بسمه تعالی
پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران
دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان
۱۷ لغایت ۱۹ آبانماه ۱۳۸۴
انجمن هیدرولیک ایران
Iranian Hydraulic Association
دانشگاه شهید باهنر کرمان

# پیامدهای کمّی "طرح جامع تأمین آب شرب مشهد" بر منابع آب زیرزمینی

**یوسف منفرد*، سید محمود حسینی****

*کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسی مشاور سکّو، تهران،
۰۲۱-۸۷۲۸۷۳۰ ،yousef_monfared@yahoo.com

**استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد،
۰۵۱۱-۸۸۲۹۵۳۳ ،shossein@Ferdowsi.um.ac.ir

## چکیده

*در این مطالعه پیامدهای کمّی "طرح جامع تأمین آب شهر مشهد" و "پروژه احداث شبکه فاضلاب" این شهر بر منابع آب زیرزمینی، بررسی شده است. بدین منظور به کمک مدل عددی PMWIN ابتدا با برپایی مدل‌های ماندگار و نامانداگار، هدایت هیدرولیکی و آبدهی مخصوص آبخوان واسنجی گردید. آنگاه پس از تحلیل حساسیت مشخصه‌های نامطمئن، مدل واسنجی‌شده در دوره‌ای ۳ ساله مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در نهایت، طرح جامع تأمین آب مشهد در قالب دو سناریو اصلاح شده و پیامدهای هریک تا سال ۱۳۹۵ پیش‌بینی گردید. سناریوی نخست، احیای آبخوان شهری را مدنظر ندارد، اما در سناریوی دوم، توقف بهره‌برداری برخی چاههای درون و پیرامون شهر برنامه‌ریزی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی گویای آن است که احداث شبکه فاضلاب در صورت اعمال سناریوی اول، افت شدید سطح آبهای زیرزمینی را موجب خواهد شد. همچنین نقش پیشگیرانه سناریوی دوم در قبال این واقعه به خوبی در نتایج مشهود است.*

**واژه‌های کلیدی: آبهای زیرزمینی، مدلسازی کمّی، واسنجی، طرح جامع تأمین آب مشهد، شبکه فاضلاب.**

### مقدمه

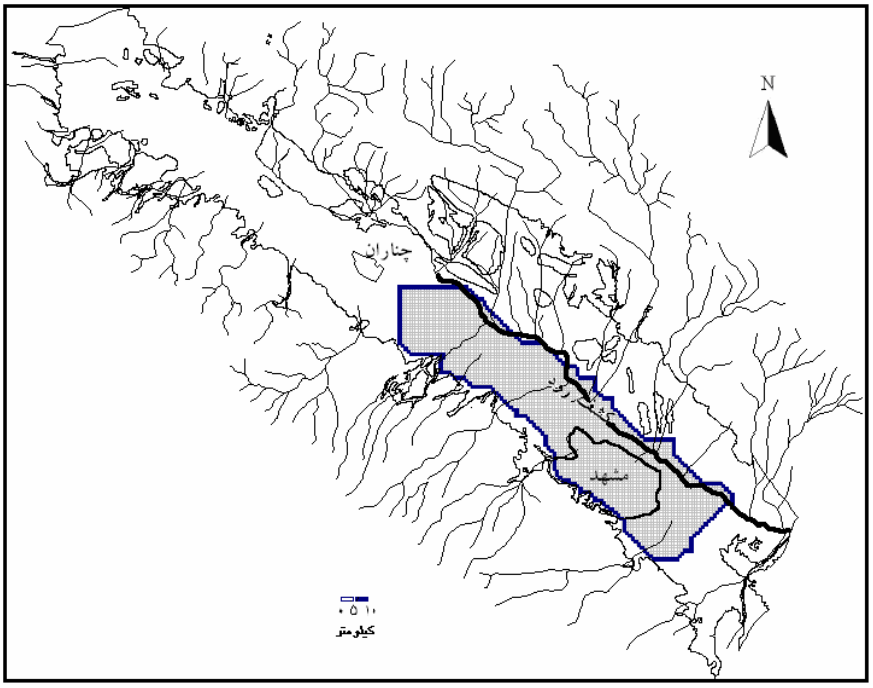
دشت مشهد از سال ۱۳۴۸ دچار بیلان منفی آبهای زیرزمینی شده، به‌گونه‌ای که در مدت ۱۶ ساله ۱۳۴۹ تا ۱۳۶۴ سطح آبهای زیرزمینی به طور متوسط افتی معادل ۱۳ متر را تجربه کرده

