شبیه‌سازی تخصیص تلفیقی کمی و کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی شرب شهر مشهد

منصوره آتشی[1]، کامران داوری[2]، محمد باقر شریفی[3]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
(نویسنده مسئول) ۳۶۰۴۲۸۹۴ (۰۵۱) Mansoureh_atashi@yahoo.com
۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت ۹۲/۱۲/۸ پذیرش ۹۳/٤/۱٦)

چکیده

مطالعات نشان می‌دهد علی‌رغم بهره‌برداری از حداکثر توان تولید منابع آب سطحی و زیرزمینی داخل و خارج شهر مشهد و اجرای طرح عظیم انتقال آب از سد دوستی، کماکان این شهر از سال ۱٤۰۰ با مشکل کمبود روزانه آب به میزان ۱/۷ متر مکعب بر ثانیه مواجه خواهد شد که در صورت لحاظ کیفیت منابع، این کمبود که از سال ۱۳۹۰ شروع شده است، تشدید شده و معادل ۰/۹ متر مکعب بر ثانیه خواهد بود. لذا، ارائه راهکارهای کوتاه مدت و میان مدت برای تأمین آب شرب این شهر ضروری است. در این تحقیق، به مدل‌سازی کمی و کیفی منابع سطحی و زیرزمینی تأمین آب شرب شهر مشهد پرداخته شد. مدل‌سازی کیفی منابع بر اساس شاخص کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام گرفت و منابع آب در سه دسته کیفی بدون محدودیت، با محدودیت متوسط و محدودیت بالا برای شرب طبقه بندی شدند. سپس پهنه‌های فشاری از لحاظ تقاضای شرب و منابع تأمین بررسی شده و بعد از یکپارچه‌سازی در محیط نرم‌افزار مادیسم، مدل‌سازی شدند. این مدل برای سال ۱۳۹۰ صحت‌سنجی شده و سپس با در نظر گرفتن اقدامات مؤثر بر وضعیت منابع آبی منطقه و وضعیت کیفی منابع سناریوهای مختلف برای دوره بلند مدت ۳۰ ساله تدوین شدند. در سال ۱٤۲۰ میزان کمبود روزانه آب در ساعات اوج مصرف در صورت استفاده از منابع بدون محدودیت به ۳۸ درصد خواهد رسید که در صورت بهره جستن از منابع بدون لحاظ کیفیت، این میزان به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. رقیق‌سازی به‌عنوان یکی از راهکارها برای استفاده از حداکثر پتانسیل کمی و کیفی منابع برای تأمین نیازهای شرب در این منطقه ارائه شده است. در صورت رقیق‌سازی میزان کسری روزانه آب معادل ۳۰ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم پشتیبانی تصمیم، مادسیم، سناریوهای تخصیص آب، رقیق‌سازی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر افزایش جمعیت کره زمین و تنوع مصرف باعث افزایش سرانه مصرف آب و ایجاد آلودگی بیشتر منابع آبی شده است. گسترش شهرنشینی، افزایش جمعیت، توسعه صنایع و بالارفتن استانداردهای زندگی موجب شده تا مصرف سرانه در ایران از روندی روبه رشد برخوردار باشد. کاهش ظرفیت منابع آب موجود به همراه تقاضای روزافزون آب از یک سو و سرمایه‌گذاری‌های بالای اقتصادی به‌علت ایجاد منابع تأمین آب جدید از سوی دیگر موجب شده تا ضرورت صرفه‌جویی در مصرف آب بیش از پیش احساس شود و ضرورت دارد که با اتخاذ تدابیر لازم زمینه برای برقراری تعادل میان میزان مصرف آب و ظرفیت ذخایر آبی فراهم شود و در نتیجه آن، راندمان برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بهبود یابد.

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی، پرجمعیت‌ترین شهر کشور بعد از پایتخت است. این شهر هم اکنون ۲/۷ میلیون نفر جمعیت ساکن داشته و پذیرای بیش از ۴۰ میلیون نفر زائر در سال است. در سال ۱۴۲۰ ، جمعیت ساکن این شهر به ۴/۷ میلیون نفر خواهد رسید و پذیرای بیش از ۸۰ میلیون نفر زائر در سال خواهد بود. عمده تأمین آب شرب این شهر در سال‌های گذشته از سد دوستی و منابع آب زیرزمینی دشت مشهد بوده است. در حالی که با توجه به موقعیت سد و توسعه بالادست آن (رودخانه هریرود) توسط کشور افغانستان و کاهش نزولات جوی، در آینده‌ای نه

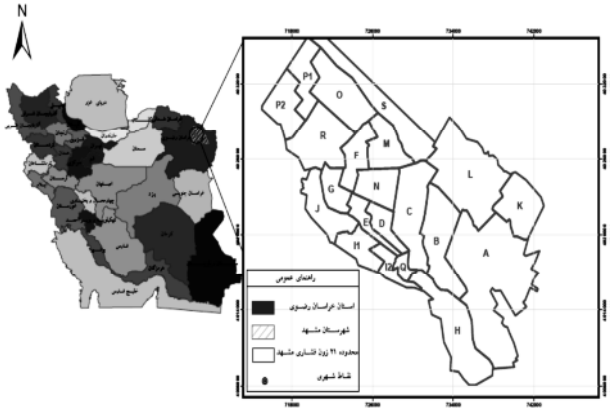
چنـدان دور آبـدهی ایـن سـد کـاهش چشـمگیری خواهـد داشـت. همچنین دشت مشهد یکی از بحرانی‌ترین دشت‌های کشور از لحـاظ کمی و کیفی است، لذا در آینده نزدیک تامین آب شرب شهر مشـهد با مشکل جدی مواجه خواهد بود.

مدل‌های ریاضی جامع کمی-کیفی آب، ابزار مناسـبی بـرای تحلیـل گزینه‌های متعدد مدیریت منابع آب بـه‌شـمار مـی‌رونـد. روش‌هـای مختلفی برای استراتژی‌های بهـره‌بـرداری و تخصـیص در مـدل‌هـای شبیه‌سازی حوضـه‌ای وجـود دارد[۱]. مادسـیم[1] یـک مـدل ریاضـی تخصیص آب حوضه‌ای است کـه در آن از روش تخصـیص بـر پایـه اولویـت[2] و از یـک مـدل بهینـه‌سـازی بـرای ارضـای اولویـت‌هـای مطلوب بهره‌برداری، استفاده شده است[۲]. در مادسـیم سـناریوهای مختلف بهره‌بـرداری بـا تغییـر اولویـت‌هـای نسـبی تـأمین نیازهـای مختلف قابل شبیه‌سازی است. این مزیـت بـه تصـمیم گیرنـده اجـازه می‌دهد که نیازهای مختلف آبی را رتبه‌بندی کنـد[۳]. مادسـیم یـک سیستم پشتیبانی تصمیم مدیریت حوضه رودخانه جامع برای تحلیـل برنامه‌ریزی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت است[۴ و ۵].

در این تحقیق، منابع سطحی و زیرزمینی تأمین آب شـرب شـهر مشهد از نظر کمی و کیفـی مـورد بررسـی قـرار گرفتنـد. در ابتـدا بـه دسته‌بندی کیفی منابع بر اساس شاخص کیفیـت آب‌هـای سـطحی و زیرزمینی و آیین‌نامه‌ها و استانداردهای آب شرب پرداختـه شـد. بـر این اسـاس منـابع بـه سـه دسـته کیفـی منـابع بـدون محـدودیت، بـا محدودیت متوسط و محدودیت بالا برای شرب طبقـه‌بنـدی شـدند. بررسی کمی منابع شرب حاکی از آن است که با بهره جستن از منـابع بدون محدودیت برای شرب، شهر مشهد با کسری روزانـه بـه میـزان ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه مواجه خواهد شد. بر اساس مطالعـات طـرح جامع، شهر مشهد تا سال ۱۴۲۰ به ۲۰ زون تقسیم می‌شـود کـه ایـن زون‌ها دارای مخزن مستقل بوده و محدوده خود را توسط یک شـبکه مجزا تحت پوشش قرار می‌دهند. زون‌های فشاری از لحاظ تقاضای شرب و منابع تأمین بررسی شده و بعد از یکپارچـه‌سـازی در محـیط نرم‌افزار مادسیم، مدل‌سازی شدند. این مدل بـر اسـاس سـال ۱۳۹۰ کالیبره شده و سپس با در نظر گـرفتن اقـدامات مـؤثر بـر وضـعیت منابع آبی منطقه و وضعیت کیفی منـابع سـناریوهای مختلـف بـرای دوره بلند مدت ۳۰ ساله تدوین شد.

