‌زیستی: همان‌طور که اشاره شد، در این زیرسیستم منابع آلاینده کشف‌رود و شرایط کیفی رودخانه‌ها به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر انتخاب شده است. مهم‌ترین منابع آلاینده کشف‌رود فاضلاب خام صنعتی و پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری است. در حال حاضر سالانه بیش از ۶۲ میلیون‌متر مکعب فاضلاب صنعتی خام و پساب شهری وارد کشف‌رود می‌گردد که مقدار BOD، COD و برخی فلزات سنگین در آنها بیش از حد استانداردهای موجود برای تخلیه به جریانات سطحی یا مصارف کشاورزی است، از این‌رو آلودگی جدی کشف‌رود را در پی داشته است؛ به‌طوری‌که به‌لحاظ مصارف کشاورزی و شرب کاملاً غیرقابل استفاده می‌باشد. تغییرات کیفی آب رودخانه کشف‌رود برای مصارف کشاورزی و شرب به‌ترتیب مطابق با معیارهای طبقه‌بندی ویلکاکس و شولر، با استفاده از آمار ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری اولنگ اسدی در یک دوره ۳۰ ساله (سال‌های آبی ۱۳۹۳_۱۳۶۳) نشان می‌دهد که به‌لحاظ مصارف کشاورزی تغییرات مقدار هدایت الکتریکی و نسبت جذبی سدیم بدین‌صورت بوده است که در دو دهه ۱۳۷۳-۱۳۶۳ و ۱۳۹۳-۱۳۸۳ کیفیت آب خیلی شور و غیرقابل استفاده برای کشاورزی (C_4-S_1) و در دهه ۱۳۸۳-۱۳۷۳ شور اما برای کشاورزی قابل استفاده (C_3-S_1) بوده است؛ به‌لحاظ کیفیت شرب نیز، در تمام سال‌های مورد بررسی و در زمان وقوع دبی متوسط، کیفیت آب در گروه "نامناسب" قرار دارد.

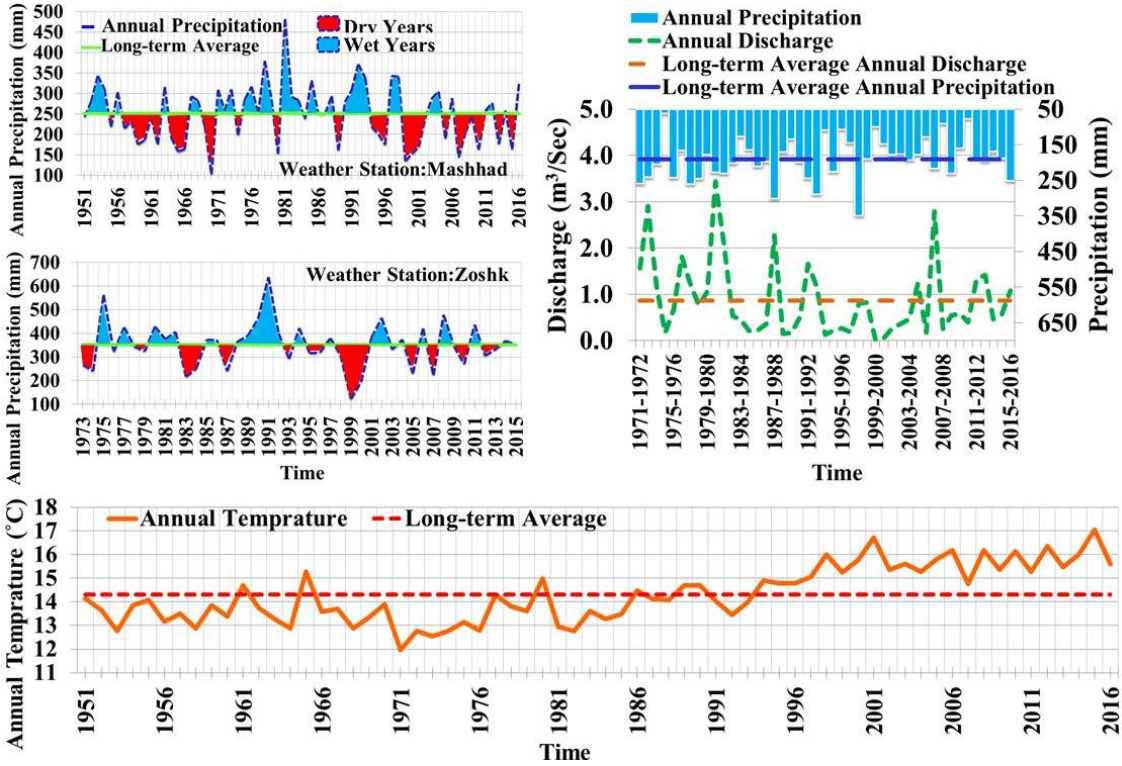

Fig. 5- Annual precipitation, discharge and temperature changes in Mashhad basin

شکل ۵- تغییرات بارش، آبدهی و درجه حرارت سالانه در حوضه آبریز مشهد

در مجموع کیفیت آب کشف‌رود در تمام دوره‌های مورد بررسی نامناسب بوده و کاملاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی بوده است.

از طرف دیگر بر اساس ارزیابی کیفی آب سایر رودخانه‌های حوضه در سرشاخه‌ها در دوره ۳۳ ساله (۱۳۹۶-۱۳۶۳) با استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر آنها، در تمام سال‌های مورد بررسی جهت مصارف کشاورزی از کیفیت قابل قبول برخوردارند؛ به‌طوری‌که مطابق با طبقه‌بندی ویلکاکس، در رودخانه‌های کارده، زشک، جاغرق، خرم‌دره، گلمکان، طرق و فریزی، کیفیت آب کمی شور اما برای کشاورزی مناسب (C_2-S_1) است؛ در رودخانه رادکان کیفیت آب شور اما برای کشاورزی قابل استفاده (C_3-S_1) می‌باشد. همچنین در همین دوره کیفیت آب رودخانه‌هایی که در مسیر آنها سدهای مخزنی احداث شده و بخشی از ذخایرشان به تأمین آب شرب تخصیص یافته نیز جهت مصارف شرب مناسب است؛ به‌طوری‌که بر مبنای معیارهای طبقه‌بندی شولر، کیفیت آب رودخانه‌های کارده، طرق و ارداک با استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر آنها در دوره ۳۳ ساله (۱۳۹۶-۱۳۶۳) در تمام سال‌های مورد بررسی و در زمان وقوع دبی متوسط، در گروه "خوب" قرار دارد. در مجموع کیفیت آب رودخانه‌ها در سرشاخه‌های اصلی در ارتفاعات به‌لحاظ مصارف کشاورزی و شرب چندان تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نبوده است. مطابق با گزارشات مصوب، سدهای موجود در حوضه نیز با تفاوت‌های جزیی، از نظر زیست‌محیطی مثبت ارزیابی شده‌اند.

زیرسیستم اجتماعی: مطابق با توضیحات قبلی، در این زیرسیستم تحولات جمعیتی و شهرنشینی، توسعه برداشت از منابع آبی و مصارف آب، توسعه زیرساخت‌های آبی، قوانین، تصمیمات/ وقایع سیاسی و حساسیت اجتماعی به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج بررسی‌ها، جمعیت در حوضه مشهد طی دوره ۶۰ ساله (۱۳۹۵_۱۳۳۵؛ ۲۰۱۶-۱۹۵۶ میلادی) حدوداً ۹ برابر شده است که افزایش جمعیت شهری (تقریباً ۱۳ برابر) بسیار بیشتر از افزایش جمعیت روستایی (تقریباً ۳ برابر) بوده است؛ در حال حاضر ٪۹۵/۴ از جمعیت شهری در شهر مشهد ساکن هستند. یکی از عوامل مؤثر بر تغییرات جمعیتی مهاجرت می‌باشد. به‌دلیل واقع شدن شهر مشهد در حوضه، تعداد مهاجرینی که برای اقامت دائم به حوضه وارد می‌شوند قابل توجه است؛ به‌طوری‌که در دوره ۲۵ ساله (۱۳۹۰-۱۳۶۵)، در حدود ۱,۰۰۰,۴۰۰ نفر مهاجر دائمی به حوضه وارد شده که بیشترین تعداد در دهه ۱۳۸۵-۱۳۷۵ و برابر با ۵۱۱,۰۰۰ نفر بوده است. همچنین با توجه به اینکه کلان‌شهر مشهد از مهم‌ترین مقاصد زیارت و گردشگری در ایران است، تعداد زائران و گردشگرانی که به‌طور موقت طی سال به این شهر وارد می‌شوند نیز حائز اهمیت می‌باشد؛ به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۵، ۲۷/۷ میلیون نفر زائر (Saghaei and Javanbakht, 2012) با متوسط مدت اقامت ۵/۵ روز در فصول پاییز و زمستان، و ۶ روز در فصل بهار به شهر مشهد وارد شده است (Foroughzadeh et al., 2013). در خصوص توسعه شهری، در حال حاضر ۸ شهر مشهد، چناران، طرقبه، شاندیز، گلمکان، گلبهار، چکنه و رضویه در حوضه آبریز مشهد واقع شده‌اند؛ به‌طور کلی توسعه مناطق شهری طی دوره ۶۰ ساله (۱۳۹۵_۱۳۳۵) دارای روند افزایشی می‌باشد (افزایش ۲۰ برابری)، اما در دهه ۱۳۶۵-۱۳۵۵ افزایشی ۹۱ درصدی در توسعه شهرها وجود داشته و مساحت این مناطق در حدود ۲/۷ برابر افزایش یافته است که تقریباً بیش از ٪۹۵ این توسعه مربوط به شهر مشهد می‌باشد. در مجموع بیشترین رشد جمعیت و توسعه شهرها در دهه ۱۳۶۵-۱۳۵۵ رخ داده است (شکل ۱۵). همگام با رشد جمعیت، به‌منظور توسعه برداشت از منابع آب زیرزمینی، تعداد چاه‌های بهره‌برداری طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۳۵ (۲۰۱۰- ۱۹۵۶ میلادی) ۶۷ برابر (از ۱۰۰ چاه در سال ۱۳۳۵ به ۶۷۱۶ چاه در سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۸۷) و میزان برداشت از آنها ۳۱ برابر (از ۲۷ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۳۵ به ۸۴۷ میلیون متر مکعب در سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۸۷) افزایش یافته است؛ همچنین تعداد بسیار قابل توجهی چاه غیرمجاز نیز در حال برداشت از آب زیرزمینی هستند که فقط در سال ۱۳۹۵ در حدود ۳۴۲۰ حلقه چاه با برداشت ۲۸۵ میلیون متر مکعب مسدود شده‌اند. در خصوص برداشت از آب سطحی آمار درازمدت موجود نیست، اما میزان برداشت در ۱۵ سال اخیر با کاهش آبدهی رودخانه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر منابع آب سطحی داخل حوضه، از سال ۱۳۸۷، هر سال بخشی از آب سد دوستی نیز جهت مصارف شرب شهر مشهد به این حوضه انتقال یافته است (شکل ۶).

