

## برآورد تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان مشهد-چناران با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی (الگوریتم MRC)

محمود ارجمند شریف<sup>۱</sup>، هادی جعفری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

۲- دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

\* نویسنده مسئول: [h.jafari@shahroodut.ac.ir](mailto:h.jafari@shahroodut.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

### چکیده

آبخوان مشهد-چناران با وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومترمربع، مهم‌ترین آبخوان آبرفتی استان خراسان رضوی و تنها منبع پایدار تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از آب شرب کلان‌شهر مشهد است. در این تحقیق، تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از آمار و اطلاعات ۳۱ حلقه چاه مشاهده‌ای به روش نوسانات سطح ایستابی و الگوریتم MRC در یک دوره ۱۵ ساله (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴) برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهند، تغذیه در آبخوان مشهد-چناران از الگوی مشخصی پیروی نموده و تابعی از میزان بارندگی است. بارندگی‌های فصلی از اواخر مهرماه شروع و در فروردین‌ماه به حداکثر می‌رسند. روند افزایش تغذیه آبخوان تا پایان اسفند ادامه یافته و پس‌از آن با شروع فصل بهار، میزان تغذیه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. مهم‌ترین دلیل کاهش تغذیه در این بازه، وجود یک تأخیر بین شروع بارندگی‌های و تأثیر آن بر آب زیرزمینی است. بیش‌ترین مقدار تغذیه در ماه‌های دی، بهمن و اسفند و کم‌ترین آن نیز در ماه‌های مرداد و شهریور صورت می‌گیرد. در طول دوره آماری، کم‌ترین مقدار تغذیه در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ به میزان ۸۷/۲ میلیون مترمکعب (۱۲/۴ درصد بارندگی)، بیش‌ترین مقدار در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ به میزان ۲۲۱/۷ میلیون مترمکعب (۲۹ درصد بارندگی) و میانگین تغذیه نیز ۱۲۲ میلیون مترمکعب (۱۹ درصد بارندگی) می‌باشد. رخدادهای تغذیه کمتر از ۵ میلیون مترمکعب در سال، بیش‌ترین فراوانی و مقادیر بالا نیز دارای کم‌ترین فراوانی می‌باشند. ارزیابی نسبت مقدار تغذیه به مقدار بارش، حاکی از برآورد درست مقدار تغذیه به روش نوسانات سطح ایستابی با استفاده از الگوریتم MRC است.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان مشهد-چناران، الگوریتم MRC، تغذیه آب زیرزمینی، نوسانات سطح ایستابی.

### مقدمه

سطح ایستابی می‌شوند. در بین عوامل یادشده، تغذیه از بارندگی به‌دلیل ماهیت طبیعی آن و تأثیرگذاری بسیار زیاد بر تغییرات حجم مخزن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تغذیه یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در برآورد بیلان آب زیرزمینی است، اما به‌دلیل تغییرات زمانی و مکانی و مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم، همچنان یکی از مؤلفه‌های کمتر شناخته‌شده است (Healy, 2010). پس از یک رخداد بارندگی، مقداری از بارش

برآورد مقادیر تغذیه، تخلیه و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در یک آبخوان، نخستین گام برای مدیریت منابع آب است. برخلاف عوامل تخلیه که بیشتر به‌طور مستقیم قابل‌اندازه‌گیری هستند، برآورد عوامل تغذیه آب زیرزمینی مشکلات و پیچیدگی‌های خاصی دارند. در آبخوان‌های آزاد، عوامل مختلفی از جمله نفوذ آب، بارندگی و یا آب برگشتی کشاورزی، آب‌های برگشتی از طریق چاه‌های جذبی و بهره‌برداری از طریق چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها باعث نوسان

برای توسعه و ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی استفاده نمودند. بر اساس نتایج این پژوهش، اگرچه روش نوسانات سطح ایستابی برای تعیین درستی روش‌های ارزیابی توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی در مقیاس ناحیه‌ای و همچنین برای شناسایی ناسازگاری در مدل‌های موجود بسیار خوب است، اما باید برآورد تغذیه به دلیل وابستگی این روش به داده‌های محلی و حساسیت آن به عواملی غیر از تغذیه آب زیرزمینی با احتیاط بیشتری صورت گیرد.

باوجود انجام مطالعات گسترده و اجرای طرح‌های توسعه‌ای فراوان در آبخوان مشهد-چناران، به دلیل شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بسیار پیچیده و وجود الگوهای متفاوت و گاه ناسازگار هیدرولیکی، تاکنون برآورد قابل قبولی از پارامترهای بیلان آبخوان ارائه نشده است. در این پژوهش کوشش شده است تا با در نظر گرفتن شرایط یادشده، تغذیه عمودی آبخوان که بیشتر ناشی از بارندگی بر روی دشت است، به روش نوسانات سطح ایستابی برآورد گردد.

### مواد و روش‌ها

#### موقعیت جغرافیایی

محدوده مطالعاتی مشهد-چناران به وسعت حدود ۹۹۵۷ کیلومتر مربع در حدفاصل ۲۲° ۵۸' تا ۷° ۶۰' طول شرقی و ۵۹° ۳۵' تا ۲° ۳۷' عرض شمالی، در حوضه آبریز درجه دو قره‌قوم واقع شده است (شکل ۱). آبخوان آبرفتی مشهد-چناران که مهم‌ترین آبخوان آبرفتی به لحاظ گستردگی و میزان بهره‌برداری در استان خراسان رضوی می‌باشد، در این محدوده جای گرفته است.

#### زمین‌شناسی

از دیدگاه زمین‌شناسی عمومی، دشت مشهد-چناران حوضه فروافتاده‌ای با کشیدگی شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد که در حدفاصل رشته کوه‌های بینالود در غرب و جنوب غرب و رشته کوه‌های هزار مسجد در شمال و شمال شرق جای گرفته است. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰، قدیمی‌ترین سازندهای

به زمین نفوذ<sup>۱</sup> می‌کند. این مقدار در ناحیه غیراشباع به نفوذ عمقی<sup>۲</sup> ادامه داده، به سطح ایستابی رسیده و موجب خیز<sup>۳</sup> آن می‌شود. دامنه افت و خیز سطح ایستابی، بیانگر مقدار آبی است که به آبخوان اضافه و یا از آن کم می‌شود. در این مدل، تغذیه شامل جریان‌های زیرزمینی از آبخوان‌های مجاور نمی‌شود.

روش نوسانات سطح ایستابی که در گروه روش‌های فیزیکی در منطقه اشباع طبقه‌بندی می‌شود، به عنوان یک ابزار ساده و کاربردی، رایج‌ترین روش برآورد تغذیه در آبخوان‌های آزاد<sup>۴</sup> است (Sophocleous, 1991; Crosbie et al., 2005; Healy and Cook, 2005). اگرچه می‌توان از روش‌های متعددی برای برآورد تغذیه استفاده نمود، اما انتخاب روش مناسب برای برآورد تغذیه فرآیندی مشکل و بیشتر ترکیبی است (Scanlon et al., 2002). به عقیده این پژوهشگرها، مقیاس‌های زمانی و مکانی، محدوده و اعتبار مقدار تغذیه، برآورد آسان و در دسترس بودن کدهای کامپیوتری از مهم‌ترین نکته‌های انتخاب روش مناسب برای برآورد تغذیه هستند. روش نوسانات سطح ایستابی، به عنوان یک روش ساده و کاربردی، توسط پژوهشگرهای مختلفی مطالعه شده و مورد پذیرش قرار گرفته است. هیلی و کوک (Healy and Cook, 2005) از داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی برای برآورد تغذیه استفاده نموده و استفاده از داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی را رایج‌ترین روش مورد استفاده برای برآورد تغذیه دانسته‌اند. امتیاز این روش، سادگی و عدم حساسیت آن نسبت به فرآیندهایی است که باعث انتقال آب از منطقه اشباع می‌شوند. عدم قطعیت در برآورد تغذیه در این روش نیز ناشی از محدودیت دقت در آبدهی ویژه و تا حدودی نیز مربوط به انگاره‌های مورد استفاده است. Varni et al. (2013) با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی در دشت پامپا<sup>۵</sup> واقع در آرژانتین، تغذیه آب زیرزمینی را بررسی و مطالعه نموده‌اند. در این پژوهش، مقدار میانگین آبدهی ویژه بر اساس داده‌های سطح آب در یک دوره ۱۸ ساله، ۰/۰۹ و مقدار تغذیه نیز ۲۱۰ میلی‌متر در سال (حدود ۱۸ درصد بارش سالانه) برآورد شده است. (Jie et al., 2011) از هم‌بندی روش بیلان آب-خاک و روش نوسانات سطح ایستابی

<sup>۴</sup> Unconfined Aquifer

<sup>۵</sup> Pampa Plain

<sup>۱</sup> Infiltration

<sup>۲</sup> Percolation

<sup>۳</sup> Water-table rise

زمین‌شناسی رخنمون‌یافته در سطح محدوده مطالعاتی مشهد-چناران شامل سنگ‌آهک و دولومیت‌های متبلور سازند بهرام به سن پالئوزوئیک می‌باشند که در خط‌الراس بلندی‌های بینالود و حاشیه جنوب‌غربی منطقه، در سطح رخنمون دارند. بخش بیشتر سطح محدوده مطالعاتی را رسوب‌ها و سازندهای دوران دوم زمین‌شناسی (ژوراسیک و کرتاسه) دربرگرفته است. واحدهای سنگی این دوران در بلندی‌های بینالود و در غرب شهر مشهد بیشتر آذرین و دگرگونی بوده و در بخش‌های شمالی و شرقی (حوضه رسوبی کپه‌داغ) از نوع سنگ‌های رسوبی می‌باشند. دوران سوم زمین‌شناسی در منطقه، بیشتر با رخنمون واحدهای مارنی قرمز رنگ گچ‌دار نتوژن و رسوب‌های کواترنر شناخته می‌شود (آقانباتی، ۱۳۸۳). واحدهای نتوژن دارای نفوذپذیری اندک است و بیشتر سنگ کف آبخوان آبرفتی را تشکیل داده‌اند. علاوه بر این، باعث تخریب کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه نیز می‌شوند. رسوب‌های کواترنر، بیشتر شامل رسوب‌های تحکیم‌نیافته آواری حاصل از فرسایش بلندی‌های و سازندهای سنگی قدیمی‌تر بوده که در مناطق پست و فروافتاده دشت تجمع یافته‌اند.