۲- منطقه مطالعاتی

شـهر مشـهد مرکـز اسـتان خراسـان رضـوی بـا جمعیتـی بـالغ بـر ۲۷۶۶۲۴۲ نفر (بر طبق سرشماری سال ۱۳۹۰) دومین شهر بـزرگ و پرجمعیت ایران پـس از تهـران اسـت. ایـن شـهر تقریبـاً در مرکـز حوضه آبریز کشف‌رود که یکی از زیرحوضه‌های قره‌قوم است، قـرار دارد. حوضه آبریز کشـف‌رود، بـین رشـته کـوه‌هـای بینـالود و هـزار مسجد واقع است و رودخانه کشف‌رود، مهم‌ترین رودخانـه‌ای اسـت که در آن جریان دارد. ارتفاع شهر از سطح دریا ۹۸۵ متر است. ایـن شهر با گستره‌ای معادل ۳۶۵ کیلومترمربع، بین طول‌های جغرافیـایی '۱۵ °۵۹ تا' ۳۶ °۶۰ شرقی و عرض‌هـای جغرافیـایی' ۴۳ °۳۵ تـا '۰۸ °۳۷ شمالی قرار گرفته است. شـیب عمـومی شـهر از غـرب بـه شرق و از جنـوب بـه شـمال اسـت[۶]. میـزان ایـن شـیب از سـمت جنوب به شمال کاهش یافته به‌طـوری کـه در قسـمت‌هـای شـمالی، زمین دارای شیب بسیار ملایمی است. با توجه بـه اخـتلاف ارتفـاع مذکور و بـا توجـه بـه اسـتاندارد صـنعت آب در خصـوص محـدوده فشاری شبکه توزیع شهری، لزوم استفاده از زون‌بندی در سطح شـهر کاملاً مشخص است. بر اساس مطالعـات انجـام شـده از سـوی دفتـر فنی آب و فاضلاب مشهد و مطالعات طـرح جـامع، شـهر مشـهد تـا سال ۱۴۲۰ به ۲۰ زون تقسیم شده که هر کدام از این زون‌هـا دارای مخزن مستقل بوده و محدوده خود را توسط یـک شـبکه مجـزا بـا در نظر گرفتن نیاز آبی آن تحـت پوشـش قـرار مـی‌دهنـد[۷]. شـکل ۱ موقعیت شهر و محدوده کلی زون‌های فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت شهر و محدوده کلی زون‌های فشاری

۲-۱- ساخت مدل تلفیقی آب شرب مشهد

برای بررسی وضعیت تـأمین آب شـرب شـهر مشـهد در افـق طـرح بلندمـدت لازم اسـت اطلاعـات و داده‌هـای مربـوط جمـع‌آوری و پردازش و پس از انجام محاسبات لازم، اقدام بـه مـدل‌سـازی شـود. به‌طور کلی مراحل انجام این تحقیق به‌صورت زیر است:

مرحله اول: شناسایی سیستم منابع آب؛

مرحله دوم: بررسی کیفی داده‌ها و دسته‌بندی کیفی منابع آب سـطحی و زیرزمینی؛

مرحله سوم: تهیه مدل سیستم منابع آب بـه‌عنـوان ابـزار مـدیریتی و تصمیم‌گیری؛

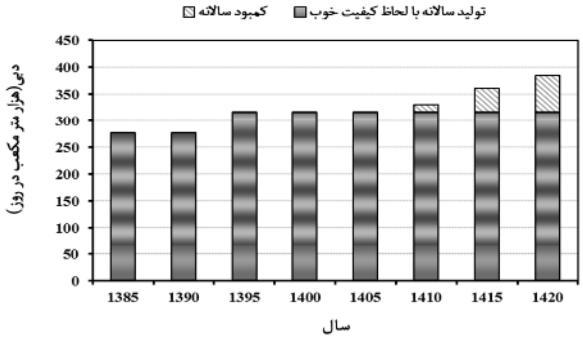
مرحله چهارم: راه‌اندازی سیستم پشتیبانی و تصمیم‌گیری.

[1] Modeling and Simulation (MODSIM)
[2] Priority Based Allocation

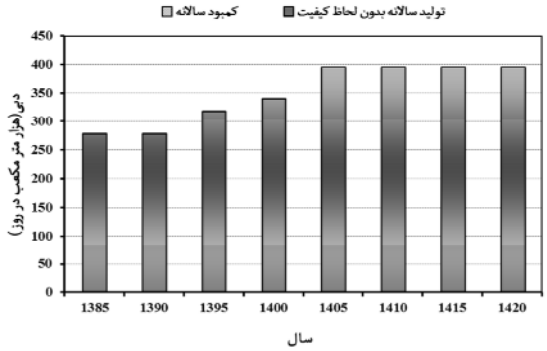
۲-۲- شناسایی سیستم منابع آب

منابع آب شرب در کشور محدود بوده و این محدودیت در شرق، شمال شرقی و جنوب شرقی کشور محسوس‌تر می‌باشد. شهر مقدس مشهد همه ساله میزبان حدود ۱۵ میلیون نفر زائر در ماه است که عمدتاً حضور آنان در زمان اوج مصرف است. بررسی‌های به‌عمل آمده در خصوص نحوه توزیع آب در شهرهای سیاحتی و زیارتی حکایت از افزایش مصرف آب در فصل تابستان دارد[۸]. علاوه بر آن افزایش جمعیت در این فصل سال در این شهر کاملاً متمایز از سایر شهرهای کشور است. تا آنجا که تقاضای ماهانه مصرف آب شرب در این فصل سال، بالغ بر ۱۴۰درصد مصرف متوسط ماهانه طی سال می‌شود. شهر مشهد در حال حاضر سالانه حدود ۲۳۰ میلیون مترمکعب آب شرب نیاز دارد که از منابع آب زیرزمینی و سطحی تأمین می‌شود. حدود ۵۰ درصد از نیاز آب شرب مشهد از ۴۰۰ حلقه چاه داخل و خارج از شهر تأمین می‌شود [۹]. بخش دیگر نیاز آبی از منابع سطحی و توسط سه سد: دوستی، طرق و کارده تأمین می‌شود. دو سد طرق و کارده آبدهی نسبتاً کم داشته در حالی که سد دوستی حدود ۲۰ برابر این دو سد آبدهی دارد. علاوه بر این سدها، سد ارداک نیز در آینده‌ای نزدیک به تأمین آب شرب مشهد کمک خواهد کرد. در واقع در حال حاضر ۵۰ درصد از نیاز شرب مشهد از چاه‌ها، ۴۳ درصد از سد دوستی و بقیه هم از دو قنات و یک چشمه و دو سد طرق و کارده تامین می‌شود[۱۰].