است (شرکت مهندسین مشاور سروآب، ۱۳۷۷). تاکنون متوسط افت سطح آبهای زیرزمینی در محدودهٔ شهر مشهد به سبب تغذیه فاضلاب از طریق چاههای جذبی، نسبت به کل دشت به میزان قابل توجهی کمتر بوده است. اما با پیشرفت تدریجی شبکه فاضلاب شهری و اتمام آن تا سال ۱۴۱۰ بدیهی است که این منبع مهم تغذیه رو به کاهش می‌نهد و نواحی مختلف شهری در صورت عدم اعمال برنامه‌هایی به منظور احیای آبخوان، افت مضاعفی را تجربه خواهند کرد.

در مطالعه حاضر، ابتدا طرح جامع تأمین آب شهر مشهد به سبب تأخیر در اجرای برخی پروژه‌ها مورد اصلاح قرار گرفته، سپس ضمن تعریف دو سناریوی ممکن، به کمک مدل عددی PMWIN پیامدهای کمی طرح مزبور همگام با احداث شبکه فاضلاب شهری تا سال ۱۳۹۵ پیش‌بینی شده است. سناریوی نخست مشابه طرح جامع فعلی بوده، احیای آبخوان شهری را مد نظر ندارد و بدین سبب پیامدهای احداث شبکه فاضلاب را به نحو مطلوبی نشان می‌دهد. سناریوی دوم با اعمال سیاست‌هایی به منظور احیای آبخوان همراه بوده، یکی از راهکارهای پیش‌گیری از پیامدهای نامطلوب احداث شبکه فاضلاب بر کمّیت آبهای زیرزمینی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

## محدوده مورد مطالعه

شهر مشهد با وسعت تقریبی ۲۳۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۲/۳ میلیون نفر جزء دشت مشهد یا حوضهٔ آبریز کشف‌رود می‌باشد (سیادتی،۱۳۸۳). مساحت کل این حوضه ۹۸۲۲ کیلومتر مربع بوده که حدود ۳۴۴۸ کیلومتر مربع آن را دشت و ۶۳۷۴ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. در این پژوهش محدوده مورد مطالعه با وسعتی معادل ۸۸۱ کیلومتر مربع انتخاب گردیده است(شکل ۱).




**شکل ۱- حوضهٔ آبریز کشف‌رود و محدوده مورد مطالعه**

**مشخصات عمومی مدل**

مطابق مطالعات ژئوفیزیک، آبخوان محدوده مدل، آزاد و تک‌لایه فرض گردیده است. ابعاد تمامی سلولها ۵۰۰×۵۰۰ متر بوده، دوره‌های تنش، فصلی و گامهای زمانی در مراحل مختلف، یک الی پنج روزه اختیار شده‌اند. در محدودهٔ مدل، چشمه یا قناتی با دبی قابل توجه موجود نبوده، همچنین به سبب عمق نسبتاً زیاد آبهای زیرزمینی نسبت به سطح زمین، مؤلفهٔ تبخیر به عنوان یک عامل تخلیه، ناچیز انگاشته شده است. بنابراین چاههای بهره‌برداری به عنوان تنها مؤلفه تخلیهٔ سطحی آبخوان منظور گردیده‌اند. چاههای مذکور به چهار دسته کشاورزی، صنعتی، شرب روستایی و شرب شهر مشهد قابل تقسیم‌اند.

مؤلفه‌های تغذیهٔ آبخوان نیز مشتمل بر فاضلاب شهر مشهد، فاضلابهای روستایی و صنعتی، نفوذ ناشی از بارندگی و نفوذ ناشی از آبیاری می‌باشند. ضرایب تبدیل آب به فاضلاب در مورد مصارف روستایی و صنعتی به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۸۵ و ضریب نفوذ ناشی از آبیاری معادل ۰/۲۷ در نظر گرفته شده‌اند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۷۸). ضریب تبدیل آب به فاضلاب در شهر مشهد مطابق گزارش "بازنگری طرح شبکهٔ فاضلاب شهر مشهد" (شرکت مهندسین مشاور سروآب، ۱۳۸۲) با در نظر داشتن تلفات و مصارف فضای سبز در تمام دوران بهره‌برداری، معادل ۰/۷۲ فرض گردیده و در هر سال با توجه به نقشهٔ تراکم جمعیتی و مصرف سرانهٔ آب در آن سال، شدت تغذیه ناشی از فاضلاب در مناطق مختلف شهری محاسبه شده است.