### هیدروژئولوژی

آبخوان آبرفتی مشهد - چناران به وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومتر مربع از نوع آزاد است. نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی، بررسی‌های ژئوفیزیک و حفاری‌های اکتشافی بیانگر این است که توپوگرافی سنگ کف آبخوان به شدت تحت تأثیر عملکرد سیستم‌های گسلی طولی و عرضی دشت، تنوع واحدهای زمین‌شناسی حاشیه شمالی و جنوبی آبخوان و سیستم رسوب‌گذاری کشف‌رود بوده و در نتیجه تغییرات چشمگیری در خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان، ضخامت، جنس و مورفولوژی آبرفت مشاهده می‌شود. جنس سنگ کف در بخش جنوب‌شرقی و شمال‌غربی آبخوان تا محدوده شهر چناران بیشتر از رسوب‌های نتوژن، در حاشیه شمالی بیشتر سازندهای شورابه و تیرگان و در نوار جنوبی دشت نیز از سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. میانگین آبدهی ویژه آبخوان، ۶ درصد و مقدار قابلیت انتقال نیز از حداقل حدود ۲۰۰ مترمربع بر روز در آبرفت‌های بلندی‌های جنوب‌غرب تا حداکثر حدود ۳۰۰۰

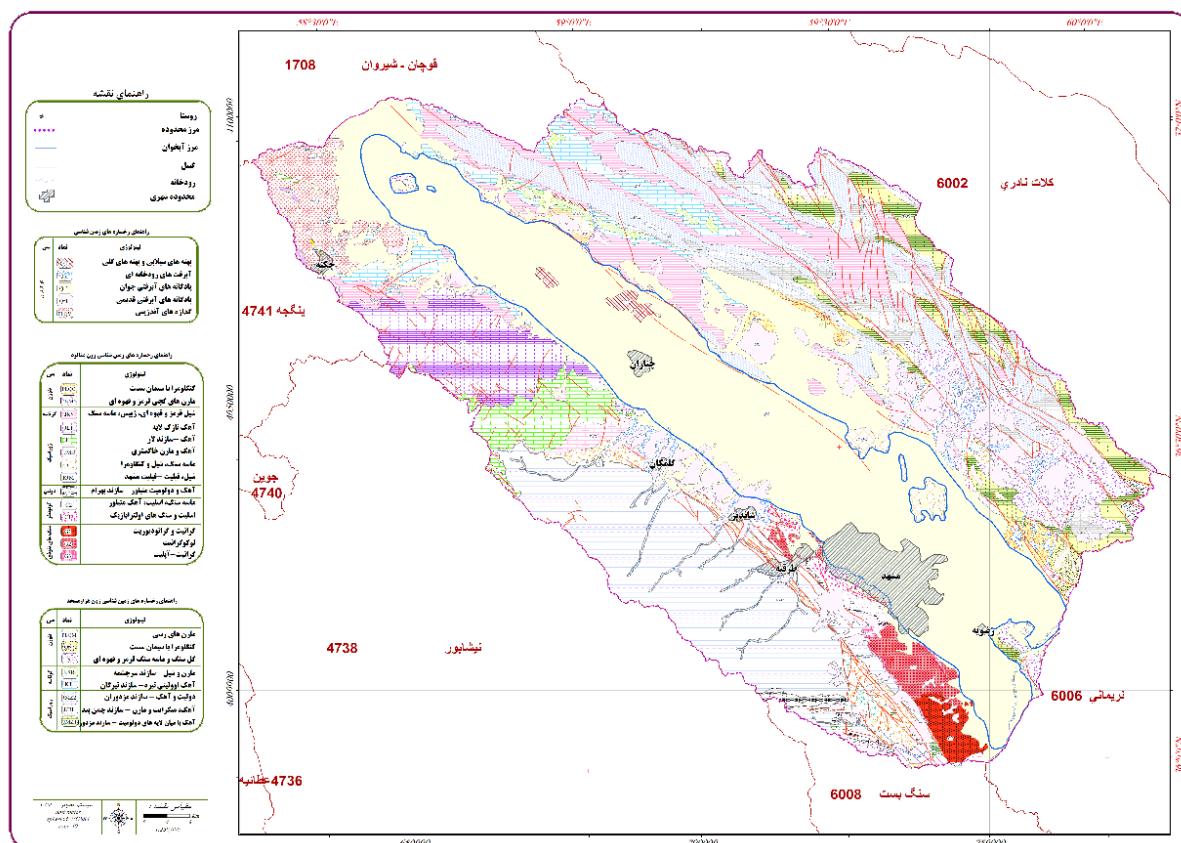
### روش انجام پژوهش

در روش نوسانات سطح ایستابی، از خیز سطح آب برای برآورد تغذیه استفاده می‌شود (Heppner and Nimmo, 2005). در این روش مقدار تغذیه از حاصل ضرب بالاآمدگی یا خیز سطح ایستابی<sup>۱</sup> در آبدهی ویژه آبخوان، طبق رابطه ۱ برآورد می‌شود.

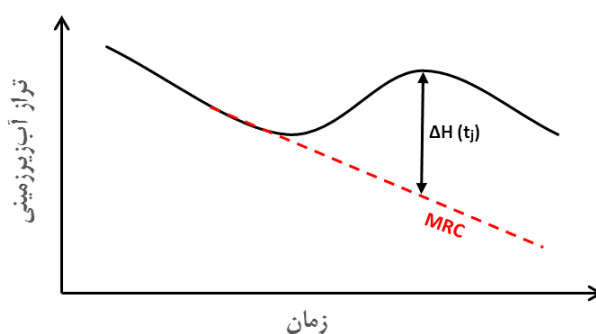
$$R = S_y \times \Delta H \quad (1)$$

در این رابطه، R مقدار تغذیه در یک فاصله زمانی مشخص،  $S_y$  آبدهی ویژه و  $\Delta H$  خیز سطح ایستابی است. اساس این روش در شکل ۲ ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Water-table rise



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی مشهد-چناران (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی مشهد، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰)



شکل ۲- هیدروگراف فرضی آب زیرزمینی.

(۲) مقدار آبدهی ویژه مشخص و در طی دوره تغذیه ثابت است،  
(۳) یال فرود هیدروگراف را که بیانگر دوره قبل از تغذیه است می‌توان از روش برون‌یابی تا جایی که مقدار  $\Delta H$  قابل برآورد کردن باشد، ادامه داد و  
(۴) تغذیه، جریان‌های زیرزمینی از آبخوان‌های مجاور را شامل نمی‌شود. تغذیه در این روش با داشتن مقادیر  $\Delta H$  و آبدهی ویژه برآورد می‌شود.  
برخلاف فرآیند انتخاب آبدهی ویژه، برآورد مقدار  $\Delta H$  همواره مشکل، و به تجربه و اطلاعات دقیق، از هیدروژئولوژی منطقه

این روش بر مبنای این فرض که بالاآمدگی سطح ایستابی ناشی از جریان‌های رو به پایین است، مقدار تغذیه را برآورد می‌کند. باوجود سادگی فرآیند برآورد تغذیه در روش نوسانات سطح ایستابی، یکسری انگاره کلیدی و بغرنج در اساس این روش وجود دارند که برآورد مقدار تغذیه را با سختی‌ها و مشکلات فراوانی همراه نموده است (Heppner amd Nimmo, 2005). مهم‌ترین این انگاره‌ها عبارتند از:

۱) نوسانات دیده شده در سطح ایستابی، ناشی از تغذیه و تخلیه طبیعی است،

شده در محیط اکسل بازنویسی شد. در این الگوریتم، نرخ افت آب زیرزمینی نسبت به تراز آب زیرزمینی، در بخش منحنی فرود هیدروگراف رسم می‌شود. معادله منحنی اصلی فرود از برازش بهترین خط عبوری از بین نقاط به دست می‌آید. با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی هر منطقه، می‌توان از برازش خطی، توانی و غیره استفاده نمود.

### نتایج و بحث

روش نوسانات سطح ایستابی از دو پارامتر آبدی و ویژه و خیز سطح آب زیرزمینی برای برآورد تغذیه استفاده می‌کند. برای برآورد تغذیه آبخوان مشهد - چناران، از داده‌های عمق آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، آبدی ویژه آبخوان مشهد-چناران و بارندگی استفاده شده است.

#### سطح آب زیرزمینی در محل چاه‌های مشاهده‌ای

تاکنون بیش از ۱۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای و پیزومتر، در پهنه آبرفتی و سازندی محدوده مطالعاتی مشهد-چناران حفاری و تجهیز شده‌اند. در حال حاضر، ۷۴ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال وجود دارند که به صورت ماهانه سطح آب زیرزمینی در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، نخست تراز آب زیرزمینی در یک دوره آماری ۱۵ ساله (از مهر ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۵) برای ۷۴ حلقه چاه رسم شده است. بررسی‌های انجام‌شده بر اساس داده‌های سطح آب و لاگ حفاری چاه‌ها (بهره‌برداری و مشاهده‌ای) نشان می‌دهد، چندلایه بودن آبخوان مشهد-چناران، در حاشیه شمالی رودخانه کشف‌رود، از محدوده شهر چناران تا خروجی آبخوان، الگوهای هیدرولیکی متفاوتی را ایجاد نموده است (گزارش مطالعات استفاده بهینه از ظرفیت انتقالی پروژه آبرسانی سد دوستی در حوزه شهری مشهد- مرحله اول، ۱۳۹۴). این پدیده باعث شده، چاه‌های مشاهده‌ای بسته به عمق حفاری و نوع لایه آبدار، سطح آب متفاوت و به پیرو آن نوسانات متفاوت و گاه ناسازگاری را تجربه نمایند. رفتار هیدرولیکی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان مشهد-چناران بیشتر به سه حالت کلی است. گروه اول شامل چاه‌هایی است که بیشتر در لایه آبدار آزاد فوقانی (محلی) حفر شده و سطح آب در آنها به‌طور پیوسته

نیاز دارد. بر اساس انگاره‌های این روش، مقدار بالآمدگی سطح ایستابی، باید نسبت به سطحی که در آن هیچ‌گونه تغذیه‌ای صورت نگرفته است سنجیده شود. به این ترتیب، مقدار بالآمدگی از کم کردن کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار سطح آب در طی دوره رخداد تغذیه به دست می‌آید. کم‌ترین مقدار سطح آب در طی دوره رخداد تغذیه، از طریق برون‌یابی یال فرود هیدروگراف و رسم سطحی که در آن هیچ‌گونه تغذیه‌ای صورت نگرفته، برآورد می‌شود (شکل ۲). برون‌یابی یال فرود هیدروگراف و رسم سطحی که در آن هیچ‌گونه تغذیه‌ای صورت نگرفته، همیشه کار ساده‌ای نیست. روش‌های مختلفی از جمله روش گرافیکی، روش منحنی اصلی فرود<sup>۱</sup> (MRC) و کد کامپیوتری RISE که توسط Rutledge (2005) برنامه‌نویسی شده است، برای برون‌یابی استفاده می‌شوند. در این پژوهش، از روش MRC که توسط هپنر و نیمو ارائه شده، استفاده گردیده است. روش MRC از یک فرآیند نیمه‌خودکار برای برآورد مقادیر  $\Delta H$  استفاده می‌کند. MRC، یک ویژگی از شاخه فرود هیدروگراف است که بیانگر میانگین رفتار افت سطح آب در منطقه است. در یک منطقه معین، افت سطح آب زیرزمینی تابعی از خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان بوده و همواره رابطه مشخصی بین نرخ افت سطح آب زیرزمینی<sup>۲</sup>، تراز سطح آب و مقدار تغذیه وجود دارد (Heppner amd Nimmo, 2005). پس از اینکه منحنی اصلی فرود برای یک منطقه تعیین شد، می‌توان از آن برای پیش‌بینی رفتار سطح ایستابی در زمانی که تغذیه‌ای صورت نگرفته است، استفاده کرد. انحراف مثبت هیدروگراف نسبت به منحنی فرود اصلی بیانگر مقدار تغذیه است. مقدار بالآمدگی سطح آب (انحراف مثبت هیدروگراف) از تفاضل بین تراز پیش‌بینی شده و تراز مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده در چاه) برآورد می‌شود. الگوریتم و روش‌های مختلفی برای استخراج منحنی فرود اصلی استفاده می‌شوند (Crosbie et al., 2005; Heppner amd Nimmo, 2005). در این پژوهش از الگوریتم هپنر و نیمو استفاده شده است. الگوریتم هپنر و نیمو در محیط متلب برنامه‌نویسی شده است، اما به دلیل در دسترس نبودن کد و مشکلات استفاده از برنامه متلب، کد بر اساس الگوریتم معرفی