نیاز آبی و پتانسیل تولید منابع تأمین شرب مشهد بر اساس آخرین اطلاعات و آمار دریافت شده از شرکت آب و فاضلاب مشهد محاسبه شده است. شکل‌های ۲ و ۳کسری آب شرب شهر مشهد را به‌صورت سالانه در مقاطع پنج‌ساله با لحاظ منابع با کیفیت نشان می‌دهد. اگر میزان حد مجاز برداشت از آب‌های زیرزمینی تا افق طرح ثابت و حداکثر برداشت مجاز از چاه‌های بدون محدودیت برای شرب صورت گیرد، این شهر از سال ۱۴۱۰ با کسری سالانه آب به میزان ۱۶/۱ مترمکعب بر ثانیه مواجه می‌شود. شکل‌های ۴ و

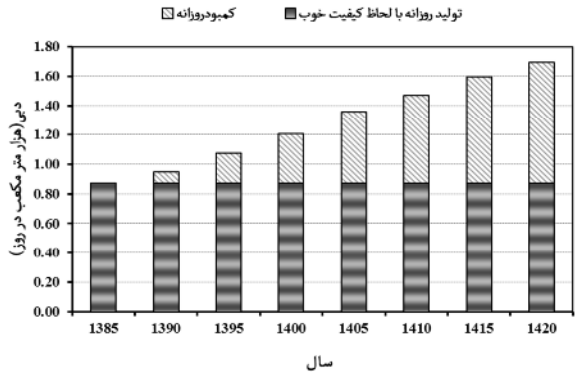


شکل ۲- میزان کسری سالانه آب بدون لحاظ کیفیت



شکل ۳- میزان کسری سالانه آب با منابع بدون محدودیت برای شرب

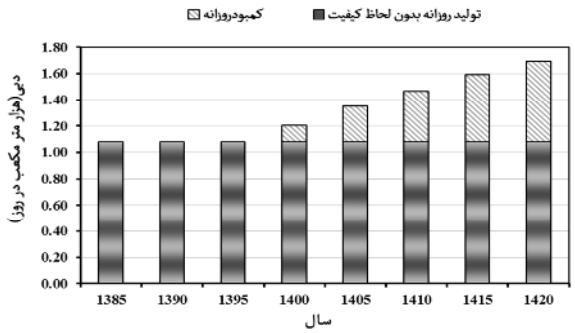
۵ مقدار کسری روزانه آب را نشان می‌دهد. در صورت تأمین آب شرب از منابع بدون لحاظ کیفیت، این شهر از سال ۱۴۰۰ به میزان ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه و در صورت استفاده از چاه‌های بدون محدودیت برای شرب، از سال ۱۳۹۰ با کسری معادل ۰/۹ مترمکعب بر ثانیه در پیک روزانه مواجه خواهد بود.



شکل ۴- میزان کسری روزانه بدون لحاظ کیفیت

۲-۳- بررسی کیفی داده‌ها و دسته‌بندی کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی

یکی از محدودیت‌های عمده استفاده از منابع آب، مشکل کیفیت شیمیایی است. کیفیت شیمیایی آب ویژگی‌ها و فاکتورهای فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی است که استفاده از منابع آب را محدود می‌سازد. با توجه به اینکه مدل‌سازی کیفی توسط مدل مادسیم میسر نیست لذا قبل از مدل‌سازی کمی به دسته‌بندی کیفی منابع آب و مطالعه حدود مجاز پارامترها در استانداردهای آب شرب پرداخته شد. جدول ۱ جمع‌بندی حدود مجاز پارامترها در استانداردهای مختلف را نشان می‌دهد. با بررسی استانداردهای مختلف آب آشامیدنی و حدود مجاز و مطلوب پارامترهای آب آشامیدنی در



شکل ۵ - میزان کسری روزانه آب با منابع بدون محدودیت برای شرب

این مطالعات، استاندارد ۱۰۵۳ تجدید نظر پنجم سازمان بهداشت جهانی[1] برای طبقه‌بندی کیفی مد نظر قرار گرفت.

شاخص کیفیت آب، ابزاری برای خلاصه‌سازی تعداد زیادی داده‌های کیفی آب به اطلاعات ساده‌تر است. برای طبقه‌بندی کیفی منابع آب خام برای مصارف آشامیدنی لازم است پارامترهایی گنجانده شود که با پارامترهای مربوط به استانداردهای آب آشامیدنی همخوانی داشته باشد. بسیاری از طبقه‌بندی‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی با ارائه مقادیر پارامترهای مختلف در کلاس‌های متفاوت بیان شده‌اند. ولی تمام پارامترهای اساسی موجود در آب لحاظ نشده است. چنانچه غلظت پارامترهای مختلف آب در کلاس‌های گوناگون قرار گیرد، برای تعیین کلاس آب ضروری است به ازای مقادیر غلظت‌های پارامترهای مختلف، ارزش عددی بیان شود. در این مقاله از پژوهش محوی استفاده شد [۱۱]. شاخص کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی پیشنهادی برای ایران (IWQI) با توجه به ارزش عددی محدوده غلظت پارامترهای پانزده‌گانه در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳-۱- مدل کیفی منابع آب زیرزمینی و سطحی

به‌منظور ساخت مدل کیفی پس از مقایسه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی منابع آب با آیین‌نامه‌های آب شرب (۱۰۵۳ و WHO) به دسته‌بندی آن‌ها با توجه به جدول شاخص کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر پرداخته شد. به این منظور برنامه‌ای در محیط ماکروس[2] تهیه شد. بر اساس این برنامه، ارزش هر پارامتر با توجه به مقدار غلظت آن بر اساس جدول ۲ تعیین می‌شود. با توجه به آنکه پارامترهای درصد اشباع اکسیژن، منگنز و TOC برای منابع در دسترس نیستند، مقادیر امتیاز کل بر اساس پارامترهای حذف شده تغییر داده شد. چنانچه محدوده امتیاز کل با توجه به مجموع ارزش عددی پارامترهای یازده‌گانه برابر با ۷۷-۶۰، ۶۰-۵۰، ۵۰> شود، کیفیت منبع فوق در یکی از

[1] Word Health Organization (WHO)

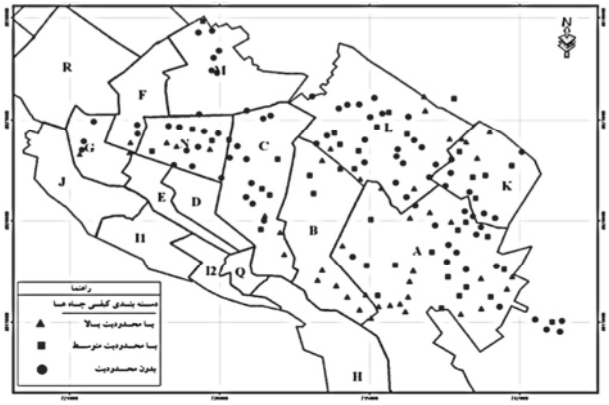
[2] Marcros

جدول ۱- مقایسه استانداردهای آب آشامیدنی [۱۲، ۱۳ و ۱۴]

نام	واحد	تحقیقات صنعتی (تجدید نظر ۱۰۵۳) ۱۳۸۷		وزارت نیرو ۱۳۷۲		WHO ۱۹۹۳	WHO ۲۰۰۲	WHO ۲۰۱۰	EPA ۲۰۱۱	USA ۲۰۱۰
		حد مطلوب	حد مجاز	حد مطلوب	حد مجاز	حد راهنما	حد راهنما	حد راهنما	حد راهنما	حد راهنما
کدورت	NTU	-	۵	-	-	۵	۵	۵	۵	۰/۵>٪۹۵
رنگ	TCU	-	۱۵	-	-	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	-
سولفات	mg/L	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۴۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۲۵۰
سدیم	mg/L	۲۰۰	۲۰۰	-	-	۲۰۰	-	۲۰۰	-	-
آلومینیوم	µg/L	۱۰۰	۲۰۰	-	-	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۰۰	-
نیترات	mg/L	-	۵۰	۰/۰	۴۵	۵۰	۵۰	۵۰	۱۰	۴۵
آهن	µg/L	۳۰۰	-	۱۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰
منگنز	µg/L	۱۰۰	۴۰۰	۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۵۰	۵۰
نقره	µg/L	-	۱	-	۵۰	-	-	-	۱۰	۵۰
آرسنیک	µg/L	-	۱۰	-	۵۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵۰
کادمیم	µg/L	-	۳	-	۱۰	۳	۱۰	۳	۵	۱۰
سیانور	µg/L	-	۷۰	-	۵۰	۷۰	-	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰
سرب	µg/L	-	۱۰	۰/۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵	۵۰
تتراکلرید کربن	µg/L	-	-	-	-	۴	-	۴	۵	۵
لیندان	µg/L	-	۲	-	-	۳	-	۳	۰/۲	۰/۲
سختی	$CaCO_3$	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	-	-
TDS	mg/L	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰

جدول۲- طبقه بندی پیشنهادی برای منابع آب خام سطحی و زیرزمینی (IWQI)

	پارامتر / ارزش	۷	۶	۵/۹	۵/۵	۵	۴/۹	۴	۳	۲/۹	۲/۵	۲	۱/۹	۱	۰
۱	pH	۷/۵	۷	۶/۸	۶/۵	۶/۳	۶/۱	۶	۵/۸	۵/۵	۵/۲	۵	۴/۵	۴	<۴
		۷/۵	۸	۸/۳	۸/۴	۸/۵	۸/۷	۸/۹	۹	۹/۲	۹/۲	۹/۵	۱۰	۱۰/۵	>۱۰/۵
۲	دما (^{0}C)	۲	۵	۷	۱۰	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰	۳۰	>۳۰
۳	کدورت(NTU)	۱	۴	۸	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰	۷۰	۹۰	۱۰۰	>۱۰۰
۴	درصد اشباع اکسیژن	۱۰۰	۸۵	۸۰	۷۵	۷۰	۶۵	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۰	۲۰	<۲۰
۵	آهن(mg/L)	۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۱	۲	۳	۵	۷	۱۰	۱۵	>۱۵
۶	منگنز(mg/L)	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱	۱/۵	۲	۳	۵	۷	۱۰	>۱۰
۷	سختی(mg/L)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	>۱۵۰۰
۸	کلراید(mg/L)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	>۱۰۰۰
۹	سولفات(mg/L)	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	>۲۰۰۰
۱۰	نیترات(mg/L)	۰	۲	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۵۰	>۱۵۰
۱۱	فسفر کل(mg/L)	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱	۱/۷۵	۳	۶	>۶
۱۲	کل جامدات محلول(mg/L)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۱۷۰۰	۱۹۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	>۳۰۰۰
۱۳	TOC (mg/L)	۰	۱	۱/۵	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۹	۱۲	۱۵	۲۰	>۲۰
۱۴	کلیفرم گوارشی در 100Ml	۱	۲	۳	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	>۲۰۰۰۰
	امتیاز کل IWQI	۹۰-۱۰۰			۷۰-۹۰			۵۰-۷۰			۲۵-۵۰			۰-۲۵	
	کلاس منبع آب	عالی			خوب			متوسط			بد			خیلی بد	



شکل۶- پراکندگی کیفی چاه‌های داخل شهر

وضعیت‌های بدون محدودیت (با کیفیت خوب)، با محدودیت متوسط و با محدودیت بالا برای شرب قرار خواهد گرفت. همچنین پارامترهای اصلی آب شرب نظیر نیترات، سولفات، مواد جامد محلول به‌عنوان حدود تعیین کننده در دسته‌بندی لحاظ شدند به‌طوری که اگر مقادیر بالا از حدود مجاز تجاوز کنند، بدون در نظر گرفتن امتیاز کل، منبع در دسته منابع با محدودیت بالا طبقه‌بندی می‌شود. شکل ۶ پراکندگی کیفی چاه‌های داخل شهر را نشان می‌دهد. با این برنامه دسته کیفی ۳۴۵ چاه داخل و خارج مشهد مشخص شد و مقادیر پارامترهای بحرانی و بالاتر از حد مجاز گزارش شد. نتایج دسته‌بندی کیفی چاهها داخل شهر نشانگر آن است که زون A دارای بیشترین تعداد چاه با محدودیت بالا است که از لحاظ آبدهی مقادیر قابل توجهی دارند. همچنین تمامی چاههای خارج از شهر در دسته بدون محدودیت برای شرب قرار دارند. برای دسته‌بندی کیفی منابع آب سطحی به بررسی پارامترهای کیفی خروجی تصفیه‌خانه‌ها در چهار سال اخیر پرداخته شد. نتایج نهایی نشان داد که تمامی منابع آب سطحی در کلاس بدون محدودیت برای شرب قرار دارند. با در نظر گرفتن اتمام ساخت سد دوستی و خط انتقال آن به‌عنوان نزدیک‌ترین منبع آب سطحی در دسترس، نمی‌توان پیش‌بینی سد بزرگی را در محدوده نزدیک به شهر مشهد داشت و دو پروژه انتقال آب از سد ارداک و ارتفاعات هزار مسجد در حال حاضر تنها پروژه‌های در دست مطالعه و اجرا می‌باشند. همچنین به‌دلیل قرارگیری دشت مشهد در محدوده ممنوعه، امکان حفر چاه جدید در این دشت بحرانی وجود ندارد و با توجه به شواهد موجود، ظرفیت آبدهی چاه‌های دشت مشهد، اعم از شرب و غیر شرب طی سال‌های اخیر با روند کاهشی کمی و کیفی آب در هر سال روبرو بوده است و این مشکل تأمین آب را دو چندان خواهد کرد. با در نظر گرفتن این موارد باید از تمامی پتانسیل منابع آب در دسترس شهر مشهد بهره جست. به‌طوری‌که تا حد امکان با منابع موجود، کلیه نیازهای کمی و کیفی آب شرب شهر برطرف شود و

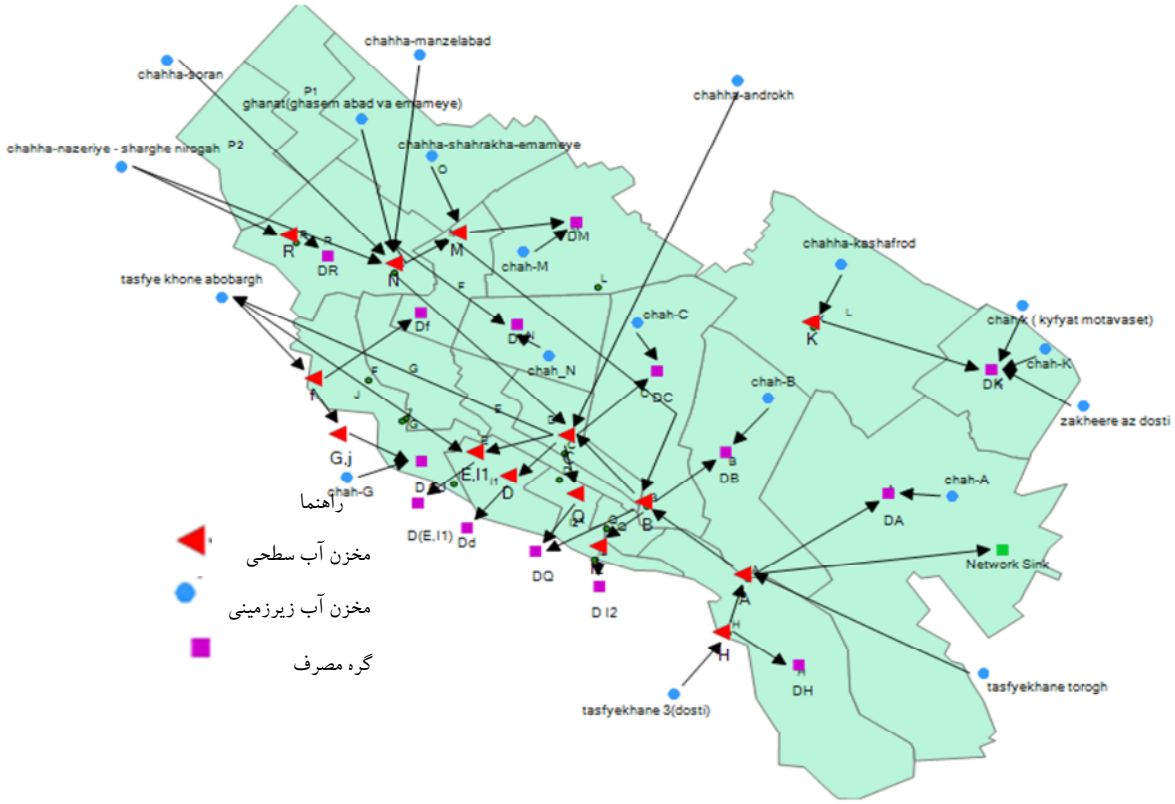
احتیاج به افزودن منبع آبی جدیدی برای شهر مشهد نباشد[۱۵].