از مجموع شرایط اقلیمی، توصیه‌های تجربی و مطالعات پیشین دشت چنین برمی‌آید که ضریب تغذیهٔ ناشی از نزولات جوی در محدودهٔ دشت مشهد بین ۹ الی ۱۵ درصد متغیر است. از این رو در مطالعهٔ حاضر ابتدا ضریب مذکور در محدودهٔ دشت، به طور متوسط معادل ۱۲ درصد فرض گردیده، سپس در فرآیند تحلیل حساسیت، حساسیت مدل نسبت به تغییر این ضریب در حدود بالایی و پایینی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در محدودهٔ شهر مشهد آب باران پشت‌بام اغلب ساختمانها به چاه‌های جذبی هدایت می‌شود. مطابق مطالعات انجام شده، خیابانها، معابر و فضاهای باز عمومی ۳۵ درصد و اراضی مسکونی، تجاری، اداری و ... ۶۵ درصد از مساحت کل شهر مشهد را به خود اختصاص داده‌اند. طبق ضوابط ساخت و ساز شهری، ۶۰ درصد از اراضی دستهٔ دوم تحت پوشش ساختمانها فرض گردیده و ضریب هدایت آب باران پشت‌بامها به چاههای جذبی معادل ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است (جوشش،۱۳۷۴). بنابراین ضریب نفوذ ناشی از بارندگی در محدودهٔ شهری حدود ۲۷ درصد محاسبه می‌شود.

تمامی مرزهای مدل از نوع مرزهای با ارتفاع هیدرولیکی معلوم و متغیر با زمان می‌باشند. در دوران واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر ارتفاع هیدرولیکی در مرزها از درون‌یابی آمار مشاهداتی ۷۶ پیزومتر موجود در دشت مشهد به روش *کریجینگ* برآورد گردیده‌اند. در دوران پیش‌بینی نیز افت یا افزایش ارتفاع هیدرولیکی مرزها، متناسب با متوسط تغییرات فصلی شرایط مرزی طی دورهٔ ۶ سالهٔ مهرماه ۱۳۷۶ تا شهریور ۱۳۸۲ منظور شده‌اند. مناسب بودن این تغییرات متوسط فصلی، پیش از

استفاده در دوران پیش‌بینی، طی فرآیند صحت‌سنجی به تأیید رسیده است.

**فرآیند واسنجی**

واسنجی فرآیندی است که به منظور تنظیم و اصلاح مجموعه‌ای از پارامترهای نامطمئن یا نامشخص صورت می‌گیرد. این فرآیند با راه‌حل‌های مستقیم یا معکوس به دو شیوهٔ سعی و خطا و خودکار قابل انجام است. در این مطالعه واسنجی معکوس به روش خودکار و با استفاده از نرم‌افزار PEST صورت پذیرفته است. در مطالعه حاضر به مشخصه‌های شرایط مرزی و شدت تغذیه و تخلیه سطحی اعتماد شده، تنها به واسنجی نیمه مشروط دو مشخصهٔ نامعلوم و مبهم هدایت هیدرولیکی و آبدهی مخصوص آبخوان اقدام گردیده است و البته در مرحلهٔ تحلیل حساسیت، حساسیت قابل توجه مدل نسبت به این دو مشخصه در مقایسه با سایر مشخصات به تأیید رسیده است. رویهٔ واسنجی چنین بوده که ابتدا طی دورهٔ دو ماههٔ شهریور و مهر سال ۱۳۷۶، هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار واسنجی شده، سپس با برپایی مدل ناماندگار طی دورهٔ سه سالهٔ مهرماه ۱۳۷۶ تا شهریور ۱۳۷۹ این ضریب اصلاح گردیده و نیز آبدهی مخصوص آبخوان واسنجی شده است.