<sup>۲</sup> Water-table decline rate

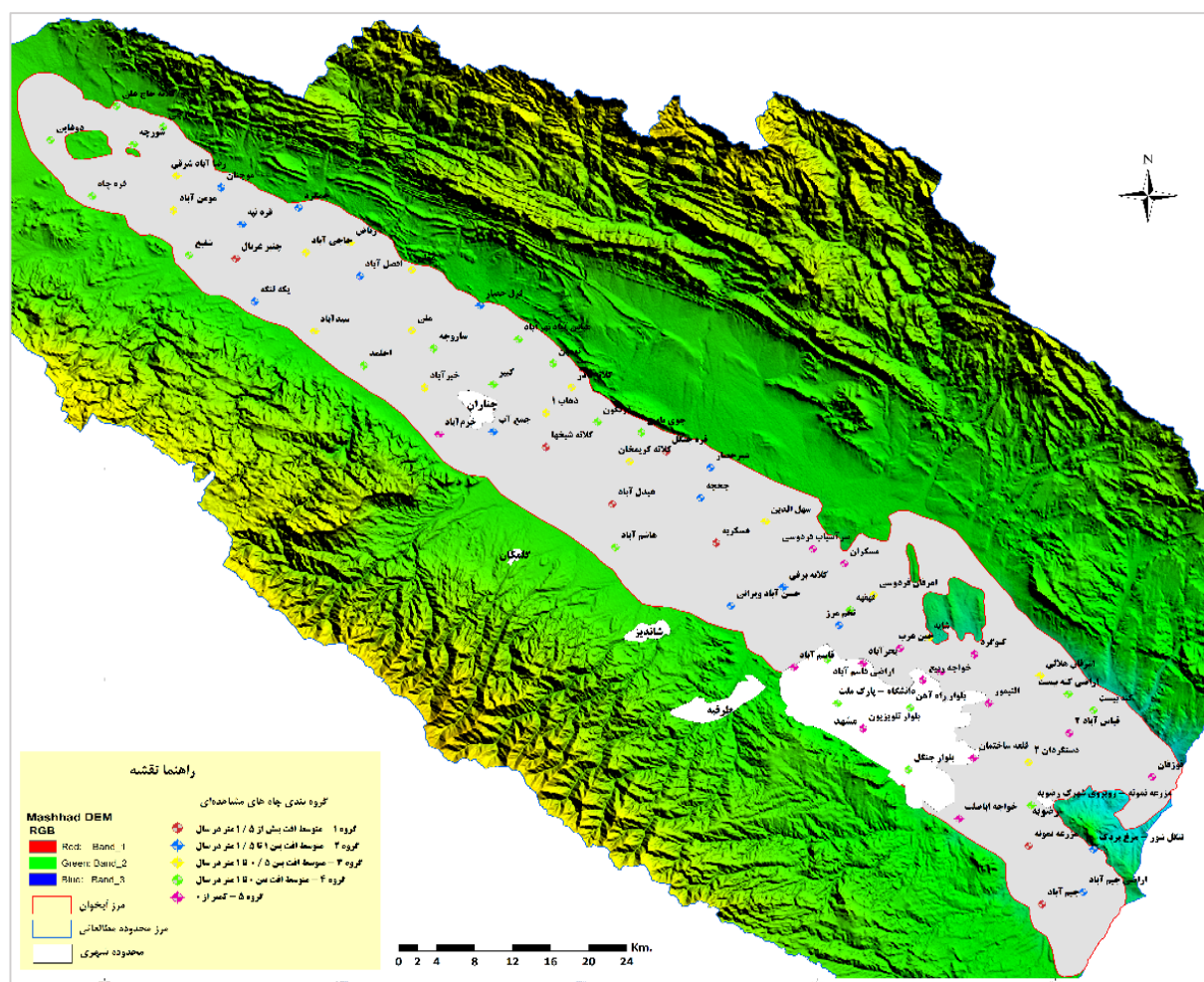
<sup>۱</sup> Master Recession Curve



جوی بوده و برای برآورد مقدار تغذیه مناسب هستند. برای مقایسه نوسانات سطح آب زیرزمینی، چاه‌های مشاهده‌ای به لحاظ افت نیز به پنج گروه تقسیم و نتیجه در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه شده است. هیدروگراف تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب هر گروه نیز در شکل ۴ ارائه شده است.

با توجه به شرایط پیش‌گفته، انتخاب چاه مشاهده‌ای مناسب که نشانگر آبخوان آزاد باشند و بتوان بر اساس آن تغذیه عمودی را نیز برآورد نمود، بسیار مهم و البته دشوار بوده و نیازمند انجام مطالعات دقیق هیدروژئولوژی است. با توجه به مقادیر میانگین افت سالانه و با در نظر گرفتن عمق چاه، نوع آبخوان و رفتار آبخوان، چاه‌هایی که افت آنها کمتر از ۰/۵ متر در سال است و همچنین چاه‌های بدون افت و یا چاه‌هایی که بالاآمدگی نشان می‌دهند، برای برآورد تغذیه در آبخوان مناسب نیستند. از بین ۷۴ حلقه چاه، ۳۱ حلقه انتخاب و تغذیه آب زیرزمینی برآورد شده است. مشخصات و موقعیت جغرافیایی این چاه‌ها به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۵ ارائه شده است.

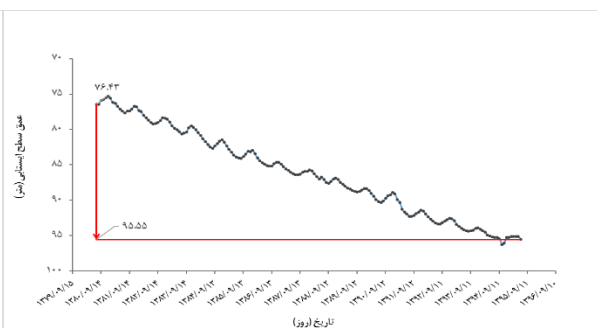
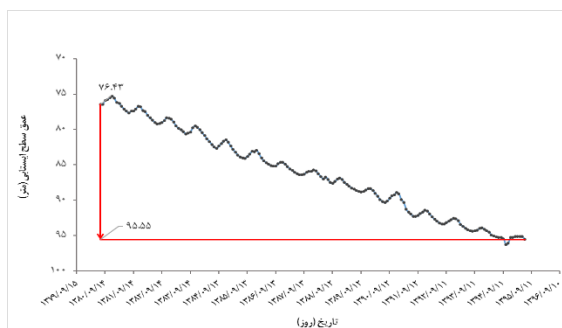
و با شدت زیاد افت می‌نماید. این چاه‌های به شدت متأثر از بارش‌های جوی بوده و دارای نوسانات سینوسی و متناوب شدید می‌باشند. در گروه دوم، چاه‌هایی که در لایه آبدار آزاد اصلی (آبخوان اصلی مشهد - چناران) حفر شده‌اند، قرار دارند. سطح آب در این چاه‌ها به طور مستمر، ولی با شدت کمتری افت می‌نماید و تغییرات سطح آب آنها نیز دارای روند سینوسی با دامنه کوتاه است. گروه سوم، شامل چاه‌هایی هستند که رفتار ناسازگاری از خود نشان می‌دهند. این چاه‌ها بیشتر در محدوده‌های شهری، در مجاورت مسیل‌ها و رودخانه‌ها و یا در مکان‌هایی که آبخوان آبرفتی بر روی سنگ کف آهکی قرار گرفته، دیده می‌شوند. سطح آب در این چاه‌ها از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند و گاهی کاهشی و گاهی نیز افزایشی است. تغییرات سطح آب در این چاه‌ها به شدت متأثر از حجم آب‌های برگشتی از طریق چاه‌های جذبی در مناطق شهری، سنگ کف آهکی و ... است. در بین این چاه‌ها، چاه‌هایی که دارای تغییرات سینوسی ملایم هستند، متأثر از بارش‌های



شکل ۳- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان مشهد - چناران و گروه‌بندی بر اساس میانگین افت سالانه در یک دوره ۱۵ سال

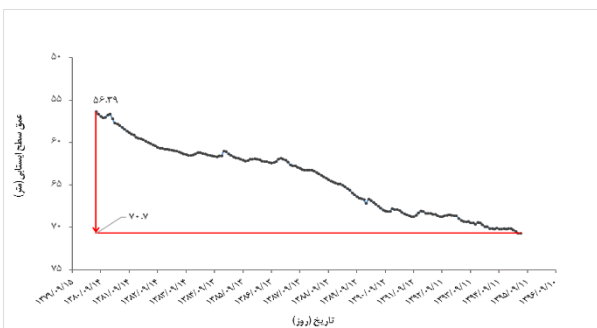
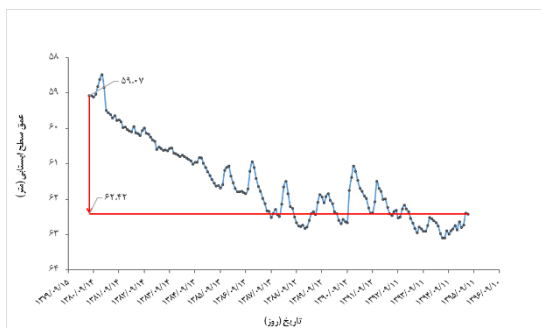
جدول ۱ - گروه‌بندی چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس میانگین افت سالانه در یک دوره ۱۵ ساله

| گروه افت   | میانگین افت سالانه (متر) | توضیحات                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| گروه اول   | بیش از ۱/۵ متر           | قره جنگل، چنبر غربال، مزرعه نمونه، عبدال‌آباد، جیم‌آباد، کلاته شیخ‌ها، عسکریه                                                                                                                                                                 |
| گروه دوم   | بین ۱ تا ۱/۵ متر         | یکه لنگه، اراضی جیم‌آباد، تنگل شور - مرغ پردک، قره تپه، قزل حصار، کلاته برفی، جمع‌آب، حسن‌آباد ویرانی، چچه، افصل‌آباد، موچنان، چمگرد، تخم مرز، شیرحصار                                                                                        |
| گروه سوم   | بین ۰/۵ تا ۱ متر         | سیدآباد، کلاته کریمخان، رضا‌آباد شرقی، امرقان فردوسی، امرقان هلالی، دستگردان ۲، حاجی‌آباد، مومن‌آباد، مغان، ریاض، کلاته نادر، خیرآباد، ذهاب ۱، شایه، ملی، سهل‌الدین                                                                           |
| گروه چهارم | بین ۰ تا ۰/۵ متر         | اراضی کنه بیست، شفیع، شهرک رضویه، نومهن، قهقهه، ساروجه، اراضی قاسم‌آباد، کبیر، اخلمد، بلوار جنگل، عباس‌آباد نهرآباد، کنه بیست، کلاته حاج علی، درنگون، جوی پایین، دوغایی، قره چاه، شورچه، بلوار راه آهن، دانشگاه - پارک ملت، آقارچی، هاشم‌آباد |
| گروه پنجم  | کمتر از ۰ (بالا آمدگی)   | کنوگرد، خین عرب، خواجه ربیع، بلوار تلویزیون، قاسم‌آباد، خرم‌آباد، خواجه اباضلت، التیمور، بحرآباد، مسکران، انبار سیس‌آباد، قیاس‌آباد ۲، قوزقان، قلعه ساختمان، سرآسیاب فردوسی                                                                   |