بررسی تغییرات مصارف آب زیرزمینی در دوره ۳۰ ساله (۱۳۹۰-۱۳۶۰؛ ۲۰۱۱-۱۹۸۱ میلادی) نشان می‌دهد که کشاورزی همواره بزرگ‌ترین مصرف کننده آب بوده و پس از آن بخش شهری بیشترین مصرف آب را داشته است. به‌طور کلی طی این دوره، بخش کشاورزی ٪۸۹-۷۵، شهری ٪۲۲_۸ و صنعت حدوداً ٪۴-۲ از مصارف آب زیرزمینی را به‌خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۵). در تمام بخش‌ها نیز روندی افزایشی در مصرف آب مشاهده می‌شود و دهه ۱۳۹۰-۱۳۸۰ پرمصرف‌ترین دهه در هر سه بخش است. در حوضه مشهد همگام با توسعه برداشت از منابع آبی شامل حفر چاه‌ها، بهره‌برداری از چشمه‌ها و قنوات و همچنین نصب تأسیسات برداشت از منابع آب سطحی، توسعه زیرساخت‌های آبی از جمله احداث سدهای مخزنی، بندهای انحرافی، احداث خطوط انتقال آب و شبکه فاضلاب نیز به‌منظور ذخیره‌سازی، انحراف و انتقال آب، و تخلیه پساب صورت گرفته است که بدون شک بر تغییر رژیم هیدرولوژیکی حوضه تأثیرگذار بوده است.

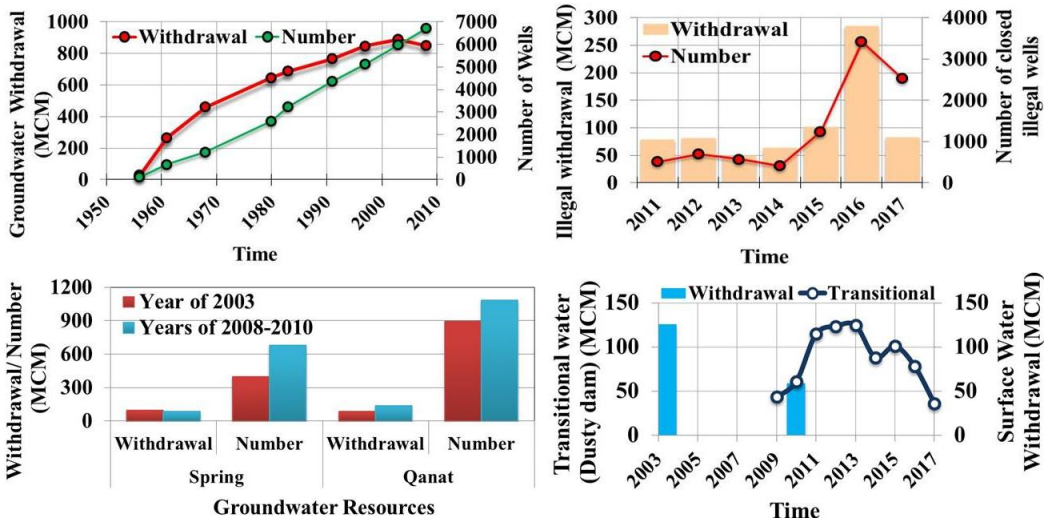

Fig. 6- Water resources development in Mashhad basin

شکل ۶- توسعه برداشت از منابع آبی در حوضه آبریز مشهد

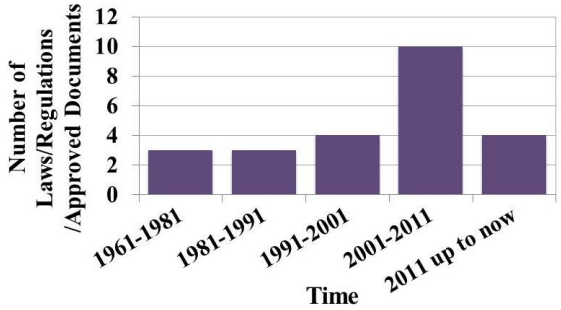

Fig. 7- Changes in the number of laws /regulations /approved documents about the water resources quality and quantity protection

شکل ۷- تغییرات تعداد قوانین/ آیین‌نامه‌ها/ اسناد مصوب در خصوص حفاظت کمی و کیفی از منابع آبی

در حال حاضر در حوضه مشهد علاوه بر بند تاریخی گلستان، ۶ سد مخزنی و ۵ بند انحرافی در دست بهره‌برداری است که مطابق با بررسی‌های صورت گرفته در دوره ۳۰ ساله (۱۳۹۵-۱۳۶۵)، در دهه ۱۳۷۵-۱۳۶۵ بیشترین تعداد بند انحرافی و سد مخزنی در حوضه تأسیس شده است. به‌لحاظ تأمین آب شرب نیز ۴۰۰ حلقه چاه، ۱ دهانه چشمه، ۲ رشته قنات و ۴ سد مخزنی در دست بهره‌برداری است. شبکه آبرسانی شهر مشهد نیز پیوسته در حال توسعه بوده است، به‌طوری‌که جمعیت تحت پوشش شبکه در دوره ۲۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۷۰) از ٪۶۷/۵ جمعیت در سال ۱۳۷۰ به ٪۱۰۰ جمعیت در سال ۱۳۹۵ رسیده است. همچنین در سال ۱۳۷۲ عملیات اجرایی تأسیس شبکه فاضلاب آغاز شده و تا پایان سال ۱۳۹۵، ٪۶۵ از جمعیت فعلی تحت پوشش شبکه فاضلاب قرار دارند و در حال حاضر پنج تصفیه‌خانه فاضلاب نیز در حوضه فعال می‌باشد.

در تکمیل مطالعه زیرسیستم اجتماعی، بررسی اسناد، آیین‌نامه‌ها و قوانین در حوزه آب مورد توجه قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که قدیمی‌ترین قانون مصوب در حفاظت از منابع آبی، قانون "حفظ و حراست منابع آب‌های زیرزمینی کشور" است که در سال ۱۳۴۵ به‌تصویب رسیده و تا کنون نیز اجرا می‌گردد. به‌طور کلی در دوره مورد بررسی (۱۳۹۷-۱۳۴۰؛ ۲۰۱۸-۱۹۶۱ میلادی) در دهه ۱۳۹۰-۱۳۸۰ تمرکز بیشتری بر قانون‌گذاری وجود داشته و نقش قابل توجه تصمیمات مدیریتی در حفاظت از منابع آبی بیش از قبل مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۷).

در حوزه سیاست، بررسی وقایع و تصمیمات کلان سیاسی به‌عنوان عاملی مؤثر بر تمام جنبه‌های مدیریتی در سطح ملی، منطقه‌ای و محلی نشان می‌دهد وقایعی نظیر انقلاب سفید در بهمن‌ماه سال ۱۳۴۱ با اصول نوزده‌گانه از جمله اصل اول: "اصلاحات ارضی و الغای رژیم ارباب و رعیتی"، اصل دوم: "ملی کردن جنگل‌ها و مراتع" و اصل دهم: "ملی کردن آب‌های کشور"، انقلاب اسلامی در سال ۱۳۵۷، جنگ تحمیلی ایران و عراق در سال‌های ۱۳۶۷-۱۳۵۹ و طرح "خودکفایی گندم" در سال ۱۳۸۳، از مواردی هستند که مستقیماً بر مدیریت آب و اراضی تأثیر قابل توجهی داشته‌اند. در خصوص افزایش حساسیت اجتماعی به مسائل آب و محیط‌زیستی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های قابل توجه در زیرسیستم اجتماعی، بررسی اخبار به‌عنوان ابزاری برای شناخت اولیه از واکنش‌های اجتماعی نشان می‌دهد که تعداد اخبار رسمی با عناوینی از جمله بحران و کمبود آب در دوره

(۱۳۹۷–۱۳۷۲؛ ۲۰۱۸–۱۹۹۳ میلادی)، از سال ۱۳۸۹ تا کنون افزایش قابل توجهی داشته است (شکل ۸). در واقع تعداد اخبار رسمی منتشر شده، نمایشی از میزان اهمیت و قابل توجه بودن مسائل آبی می‌باشد که سبب اطلاع‌رسانی و آگاهی‌بخشی عمومی نیز خواهد شد. همچنین تشکیل سازمان‌های مردم‌نهاد و کمپین‌ها در حوزه آب نیز بیانگر افزایش آگاهی و حساسیت اجتماعی می‌باشد. در حوضه مشهد "سازمان مردم‌نهاد جمعیت ناجیان آب" در سال ۱۳۹۳ به‌طور رسمی و با کسب مجوز از وزارت کشور شروع به فعالیت نموده و به‌عنوان نهادی غیردولتی تلاش می‌نماید تا مشارکت همگانی را در مدیریت پایدار منابع آب جلب نماید.

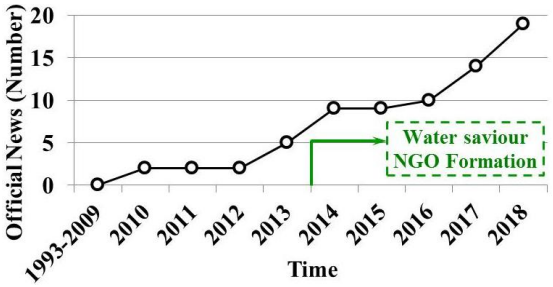

Fig. 8- The official news releases related to water crisis and scarcity in Mashhad Basin

شکل ۸- اخبار رسمی منتشر شده در ارتباط با بحران و کمبود آب در حوضه آبریز مشهد

زیرسیستم اقتصادی: همان‌طور که توضیح داده شد، در این زیرسیستم، توسعه بخش‌های عمده اقتصادی، اشتغال، ارزش افزوده و قیمت آب به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر، مورد مطالعه قرار گرفته است. بخش‌های عمده اقتصادی در حوضه مشهد به سه گروه کشاورزی، صنعت و معدن و خدمات تقسیم می‌شود. بررسی توسعه کشاورزی در دوره ۴۳ ساله (۱۳۹۳–۱۳۵۰؛ ۲۰۱۴–۱۹۷۱ میلادی) نشان می‌دهد که سطح کل اراضی زراعی و باغی (دیم و آبی) ٪۱۳، و در دوره ۲۶ ساله (۱۳۹۳–۱۳۶۷؛ ۲۰۱۴–۱۹۸۸ میلادی) سطح اراضی زراعی و باغی آبی ٪۲۸ کاهش یافته است. به‌لحاظ تغییرات الگوی کشت، در تمام دوره‌ها بیش از ٪۶۵ از سطح زیر کشت اراضی زراعی (دیم و آبی) به محصولات گندم و جو و بیش از ٪۴۰ از سطح باغات به درختان سیب، گلابی و گیلاس اختصاص داشته و در سال‌های اخیر پسته نیز به الگوی کشت افزوده شده است. در این دوره‌ها آبیاری در اراضی زراعی و باغی عمدتاً از نوع سطحی بوده است، اما از سال ۱۳۸۲ توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار آغاز شده و تاکنون حدوداً ٪۳۰ افزایش یافته است؛ در حال حاضر تقریباً ۱۵۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی دارای آبیاری تحت فشار هستند (شکل ۹). در بخش صنعت و معدن، در دوره ۴۰ ساله (۱۳۹۵–۱۳۵۵؛ ۲۰۱۶–۱۹۷۶ میلادی)، تعداد واحدهای صنعتی از کمتر از ۱۰۰ واحد به بیش از ۴۵۰۰ واحد افزایش یافته و تعداد ۸ شهرک صنعتی نیز بهره‌برداری شده است؛ به‌طور کلی در دهه ۱۳۸۰–۱۳۷۰ بیشترین تعداد شهرک صنعتی احداث شده و تعداد واحدهای صنعتی نسبت به دهه قبل تقریباً ۱۰ برابر شده است. همچنین در دوره ۴۵ ساله (۱۳۹۵–۱۳۵۰؛ ۲۰۱۶–۱۹۷۱ میلادی) تعداد معادن نیز از ۱۹ به ۱۷۷ واحد افزایش یافته است. در خصوص بهره‌برداری از معادن، در دهه ۱۳۹۵–۱۳۸۵ بیشترین توسعه مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

در مقایسه با دو بخش کشاورزی و صنعت و معدن، بخش خدمات که تمام مشاغل خارج از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی اعم از آموزش، بهداشت، حمل و نقل و ارتباطات، ساختمان، تأمین آب و برق و گاز، خرید و فروش، بیمه، فعالیت‌های اداری، هتل و رستوران، املاک و مستغلات، و تعمیرات را در برمی‌گیرد، همواره در حوضه آبریز مشهد عمده‌ترین بخش اقتصادی بوده است.