راهکارهای مختلفی برای کاهش مصرف و یا بهره جستن از تمامی منابع موجود به طریقی که کیفیت نیز تأمین شود، وجود دارد. از آن جمله می‌توان به راهکار مدیریت مصرف و تقاضا، جداسازی آب شرب از سایر مصارف، جایگزینی فاضلاب تصفیه شده و اختلاط منابع و ترقیق اشاره نمود. در این پژوهش به مطالعه اثر اختلاط منابع، ترقیق و رسیدن به کیفیت معادل پرداخته شد. با ارائه این راهکار گرچه میزان مصرف کل تغییر نمی‌کند، لیکن به میزان تولید منابع بالقوه در دسترس افزوده می‌شود. به این ترتیب می‌توان از چاه‌های با کیفیت پایین‌تر در شهر مشهد نیز بهره برد و هزینه تولید و انتقال آب از منابع دور دست را کاهش داد. لذا با توجه به آنکه زون‌های فشاری از چاههای خاص خود تامین می‌شوند، برای اعمال کیفیت‌های مختلف چاهها و همچنین ترقیق نیاز به محاسبه کسری آب به تفکیک زون‌های فشاری است. در نتیجه به مدل‌سازی منطقه مطالعاتی با نرم‌افزار مادسیم پرداخته شد.

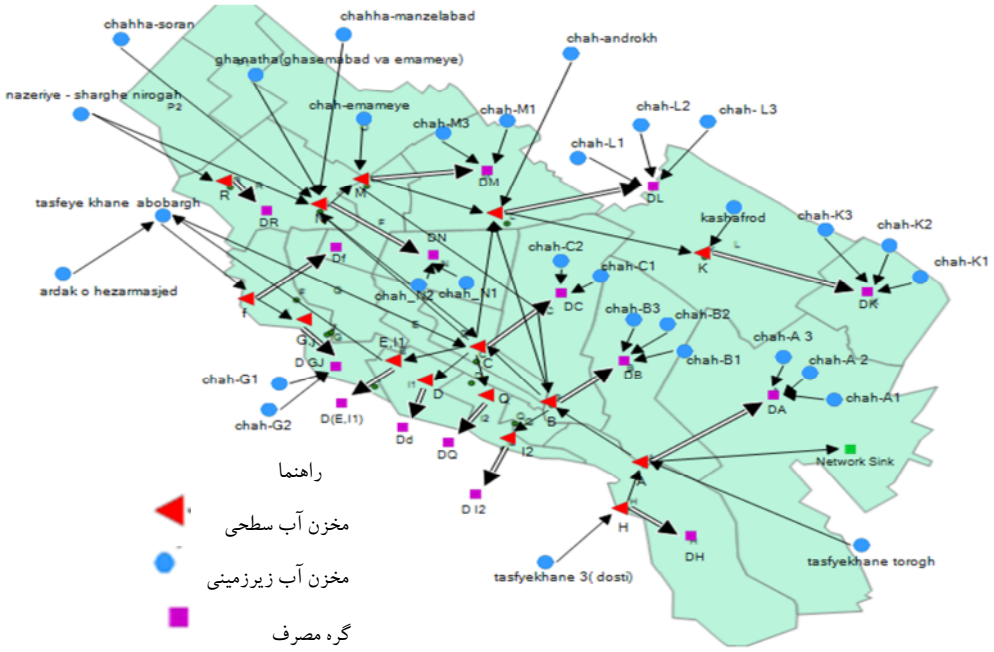
۲-۴- ایجاد مدل مفهومی و وارد کردن اطلاعات و اولویت‌ها

برای مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه از چهار نوع گره استفاده شد: ۱) گره تقاضای آب شرب ۲) مخزن آب سطحی ۳) گره تصفیه‌خانه‌های آب شرب ۴) گره چاه‌های با کیفیت‌های مختلف. اسامی گره‌ها بر اساس نام مخزن آب سطحی، منابع تولید آب شرب و تصفیه‌خانه‌ها انتخاب شده است. در خصوص نام‌گذاری منابع آب زیرزمینی، چاه‌های آب شرب هر زون با سه اندیس مشخص شدند که اندیس ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب معرف چاه‌های بدون محدودیت، با محدودیت متوسط و با محدودیت بالا برای شرب می‌باشند.

شبکه ارتباطی منابع با مخازن شهر و تقاضای آب شرب در قسمت مدل مفهومی ایجاد شده است، تا بتوان اطلاعات را در مدل وارد نمود. در هنگام ایجاد شبکه، اولویت دریافت آب برای گره‌های تقاضا با توجه به نوع و کیفیت منابع مشخص شد. در این مورد باید گفت که در منطقه مورد مطالعه مصرف آب شرب در هر زون از مخزن فشاری و چاه‌های خود آن زون تأمین می‌شود. از آن‌جایی که هدف این پژوهش، مطالعه بررسی کمی و کیفی تخصیص آب شرب بود و هدف اصلی شبیه‌سازی مسائل مربوط به آب‌زیرزمینی نبود، لذا منابع آب زیرزمینی شامل چاههای تأمین شرب به‌صورت منبع آب سطحی با محاسبه میزان آبدهی روزانه در نظر گرفته شد. شکل‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب مدل ساخته شده در مادسیم را برای وضع موجود و افق طرح نشان می‌دهند.



شکل ۷- مدل وضع موجود در مادسیم برای منطقه مورد مطالعه (سال ۱۳۹۱)



شکل ۸- مدل طرح در مادسیم برای منطقه مورد مطالعه (سال ۱۴۲۰)

۲-۴-۱- فرضیات و صحت سنجی مدل

منابع آب زیرزمینی شامل چاههای تأمین شرب به‌صورت منبع آب سطحی با محاسبه میزان آبدهی روزانه در نظر گرفته شد.

میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی و کیفیت در سال افق طرح معادل میزان حد مجاز برداشت سال مبنا ۱۳۹۰ فرض شد.

آمار میزان تولیدات و مصارف در سال ۱۳۹۱ نشان می‌دهد که در این سال تمامی منابع پاسخگوی نیاز آبی شهر بوده‌اند و شهر مشهد با کمبود آب مواجه نشده است. ولی با توجه به عدم وجود مخزن در پهنه فشاری L و اتصال شبکه توزیع این پهنه فقط به پهنه فشاری K تا زمان کامل شدن مخزن پهنه فوق از مخزن پهنه K نیاز شرب این پهنه تأمین خواهد شد. لذا به‌عنوان راهکار کوتاه مدت، خط انتقال از مخزن پهنه فشاری A به مخزن پهنه K احداث شده است. با این وجود باز هم نیاز آبی پیک مصرف در پهنه‌های فشاری K و L تأمین نخواهد شد. لذا بر طبق مدل نیز تمامی نیازهای پهنه‌های فشاری از لحاظ کمی تامین شده است؛ فقط در زون K از ذخیره سد دوستی و چاه‌های با محدودیت متوسط در روز پیک استفاده شده است. مدل وضع موجود تنظیم شده با شرایط واقعی کاملاً همخوانی دارد.