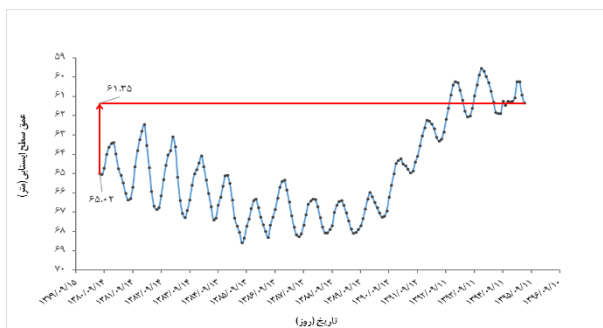
ب) هیدروگراف چاه مشاهده‌ای کلاته برفی (نمونه گروه دوم)

الف) هیدروگراف چاه مشاهده‌ای جیم‌آباد (نمونه گروه اول)



د) هیدروگراف چاه مشاهده‌ای کنه بیست (نمونه گروه چهارم)

ج) هیدروگراف چاه مشاهده‌ای سیدآباد (نمونه گروه سوم)



ه) هیدروگراف چاه مشاهده‌ای بحرآباد (نمونه گروه پنجم)

شکل ۴ - هیدروگراف تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب

## آبدهی ویژه آبخوان

حجم تغذیه و بارندگی ماهانه نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، بارندگی‌های فصلی از اواخر مهرماه آغاز و در فروردین‌ماه به مقدار بیشینه خود می‌رسد. با پایان فصل تر، به تدریج از میزان بارندگی‌های فصلی کاسته شده و در مرداد و شهریور به کم‌ترین مقدار می‌رسد. تغذیه نیز از الگوی بارندگی پیروی نموده و تابعی از میزان و شدت بارندگی و مقدار بهره‌برداری از آبخوان است. با افزایش میزان بارندگی‌های فصلی نرخ تغذیه آبخوان افزایش می‌یابد. این روند افزایشی تا پایان اسفندماه ادامه یافته و پس‌از آن با آغاز فصل بهار، میزان تغذیه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

مهم‌ترین دلایل کاهش تغذیه در فصل بهار، باوجود وقوع بارندگی‌های خوب، شروع بهره‌برداری از آبخوان، رگباری بودن بارش‌ها و وجود یک زمان تأخیر بین وقوع بارندگی و واکنش آب زیرزمینی به آن است. در فصل بهار که بیشتر بارش‌ها به‌صورت رگباری هستند، درصد بیشتری از آن به رواناب تبدیل شده و آب کمتری به درون زمین نفوذ می‌کند. علاوه بر این، همواره یک زمان تأخیر بین شروع بارندگی و تأثیر آن بر آب زیرزمینی وجود دارد. این فاصله زمانی با توجه به همبستگی متقابل<sup>۱</sup> بین بارندگی و سطح آب زیرزمینی، به‌طور میانگین حدود ۳ تا ۵ ماه است. بیش‌ترین مقدار تغذیه در طول دوره آماری در ماه‌های دی، بهمن و اسفند و کم‌ترین آن نیز در ماه‌های مرداد و شهریور صورت می‌گیرد.

ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، مهم‌ترین اطلاعات هیدروژئولوژیکی هر آبخوان محسوب می‌شوند (نخعی و حسن‌نیا، ۱۳۹۸). روش‌های مختلفی ازجمله آزمایش پمپاژ، مدل‌سازی عددی، روش‌های سونداژ الکتریکی و ... برای تخمین آبدهی ویژه استفاده می‌شوند (خدری و کلانتری، ۱۳۹۸). در آبخوان مشهد-چناران، به‌دلیل محدودیت‌های مالی، برآورد آبدهی ویژه با استفاده از روش‌های مرسوم (آزمایش پمپاژ)، امکان‌پذیر نبود.

در این پژوهش آبدهی ویژه از مطالعات اکتشافی پیشین استخراج و استفاده شده است. بر اساس مطالعات بیلان منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی و بررسی نتایج مدل ریاضی دشت مشهد-چناران، میانگین آبدهی ویژه آبخوان ۶ درصد برآورد شده است (گزارش ممنوعیت محدوده مطالعاتی مشهد-چناران، ۱۳۹۲). در این پژوهش، از این مقدار استفاده گردید.

## برآورد مقدار تغذیه

برای برآورد تغذیه در آبخوان مشهد - چناران، از داده‌های سطح آب زیرزمینی و ضریب ذخیره آبخوان در محل هر چاه استفاده شده است. پس از رسم هیدروگراف ماهانه چاه‌های مشاهده‌ای معرف، منحنی فرود اصلی بر اساس داده‌های بخش فرود هیدروگراف در طول دوره آماری ۱۵ ساله استخراج گردید. سپس از حاصل ضرب مقادیر  $\Delta H$  ماهانه در آبدهی ویژه، ارتفاع تغذیه ماهانه برحسب متر در محل هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای برآورد شد. مقدار تغذیه آبخوان، از میانگین وزنی ارتفاع تغذیه ماهانه و مساحت تیسن هر چاه با استفاده از رابطه ۲ برآورد شد.

$$R_{Aq} = \sum_{i=1}^m \frac{R_i \times a_i}{A} \quad (2)$$

در این رابطه،  $R_{Aq}$  میانگین وزنی تغذیه آبخوان در ماه موردنظر،  $R_i$  مقدار تغذیه چاه مشاهده‌ای،  $a_i$  مساحت تیسن چاه مشاهده‌ای و  $A$  مساحت آبخوان (مجموع مساحت کل چاه‌های مشاهده‌ای) است.

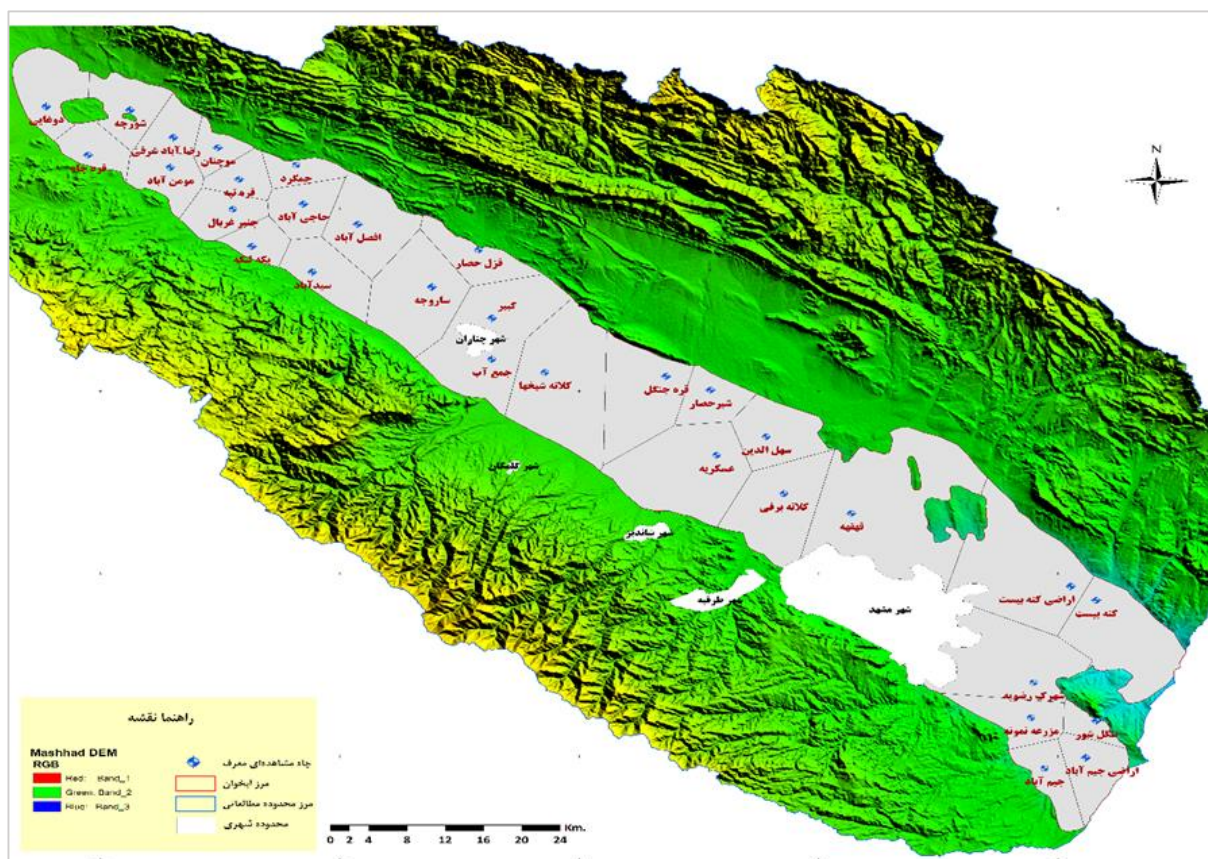
تغییرات ماهانه و تجمعی بارندگی و تغذیه در دوره آماری ۱۵ ساله (سال آبی ۹۵-۱۳۸۰) در شکل‌های ۶ تا ۹ و میانگین

<sup>۱</sup> Cross Correlation

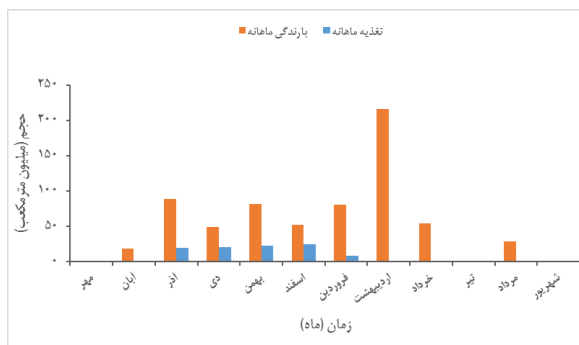


جدول ۲- مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای معرف در آبخوان مشهد - چناران