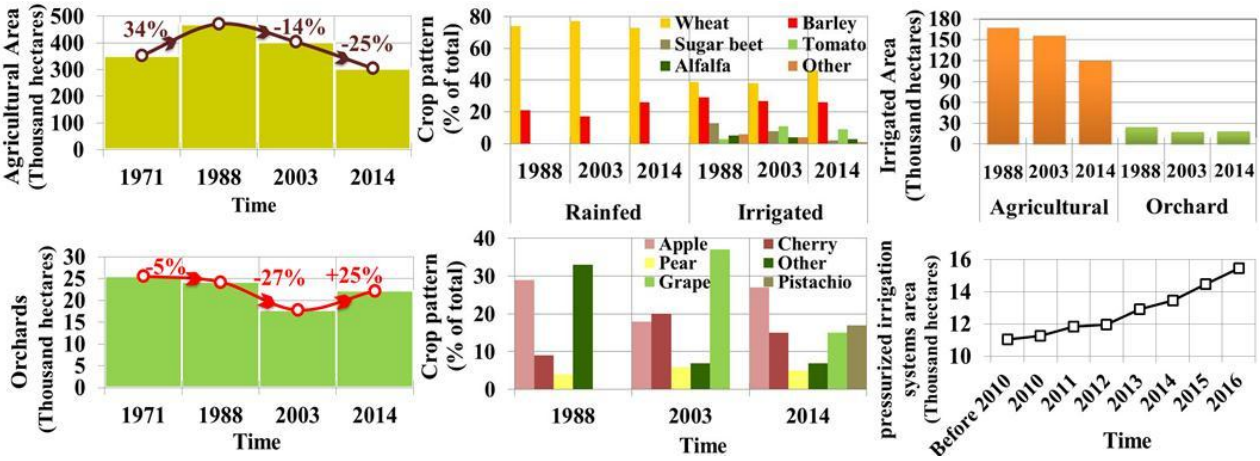

Fig. 9- Agriculture development and crop pattern changes in Mashhad basin

شکل ۹- توسعه کشاورزی و تغییرات الگوی کشت در حوضه آبریز مشهد

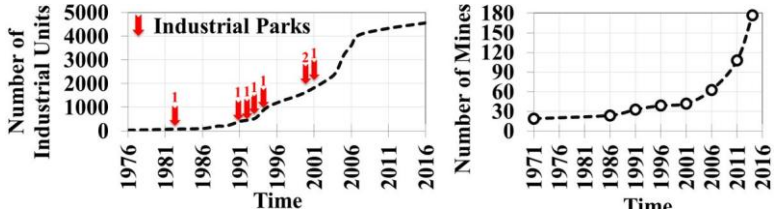

Fig. 10- Industrial and mining developments in Mashhad basin

شکل ۱۰- توسعه صنایع و معادن در حوضه آبریز مشهد

در بخش خدمات به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش اقتصادی به‌لحاظ میزان اشتغال و ارزش افزوده، در دوره ۱۵ ساله (۱۳۹۰-۱۳۸۵)، مشاغل عمده/ خرده‌فروشی، تعمیرات، ساختمان، حمل و نقل و ارتباطات دارای بیشترین تعداد شاغلین می‌باشند. از طرفی مشاغل املاک، مستغلات و اجاره، عمده/ خرده‌فروشی و تعمیرات، بیشترین ارزش افزوده را نسبت به ارزش افزوده کل این بخش به‌خود اختصاص داده‌اند؛ به‌رغم اینکه تعداد شاغلین در املاک، مستغلات و اجاره کمتر از ٪۵ کل تعداد شاغلین در بخش خدمات است و این درحالی است که تعداد شاغلین در عمده/ خرده‌فروشی و تعمیرات در حدود ٪۲۵ از کل شاغلین در این بخش می‌باشد. در مجموع به‌لحاظ میزان اشتغال، در دوره ۲۵ ساله (۱۳۹۰-۱۳۶۵؛ ۲۰۱۱-۱۹۸۶ میلادی)، بخش خدمات بیشترین و بخش کشاورزی کمترین تعداد شاغلین را به‌خود اختصاص داده‌اند. به‌طور میانگین ٪۵ از کل شاغلین به بخش کشاورزی، ٪۲۵ به بخش صنعت و معدن و ٪۷۰ به بخش خدمات اختصاص دارند. در مقایسه ارزش افزوده نیز، بخش‌های خدمات، صنعت و معدن و کشاورزی به‌ترتیب بیشترین تا کمترین سهم را از ارزش افزوده کل به‌خود اختصاص داده‌اند، به‌طوری‌که در دوره ۲۵ ساله (۱۳۹۰-۱۳۶۵)، به‌طور میانگین سهم بخش کشاورزی ٪۵، صنعت و معدن ٪۱۵ و خدمات ٪۸۰ از ارزش افزوده کل می‌باشد (شکل ۱۱).

در خصوص آب‌بها در بخش‌های مختلف اقتصادی، در شرایط کنونی متوسط قیمت آب‌های خانگی شهری به‌گونه‌ای است که مصرف کننده حدوداً ٪۳۵ از هزینه تمام شده را پرداخت می‌کند. در بخش کشاورزی نیز آب‌بها کمتر از ٪۵ از هزینه تولید محصول است. در خصوص مصارف صنعتی و خدماتی نیز تعرفه آب به‌زحمت به هزینه تمام شده می‌رسد. درحالی‌که آب به‌عنوان کالایی اقتصادی در مصارف واسطه صنعتی و کشاورزی نمی‌تواند خارج از معیارهای اقتصادی بازار قیمت‌گذاری شود، اما در ایران قیمت آب به‌صورت متمرکز و دستوری از سوی دولت تعیین می‌گردد. به‌طور کلی، نظام تعرفه‌گذاری و تعیین قیمت کنونی آب، با مبانی و معیارهای اقتصادی سازگار نیست و این شیوه قیمت‌گذاری، موجب تنزل بهره‌وری آب در بخش‌های مختلف مصرف و کاهش ارزش اقتصادی آن شده است.

۴-۲- تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی و گاهشمار وقایع طبیعی/فعالیت‌های انسانی در حوضه آبریز مشهد

تاریخ هم‌تکاملی در حوضه مشهد به دوران پارینه‌سنگی باز می‌گردد و اولین آثار یکجانشینی در ناحیه کشف‌رود و در دشت مشهد مشاهده شده است (Malekshahmirzadi, 2012). در خراسان اولین جوامع انسانی با ساختاری پیچیده‌تر از روستاها و به‌شکل شهرهای ابتدایی، در دوره هخامنشیان (۵۵۰-۳۳۰ سال پیش از میلاد مسیح) تشکیل شد که توس یکی از آنهاست کـــه در حوضه مشهد توسعه یافت (Frye, 1975). در این مطالعه تا پیش از توسعه شهرنشینی به‌عنوان دوره طبیعی در نظر گرفته شده است؛ در این دوره جوامع انسانی در قالب قبایل ابتدایی و به‌صورت پراکنده در حاشیه رودخانه‌ها از جمله کشف‌رود مستقر بودند و مهم‌ترین منبع آبی مورد استفاده نیز آب رودخانه‌ها بوده است.

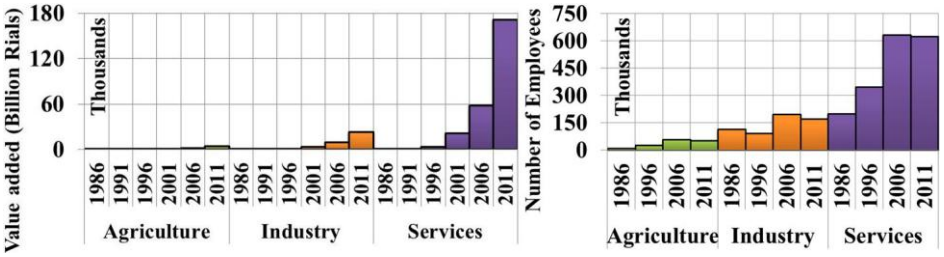

Fig. 11- Value added and number of employees changes in major economic sectors in Mashhad basin

شکل ۱۱- تغییرات تعداد شاغلین و ارزش افزوده بخش‌های عمده اقتصادی در حوضه آبریز مشهد

مسلماً در این دوره ارتباط میان سیستم‌های انسانی و طبیعی بسیار ساده و سطحی بوده و منابع طبیعی، اراضی، چرخه هیدرولوژی و سفره آب زیرزمینی در وضعیت بکر و متعادل قرار داشته‌اند.