۲-۴-۲- تدوین سناریوهای مختلف

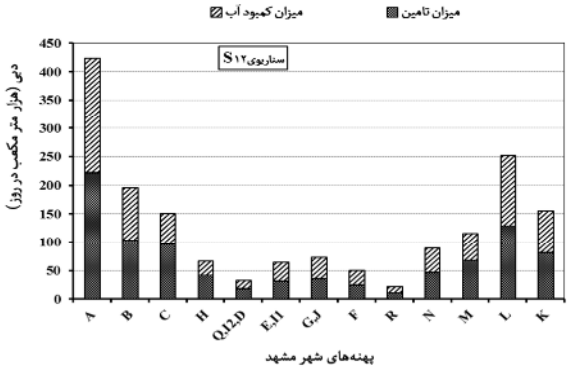
تدوین سناریوها بر اساس اهداف مدل‌سازی انجام می‌گیرد. در این تحقیق به بررسی وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی در دو حالت لحاظ و عدم لحاظ سیاست‌های گوناگون مدیریت کمی آب و طرح‌های مختلف توسعه منابع آب تعریف شده است. تمامی فرضیات و سیاست‌های به‌کار رفته در مدل تا سال ۱۳۹۰ یکسان بوده و در سال ۱۴۲۰ (که دوره طرح است)، بسته به نوع سناریو، مقادیر متفاوتی در مدل‌سازی استفاده شده است. در تحقیق صورت گرفته سطوح مختلف توسعه به‌شرح جدول ۳ می‌باشند.

جدول ۳- بررسی اجمالی سناریوهای توسعه در منطقه مورد مطالعه

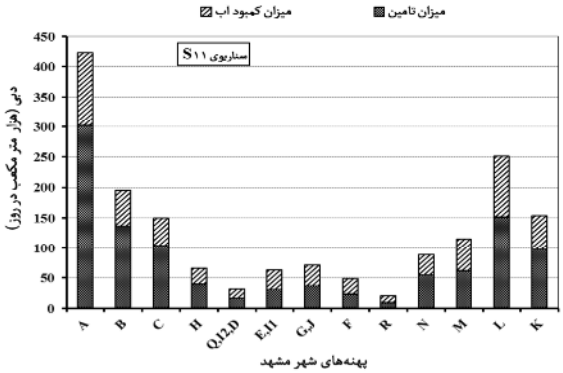
علامت اختصاری	سطح سناریو	توضیحات
S_{11}	اول	سناریو مرجع ۱: تحت این سناریو تخصیص منابع موجود با حداکثر توان تولید بدون لحاظ کیفیت می‌باشد.
S_{12}	اول	تحت این سناریو تنها منابع موجود بدون محدودیت برای شرب لحاظ شده است.
S_{21}	دوم	تحت این سناریو تخصیص منابع با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه و در حال اجرا با حداکثر توان تولید بدون لحاظ کردن کیفیت می‌باشد.
S_{22}	دوم	تحت این سناریو پروژه‌های انتقال آب از ارداک و هزار مسجد و منابع بدون محدودیت برای شرب در نظر گرفته شده است.
S_{31}	سوم	تحت این سناریو اثر اختلاط و ترقیق منابع سطحی و زیر زمینی بررسی می‌گردد.

۲-۴-۳- بررسی نتایج سناریوها

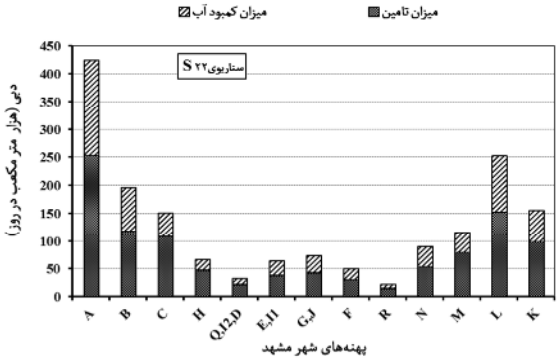
شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج سناریوهای اعمال شده در مدل را نشان می‌دهند. نتایج سناریوها و درصد کسری آب شهر مشهد در سال ۱۴۲۰ نشانگر آن است که برای تأمین آب شرب این شهر علاوه بر راهکارهای کاهش مصرف باید به طریقی از تمامی پتانسیل‌های موجود استفاده کرد. به این منظور راهکار ترقیق ارائه شده است. در این راهکار، اختلاط چاه‌های با کیفیت مختلف در زون‌های فشاری و منابع سطحی مورد مطالعه قرار گرفته و کیفیت معادل این اختلاط بررسی شده است.



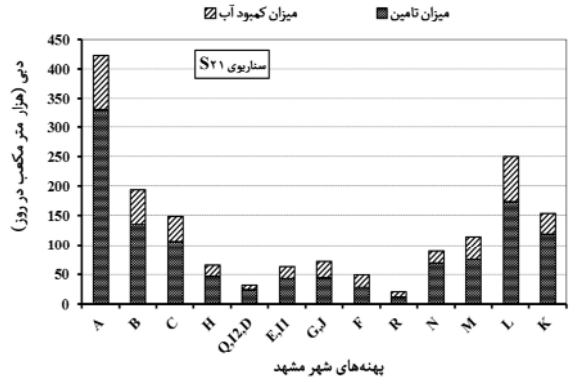
شکل ۹- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S_{11}



شکل ۱۰- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S_{12}



شکل ۱۱- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S_{21}



شکل ۱۲- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S_{22}

۲-۵- رقیق‌سازی[1]

زمانی که برای تأمین آب به‌منظور توزیع در یک سامانه آبرسانی، امکان استفاده از چند منبع آب خام با کیفیت‌های متفاوت وجود داشته باشد، بحث رقیق‌سازی قابل طرح خواهد بود. ترقیق فرایندی فیزیکی است. ظرفیت رقیق‌سازی یک جریان با استفاده از موازنه جرم قابل محاسبه است. غلظت پس از اختلاط مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است

$$C_m = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2}{Q_1 + Q_2} \qquad (۱)$$

که در آن C غلظت ماده مورد نظر و Q بیانگر شدت جریان حجمی است[۱۶].

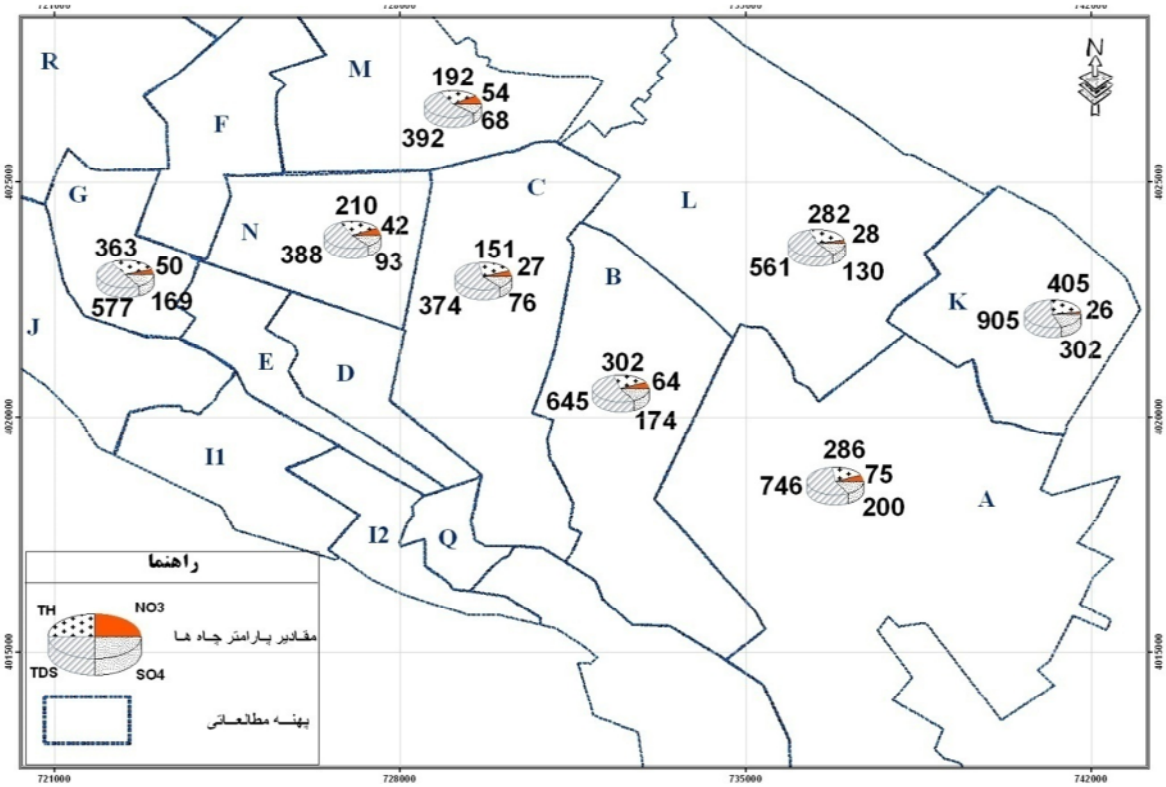
بررسی مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی منابع آب مشهد مشخص می‌کند که چهار پارامتر نیترات، سختی، مواد جامد محلول و سولفات در کیفیت آب این شهر مؤثر هستند. جدول ۴ مقادیر بحرانی این پارامترهای اساسی را در سه دسته کیفی برای زون‌های مختلف نشان می‌دهد.