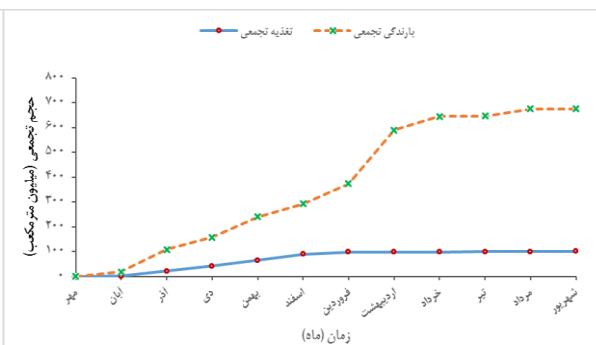
| ردیف | نام چاه       | مختصات جغرافیایی |           | ردیف  | نام چاه           | مختصات جغرافیایی |           | تیسن (کیلومتر مربع) |
|------|---------------|------------------|-----------|-------|-------------------|------------------|-----------|---------------------|
|      |               | Y                | X         |       |                   | Y                | X         |                     |
| ۱    | دوغایی        | ۳۶/۹۳۵۵۰۲        | ۵۸/۶۲۰۵۳۶ | ۱۷    | کبیر              | ۳۶/۶۶۶۳۱۷        | ۵۹/۱۳۵۸۵۵ | ۷۹/۸۱               |
| ۲    | قره چاه       | ۳۶/۸۷۴۹۳۴        | ۵۸/۶۶۸۴۵۲ | ۱۸    | کلاته شیخا        | ۳۶/۵۹۸۲۲۲        | ۵۹/۱۹۵۸۹۱ | ۱۶۲/۲۱              |
| ۳    | شورچه         | ۳۶/۹۲۹۵۴۳        | ۵۸/۷۱۸۶۸۲ | ۱۹    | قره جنگل          | ۳۶/۵۹۰۸۲         | ۵۹/۳۳۷۱۶۹ | ۱۰۵/۵۶              |
| ۴    | مومن آباد     | ۳۶/۸۵۸۲۴۵        | ۵۸/۷۶۴۲۸۴ | ۲۰    | شیر حصار          | ۳۶/۵۷۲۷۷۶        | ۵۹/۳۸۸۵۱۷ | ۴۱/۶۲               |
| ۵    | رضا آباد شرقی | ۳۶/۸۹۵۰۹۷        | ۵۸/۷۶۸۸۰۲ | ۲۱    | عسکریه            | ۳۶/۴۹۲۱۸۶        | ۵۹/۳۹۲۹۱۴ | ۱۴۴/۶۴              |
| ۶    | موچنان        | ۳۶/۸۸۱۸۱۱        | ۵۸/۸۲۰۷۴۷ | ۲۲    | سهل الدین         | ۳۶/۵۱۳۸۶۳        | ۵۹/۴۵۱۴۱۸ | ۶۷/۶۴               |
| ۷    | چنبر غربال    | ۳۶/۸۰۵۷۳۲        | ۵۸/۸۳۶۳۵۱ | ۲۳    | کلاته برفی        | ۳۶/۴۴۳۳۱۸        | ۵۹/۴۶۹۸۵۵ | ۱۱۱/۸۱              |
| ۸    | قره تپه       | ۳۶/۸۴۲۲۶۳        | ۵۸/۸۴۴۵۰۲ | ۲۴    | قپقه              | ۳۶/۴۱۷۳۴۸        | ۵۹/۵۴۷۶۳۷ | ۳۵۲/۰۱              |
| ۹    | یکه لنگه      | ۳۶/۷۵۹۴۸         | ۵۸/۸۵۷۴۹۵ | ۲۵    | مزرعه نمونه       | ۳۶/۱۶۰۹۱۷        | ۵۹/۷۴۷۹۴۹ | ۵۰/۶۵               |
| ۱۰   | چمگرد         | ۳۶/۸۵۸۸۸۴        | ۵۸/۹۱۱۷۵۳ | ۲۶    | شهرک رضویه        | ۳۶/۲۰۴۲          | ۵۹/۷۵۲۴۵۴ | ۱۸۷/۶۳              |
| ۱۱   | حاجی آباد     | ۳۶/۸۱۰۸۰۶        | ۵۸/۹۱۹۱۴۲ | ۲۷    | جیم آباد          | ۳۶/۰۹۸۲۰۶        | ۵۹/۷۶۱۳۵۴ | ۴۳/۹۶               |
| ۱۲   | سیدآباد       | ۳۶/۷۲۶۷۲۴        | ۵۸/۹۲۷۳۱۵ | ۲۸    | اراضی کنه بیست    | ۳۶/۳۲۱۸۱۹        | ۵۹/۷۹۹۸۲  | ۱۷۲/۴۱              |
| ۱۳   | افصل آباد     | ۳۶/۷۸۴۶۷۱        | ۵۸/۹۸۲۰۸۲ | ۲۹    | اراضی جیم آباد    | ۳۶/۱۱۰۱۴۸        | ۵۹/۸۰۹۷۳۱ | ۵۱/۴۶               |
| ۱۴   | ساروجه        | ۳۶/۷۰۵۹۰۵        | ۵۹/۰۶۶۸۲۱ | ۳۰    | کنه بیست          | ۳۶/۳۰۳۸۱۶        | ۵۹/۸۲۸۷۴۸ | ۱۲۲/۵۲              |
| ۱۵   | قزل حصار      | ۳۶/۷۵۰۸          | ۵۹/۱۲۲۵۹۴ | ۳۱    | تنگل شور-مرغ پردک | ۳۶/۱۵۵۳۸۲        | ۵۹/۸۲۳۵۰۳ | ۱۸/۵۸               |
| ۱۶   | جمع آب        | ۳۶/۶۱۵۷۳۵        | ۵۹/۱۳۴۳۴۷ | ۷۴/۳۹ |                   |                  |           |                     |



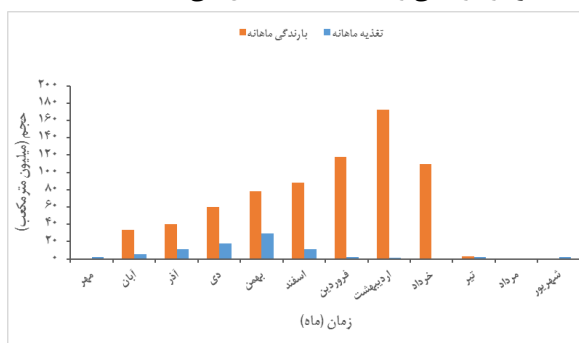
شکل ۵- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای معرف و شبکه تیسن آنها



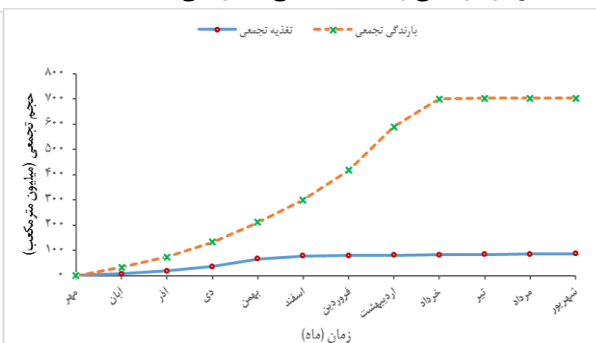
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰)



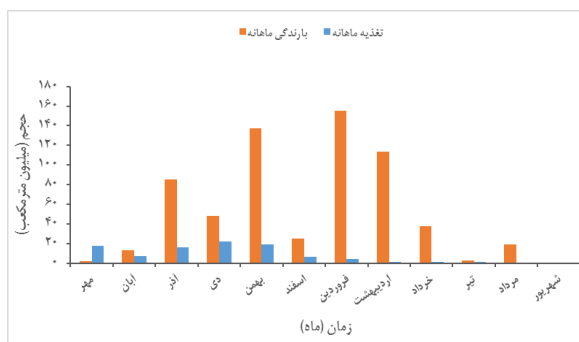
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰)



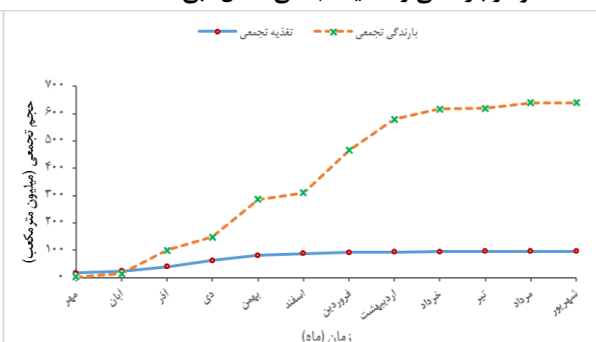
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۲ - ۱۳۸۱)



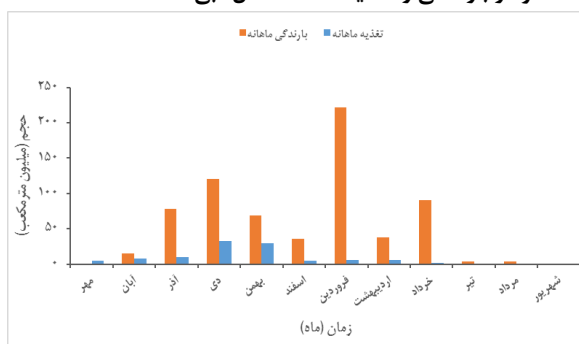
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۲ - ۱۳۸۱)



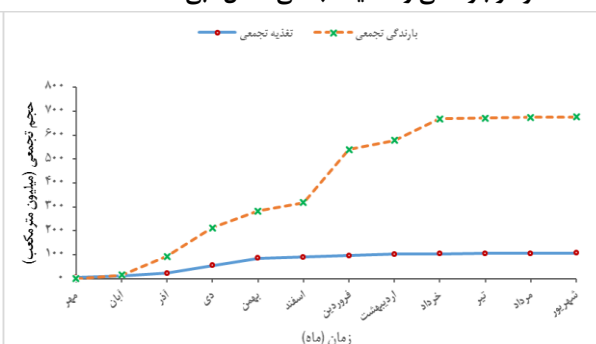
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۳ - ۱۳۸۲)



نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۳ - ۱۳۸۲)

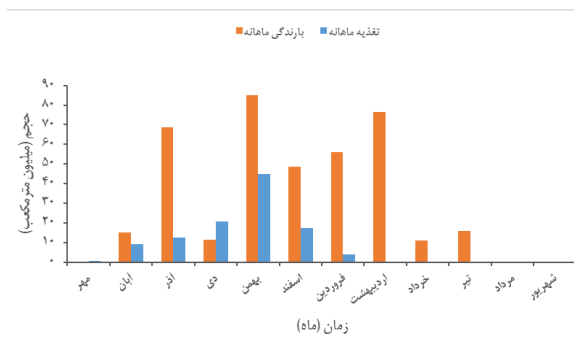


نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۴ - ۱۳۸۳)

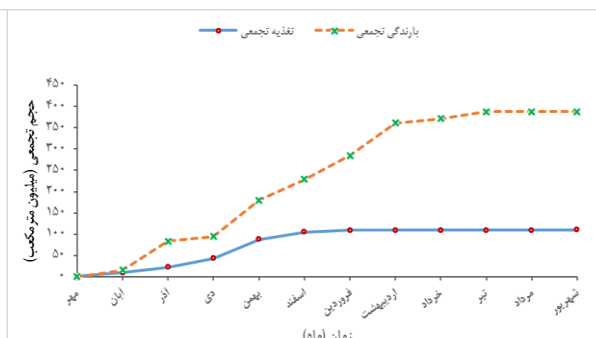


نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۴ - ۱۳۸۳)

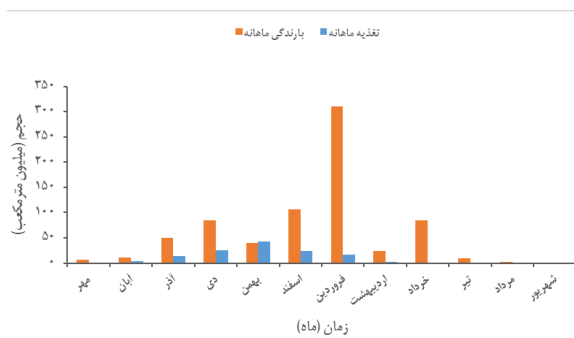
شکل ۶- تغییرات ماهانه و تجمعی بارندگی و تغذیه در آبخوان مشهد -چنانرا از سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ تا سال آبی ۸۴-۱۳۸۳