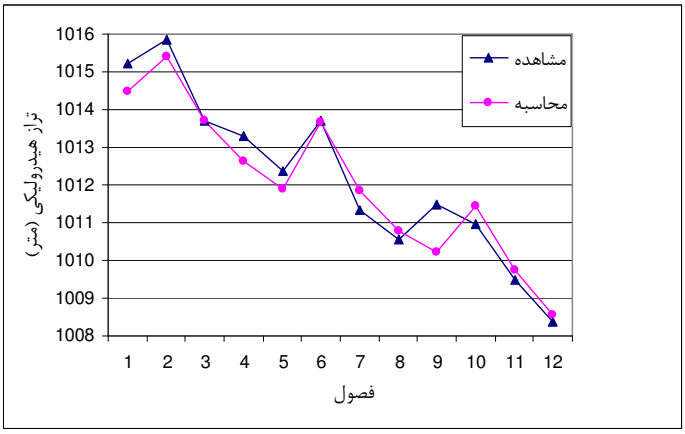
در تحلیل خطای باقیمانده‌ها، از *خطای استاندارد* که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود، به عنوان اصلی‌ترین معیار آماری استفاده شده است. این معیار از آن رو که واجد درجهٔ آزادی یا تفاضل تعداد مشاهدات و تعداد پارامترهای واسنجی شده می‌باشد، نسبت به سایر معیارها ارجحیت دارد. مطابق این معیار اولاً تعداد پارامترها نمی‌تواند مساوی یا بیشتر از تعداد مشاهدات باشد، ثانیاً با افزایش تعداد پارامترها یا شمار ناحیه‌های واسنجی شونده، مدل توسط معیار مزبور جریمه می‌شود (Anderson,1992).

$$SE = \left[ \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^{n} (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0.5} \qquad (۱)$$

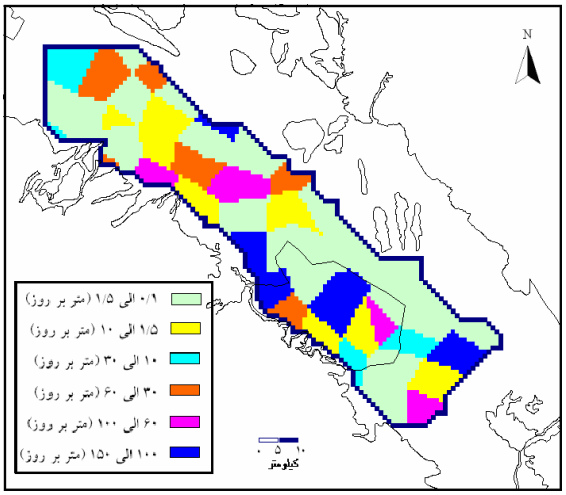
در رابطه (۱) $n$ تعداد مشاهده، $p$ تعداد پارامترهای واسنجی شونده، $h_m$ ارتفاع هیدرولیکی مشاهده شده و $h_s$ ارتفاع هیدرولیکی محاسبه شده می‌باشند. جدول ۱ معیارهای خطا را در واسنجی ماندگار و ناماندگار نشان می‌دهد. شکل ۲ نمودار مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در یکی از پیزومترها و شکل‌های ۳ و ۴ نمایانگر مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی مخصوص واسنجی‌شده می‌باشند.

**جدول ۱- معیارهای خطا در واسنجی ماندگار و ناماندگار**

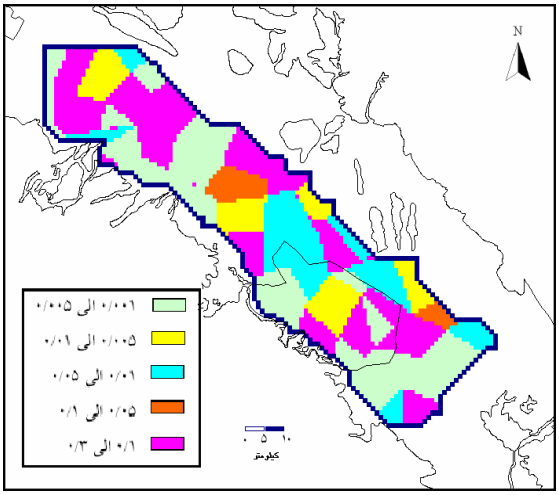
| معیارهای خطا | واسنجی ماندگار | واسنجی ناماندگار |
|---|---|---|
| خطای بیشینه (متر) | ۳/۲۳ | ۶/۴۵ |
| خطای میانگین (متر) | ۰/۳۳ | ۰/۰۷ |
| خطای استاندارد (متر) | ۱/۴۷ | ۱/۴۸ |