با رقیق‌سازی منابع زیرزمینی، کیفیت معادل هر یک از سه دسته کیفی چاه‌ها در هر یک از زون‌های فشاری محاسبه شده است. نتایج رقیق‌سازی سه دسته کیفی منابع زیرزمینی هر زون در شکل ۱۳ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پارامترهای سختی، مواد جامد محلول و سولفات با ترقیق منابع در هر زون به مقادیر حد مجاز استاندارد می‌رسند. برای بالا بردن کیفیت منابع زیرزمینی نیتراته در پهنه‌های A ,B , M ,G و L به ترقیق منابع زیرزمینی با منابع آب سطحی در دسترس هر پهنه و چاه‌های خارج از شهر پرداخته شد.

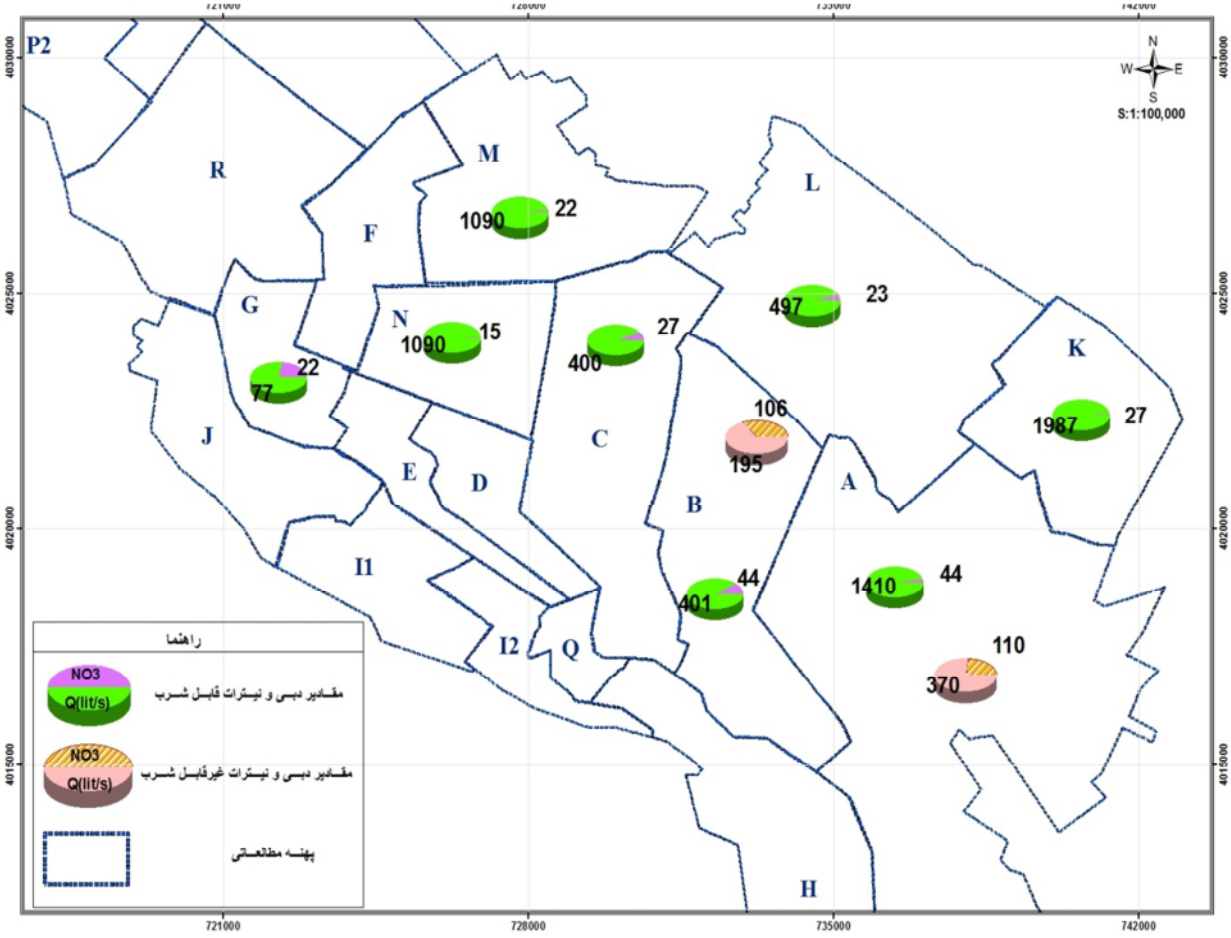
[1] Dilution

جدول ۴- مقادیر پارامترهای بحرانی در سه دسته کیفی برای زون‌های مختلف

پهنه های فشاری	دسته کیفی	NO_3(mg/L)	TH	SO_4(mg/L)	Tds(mg/L)	Q(lit/s)
A	با محدودیت بالا	۱۱۱	۳۵۸	۲۹۴	۹۳۷	۶۶۴
	با محدودیت متوسط	۶۱	۲۵۲	۱۵۰	۷۱۹	۱۸۵
	بدون محدودیت	۳۲	۲۰۱	۹۱	۴۹۷	۴۸۶
B	با محدودیت بالا	۱۰۶	۴۲۲	۲۵۳	۸۳۲	۱۹۴
	با محدودیت متوسط	۶۶	۳۱۶	۱۷۰	۶۵۷	۱۸۳
	بدون محدودیت	۲۶	۱۸۶	۱۱۰	۴۷۲	۲۱۸
C	با محدودیت بالا	–	–	–	–	–
	با محدودیت متوسط	۶۹	۲۳۸	۶۷	۴۱۴	۹۱
	بدون محدودیت	۱۵	۱۲۶	۷۹	۳۶۳	۳۰۹
M	با محدودیت بالا	–	–	–	–	–
	با محدودیت متوسط	۱۱۳	۳۰۱	۷۷	۴۳۸	۴۱
	بدون محدودیت	۲۰	۱۲۹	۶۳	۳۶۶	۷۰
N	با محدودیت بالا	۶۸	۳۲۰	۱۶۰	۵۱۳	۱۰۱
	با محدودیت متوسط	–	–	–	–	–
	بدون محدودیت	۲۶	۱۳۷	۴۸	۳۰۴	۱۵۰
K	با محدودیت بالا	۲۹	۶۶۴	۵۹۹	۱۵۳۵	۱۶۶
	با محدودیت متوسط	۲۸	۴۳۸	۲۹۵	۹۲۶	۱۰۸
	بدون محدودیت	۲۵	۲۱۱	۱۰۱	۴۶۰	۲۳۹
G	با محدودیت بالا	۶۶	۴۲۷	۲۲۱	۶۷۹	۱۷
	با محدودیت متوسط	–	–	–	–	–
	بدون محدودیت	۳۱	۲۸۸	۱۰۸	۴۵۸	۱۵
L	با محدودیت بالا	۸۴	۴۸۶	۱۳۰	۸۲۷	۳۲
	با محدودیت متوسط	۲۶	۴۲۰	۱۷۱	۶۹۵	۶۷
	بدون محدودیت	۱۸	۱۸۷	۱۱۴	۴۵۵	۱۶۵