پس از ورود اعراب به خراسان، در سال‌های ۳۱ تا ۲۰۳ هـ . ق (سال‌های ۶۵۱ تا ۸۱۸ پس از میلاد)، با سفر امام رضا (ع) به خراسان و شهادت و دفن ایشان در سناباد توس، دوره جدیدی در تاریخ حوضه آبریز مشهد آغاز شد. در سال‌های ۳۰۰ تا ۷۰۰ هـ . ق (۹۱۲ تا ۱۳۰۰ پس از میلاد) روستای مشهدالرضا به‌عنوان یکی از توابع توس توسعه تدریجی یافت و قبایل و اقوام مختلفی به این منطقه مهاجرت کرده و در آنجا مستقر شدند. در این سال‌ها توسعه فعالیت‌های اقتصادی متأثر از شرایط طبیعی منطقه از جمله خاک زراعی مناسب و وجود معادن مختلف، عمدتاً کشاورزی، صنایع کوچک تولید ظروف سنگی، استخراج و فروش سنگ‌های قیمتی، و بازرگانی بوده است (Hataminejad, 2003). در سال‌های ۷۰۰ تا ۸۰۰ هـ . ق (۱۳۰۰ تا ۱۳۹۷ پس از میلاد) به دلیل گرایش حکومت به تشیع و توسعه روابط سیاسی، شهر مشهد به‌جای شهر توس و قریه مشهدالرضا شهرت عمومی و توسعه یافت. طی همین سال‌ها بند تاریخی گلستان به‌عنوان اولین تأسیسات مهم آبی (قرن هشتم هـ . ق) تأسیس شد (Navaei, 1973) که بنا بر اسناد موجود هدف از تأسیس آن آبیاری اراضی کشاورزی پایین‌دست و قریه آبکوه بوده است (Lambton, 1983). در قرن ۹ هـ . ق مشهد به‌عنوان دومین شهر حکومتی انتخاب گردید و به‌دنبال آن فعالیت‌های اقتصادی رونق بیشتری یافت و جمعیت بیشتری نیز به این شهر جذب شد. در سال‌های ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ هـ . ق (دوره صفوی) مذهب تشیع به‌عنوان مذهب رسمی کشور اعلام گردید و از این‌رو شهر مشهد به مرکز مذهبی کشور تبدیل شد (Farnahad Consulting Engineers Company, 2009). در همین زمان بیشترین رشد اقتصادی نیز آغاز شد (Hataminejad, 2003) و تا قرون ۱۳ و ۱۴ هـ . ق (دوران قاجار) ادامه داشت. طی این دوره با توسعه شهر مشهد و در پـــی آن افزایش جمعیت و رونق اقتصادی، در اوایل قرن دهم هـ . ق به‌منظور تأمین نیازهای آبی، برای اولین بار علاوه بر منابع آب سطحی موجود به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب، آب چشمه گیلاس نیز به مشهد انتقال یافت؛ پس از آن در سال ۱۰۲۳ هـ . ق، آب چندین قنات و بخشی از آب کشف‌رود نیز از طریق کانال‌های انتقال آب به شهر مشهد منتقل شد (Farnahad Consulting Engineers Company, 2009). بدین‌ترتیب طی این دوره که در این مطالعه به‌عنوان دوره توسعه سنتی تقسیم‌بندی می‌گردد، با افزایش جمعیت سیستم انسانی توسعه یافته و دخالت جوامع انسانی در سیستم طبیعی بیشتر شده است؛ در این دوره اگرچه که تأمین آب علاوه بر منابع آب سطحی، تا حدودی به منابع آب زیرزمینی (چشمه و قنات) نیز وابسته بوده است، اما هنوز چرخه هیدرولوژی و سفره آب زیرزمینی متعادل بوده و در وضعیت طبیعی قرار داشته‌اند.

پس از اتمام دوره توسعه سنتی، توسعه صنعتی با پایان حکومت قاجار و شروع حکومت پهلوی، در دهه ۱۲۷۰ شمسی آغاز شد. طی این دوره توسعه سریع شهرنشینی، رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های اقتصادی، با افزایش روزافزون نیاز آبی همراه بوده است. به‌طوری‌که در سال ۱۳۰۱ احداث شبکه آبرسانی لوله‌کشی برای انتقال آب از رودخانه‌ها به شهر مشهد آغاز گردید؛ سپس در سال ۱۳۲۸ شمسی برای اولین بار حفر چاه‌های عمیق مورد توجه قرار گرفت. پس از آن در سال ۱۳۳۵ تأسیس شبکه آب لوله‌کشی داخل شهری آغاز شد و تا سال ۱۳۹۵ کل شهر مشهد تحت پوشش شبکه آبرسانی لوله‌کشی قرار گرفت. به‌علاوه، طرح اولیه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در شهر مشهد در سال ۱۳۵۳ مطرح شد و پس از توقف مطالعات در سال ۱۳۵۴، مجدداً در سال ۱۳۶۸ ادامه یافت. در نهایت در سال ۱۳۷۲ عملیات اجرایی تأسیس شبکه فاضلاب آغاز شد و تا پایان سال ۱۳۹۵، ٪۶۵ از جمعیت فعلی، تحت پوشش شبکه فاضلاب قرار گرفت. در همین دوره احداث بندهای انحرافی و سدهای مخزنی نیز، به‌منظور بهره‌برداری هرچه بیشتر از منابع آب سطحی طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۶۶ توسعه یافت. به‌طور یقین در این دوره با توسعه برداشت از منابع آبی سطحی و زیرزمینی، ارتباط پیچیده‌ای میان سیستم‌های انسانی و هیدرولوژیکی شکل یافته است. بدین‌ترتیب، می‌توان اذعان نمود که در تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد، بیشترین برهمکنش میان سیستم‌های طبیعی و انسانی در همین ۱۰۰ سال اخیر رخ داده است. مطالعه تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در دوره معاصر در حوضه مشهد نشان می‌دهد که همگام با رشد جمعیت و توسعه شهری، بیشترین توسعه اقتصادی و در پی آن بهره‌برداری از منابع آبی و طبیعی بدون توجه به نرخ تجدیدپذیری و محدودیت ظرفیت‌های محیط‌زیستی، در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۳۰ انجام شده است؛ به‌طوری‌که بیشترین رشد جمعیت و توسعه شهری در سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۵۵، بیشترین توسعه صنایع در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۶۵، بیشترین توسعه برداشت از منابع آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۶۰، و بیشترین احداث سدها و بندها در سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۶۵ رخ داده است؛ البته پیش از این دوره نیز طی سال‌های ۱۳۳۰-۱۳۰۰ توسعه و صنعتی شدن با روند کندتری وجود داشته است. بدین‌ترتیب طی این سال‌ها، بازخوردها و برهمکنش‌های میان سیستم‌های انسانی و طبیعی بسیار پیچیده‌تر شده و تغییر کاربری اراضی، استخراج بی‌رویه از منابع آب و احداث سازه‌های آبی، تغییرات محسوسی را در وضعیت رودخانه‌ها، چرخه هیدرولوژی، وضعیت سفره آب زیرزمینی و بیلان آبی ایجاد نموده است؛ از سال ۱۳۸۰ تا کنون

نیز، توسعه همچنان با روند کندتری ادامه یافته، به‌رغم اینکه در این سال‌ها کمبود منابع آبی و فشارهای محیط‌زیستی بسیار مشهودتر از قبل بوده است. از این‌رو در این مطالعه، از سال ۱۳۰۰ تا کنون به‌عنوان فاز توسعه در نظر گرفته شده است.

نکته تأمل برانگیز اینجاست که از سال ۱۳۴۵، ماده ۲ قانون "حفظ و حراست منابع آب‌های زیرزمینی کشور" با مضمون "ممنوعیت حفر چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق و قنوات در مناطقی با افت سطح آب زیرزمینی"، در حوضه آبریز مشهد مورد اجرا قرار گرفته است؛ از این‌رو اجرایی شدن این قانون نشان از وضعیت نامتعادل آبخوان آبرفتی دشت مشهد در آن زمان دارد. در واقع از سال ۱۳۴۵، در محدوده مطالعاتی مشهد برای اولین بار توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تا ۵ سال ممنوع اعلام شد و پس از آن تا کنون نیز هر ۵ سال این ممنوعیت تمدید شده است. با این حال نه تنها توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی متوقف نشده، بلکه با شدت بیشتری افزایش نیز یافته است؛ به‌طوری‌که مطابق با نتایج آماربرداری سراسری که از سال ۱۳۴۷ در دشت مشهد آغاز شده است، طی سال‌های ۱۳۵۹-۱۳۴۷، تعداد چاه‌های بهره‌برداری دو برابر و میزان تخلیه از آنها ٪۴۰ افزایش یافته است. همچنین طی سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۵۹ تعداد چاه‌های بهره‌برداری ٪۶۸ و میزان تخلیه از آنها ٪۲۰ افزایش یافته است؛ این توسعه بهره‌برداری از سال ۱۳۷۰ تا کنون نیز همچنان ادامه داشته است. چنین نتایجی فقط ناشی از نگاه نقطه‌ای مدیران در تأمین آب مورد تقاضا بدون توجه به میزان تجدیدپذیری، و عدم نظارت بر اجرای صحیح قوانین می‌باشد. با توجه به اینکه مهم‌ترین منبع تأمین کننده آب در حوضه مشهد سفره آب زیرزمینی می‌باشد، می‌توان چنین استنباط نمود که دوره انقباض از همان زمان در این حوضه آغاز شده و تا کنون نیز ادامه یافته است. مطابق با تعاریف قبلی، در این فاز کامیابی اقتصادی هنوز می‌تواند افزایش یابد، اما به‌طور تدریجی به‌دلیل عواقب منفی تغییرات محیط‌زیستی، توسعه کُند یا متوقف خواهد شد، اما متأسفانه به‌رغم وجود فشارهای فزاینده بر منابع آبی، توسعه برداشت از این منابع متوقف نشده و از سال ۱۳۸۰ تا کنون نیز همگام با توسعه اقتصادی با روند کندتری ادامه داشته است؛ به بیان دیگر، درحالی‌که توسعه اقتصادی در دوره انقباض می‌تواند متکی بر منابع آب موجود و بدون توسعه بهره‌برداری از منابع آبی ادامه یابد، در حوضه مشهد توسعه اقتصادی در حین وجود شرایط انقباض کاملاً مبتنی بر توسعه منابع آبی بوده و از این‌رو اثرات منفی آن، خصوصاً از سال ۱۳۸۰ تا کنون بسیار قابل توجه می‌باشد. به‌طوری‌که در این دوره اجرای طرح انتقال آب از سد دوستی از سال ۱۳۸۷ جهت تأمین بخشی از نیاز آبی شهر مشهد و مطرح شدن جدی سایر گزینه‌های انتقال آب از خارج به داخل حوضه، نشان از عدم اطمینان مدیران به‌وجود منابع آبی کافی در داخل حوضه برای توسعه فزاینده دارد. از طرفی بیشترین افت سطح آب زیرزمینی و کسری مخازن نیز در این دوره رخ داده است که بیانگر وضعیت بحرانی سفره آب زیرزمینی می‌باشد. علاوه بر این پیدایش مشکلات عمده دیگری از جمله کاهش آبدهی چاه‌ها و رودخانه‌ها، خشک شدن تعداد قابل توجهی از قنوات و چشمه‌ها، آلودگی کشف‌رود و نشست زمین، که با تغییرات اقلیمی و وقوع خشکسالی‌های متوالی توأم شده است، وضعیت حوضه را بسیار پیچیده‌تر ساخته است. با چنین شرایطی هنوز توسعه بهره‌برداری از منابع آبی کاملاً متوقف نشده و رکود اقتصادی ناشی از زوال این منابع در برخی از بخش‌های اقتصادی از جمله کشاورزی و حتی برخی از صنایع آب‌بر کاملاً مشهود است. در ادامه در شکل ۱۲، تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد نشان داده شده است.

در طرف مقابل، عدم وجود امنیت آبی تا حدودی توجهات بیشتری را بر توقف توسعه بهره‌برداری از منابع آبی و حفاظت از محیط‌زیست معطوف نموده است؛ به‌طوری‌که طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۰ تمرکز بیشتری بر قانون‌گذاری و حفاظت از منابع آبی و طبیعی وجود داشته و در این دوره بیشترین تعداد قوانین، اسناد، راهبردها و برنامه‌های جامع در خصوص حفاظت کمی و کیفی از منابع آبی مصوب شده است. تعریف و اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی سفره آب زیرزمینی نیز از سال ۱۳۸۵ آغاز شده است. از سال ۱۳۹۰ تا کنون نیز به‌دلیل وخامت وضعیت منابع آبی، کنترل نسبتاً بیشتری بر میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی وجود داشته و شناسایی و انسداد چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز و توقف اضافه‌برداشت‌های آبی با جدیت بیشتری مورد پیگیری قرار گرفته است. همچنین انتشار اخبار و اطلاع‌رسانی‌های عمومی در خصوص خشکسالی‌ها و بحران‌های آبی، منجر به افزایش سطح آگاهی اجتماعی و تشکیل گروه‌های مردم‌نهاد (از جمله تشکیل سازمان مردم‌نهاد جمعیت ناجیان آب در سال ۱۳۹۳) جهت حفاظت بیشتر از منابع آبی شده است. اخیراً نیز اقداماتی از قبیل تدوین "سند تدبیر آب مشهد" و تشکیل "شورای هماهنگی مدیریت بهم پیوسته منابع آب حوضه آبریز کشف‌رود" در سال ۱۳۹۴، و همچنین اجرای طرح "همیاران آب خراسان رضوی" در سال ۱۳۹۸ نیز در جهت مدیریت بحران‌های آبی کنونی و بهبود وضعیت موجود انجام شده است. گرچه این اقدامات تا حدودی نشانگر تغییر رویکردهای مدیریتی منابع آب و تأثیر آگاهی اجتماعی بر تصمیمات مدیریتی می‌باشد، اما در مقابل وضعیت بغرنج موجود هنوز کافی نیست. به‌نظر می‌رسد در چنین شرایطی در آستانه دوره رکود ایستاده‌ایم و بدیهی است که با وجود این شرایط ورود به دوره بهبود و تعادل جدید در حوضه مشهد نیز، مستلزم پیمودن هوشمندانه مسیری بسیار ناهموار و دشوار می‌باشد.

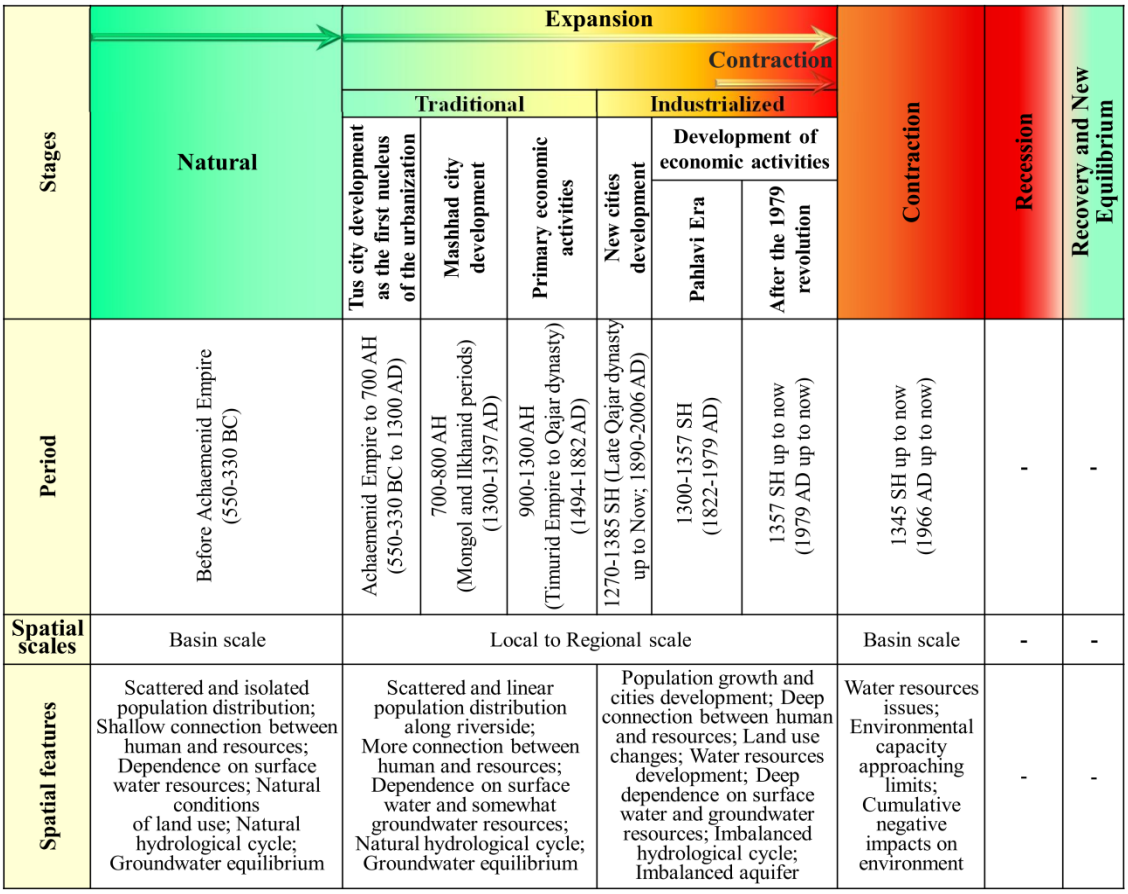

Fig. 12- Co-evolutionary history of the socio-hydrological system within the Mashhad basin

شکل ۱۲- تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

در ادامه تسلسل زمانی وقایعی که به‌لحاظ هیدرولوژیکی اجتماعی قابل توجه‌اند، در قالب گاهشماری از وقایع طبیعی/فعالیت‌های انسانی در فازهای جداگانه طی دوره معاصر، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

۴-۳- بررسی حلقه جمعیتی- اقتصادی در حوضه آبریز مشهد

دو حلقه اصلی بازخوردی که با چرخه هیدرولوژی ارتباطی اساسی دارند و در پویایی سیستم پیوسته نقشی کلیدی ایفا می‌نمایند، حلقه‌های "جمعیتی ـ اقتصادی" و "حساسیت" می‌باشند (شکل ۱۴) (Elshafei et al., 2014).

با نگاهی به سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد بر این مبنا، درمی‌یابیم مهم‌ترین عامل مؤثر بر موجودیت آب حلقه جمعیتی- اقتصادی است که بیشترین بازخوردها را با چرخه هیدرولوژی ایجاد نموده است؛ در واقع فعالیت‌های انسان‌محور و توسعه جوامع انسانی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر چرخه هیدرولوژی و موجودیت آب در حوضه است. شرایط هیدرولوژی نشان می‌دهد گرچه حوضه از تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های طبیعی مصون نبوده است، اما بیشترین فشار وارد بر منابع آبی ناشی از برداشت‌های بی‌توجه به میزان تجدیدپذیری آنها می‌باشد. در میان مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی بررسی شده، تغییرات مؤثرترین مؤلفه‌های جمعیتی- اقتصادی در حوضه مشهد و تاثیر آن بر وضعیت آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تامین آب در این حوضه در فازهای توسعه و انقباض در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین سهم فعالیت‌های عمده اقتصادی نیز در ایجاد ارزش افزوده، اشتغال و مصرف آب در دوره‌های مختلف مقایسه شده است (شکل ۱۶).

مطابق با نتایج، در حوضه مشهد رشد جمعیت در تمام دوره‌ها به‌طور مداوم دارای روندی صعودی می‌باشد. از یک طرف به‌طور متوسط تجمع حدوداً ۸۸٪ از جمعیت در شهرها، همواره با افزایش تقاضای آب در مصارف خانگی و فعالیت‌های خدماتی و صنعتی همراه بوده است؛ از طرف دیگر در حوضه‌های روستایی با فعالیت غالب کشاورزی، به‌رغم تجمع کمتر جمعیت، اقتصاد خرد تقویت شده و تقاضای آب مستقل از رشد جمعیت افزایش یافته است؛ از این‌رو منابع آبی مازاد برای تأمین تقاضای آب کشاورزی مورد نیاز بوده است.

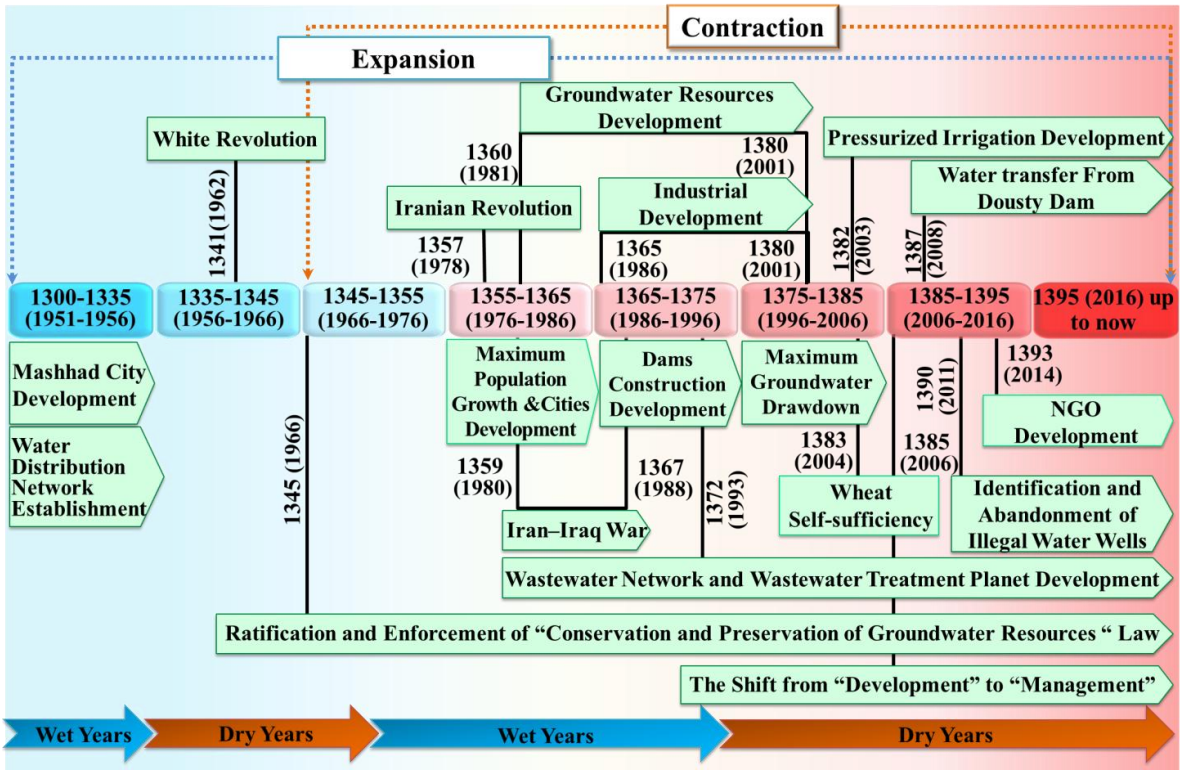

Fig. 13- Timeline of contemporary socio-hydrological events in Mashhad basin

شکل ۱۳- تسلسل زمانی وقایع هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد در دوره معاصر