**شکل۲- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی طی دوران واسنجی در پیزومتر ۲۲**




**شکل ۳- مقادیر هدایت هیدرولیکی واسنجی‌شده**




**شکل ۴- مقادیر آبدهی مخصوص واسنجی‌شده**

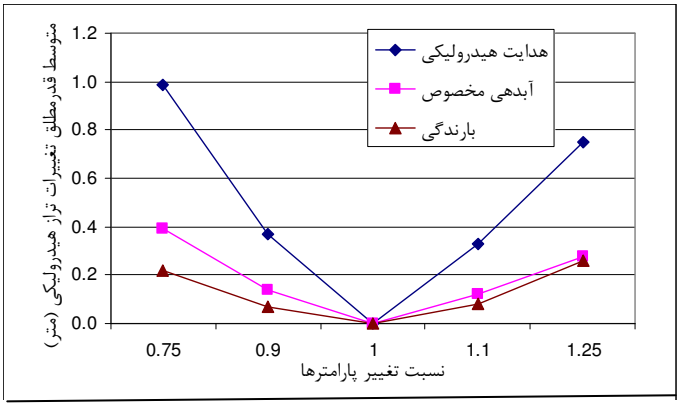
## تحلیل حساسیت

در این مرحله صرفاً به منظور مقایسهٔ کیفی حساسیت مدل نسبت به تغییرات مشخصه‌های نامطمئن (Spitz and Moreno, 1996)، حساسیت نسبی و مطلق پنج مشخصهٔ هدایت هیدرولیکی، آبدهی مخصوص، دبی چاههای بهره‌برداری، نفوذ ناشی از بارندگی و شرایط مرزی تحلیل گردیده است. به منظور تحلیل حساسیت نسبی، سه مشخصه هدایت هیدرولیکی، آبدهی مخصوص و نفوذ ناشی از بارندگی در محدوده‌های ۰/۷۵ ، ۰/۹ ، ۱/۱ و ۱/۲۵ تغییر داده شده، نتایج حاصل از تغییرات متناظر آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۵ متوسط قدرمطلق تغییرات نتایج را به ازای تغییرات هر یک از مشخصه‌ها نشان می‌دهد.

مراد از تحلیل حساسیت مطلق، تغییر هر یک از مشخصه‌ها تا کرانهای بالایی و پایینی بازهٔ عدم قطعیتشان و مقایسهٔ نتایج حاصل از این تغییرات است. حدود تغییرات پارامترهایی که زیرمجموعهٔ مشخصه‌های هدایت هیدرولیکی و آبدهی مخصوص آبخوان هستند، براساس شواهد میدانی و مقادیر واسنجی شدهٔ آنها تعیین شده است. خطا در مقادیر دبی چاههای بهره‌برداری، ضریب

تبدیل آب به فاضلاب و ضریب بازگشت آبیاری به طور تقریبی حدود ۰/۱ فرض گردیده است. حدود تغییرات ضریب نفوذ ناشی از بارندگی همچنانکه ذکر شد بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۵ می باشد. در مورد شرایط مرزی دوران پیش‌بینی همچنان که گفته شد، از متوسط تغییرات فصلی شرایط مرزی طی سالهای ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۲ استفاده خواهد شد. تخمین شرایط مرزی با این روش طبیعتاً با خطا همراه بوده، در این تحلیل متوسط خطاهای فصلی در امتداد کلیهٔ مرزها ۲۵ سانتی‌متر فرض گردیده است.

جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مطلق مشخصه‌های مذکور را نشان می‌دهد. طبق این نتایج، حساسیت بالای مدل نسبت به بازهٔ تغییرات هدایت هیدرولیکی کاملاً مشهود است. در صورتی که میانگین قدرمطلق تغییر نتایج به عنوان معیار اصلی در نظر باشد، حساسیت مدل نسبت به بازهٔ تغییرات هدایت هیدرولیکی در قیاس با آبدهی مخصوص، دبی چاههای بهره‌برداری، ضریب نفوذ ناشی از بارندگی و شرایط مرزی، به ترتیب حدود ۴، ۶ ، ۱۶ و ۲۷ برابر است.