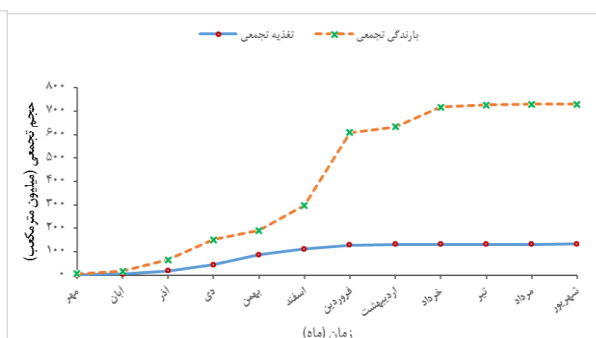
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۵ - ۱۳۸۴)



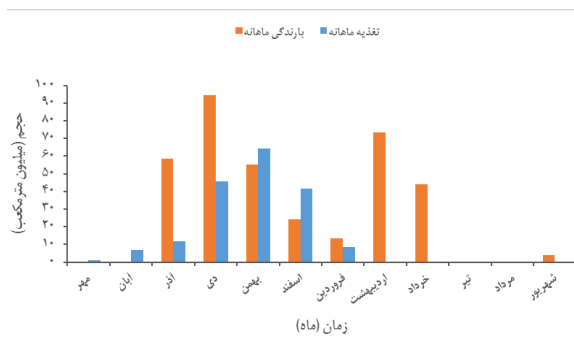
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۵ - ۱۳۸۴)



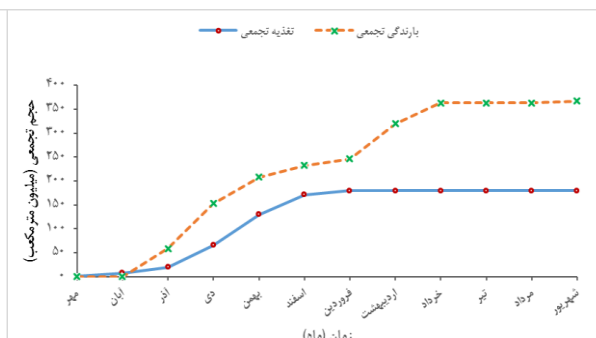
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۶ - ۱۳۸۵)



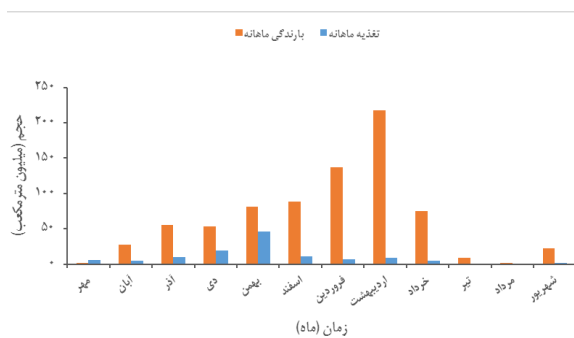
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۶ - ۱۳۸۵)



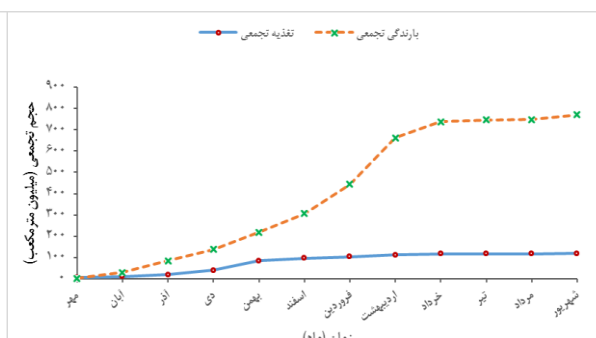
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۷ - ۱۳۸۶)



نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۷ - ۱۳۸۶)



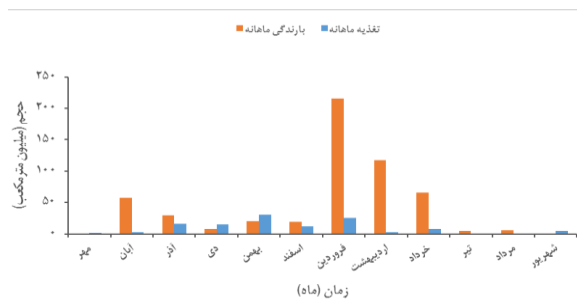
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۸۸ - ۱۳۸۷)



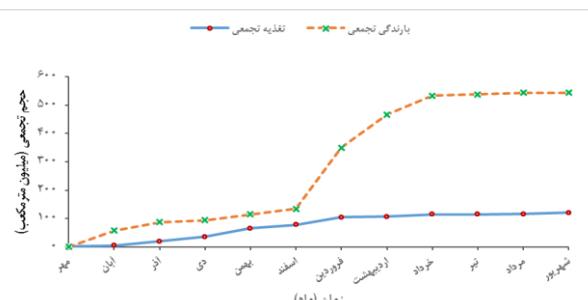
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۸۸ - ۱۳۸۷)

شکل ۷- تغییرات ماهانه و تجمعی بارندگی و تغذیه در آبخوان مشهد-چنان از سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ تا سال آبی ۸۸-۱۳۸۷

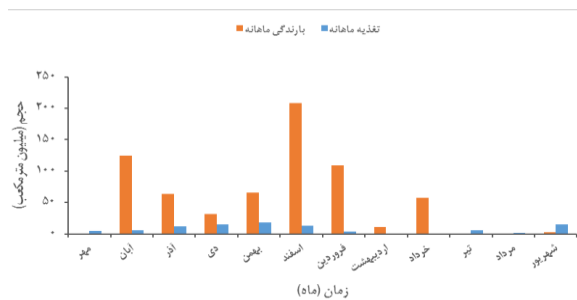




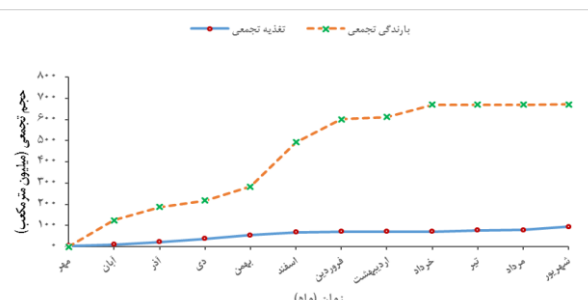
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۹۳ - ۱۳۹۲)



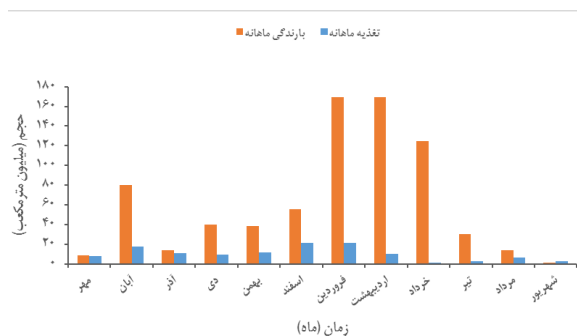
نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۹۳ - ۱۳۹۲)



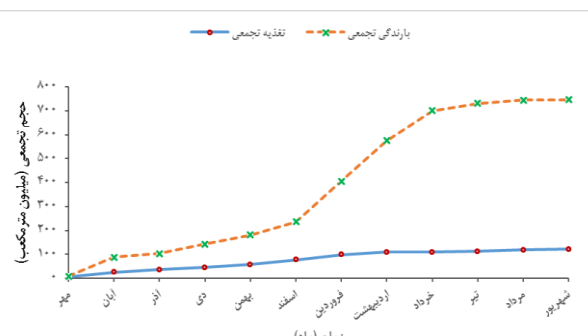
نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۹۴ - ۱۳۹۳)



نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۹۴ - ۱۳۹۳)

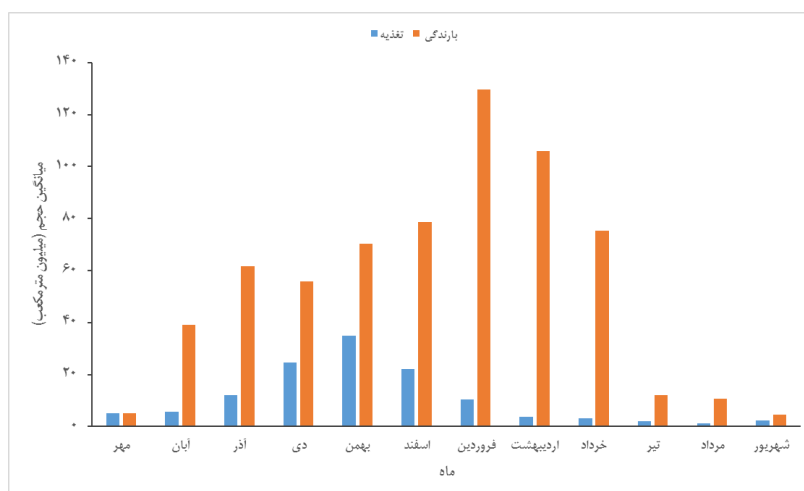


نمودار بارندگی و تغذیه ماهانه (سال آبی ۹۵ - ۱۳۹۴)



نمودار بارندگی و تغذیه تجمعی (سال آبی ۹۵ - ۱۳۹۴)

شکل ۹- تغییرات ماهانه و تجمعی بارندگی و تغذیه در آبخوان مشهد-چناران از سال آبی ۹۳ - ۱۳۹۲ تا سال آبی ۹۵ - ۱۳۹۴



شکل ۱۰- میانگین حجم تغذیه و بارندگی ماهانه در آبخوان مشهد-چناران در دوره آماری ۱۵ ساله (سال آبی ۹۵ - ۱۳۸۰)