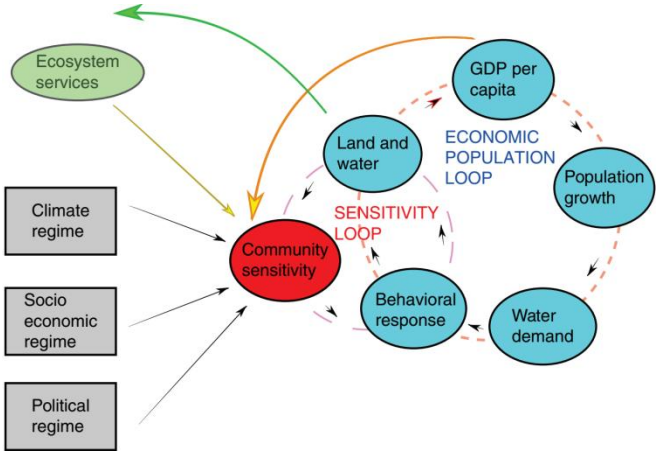

Fig. 14- The socio-hydrology model as two interconnecting feedback loops (Elshafei et al., 2014)

شکل ۱۴- مدل هیدرولوژی اجتماعی در قالب اتصال دو حلقه بازخوردی (Elshafei et al., 2014)

بدین ترتیب افزایش تقاضای آب در هر دو حوزه شهری و روستایی، یکی از محرک‌های کلیدی بازخورد دهنده به افزایش استخراج آب، تغییر کاربری اراضی و تصمیمات مدیریتی در خصوص توسعه منابع و زیرساخت‌های آبی بوده است. اما عدم آگاهی از میزان منابع آب تجدیدپذیر داخلی به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه استراتژیک در برنامه‌ریزی‌های درازمدت تخصیص منابع آب و تأمین امنیت غذایی، منجر به برداشت بی‌رویه از منابع آبی شده که نتیجه آن افت مداوم سطح سفره و کسری تجمعی ذخائر آب زیرزمینی می‌باشد. از این نقطه به بعد، موجودیت آب به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدود کننده عمل نموده که به‌موجب آن رشد فعالیت‌های کشاورزی و برخی از فعالیت‌های صنعتی آب‌بر محدود شده است. چنانچه این شرایط با همین روند ادامه یابد، نایابی آب با کیفیت مناسب و انحطاط اراضی، رشد اقتصادی را محدودتر کرده و به‌دنبال آن وخامت شرایط اجتماعی نیز ایجاد خواهد شد.

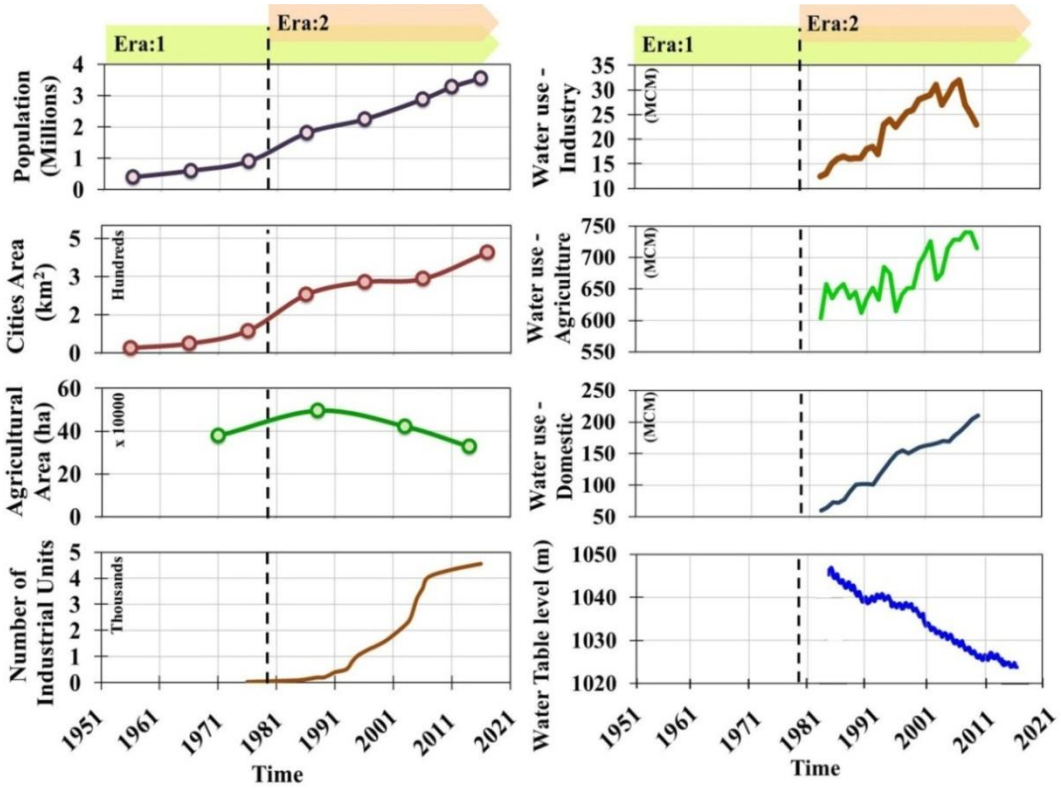

Fig. 15- Effective economic-population factors changes in Mashhad basin in 1) Expansion, and 2) Contraction phases

شکل ۱۵- تغییرات مؤلفه‌های جمعیتی- اقتصادی مؤثر در حوضه آبریز مشهد در فازهای ۱) توسعه، و ۲) انقباض

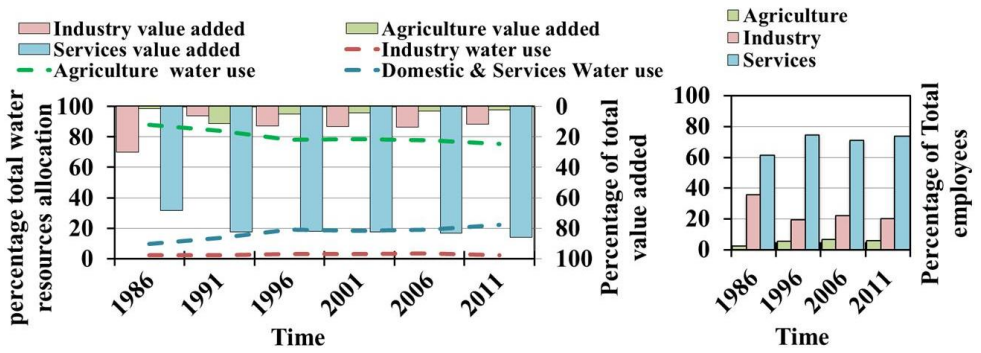

Fig. 16- Major economic sectors value added, employment and water use in Mashhad basin

شکل ۱۶- سهم فعالیت‌های عمده اقتصادی در ارزش افزوده، ایجاد اشتغال و مصرف آب در حوضه آبریز مشهد

بررسی ارزش افزوده حاصل از بخش‌های اقتصادی و در مقابل مصرف آب و تعداد شاغلین، نشان می‌دهد بخش کشاورزی به‌رغم اینکه کمترین ارزش افزوده و تعداد شاغلین را به‌خود اختصاص داده، همواره بزرگ‌ترین مصرف کننده آب بوده است. از طرف دیگر، مشاغل خدماتی دارای بیشترین ارزش افزوده و تعداد شاغلین می‌باشند، درحالی‌که در مقایسه با بخش کشاورزی حجم بسیار کمتری از آب برداشتی را به‌خود اختصاص داده‌اند.

به‌عنوان جمع‌بندی، تصویری کلی از تغییرات مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عدم تعادل سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد در شکل ۱۷ به‌طور شماتیک نمایش داده شده است. همان‌طور که اشاره شد، دوره‌های رکود و بهبود و تعادل جدید در حوضه مشهد هنوز رخ نداده و به‌منظور برقراری تعادل جدید، لازم است مؤلفه‌ها مطابق با آنچه که در شکل نشان داده شده تغییر نمایند. مسلماً با توسعه جوامع انسانی و پیوستگی آن با سیستم هیدرولوژیکی، بازگرداندن چرخه هیدرولوژی به شرایط طبیعی به‌راحتی امکان‌پذیر نیست، اما اصلاح و بهبود آن با

هدف افزایش موجودیت آب و پایداری و تعادل سیستم پیوسته انسان– آب، گرچه زمان زیادی به‌طول خواهد انجامید، فرایندی غیرممکن نمی‌باشد.

۴-۴- توسعه مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

مطابق با نتایج حاصل از مطالعه تاریخی، شرایط بسیار پیچیده هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد در حال حاضر، نتیجه فعالیت‌های انسانی و تصمیمات مدیریتی در صد سال اخیر است. مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی حوضه مشهد در شکل ۱۸ نشان داده شده است؛ اجزای این مدل ادراکی و چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر، مبتنی بر تجزیه و تحلیل تاریخ هم‌تکاملی سیستم پیوسته انسان– آب در حوضه مشهد تعریف شده است و هدف از تدوین آن نمایشی ساده از سیستم‌های اصلی، زیرسیستم‌ها، مؤلفه‌های هیدرولوژیکی اجتماعی، چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر، برهمکنش‌های موجود میان سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها و در نهایت تأثیرگذاری‌شان بر موجودیت منابع آب قابل استفاده در این حوضه می‌باشد. در شکل ۱۸، دو زیرسیستم اصلی طبیعی و انسانی که سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد را تشکیل می‌دهند با دو رنگ متمایز نشان داده شده است. هر سیستم اصلی شامل زیرسیستم‌هایی است که مؤلفه‌های مؤثر در آنها مشخص شده است. همچنین ارتباط زیرسیستم‌ها با یکدیگر به‌واسطه ارتباط مؤلفه‌های مؤثر در هر زیرسیستم و نیز نسبت به سایر مؤلفه‌ها در زیرسیستم‌های دیگر نشان داده شده است. دو مرز اصلی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی تعیین شده است؛ مرز ۱ که با خط پر مشخص شده، مؤلفه‌هایی را در خود گنجانده که مستقیماً بر کمیت و کیفیت منابع آب قابل دسترس تأثیرگذار هستند. این مؤلفه‌ها تحت تأثیر مؤلفه‌های دیگری هستند که به‌صورت عواملی خارجی و غیرمستقیم بر کمیت و کیفیت منابع آب مؤثر می‌باشند که در مرز ۲ که با خط‌چین مشخص شده است، گنجانده شده‌اند. همچنین برخی از مؤلفه‌ها در زیرسیستم‌ها تحت تأثیر عواملی در مقیاس کلان و خارج از مقیاس حوضه می‌باشند، از جمله تغییر اقلیم و وقایع/ تصمیمات کلان سیاسی، که با پیکان قرمز رنگ مشخص شده‌اند. علاوه بر دو مرز مشخص شده، ارتباط میان دو سیستم طبیعی و انسانی با خط‌چین قرمز رنگ نشان داده شده است؛ در واقع ارتباط مداوم دو سیستم طبیعی و انسانی به‌واسطه ارتباط زیرسیستم‌ها و مؤلفه‌های آنها و تأثیر متقابل‌شان بر یکدیگر، با ایجاد بازخوردها و برهمکنش‌های مداوم میان دو سیستم همراه خواهد بود که پویایی این برهمکنش‌ها و بازخوردها طی زمان منجر به هم‌تکاملی دو سیستم با یکدیگر می‌شود.

در مدل ادراکی ارائه شده از سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد، از میان مؤلفه‌هایی که در مرز خارجی واقع شده‌اند یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر موجودیت آب، مؤلفه‌های هیدرواقلیمی هستند که تغییرات آنها متأثر از تغییر اقلیم جهانی می‌باشد. تأثیر این مؤلفه بر موجودیت آب در حوضه، به‌طور غیرمستقیم منجر به ایجاد برهمکنشی میان سیستم طبیعی و انسانی خواهد شد؛ بنابراین به‌عنوان یک نیروی خارجی مهم بر هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه مشهد مؤثر است.

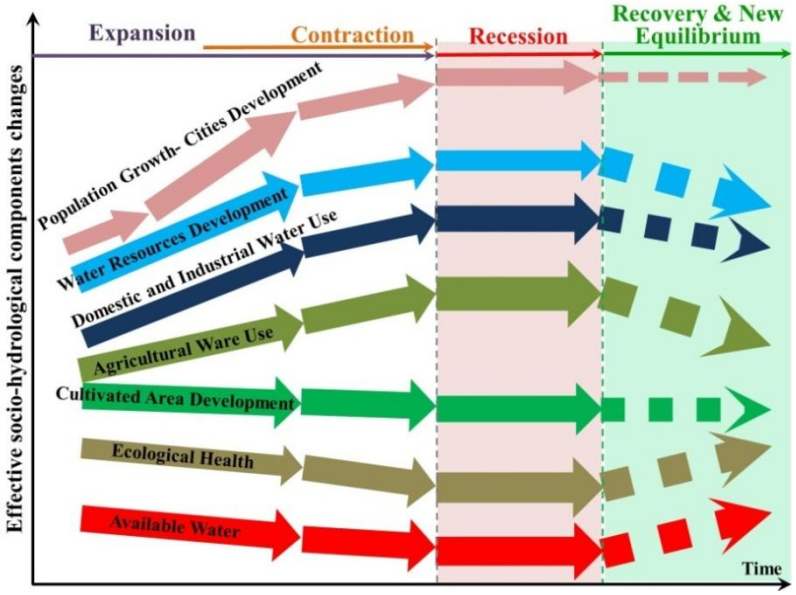

Fig. 17- The change in socio-hydrological conditions in Mashhad basin for different eras

شکل ۱۷- تغییر شرایط هیدرولوژیکی اجتماعی حاکم بر حوضه آبریز مشهد در دوره‌های گوناگون

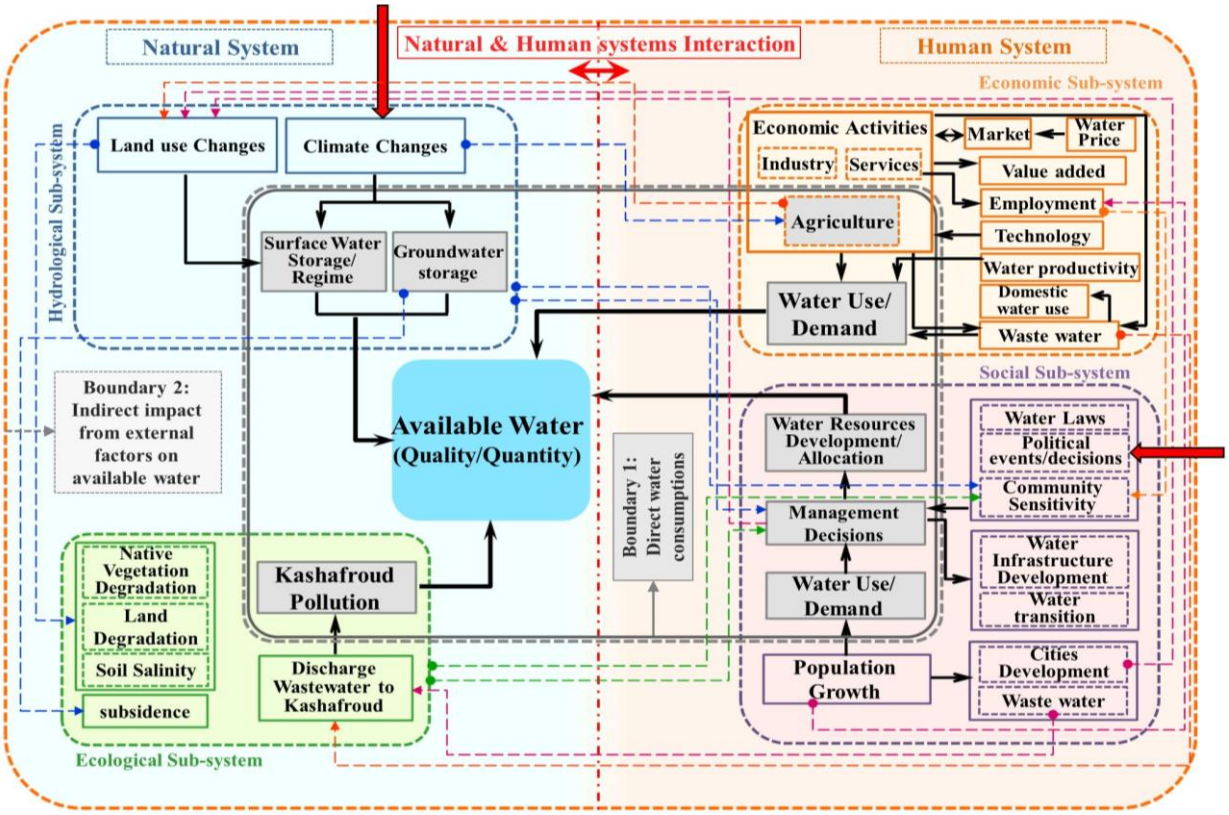

Fig. 18- Perceptual socio-hydrological model of Mashhad basin

شکل ۱۸- مدل ادراکی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد

از طرف دیگر در میان مؤلفه‌هایی که مستقیماً بر موجودیت آب در حوضه مؤثرند، تقاضا/ مصرف آب که خود متأثر از رشد جمعیت، شیوه‌های مدیریتی و الگوهای رفتاری انفرادی و جمعی می‌باشد، مهم‌ترین عامل مؤثری است که تمام برهمکنش‌های میان سیستم انسانی و طبیعی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ از این‌رو یکی از مهم‌ترین محرک‌های سیستم انسانی محسوب می‌گردد که در هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی حوضه مشهد نقشی اساسی دارد.

امروزه ساختار و مفاهیم مدیریت آب بسیار پیچیده‌تر از گذشته است؛ چالش‌هایی از قبیل امنیت آبی، انتقال بین‌حوضه‌ای یا بین‌المللی آب و تجارت آب مجازی، مسائلی با رویکردهای چندوجهی هستند که بر ابعاد مختلف اجتماعی و سیاسی مؤثرند و شکست سیاست‌های آبی در این خصوص نه فقط در سطح محلی، بلکه در سطوح منطقه‌ای و جهانی تأثیرگذار است (Gholizadeh Sarabi et al., 2018). در حوضه آبریز مشهد نیز با وجود وضعیت بحرانی منابع آبی و چالش‌های تأمین پایدار آب، به مدیریت منابع آب مبتنی بر مفاهیم و نگرش‌های جدید نیاز است. به‌نظر می‌رسد که یکی از اصلی‌ترین عوامل ناتوانی در اخذ تصمیمات مناسب مدیریت آبی، عدم وجود مطالعاتی با رویکردهای جدید و ابزارهای درست در پیش‌بینی اثرات تصمیم‌سازی در آینده می‌باشد؛ درحالی‌که مطالعات آبی در حوضه مشهد سالیان مدیدی است که همچنان با ساختاری مشخص و مبتنی بر ماهیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز بکر انجام می‌شود. حتی در دهه اخیر با وجود فشارهای فزاینده بر منابع آبی نیز، مطالعات و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی نسبت به گذشته تغییر چندانی نداشته است و عمدتاً مطالعات موجود به بیان مسائل هیدرولوژیکی بسنده کرده و ابعاد اجتماعی مورد غفلت قرار گرفته است؛ شاید ناتوانی مدل‌سازی‌های موجود در پیش‌بینی نیز از همین مسأله نشأت می‌گیرد. بدین‌ترتیب در شرایط کنونی با وجود چالش‌هایی از قبیل، توسعه مداوم شهر مشهد و رشد فزاینده جمعیت ناشی از مهاجرت، رقابت میان بخش کشاورزی و شهر مشهد بر سر تأمین پایدار آب، برداشت‌های غیرمجاز از منابع آب سطحی و زیرزمینی، مطرح شدن جدی گزینه‌های مختلف انتقال آب از خزر، عمان و تاجیکستان به مشهد با وجود انتقال آب از سد دوستی و غیره، ضروری به‌نظر می‌رسد که تحقیقات آینده از شکل کاملاً سنتی خود و فقط مبتنی بر مؤلفه‌های هیدرواقلیمی و کاربرد روابط تجربی و مدل‌های منطقه‌ای، بر درک چگونگی ارتباط و پیوستگی میان عوامل انسانی با چرخه هیدرولوژیکی متمرکز شوند. در این راستا با توجه به نگاه جامع هیدرولوژی اجتماعی به سیستم‌های پیوسته انسان- آب،