شکل ۱۳- نتایج رقیق‌سازی سه دسته کیفی منابع زیرزمینی هر زون

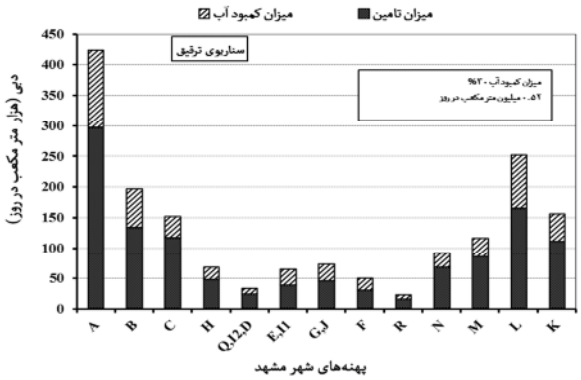


شکل ۱۴- نتایج نهایی ترقیق با منابع سطحی

جدول ۵- نتایج سناریوها در پهنه‌های فشاری

سناریو	پهنه فشاری با بیشترین میزان کسری	مقدار(درصد)	پهنه فشاری با کمترین میزان کسری	مقدار(درصد)
S_{11}	E, F,R	۵۰	A	۲۹
S_{12}	G,J	۵۱	C	۳۶
S_{21}	R	۴۱	Q,I_2,D	۲۱
S_{22}	E,I_1,G,J	۴۱	C,H	۲۸
S_{31}	F,E,I_1	۴۰	C	۲۲

در پهنه G از اختلاط منابع زیرزمینی با آب خروجی از تصفیه‌خانه شماره ۲، در پهنه M از اختلاط منابع زیرزمینی با چاههای خارج از شهر امامیه، در پهنه L نیز از چشمه اندرخ و در پهنه A از تصفیه‌خانه شماره ۳ (دوستی) و طرق بهره گرفته شده است. با این وجود نتایج نهایی حاکی از آن است که تعدادی از چاه‌ها با محدودیت بالا، زون‌های A و B به ترتیب با آبدهی ۳۷۰ لیتر بر ثانیه و ۱۹۵ لیتر بر ثانیه موجود است که به‌دلیل عدم دسترسی منابع آب سطحی و یا چاههای خارج شهر با کیفیت خوب این مقادیر غیرقابل استفاده برای شرب خواهد بود. شکل ۱۴ نتایج نهایی ترقیق با منابع سطحی را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبات ترقیق صورت گرفته و با لحاظ عدم امکان استفاده از منابع با محدودیت بالای زون B و تقریباً نیمی از منابع با محدودیت بالای زون A مدل جدید تخصیص منابع بر اساس این تغییرات در نرم‌افزار مادسیم تولید شد. بر طبق این سناریو ۶۹ درصد کسری روزانه آب زون‌های شهر مشهد تأمین می‌شود. میزان تامین کمی و کیفی شرب زون‌ها در سال ۱۴۲۰ در شکل ۱۵ آمده است. جدول ۵ نتایج سناریوها را در پهنه‌های فشاری نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- میزان کسری آب هر زون در افق طرح سناریوی ترقیق

۳- نتیجه‌گیری

بررسی تقاضای شرب در سال ۱۴۲۰ و منابع تأمین آب شرب شهر مشهد نشانگر میزان کمبود آب در پیک روزانه است. در صورت لحاظ کردن کیفیت میزان این کمبود به مراتب بیشتر خواهد شد. مدل شبیه‌سازی بهینه‌سازی تلفیقی کمی و کیفی شهر مشهد نشان می‌دهد در صورتی که از منابع بدون محدودیت برای شرب استفاده شود و میزان استحصال آب زیرزمینی در حد مجاز باشد، با فرض آنکه بتوان از حداکثر میزان منابع سطحی موجود و در دست مطالعه و اجرا بهره گرفت؛ شهر مشهد با کسری ۳۸ درصد آب در پیک روزانه مواجه خواهد بود. با توجه به لحاظ تمامی طرح‌های در دست مطالعه و اجرای منابع آب و موقعیت و پتانسیل دشت مشهد، توسعه منابع آبی جدید در بخش‌های منابع آب‌های زیرزمینی و به ویژه سطحی این دشت بسیار مشکل، پیچیده و فوق‌العاده گران قیمت خواهد بود و مسلماً بهره‌برداری از منابع بدون محدودیت شرب در مشهد امری غیر منطقی است. از این‌رو باید با تأمین کیفیت از تمامی منابع موجود بهره جست. ترقیق یا اختلاط منابع یکی از راهکارهایی است که می‌توان به این مهم دست پیدا کرد. با این وجود باز هم ۳۰ درصد کسری آب در سال طرح وجود دارد. لذا برای تأمین آب در سال‌های آتی علاوه بر توسعه بهره‌برداری از آبهای غیرمتعارف و به‌خصوص فاضلاب‌های تصفیه شده، لازم است بهسازی شبکه خطوط جمع‌آوری چاهها و آرایش خطوط شبکه توزیع شرب به‌منظور تأمین یکنواخت شرب صورت گیرد. به‌عبارت دیگر راه تأمین منابع آب مشهد در سال‌های آتی عمدتاً با تکیه بر مبحث استفاده مجدد از آب امکان پذیر است. علاوه بر این، پرداختن به مباحث مدیریت منابع و مصارف نیز می‌تواند بخشی از روش‌های تأمین آب برای طرح‌های توسعه‌ای آینده باشد.

۴- مراجع

1. Karamouz, M., Szidarovsky, F., and Zahraei, B. (2003). *Water resources systems analysis*, 2nd Ed., Lewis Publishers, USA.
2. Dinar, A., and Resegrant, M.W., and Meinzen-dick, R. (1997). "Water allocation mechanisms principles and examples." The World Bank, Policy Research Working, Paper No1779. Washington DC.
3. Labadie, J.W.(2006). "MODSIM: Decision support system for integrated river basin management." Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, USA.
4. Labadie, J. W., and Larson, R. (2007). "MODSIM 8.1: River basin management decision support system user manual and documentation." Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University.
5. Water Research Institute. (2009). *Introduction of decision support systems for water resources management*, Ministry of Energy's Office of Water and Wastewater Planning, Iran. (In Persian)
6. Rafati Sokhango, A.M. (2011). "The application of systems analysis in MODSIM decision support systems." MSc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
7. Toossab Consulting Engineers. (2009). *Technical report of quantitative and qualitative similarity distribution of potable water of Mashhad*, Vol. 1, 2nd Ed., Mashhad, Iran. (In Persian)
8. Mashhad Water and Wastewater Company.(2011). </ http://www.abfamashhad.ir> (Dec. 6, 2011)
9. Toossab Consulting Engineers. (2009). *Separation scheme of potable water from other uses of Mashhad*, Report of surface water resources, Vol. 6, 2nd Ed., Iran. (In Persian)

10. Toossab Consulting Engineers. (2009). *Separation scheme of potable water from other uses of Mashhad*, Report of groundwater resources. Vol. 5, 2nd Ed., Mashhad, Iran. (In Persian)
11. Mahvi, A.H. (2006). *Guidline for raw water sources quality for drintin*, Management of Water Rewources, Bureau of Standards, Environmental Reserch Center, Tehran University of Medical Sciences, Tehran. (In Persian)
12. Office of Groundwater and Protection. (2010). *U.S.EPA. guidelines for groundwater classification under the EPA groundwater protection strategy*, U.S. Environmental Protection Agency. </http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/ca/resource/guidance/gw/gwclass.htm > (January. 20, 2013).
13. WHO. (2010). *Guidelines for drinking water quality*, Vol. 3, 2nd Ed., WHO, USA.
14. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2007). *Potable water - the physical and chemical characteristics*, 5th Ed., The National Iranian Standard in 1053, Tehran. (In Persian)
15. Ministry of Energy, Khorasan Razavi Regional Water Authority.(2010) "Mashhad water supply master plan, future face of the water." </http://khrw.ir/> (January. 10, 2011)
16. Peavy, H. S., and Rowe, D. R. (1985). *Water resources and environmental engineering*, 2nd Ed., Mc-Graw-Hill Pub., New York.