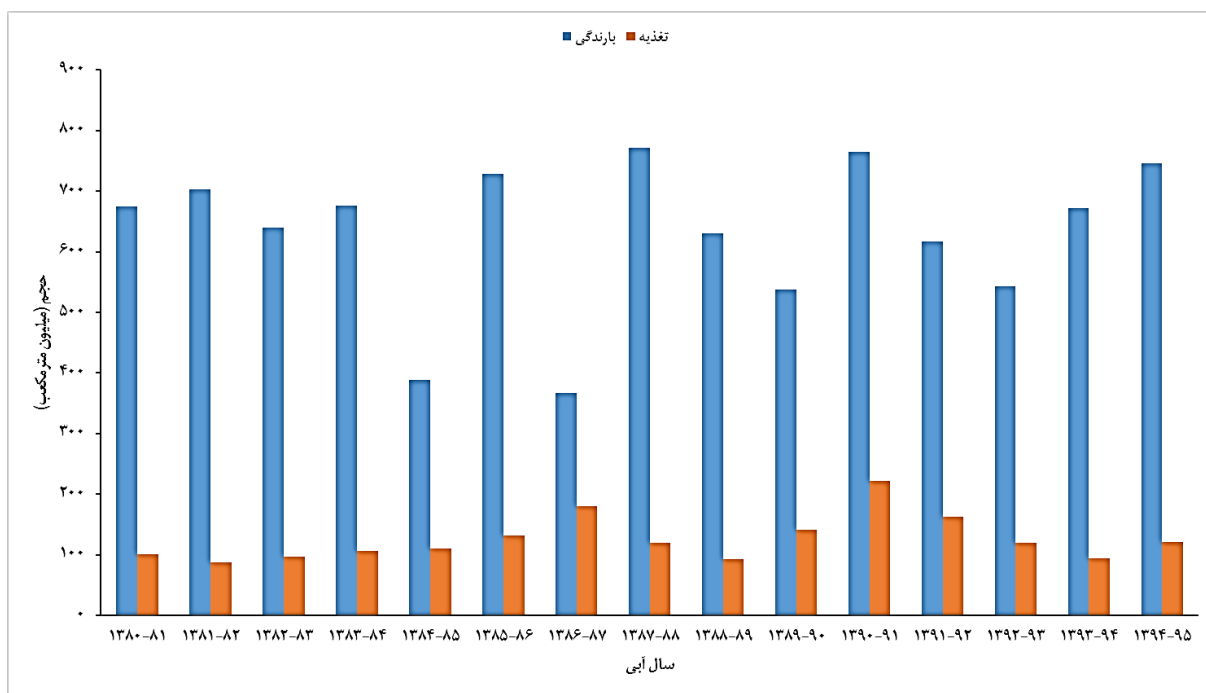


مقادیر میانگین بارندگی و میانگین تغذیه در آبخوان مشهد- چناران در طول دوره آماری ۱۵ ساله در جدول ۳ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. علاوه بر این، به منظور بررسی تغییرات مکانی تغذیه در آبخوان مشهد - چناران نقشه میانگین تغذیه در طول دوره آماری ۱۵ ساله نیز در محل چاه‌های مشاهده‌ای رسم و در شکل ۱۲ ارائه شده است. برای انجام این کار، نخست مقدار میانگین مجموع تغذیه سالانه در محل هر چاه در طول دوره آماری ۱۵ ساله برآورد و سپس به روش درونیابی اسپیلاین<sup>۱</sup>، پهنه‌بندی شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تغییرات مکانی تغذیه، تابعی از خصوصیات هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی ناحیه غیراشباع، عمق برخورد به سطح آب، مقدار و شدت بارندگی و سایر عوامل ناشناخته است. بیشترین میزان تغذیه در محل مخروط افکنه‌ها و ورودی‌های آبخوان که دارای مواد دانه‌درشت با نفوذپذیری بالا هستند، اتفاق افتاده است. عمق برخورد به سطح آب نیز از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات مکانی تغذیه است. در مناطقی که ناحیه غیراشباع از رسوبات یکنواختی تشکیل شده و عمق برخورد به سطح آب نیز کم است، تغذیه بیشتر است. عامل دیگری که نقش بسیار محدودکننده در فرآیند تغذیه آب زیرزمینی دارد، پوشش سطحی خاک و ستون زمین‌شناسی منطقه است. در صورت وجود لایه‌های رسی و مارنی در ناحیه غیراشباع، تغذیه توسط آن‌ها کنترل و به شدت کاهش می‌یابد.

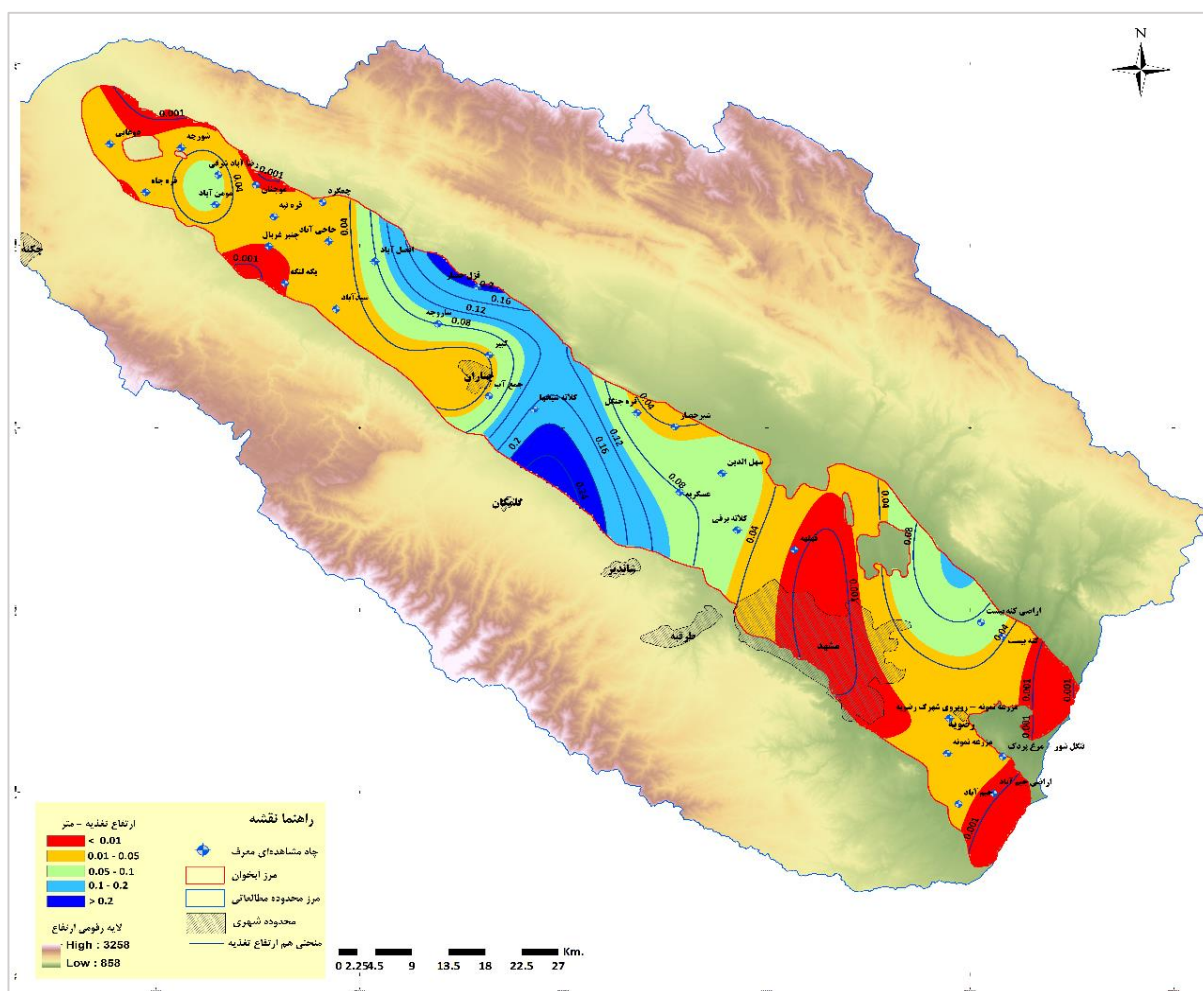
جدول ۳- مقادیر تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان مشهد-چناران و نسبت تغذیه به بارش

| سال آبی  | ارتفاع تغذیه<br>(متر) | حجم تغذیه<br>(میلیون مترمکعب) | ارتفاع بارندگی<br>(متر) | حجم بارندگی<br>(میلیون مترمکعب) | نسبت تغذیه به بارش<br>(درصد) |
|----------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| ۱۳۸۰- ۸۱ | ۰/۰۴۰                 | ۱۰۱/۱                         | ۰/۲۶۷                   | ۶۷۴/۹                           | ۱۵/۰                         |
| ۱۳۸۱- ۸۲ | ۰/۰۳۵                 | ۸۷/۲                          | ۰/۲۷۸                   | ۷۰۳/۴                           | ۱۲/۴                         |
| ۱۳۸۲- ۸۳ | ۰/۰۳۸                 | ۹۶/۸                          | ۰/۲۵۳                   | ۶۳۹/۲                           | ۱۵/۱                         |
| ۱۳۸۳- ۸۴ | ۰/۰۴۲                 | ۱۰۶/۴                         | ۰/۲۶۷                   | ۶۷۵/۶                           | ۱۵/۸                         |
| ۱۳۸۴- ۸۵ | ۰/۰۴۴                 | ۱۱۰/۰                         | ۰/۱۵۴                   | ۳۸۸/۰                           | ۲۸/۳                         |
| ۱۳۸۵- ۸۶ | ۰/۰۵۲                 | ۱۳۲/۴                         | ۰/۲۸۸                   | ۷۲۹/۰                           | ۱۸/۲                         |
| ۱۳۸۶- ۸۷ | ۰/۰۷۱                 | ۱۸۰/۰                         | ۰/۱۴۵                   | ۳۶۷/۳                           | ۴۹/۰                         |
| ۱۳۸۷- ۸۸ | ۰/۰۴۷                 | ۱۱۹/۳                         | ۰/۳۰۵                   | ۷۷۰/۹                           | ۱۵/۵                         |
| ۱۳۸۸- ۸۹ | ۰/۰۳۷                 | ۹۳/۵                          | ۰/۲۴۹                   | ۶۳۰/۴                           | ۱۴/۸                         |
| ۱۳۸۹- ۹۰ | ۰/۰۵۶                 | ۱۴۰/۸                         | ۰/۲۱۳                   | ۵۳۷/۱                           | ۲۶/۲                         |
| ۱۳۹۰- ۹۱ | ۰/۰۸۸                 | ۲۲۱/۷                         | ۰/۳۰۳                   | ۷۶۵/۱                           | ۲۹/۰                         |
| ۱۳۹۱- ۹۲ | ۰/۰۶۴                 | ۱۶۲/۸                         | ۰/۲۴۴                   | ۶۱۷/۵                           | ۲۶/۴                         |
| ۱۳۹۲- ۹۳ | ۰/۰۴۸                 | ۱۲۰/۳                         | ۰/۲۱۵                   | ۵۴۳/۷                           | ۲۲/۱                         |
| ۱۳۹۳- ۹۴ | ۰/۰۳۶                 | ۹۴/۸                          | ۰/۲۶۶                   | ۶۷۲/۱                           | ۱۴/۱                         |
| ۱۳۹۴- ۹۵ | ۰/۰۴۸                 | ۱۲۱/۸                         | ۰/۲۹۵                   | ۷۴۶/۲                           | ۱۶/۳                         |

<sup>۱</sup> Spline



شکل ۱۱- حجم تغذیه و بارندگی سالانه در آبخوان مشهد - چناران در دوره آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴)



شکل ۱۲ - نقشه تغییرات مکانی میانگین تغذیه در طول دوره آماری ۱۵ ساله در آبخوان مشهد - چناران

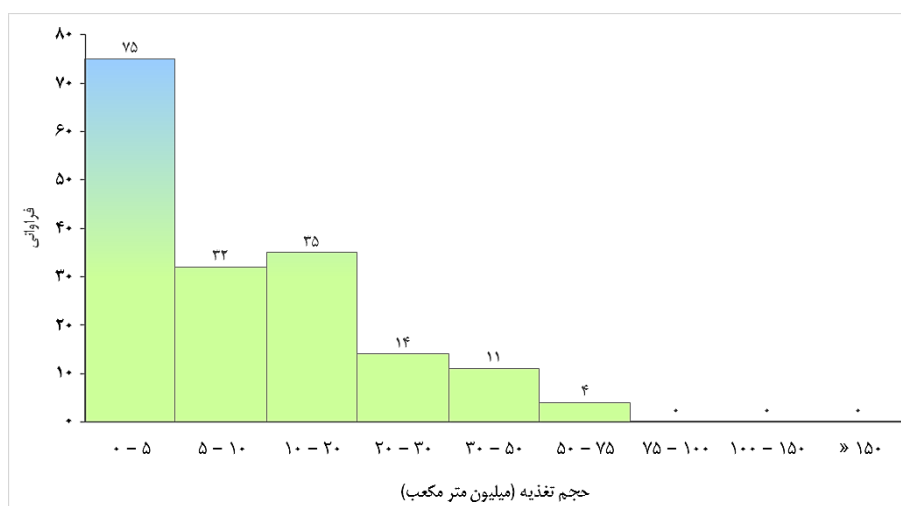
الگوریتم نیمه خودکار MRC است. همان گونه که پیش از این نیز بیان شد، در محدوده مطالعاتی مشهد - چناران پژوهشی در زمینه برآورد میزان تغذیه صورت نگرفته است. باین وجود برای مقایسه و ارزیابی نتایج به دست آمده از الگوریتم نیمه خودکار MRC، از نتایج مطالعات بیلان منابع و مصارف آب در محدوده مطالعاتی مشهد-چناران به شرح جدول ۴، استفاده شده است (گزارش های سیمای آب استان ۹۶-۱۳۹۵، ۹۷-۱۳۹۶، ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸). مقایسه نتایج حاکی از تطابق بسیار خوب نتایج دو روش است.