تدوین مدل‌های ادراکی و مفهومی با تکیه بر مفاهیم هم‌تکاملی، پویایی برهمکنش‌ها، و بازخوردهای میان نهادها، عوامل و منابع، زمینه‌ای مناسب را برای ورود به مدل‌های ریاضی کارآمد فراهم خواهند ساخت. مسلماً سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد از آنچه که توصیف شد بسیار پیچیده‌تر می‌باشد، چراکه تعاملات، بازخوردها و برهمکنش‌های میان سیستم‌های طبیعی- انسانی، در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت، همواره در حال وقوع می‌باشد؛ اما در مطالعات آینده با توسعه مدل مفهومی[12] مبتنی بر انتخاب متغیرهای مناسب در هر زیرسیستم، تعریف حلقه‌های بازخوردی[13] میان زیرسیستم‌ها، و در نهایت تبیین روابط ریاضی مناسب برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های مورد نظر با توجه به اهداف و رویکرد مدل‌سازی، درک کمّی از تأثیر عوامل انسانی بر خروجی‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی امکان‌پذیر خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مطالعه تاریخی هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد با هدف شناخت، ادراک و تجزیه و تحلیل سیستم پیوسته انسان- آب در شرایط پیچیده حاکم بر این حوضه ارائه شده است. اگرچه که این مطالعه مبتنی بر شرایط حاکم بر حوضه مشهد به‌عنوان نماینده‌ای از شرایط پیچیده آبی- اجتماعی حاکم بر حوضه‌های آبریز شرق ایران انجام شده و اولین تجربه‌ای است که با نگاه هیدرولوژیکی اجتماعی مؤلفه‌های گوناگون انسانی و طبیعی را مورد شناسایی و واکاوی قرار می‌دهد، ساز و کار جدیدی را برای انجام این‌گونه مطالعات در سایر حوضه‌های دیگر نیز ارائه می‌نماید. طی این مطالعه تاریخی، سیستم‌های اصلی، زیرسیستم‌ها و مؤلفه‌های مؤثر هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه آبریز مشهد شناسایی شده و تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی از بدو پیدایش سیستم انسانی تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است، و در نهایت نحوه ارتباط سیستم‌های انسانی و هیدرولوژیکی و برهمکنش‌های‌شان با یکدیگر در قالب مدلی ادراکی و مبتنی بر تاریخ هم‌تکاملی سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی در حوضه، به‌سادگی نمایش داده شده است. طبق نتایج مطالعه تاریخی، طی دوره معاصر، از سال ۱۳۰۰ تا کنون به‌عنوان فاز توسعه شناسایی شده است، به‌رغم اینکه از سال ۱۳۴۵ تا کنون شرایط انقباض در حوضه پدیدار شده است؛ بدین‌ترتیب تداوم توسعه توأم با وجود شرایط انقباض در حوضه، منجر به ایجاد وضعیت بغرنجی در سیستم هیدرولوژیکی اجتماعی شده است. مسلماً هنوز فازهای رکود و بهبود و تعادل جدید در حوضه آبریز مشهد رخ نداده است. در نهایت در مدل ادراکی ارائه شده نیز، کمیت و کیفیت منابع آبی و تقاضای آب به‌عنوان مهم‌ترین نیروهای محرک داخلی و مؤلفه‌های هیدرواقلیمی به‌عنوان مهم‌ترین نیروی محرک خارجیِ مؤثر بر هم‌تکاملی سیستم پیوسته انسان- آب، عمل می‌کنند. مسلماً این مرحله از مطالعه، نقطه آغازین مدل‌سازی هیدرولوژیکی اجتماعی می‌باشد و کاربردی شدن چنین الگویی در فرایند تصمیم‌سازی به‌عنوان خروجی اصلی مدل‌سازی، مستلزم تبدیل این مدل ادراکی به مدلی کمّی و عددی می‌باشد. در واقع مدل ادراکی ارائه شده در این مقاله در مرحله بعدی از مطالعه، اساس توسعه مدل مفهومی خواهد بود؛ به‌طوری‌که انتخاب متغیرهای مناسب در هر زیرسیستم، تعریف ریاضی حلقه‌های بازخوردی میان زیرسیستم‌ها، و در نهایت تبیین روابط ریاضی مناسب برای کمّی‌سازی مؤلفه‌های مورد نظر با توجه به رویکرد و اهداف مدل‌سازی، مبتنی بر سیستم‌های اصلی، زیرسیستم‌ها و ارتباط میان آنها در این مدل ادراکی، میّسر خواهد شد. با این حال این مطالعه هنوز یک مطالعه مکان‌مبنا می‌باشد که تجربیات تاریخی در یک محدوده مشخص را ارائه می‌دهد و همچنان به تکرار این نوع از مطالعات با همین شیوه در محدوده‌هایی با ویژگی‌های اجتماعی و هیدرولوژیکی کاملاً متفاوت نیاز می‌باشد که علاوه بر تکامل مدل‌های ادراکی، امکان مقایسه مفاهیم هم‌تکاملی در مکان‌های مختلف نیز، ممکن گردد. بدون شک این مدل ادراکی اولین و اما مهم‌ترین حلقه از زنجیره مدل‌سازی می‌باشد که هرچه تکامل بیشتری یابد و تصویر دقیق‌تری از حوضه ترسیم نماید، مراحل بعدی که بر مبنای آن تعریف می‌شوند نیز از صحت و دقت بیشتریی برخوردار خواهند شد. در مراحل بعدی، تدوین مدل‌های مفهومی و ریاضی کارآمد بر پایه این مدل ادراکی، در گروی تکمیل هرچه بیشتر داده‌های تاریخی، استفاده از روش‌های خلاقانه در تجزیه و تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری داده‌های جدید برای آزمودن فرضیه‌های مرتبط با حلقه‌های بازخوردی و همچنین فرضیه‌های مرتبط با پویایی برهمکنش‌های میان سیستم‌های انسانی- طبیعی، و در نهایت تعریف روابط ریاضی مناسب برای توصیف کمّی سیستم می‌باشد که برای تحقیقات آینده باقی مانده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Evolutionary Process
2. Co-Evolution
3. Socio-Hydrology
4. Historical Socio-Hydrology
5. Perceptual Model
6. Timeline
7. Community Sensitivity
8. Expansion
9. Contraction
10. Recession
11. Recovery and New Equilibrium
12. Conceptual Model
13. Feedback Loops

۶- مراجع

Beven KJ (2012) Rainfall-runoff modelling: the primer. Wiley Chichester, 457 p

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

Broderick K (2007) Getting a handle on social ecological systems in catchments: the nature and importance of environmental perception. Australian Geographic 38: 297-308

Carey M, Baraer M, Mark BG, French A, Bury J, Young KR, McKenzie JM (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

Costanza R, Graumlich L, Steffen W, Crumley C, Dearing J, Hibbard K, Leemans R, Redman C, Schimel D (2007) Sustainability or Collapse: What can we learn from integrating the history of humans and the rest of nature?. Ambio 36:522-527

Elagib NA, Musa AA, Sulieman HM (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, Sivapalan M, Tonts M, Hipsey MR (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

Farnahad Consulting Engineers Company (2009) Development plan (comprehensive) of Mashhad metropolis. Technical Report (In Persian)

Foroughzadeh S, Shariati S, Danaee M (2013) The Iranian pilgrims' length of stay in Mashhad a sociological analysis. Iranian Social Studies Journal 6(3-4):157-179 (In Persian)

Frye RN, (1975) The Sāmānids. In Frye RN (ed). The Cambridge History of Iran, Volume 4: From the Arab Invasion to the Saljuqs. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 136-161

Gholizadeh-Sarabi SH, Ghahraman B, Shafiei M (2019) New science of socio-hydrology: In search of understanding co-evolution of human and water. Iran-Water Resources Research 14(5):351-359 (In Persian)

Gholizadeh-Sarabi SH, Shafiei M, Majidi M (2018) Shifts in water resources management approaches from engineering hydrology to socio-hydrology. In: The first meeting of water and environmental experts, 1 March, Tehran, Iran. Available at: http:// waterhouse.ir/sites/default/files/142.pdf (In Persian)

Hatami A (2016) Derivation and analysis of water demand management strategies from the perspective of consumer and Authorities. Ph.D. Thesis, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian)

Hataminejad H (2003) A passing look at Mashahd city's economy. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR) 12(47):29-33(In Persian)

Jones NA, Ross H, Lynam T, Perez P, Leitch A (2011) Mental models: An interdisciplinary synthesis of theory and methods. Ecology and Society 16:46-58

Kandasamy J, Sounthararajah D, Sivabalan P, Chanan A, Vigneswaran S, 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

Kendall MG (1975) Rank correlation methods. Charles Griffin, London

Kinzig AP, Ehrlich PR, Alston LJ, Arrow K, Barrett S, Buchman TG, Daily GC, Levin B, Levin S, Oppenheimer M (2013) Social norms and global environmental challenges: The complex interaction of behaviors, values, and policy. Bio-Science 63:164-175

Lambton AKS (1983) landlord and peasant in Persia, scientific and cultural publications, Tehran, 854p (In Persian)

Lane SN (2014) Acting, predicting and intervening in a sociohydrological world. Hydrology and Earth System Sciences 18:927-952

Liu D, Tian F, Lin M, 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 Y, Tian F, Hu H, Sivapalan M (2014) Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji-Tire model. Hydrology and Earth System Sciences 18:1289-1303

Lynam T Brown K (2012) Mental Models in human-environment interactions: Theory, policy implications, and methodological explorations. Ecology and Society 17:24-26

Malekshahmirzadi S (2012) Prehistoric Iran: Iran from the earliest times to the dawn of urbanism. Sobhan e Nour Press, 584p (In Persian)

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

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

Statistical Center of Iran (2018) Statistical yearbook. (In Persian), Available on: https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_req/Item/newifs.aspx

Tolun LG, Ergenekon S, Hocaoglu SM, Donertas AS, Cokacar T, Husrevoglu S, Beken CP, Baban A (2012) Socioeconomic response to water quality: A first experience in science and policy integration for the Izmit Bay coastal system. Ecology and Society 17:40-53

Tomar AS (2014) Study of precipitation indices for drought intensity at New Delhi, India. AIJRSTEM 8(1):46-49

Toosab Consulting Engineers Company (2009) Integrated water resources management of kashafroud basin. Technical Report (In Persian)

Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM (1997) Human domination of Earth's ecosystems. Science 277(5325):494-499

Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, Glidden S, Bunn SE, Sullivan CA, Davies PM (2010) Global threats to human water security and river biodiversity. Nature 467:555-56

Wei J, Wei Y, Western A (2017) Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011. Global Environmental Change 42:82-92

Westerberg IK, Di Baldassarre G, Beven KJ, Coxon G, Krueger T (2017) Perceptual models of uncertainty for socio-hydrological systems: a flood risk change example. Hydrological Sciences Journal 62(11):1705-1713

Winder N, McIntosh BS, Jeffrey P (2005) The origin, diagnostic attributes and practical application of co-evolutionary theory. Ecological Economics 54:347-361

Zilberman D, Dinar A, MacDougall N, Khanna M, Brown C, Castillo F (2011) Individual and institutional responses to the drought: the case of California agriculture. Journal of Contemporary Water Research & Education 121:17-23

Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. Econometrica 13:245-259

Mianabadi A, Jarkeh MR, Mianabadi H, Kolahi M (2018) Socio-hydrology. The Socio Cultural Strategy Journal 27:47-78 (In Persian)

Mianabadi A, Mianabadi H, Alizadeh A (2017) A novel attitude on classical hydrology. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 11(4):539-551 (In Persian)

Mohammadi Z, Babaei Y (2011) Pollution control necessity of wastewater entering the Kashfroud River of Mashhad and providing appropriate strategies. In: Iranian Water Conference, Clean Water, 2-3 March, Tehran, Iran (In Persian)

A Navaei(1973) Shah Abbas (collection of historical documents and correspondence including detailed notes), Iranian Culture Foundation (In Persian)

Nezamkhah M, Onagh M, Komaki CH (2015) Study of land use changes in Mashhad plain during 1985-2013. In: The second National Congress of Biology and Natural Sciences of Iran, 3 December, Tehran, Iran (In Persian)

Pande S, Savenije HHG (2016) A sociohydrological model for smallholder farmers in Maharashtra, India. Water Resources Research 52:1923-1947

Pareeth S, Karimi P, Shafiei M, De Fraiture C (2019) Mapping agricultural landuse patterns from time series of Landsat 8 using random forest based hierarchial approach. Remote Sensing 11(5):601

Ponting C (1992) A green history of the world: The environment and the collapse of great civilizations.St. Martin's Press, New York

Regional Water Company of Khorasan Razavi (2017) Water view of Khorasan Razavi province. Technical Report (In Persian)

Saghaei M, Javanbakht Z (2012) Statistical analysis of tourists and pilgrims entering the Mashhad metropolis using time series models. Quarterly Journal of Geographical Sciences 28: 71-94 (In Persian)

Service and Environment Deputy of the Municipality of Mashhad (2018) Mashhad metropolis development environment documentation. Technical Report (In Persian)

Seyyedi M (2018) Historical memorial of Toos. (In Persian), Available on: http://ferdowsitoos.razavichto.ir/FTPHost/1004/filepdf/maghalattous/Toos-dar-tarikh-va-farhange-iran.pdf/

Shafiei M, Gharari SH (2017) A review on hydrological modelling concepts: Part 1- Introduction of modelling process. Water and Sustainable Development 4(2):95-102 (In Persian)