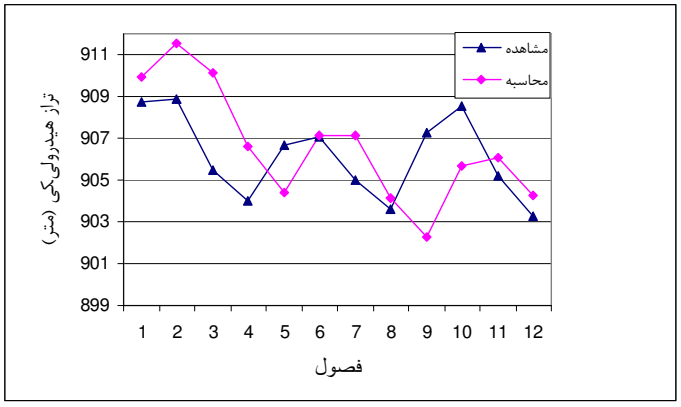

**شکل ۵- نمودار حساسیت نسبی**

**جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت مطلق**

| مشخصه‌ها | هدایت هیدرولیکی | آبدهی مخصوص | دبی چاههای بهره‌برداری | نفوذ ناشی از بارندگی | شرایط مرزی |
|---|---|---|---|---|---|
| **میانگین قدر مطلق تغییر در ارتفاع هیدرولیکی (متر)** | ۳/۹۹ | ۱/۰۳ | ۰/۶ | ۰/۲۶ | ۰/۱۴ |

## صحت‌سنجی

دورهٔ صحت‌سنجی مدل حاضر از مهرماه ۱۳۷۹ تا شهریور ۱۳۸۲ انتخاب شده است. شرایط مرزی مدل در این دوره، یکبار براساس درونیابی آمار پیزومترهای موجود، به دست آمده و بار دیگر با مبنا قرار دادن شرایط مرزی مهر ماه ۱۳۷۹ براساس متوسط تغییرات فصلی حاصل شده است. خطای استاندارد حاصل از صحت‌سنجی براساس دو شرایط مرزی مذکور به ترتیب معادل ۲/۲۱ و ۲/۲۹ متر می‌باشد. این مقادیر اولاً نشانهٔ اعتبار قابل قبول مدل واسنجی بوده، ثانیاً گویای آن است که خطای حاصل از اعمال شرایط مرزی مبتنی بر متوسط تغییرات فصلی در مقایسه با خطای ناشی از سایر پارامترها ناچیز می‌باشد. شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای ارتفاع هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی پیزومتر شماره ۴ را در طول دورهٔ شبیه‌سازی با شرایط مرزی نخست نشان می‌دهد.




**شکل ۶- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر ۴**

## پیش‌بینی

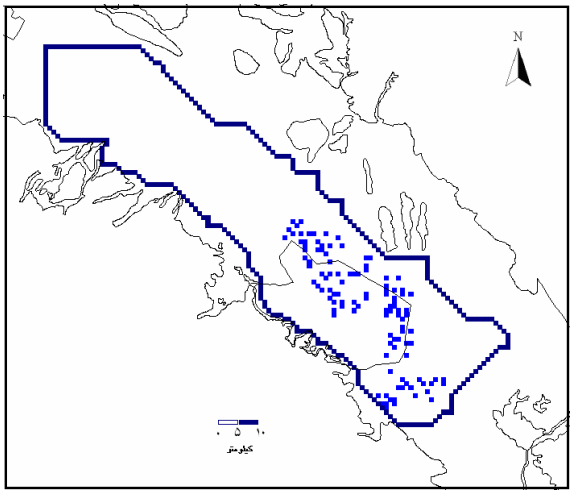
در نهایت، طرح جامع تأمین آب مشهد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۷۷) به سبب تأخیر در اجرای برخی از پروژه‌ها در قالب دو سناریوی متفاوت اصلاح شده، پیامدهای هرسناریو همگام با احداث شبکه فاضلاب تا سال ۱۳۹۵ پیش‌بینی گردیده است. سناریوی نخست، احیای آبخوان شهری را مدنظر ندارد، اما در سناریوی دوم، توقف بهره‌برداری از برخی چاههای درون و پیرامون شهر پیش‌بینی شده است.

در سناریوی نخست، به منظور تأمین بخشی از نیاز آبی شهر، طی دو مرحله مقدار ۹۰ میلیون مترمکعب جایگزینی پساب با چاهها وحقابه‌های کشاورزی پیشنهاد شده است. در سناریوی دوم، تنها مرحله اول از پروژهٔ جایگزینی پساب با حجم ۳۶ میلیون مترمکعب صورت می‌گیرد و با حذف مرحلهٔ دوم، طی سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ مقدار ۵۹ میلیون مترمکعب از پسابهای تصفیه شده، صرف توقف بهره‌برداری یا خاموش کردن تعدادی از چاههای کشاورزی شده است. شکل ۷ موقعیت این چاه‌ها را نشان می‌دهد.

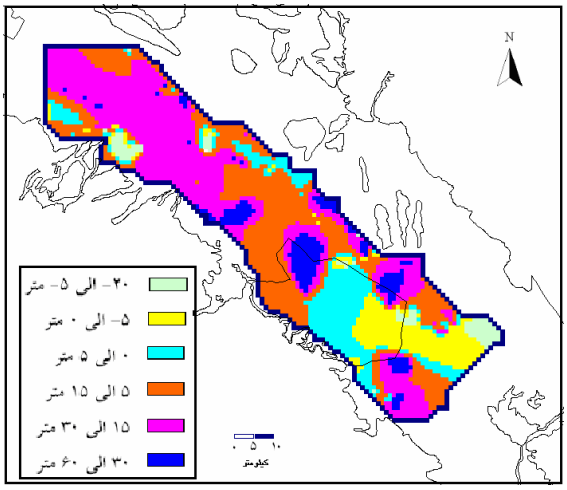
افت سطح آبهای زیرزمینی طی سالهای ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ به ازای اعمال هر دو سناریو در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز به عنوان نمونه نمایانگر تغییرات مقادیر تراز هیدرولیکی به ازای هر سناریو در یکی از پیزومترها می‌باشد.

**جدول ۳- برنامه زمانبندی توقف بهره‌برداری برخی چاههای طبق سناریوی دوم**

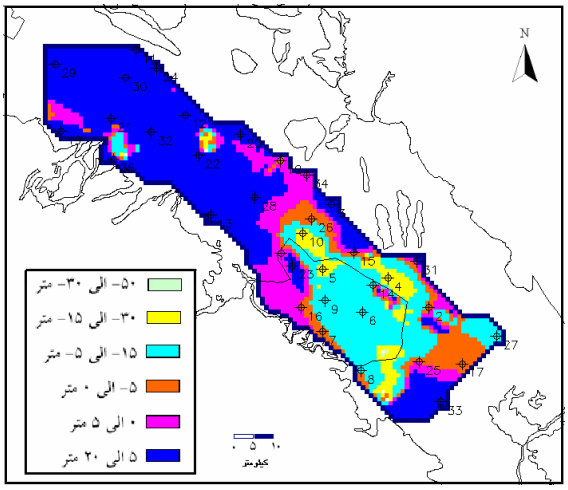
| تاریخ توقف | مهر ۸۶ | مهر ۸۹ | مهر ۸۹ | مهر ۹۰ | مهر ۹۱ | مهر ۹۱ | مهر ۹۲ | مهر ۹۲ | مهر ۹۲ | مهر ۹۳ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| برداشت سالیانهٔ چاهها (mcm) | ۱۳ | ۸ | ۶ | ۸ | ۴ | ۵ | ۳ | ۴ | ۶ | ۲ |



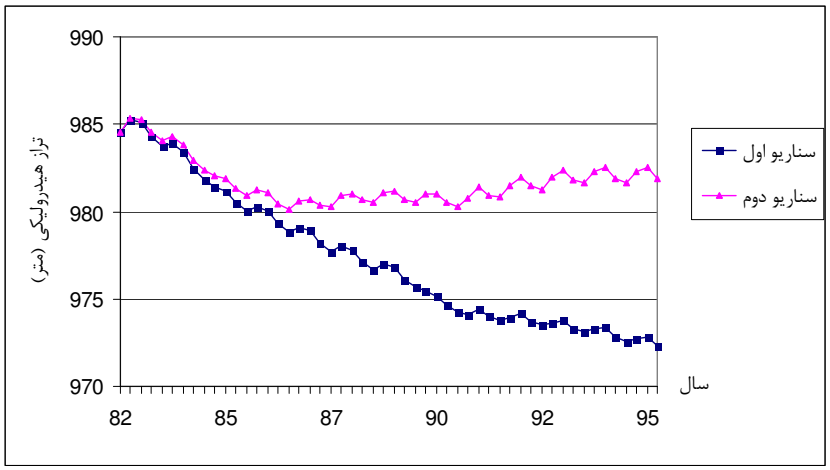

**شکل ۷- موقعیت چاههایی که بهره‌برداری از آنها طبق سناریوی دوم متوقف می‌شود**




**شکل ۸- توزیع مکانی افت تراز آب زیرزمینی طی مهرماه ۸۳ تا مهرماه ۹۵ – سناریوی اول**




**شکل۹- توزیع مکانی افت تراز آب زیرزمینی طی مهرماه ۸۳ تا مهرماه ۹۵ – سناریوی دوم**




**شکل ۱۰- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر ۱**

## نتایج

نتایج فشرده زیر را می‌توان از این فرآیند مدلسازی استخراج نمود که این نتایج می‌توانند راهکارهای مناسبی را در اختیار بهره‌برداران منابع آب به منظور بهره‌برداری اصولی از این منابع قرار دهند.

۱- در صورت اعمال سناریوی نخست، هماهنگی میزان افت سطح آبهای زیرزمینی با ضرایب بهره‌برداری از شبکه فاضلاب در نواحی مختلف شهری به خوبی مشهود است.

۲- در صورت اعمال سناریوی نخست، در سه ناحیه شمال‌غربی (قاسم‌آباد، امامیه و ...)، شمال (خواجه‌ربیع) و جنوب‌شرقی (مزرعه نمونه و کارخانه قند) سطح آبهای زیرزمینی افت شدیدی در حدود ۲ الی ۳ متر در سال را تجربه خواهد کرد. طبیعتاً کاهش آبدهی و افزایش هزینه‌های پمپاژ تعداد قابل توجهی از چاههای شرب مشهد که در این نواحی واقع شده‌اند، همچنین احتمال وقوع پدیده نشست زمین، با عنایت به سوابق پیشین، از پیامدهای نامطلوب این سناریو هستند.

۳- شکل ۹ به خوبی تأثیرات مثبت انتخاب سناریوی دوم در حفظ و احیای منابع آبخوان و نقش پیشگیرانه آن را در قبال پیامدهای نامطلوب احداث شبکه فاضلاب نشان می‌دهد.

۴- در صورت اعمال سناریوی دوم، در بخش‌هایی از شمال‌شرقی شهر مشهد، نظیر شهرک‌های گلشهر و التیمور، سطح آبهای زیرزمینی تا چند متری سطح زمین بالا می‌آید. این واقعه علاوه بر آلودگی آبهای زیرزمینی، کاهش مقاومت فشاری خاک و تهدید پایداری سازه‌های موجود در مناطق مذکور را در پی خواهد داشت. بنابراین باید از توقف بهره‌برداری چاههای این مناطق پرهیز نمود.

## فهرست منابع


جوشش، ج. ۱۳۷۴. اثرات اجرای طرح آب و فاضلاب بر منابع آب زیرزمینی شهر مشهد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

سیادتی، ج. ۱۳۸۳. مدل کیفی آب زیرزمینی شهر مشهد. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان. ۱۳۷۸. بیلان آبی دشت نمونه مشهد.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان. ۱۳۷۷. طرح جامع تأمین آب شرب مشهد.

شرکت مهندسین مشاور سروآب.. ۱۳۸۲. بازنگری طرح شبکهٔ فاضلاب شهر مشهد، گزارش مبانی و ضوابط طراحی شبکه فاضلاب.

شرکت مهندسین مشاور سروآب. ۱۳۷۷. تأمین آب شرب مشهد از طریق جایگزینی فاضلاب تصفیه شده، جلد دوم: بررسی منابع آب قابل جایگزینی با فاضلاب تصفیه‌شده.

Anderson, M. P., and W. W. Woessner. 1992. Applied ground water modeling. Academic Press.

Spitz, K., and J. Moreno. 1996. A practical guide to ground water and solute transport modeling. John Wiley & Sons.