فراوانی مقادیر حجم تغذیه ماهانه آبخوان در شکل ۱۰ ارائه شده است. بیشترین فراوانی مربوطه به تغذیه کمتر از ۵ میلیون مترمکعب در سال است. مقادیر بالای تغذیه دارای کمترین فراوانی می باشند.

برای کنترل برآوردها و مقایسه حجم تغذیه و حجم بارندگی از نسبت تغذیه به بارش<sup>۱۱</sup> (R/P) استفاده شده است. همان گونه که دیده می شود، در سال آبی ۸۷ - ۱۳۸۶ باوجود کاهش شدید مقدار بارندگی، مقدار تغذیه بسیار زیاد برآورد شده است. این ناهنجاری<sup>۱۲</sup>، به دلیل کنترل برداشت و نصب کنتورهای هوشمند برای اولین بار بر روی چاه های کشاورزی دشت مشهد و پیرو آن، کاهش افت سطح آب زیرزمینی است. با حذف این ناهنجاری، کمترین و بیشترین مقدار تغذیه به ترتیب در سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ و در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ به میزان ۸۷/۲ (معادل ۱۲/۴ درصد بارندگی) و ۲۲۱/۷ (۲۹ درصد بارندگی) است. به طور میانگین، آبخوان مشهد - چناران سالانه حدود ۱۲۶ میلیون مترمکعب تغذیه شده است. ارزیابی نسبت مقدار تغذیه به مقدار بارش در سطح آبخوان، حاکی از برآورد درست مقدار تغذیه به روش نوسانات سطح ایستابی با از استفاده از

جدول ۴- نتایج مطالعات بیلان منابع و مصارف آب در آبخوان مشهد-چناران (اقتباس از گزارش سیمای آب در آبخوان مشهد-چناران).

| سال آبی   | مساحت آبخوان<br>(کیلومتر مربع) | ارتفاع بارندگی<br>(متر) | حجم بارندگی<br>(میلیون مترمکعب) | حجم تغذیه<br>(میلیون مترمکعب) | نسبت تغذیه به بارش<br>(درصد) |
|-----------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| ۹۶ - ۱۳۹۵ | ۲۵۲۷/۶۳                        | ۰/۳۲۱                   | ۸۱۱/۳۷                          | ۲۰۲/۸۴                        | ۲۵                           |
| ۹۷ - ۱۳۹۶ | ۲۵۲۷/۶۳                        | ۰/۱۸۹                   | ۴۷۷/۷۲                          | ۱۲۸/۹۸                        | ۲۷/۰                         |
| ۹۸ - ۱۳۹۷ | ۲۵۲۷/۶۳                        | ۰/۳۷۴                   | ۹۴۵/۳                           | ۱۴۱/۸۰                        | ۱۵/۰                         |
| ۹۹ - ۱۳۹۸ | ۲۵۲۷/۶۳                        | ۰/۳۳۳                   | ۸۴۱/۷                           | ۱۷۶/۷۶                        | ۲۱/۰                         |



شکل ۱۳- فراوانی مقادیر حجم تغذیه ماهانه آبخوان در دوره آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ تا ۹۵-۱۳۹۴)

<sup>۱۲</sup> Anomaly

<sup>۱۱</sup> Recharge to Precipitation Ratio

## نتیجه گیری

مقدار تغذیه در سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ به میزان ۸۷/۲ میلیون مترمکعب (۱۲/۴ درصد بارندگی)، بیشترین مقدار در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ به میزان ۲۲۱/۷ میلیون مترمکعب (۲۹ درصد بارندگی) و میانگین تغذیه نیز ۱۲۲ میلیون مترمکعب (۱۹ درصد بارندگی) برآورد شده است. در سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ باوجود وقوع بارندگی‌های خوب، تغذیه دارای کمترین مقدار در طول آماری است. این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیر عوامل دیگر از جمله بهره‌برداری از آبخوان و وقوع بارش‌های رگباری در منطقه باشد که به‌طور مستقیم نوسانات سطح ایستابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، باوجود وقوع بارندگی مناسب، نوسانات مثبت سطح ایستابی که مبنای برآوردها در الگوریتم MRC است، توسط نوسانات منفی ناشی از بهره‌برداری آبخوان خنثی شده می‌شود و در عمل، تغذیه برآورد شده کمتر از مقدار واقعی آن است.

## سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی برای در اختیار قرار دادن داده‌ها، گزارش‌ها و اطلاعات موردنیاز، قدردانی می‌شود.

## منابع

- آقائباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ایران.
- خدری، ا.، کلانتری، ن.، ۱۳۹۸. تخمین آبدهی ویژه آبخوان با استفاده از روش‌های مختلف و برآورد حجم آب قابل استحصال (مطالعه موردی: آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران)، مجله هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۹۲-۱۰۷.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش بزنگان، چناران، رادکان، طبقه، کلات نادری و مشهد.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۶. گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت محدوده مشهد-چناران.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۱. گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت محدوده مشهد-چناران.

در روش نوسانات سطح ایستابی، مقدار تغذیه به‌صورت نقطه‌ای در محل یک چاه، از حاصل ضرب مقدار بالآمدگی سطح آب در آبدهی ویژه آبخوان برآورد می‌شود. در این روش، فرض می‌شود بالآمدگی سطح آب ناشی از تأثیر نفوذ عمقی آب باران است. اگرچه اساس این روش از دیدگاه مفهومی و هیدرولیکی ساده است، اما تخمین بالآمدگی سطح آب همواره مشکل بوده و برای انجام آن باید دقت لازم را به‌کار برد. از روش‌های مختلفی برای برآورد مقدار بالآمدگی سطح ایستابی استفاده می‌شود. در این پژوهش، از روش منحنی اصلی فرود که به‌اختصار MRC نامیده می‌شود، استفاده شده است. با توجه به اینکه همواره رابطه مشخصی بین نرخ افت سطح آب و مقدار تغذیه وجود دارد و MRC تابعی از خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان است، بنابراین، می‌توان از آن برای پیش‌بینی رفتار سطح ایستابی در دوره‌های بدون تغذیه استفاده کرد. به‌طور کلی، سادگی و ارزانی بکارگیری و نیاز اندک به داده‌ها از امتیازهای روش نوسانات سطح ایستابی است. در این روش، جزئیات تغذیه را می‌توان در مقیاس محلی به تصویر کشید. دقت این روش، به‌دقت داده‌های موردنیاز از جمله آبدهی ویژه آبخوان و داده‌های سطح آب بستگی دارد. مهم‌ترین عیب در این روش، همبستگی زیاد بین پارامترهای ورودی مدل و منحصربه‌فرد نبودن آن‌ها است. این چالش، در مواقعی که تغذیه ناشی از بارندگی و تغذیه ناشی از برگشت آب آبیاری با یکدیگر آمیخته‌شده و جدایش آنها نیز از نظر زمانی و مکانی غیرممکن باشد، بسیار پیچیده خواهد شد. تنها راه حل ممکن، تشخیص درست میزان بالآمدگی سطح آب زیرزمینی و ربط دادن آن به رخداد بارش است. به‌طور کلی، تغذیه آب زیرزمینی بیشتر توسط شرایط ناحیه غیراشباع (ضخامت، جنس و ...) و یک‌سری از عوامل دیگر از جمله کاربری اراضی و بهره‌برداری از آبخوان کنترل می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت، تغییرات عمق آب زیرزمینی به‌نوعی عامل اصلی ایجاد تأخیر زمانی بین وقوع بارندگی و شروع تغذیه در آبخوان محسوب می‌شود. در این پژوهش، مقدار تغذیه آبخوان مشهد - چناران برای یک دوره ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴) با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی و الگوریتم MRC برآورد شده است. در این یک دوره، کمترین

- to estimate groundwater recharge. *J. Hydrol*, 292: 198–209.
- Prada, S., Cruz, J.V., Figueira, C., 2016. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal. *J. Hydrol*, 536: 409–425.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, 10:18–39.
- Sophocleous, M.A., 1991, Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects: *Journal of Hydrology*, 124: 229–241.
- Tan, X.-C., Wu, J.-W., Cai, S.-Y., Yang, J.-Z., 2013. Characteristics of Groundwater Recharge on the North China Plain. *Ground Water*, 52: 798–807.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P., Dietrich, S., 2013. Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۴. گزارش مطالعات استفاده بهینه از ظرفیت انتقالی پروژه آبرسانی سد دوستی در حوزه شهری مشهد-مرحله اول.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۸. گزارش سیمای آب محدوده مشهد – چناران
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۸. گزارش وضعیت منابع آب دشت مشهد.
- نخعی، م.، حسن‌نیا، ا.، ۱۳۹۸. تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان دشت اوان در نقاط نامشخص با استفاده از منطق فازی، *مجله هیدروژئولوژی*، ۴(۱): ۱–۱۳.
- Assefa, K.A., Woodbury, A.D., 2013. Transient, spatially varied groundwater recharge modeling. *Water Resour. Res.*, 49: 4593–4606.
- Brassington, F.C., Younger, P.L., 2010. A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water Environ. J.*, 24: 261–273.
- Brkić, Ž., Briški, M., Marković, T., 2016. Use of hydrochemistry and isotopes for improving the knowledge of groundwater flow in a semiconfined aquifer system of the Eastern Slavonia (Croatia). *Catena*, 142:153–165.
- Crosbie, R.S., Binning, P., Kalma, J.D., 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41(1): 1–9.
- Fetter, C.W., 2001. *Applied hydrogeology*, 4th ed, U.S.A. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Jie, Z., van Heyden, J., Bendel, D., Barthel, R., 2011. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeol. J.*, 19: 1487–1502.
- Healy, R.W., 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press.
- Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol. J.*, 10:91–109.
- Heppner, C.S., and J.R. Nimmo., 2005. A computer program for predicting recharge with a master recession curve. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2005-5172.
- Moon, S.-K., Woo, N.C., Lee, K.S., 2004. Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation