

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

منصوره آتشی<sup>۱</sup>، کامران داوری<sup>۲</sup>، محمد باقر شریفی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(نویسنده مسئول) ۲۶۰۴۲۸۹۴ (۰۵۱) Mansoureh\_atashi@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش ۹۳/۴/۱۶

(دریافت ۹۲/۱۲/۸)

## 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 ۱۴۰۰ 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 مادیسیم، 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 ۱۴۲۰ میزان کمبود روزانه آب در ساعات اوج مصرف در صورت استفاده از منابع بدون محدودیت به ۳۸ درصد خواهد رسید که در صورت بهره‌جستن 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

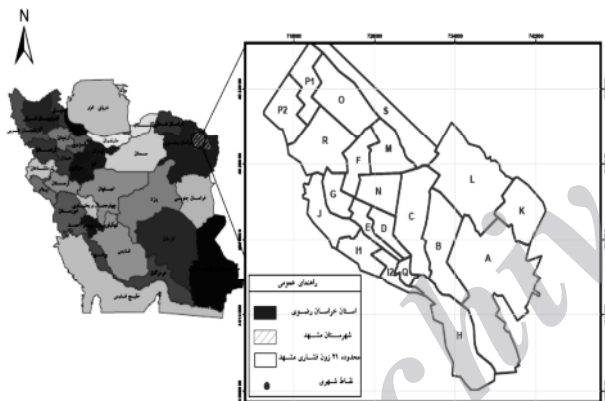
ذخایر آبی فراهم شود و در نتیجه آن، راندمان برنامه‌ریزی و

مدیریت منابع آب بهبود یابد.

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی، پرجمعیت‌ترین شهر کشور بعد از پایتخت است. این شهر هم‌اکنون 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

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 بالا رفتن 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 به علت 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

حوضه آبریز کشف رود که یکی از زیرحوضه‌های قره‌قوم است، قرار دارد. حوضه آبریز کشف رود، بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع است و رودخانه کشف رود، مهم‌ترین رودخانه‌ای است که در آن جریان دارد. ارتفاع شهر از سطح دریا ۹۸۵ متر است. این شهر با گستره‌ای معادل ۳۶۵ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی  $35^{\circ} 43'$  تا  $59^{\circ} 15'$  تا  $36^{\circ} 06'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $37^{\circ} 08'$  شمالی قرار گرفته است. شیب عمومی شهر از غرب به شرق و از جنوب به شمال است [۶]. میزان این شیب از سمت جنوب به شمال کاهش یافته به طوری که در قسمت‌های شمالی، زمین دارای شیب بسیار ملایمی است. با توجه به اختلاف ارتفاع مذکور و با توجه به استاندارد صنعت آب در خصوص محدوده فشاری شبکه توزیع شهری، لزوم استفاده از زون‌بندی در سطح شهر کاملاً مشخص است. بر اساس مطالعات انجام شده از سوی دفتر فنی آب و فاضلاب مشهد و مطالعات طرح جامع، شهر مشهد تا سال ۱۴۲۰ به ۲۰ زون تقسیم شده که هر کدام از این زون‌ها دارای مخزن مستقل بوده و محدوده خود را توسط یک شبکه مجزا با در نظر گرفتن نیاز آبی آن تحت پوشش قرار می‌دهند [۷]. شکل ۱ موقعیت شهر و محدوده کلی زون‌های فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت شهر و محدوده کلی زون‌های فشاری

## ۱-۲- ساخت مدل تلفیقی آب شرب مشهد

برای بررسی وضعیت تأمین آب شرب شهر مشهد در افق طرح بلندمدت لازم است اطلاعات و داده‌های مربوط جمع‌آوری و پردازش و پس از انجام محاسبات لازم، اقدام به مدل‌سازی شود. 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 سطحی و زیرزمینی؛

مرحله سوم: تهیه مدل سیستم منابع آب به‌عنوان ابزار مدیریتی و تصمیم‌گیری؛

مرحله چهارم: راه‌اندازی سیستم پشتیبانی و تصمیم‌گیری.

چندان دور آبدهی این سد کاهش چشمگیری خواهد داشت. همچنین دشت مشهد یکی از بحرانی‌ترین دشت‌های کشور از لحاظ کمی و کیفی است، لذا در آینده نزدیک تامین آب شرب شهر مشهد با مشکل جدی مواجه خواهد بود.

مدل‌های ریاضی جامع کمی-کیفی آب، ابزار مناسبی برای تحلیل گزینه‌های متعدد مدیریت منابع آب به‌شمار می‌روند. روش‌های مختلفی برای استراتژی‌های بهره‌برداری و تخصیص در مدل‌های شبیه‌سازی حوضه‌ای وجود دارد [۱]. مادسیم<sup>۱</sup> یک مدل ریاضی تخصیص آب حوضه‌ای است که در آن از روش تخصیص بر پایه اولویت<sup>۲</sup> و از یک مدل بهینه‌سازی برای ارضای اولویت‌های مطلوب بهره‌برداری، استفاده شده است [۲]. در مادسیم سناریوهای مختلف بهره‌برداری با تغییر اولویت‌های نسبی تأمین نیازهای مختلف قابل شبیه‌سازی است. این مزیت به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد که نیازهای مختلف آبی را رتبه‌بندی کند [۳]. مادسیم یک سیستم پشتیبانی تصمیم مدیریت حوضه رودخانه جامع برای تحلیل برنامه‌ریزی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت است [۴ و ۵].

در این تحقیق، منابع سطحی و زیرزمینی تأمین آب شرب شهر مشهد از نظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا به دسته‌بندی کیفی منابع بر اساس شاخص کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و آیین‌نامه‌ها و استانداردهای آب شرب پرداخته شد. بر این اساس منابع به سه دسته کیفی منابع بدون محدودیت، با محدودیت متوسط و محدودیت بالا برای شرب طبقه‌بندی شدند. بررسی کمی منابع شرب حاکی از آن است که با بهره‌جستن از منابع بدون محدودیت برای شرب، شهر مشهد با کسری روزانه به میزان ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه مواجه خواهد شد. بر اساس مطالعات طرح جامع، شهر مشهد تا سال ۱۴۲۰ به ۲۰ زون تقسیم می‌شود که این زون‌ها دارای مخزن مستقل بوده و محدوده خود را توسط یک شبکه مجزا تحت پوشش قرار می‌دهند. زون‌های فشاری از لحاظ تقاضای شرب و منابع تأمین بررسی شده و بعد از یکپارچه‌سازی در محیط نرم‌افزار مادسیم، مدل‌سازی شدند. این مدل بر اساس سال ۱۳۹۰ کالیبره شده و سپس با در نظر گرفتن اقدامات مؤثر بر وضعیت منابع آبی منطقه و وضعیت کیفی منابع سناریوهای مختلف برای دوره بلندمدت ۳۰ ساله تدوین شد.

## ۲- منطقه مطالعاتی

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی با جمعیتی بالغ بر ۲۷۶۶۲۴۲ نفر (بر طبق سرشماری سال ۱۳۹۰) دومین شهر بزرگ و پرجمعیت ایران پس از تهران است. این شهر تقریباً در مرکز

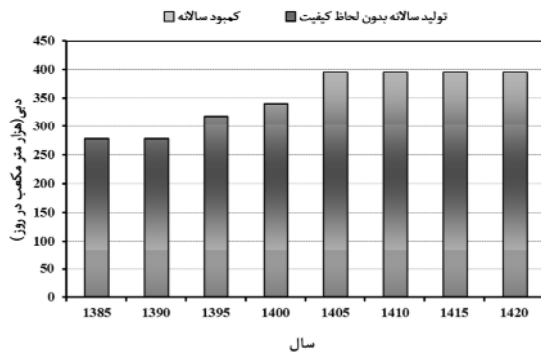
<sup>1</sup> Modeling and Simulation (MODSIM)

<sup>2</sup> Priority Based Allocation

## ۲-۲- شناسایی سیستم منابع آب

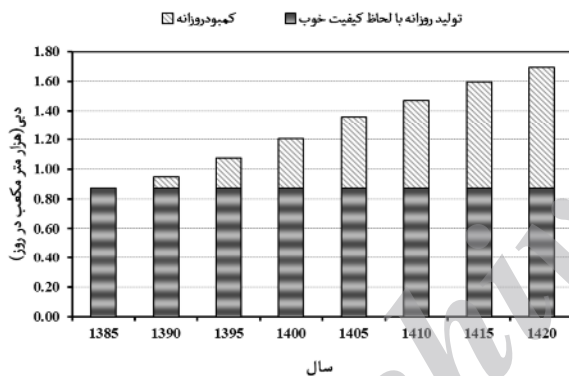
منابع آب شرب در کشور محدود بوده و این محدودیت در شرق، شمال شرقی و جنوب شرقی کشور محسوس تر می‌باشد. شهر مقدس مشهد همه ساله میزبان حدود ۱۵ میلیون نفر زائر در ماه است که عمدتاً حضور آنان در زمان اوج مصرف است. بررسی‌های به عمل آمده در خصوص نحوه توزیع آب در شهرهای سیاحتی و زیارتی حکایت از افزایش مصرف آب در 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 ۱۴۰ درصد 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، طوق و کارده تأمین می‌شود. دو سد طوق 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 طوق و کارده تأمین 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 ۳ کسری آب شرب شهر مشهد را به صورت سالانه در مقاطع پنج ساله 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 ۳- میزان کسری سالانه آب با منابع بدون محدودیت برای شرب

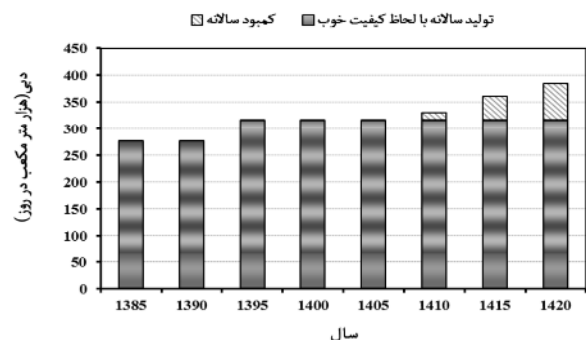
۵ مقدار کسری روزانه آب را نشان می‌دهد. در صورت تأمین آب شرب از منابع بدون لحاظ کیفیت، این شهر از سال ۱۴۰۰ به میزان ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه و در صورت استفاده از چاه‌های بدون محدودیت برای شرب، از سال ۱۳۹۰ با کسری معادل ۰/۹ مترمکعب بر ثانیه در پیک روزانه مواجه خواهد بود.



شکل ۴- میزان کسری روزانه بدون لحاظ کیفیت

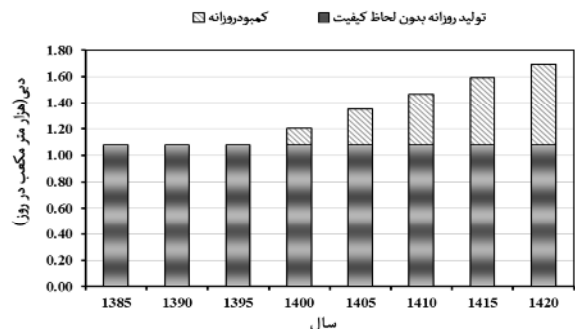
## ۲-۳- بررسی کیفی داده‌ها و دسته‌بندی کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی

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 ۲- میزان کسری سالانه آب بدون لحاظ کیفیت

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.



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

۲-۳-۱- مدل کیفی منابع آب زیرزمینی و سطحی به منظور ساخت مدل کیفی پس از مقایسه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی منابع آب با آیین‌نامه‌های آب شرب (WHO و ۱۰۵۳) 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<sup>۲</sup> 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

این مطالعات، استاندارد ۱۰۵۳ تجدید نظر پنجم سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup> 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

<sup>2</sup> Marcros

<sup>1</sup> World Health Organization (WHO)

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

نام	واحد	تحقیقات صنعتی (تجدید نظر ۱۰۵۳)		وزارت نیرو		WHO		EPA	USA
		حد مجاز	حد مطلوب	حد مجاز	حد مطلوب	حد راهنما	حد راهنما	حد راهنما	حد راهنما
کدورت	NTU	-	۵	-	-	۵	۵	۵	>۹۵/۰.۵
رنگ	TCU	-	۱۵	-	-	۱۵	۱۵	۱۵	-
سولفات	mg/L	-	۲۵۰	۴۰۰	۲۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰
سدیم	mg/L	۲۰۰	۲۰۰	-	-	۲۰۰	۲۰۰	-	-
آلومینیوم	µg/L	۱۰۰	۲۰۰	-	-	۲۰۰	۳۰۰	۲۰۰	-
نیترات	mg/L	-	۵۰	۴۵	۰/۰	۵۰	۵۰	۱۰	۴۵
آهن	µg/L	۳۰۰	-	۱۰۰	-	۳۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰
منگنز	µg/L	۱۰۰	۴۰۰	۵۰	۵۰	۵۰۰	۴۰۰	۵۰	۵۰
نقره	µg/L	-	۱	-	۵۰	-	-	۱۰	۵۰
آرسنیک	µg/L	-	۱۰	-	۵۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵۰
کادمیم	µg/L	-	۳	-	۱۰	۳	۱۰	۳	۱۰
سیانور	µg/L	-	۷۰	-	۵۰	۷۰	-	۱۰۰	۲۰۰
سرب	µg/L	-	۱۰	۰/۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵
تتراکلرید کربن	µg/L	-	-	-	-	۴	-	۴	۵
لیندان	µg/L	-	۲	-	-	۳	-	۳	۰/۲
سختی	CaCO <sub>3</sub>	۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	-
TDS	mg/L	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰

جدول ۲- طبقه بندی پیشنهادی برای منابع آب خام سطحی و زیرزمینی (IWQI)

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

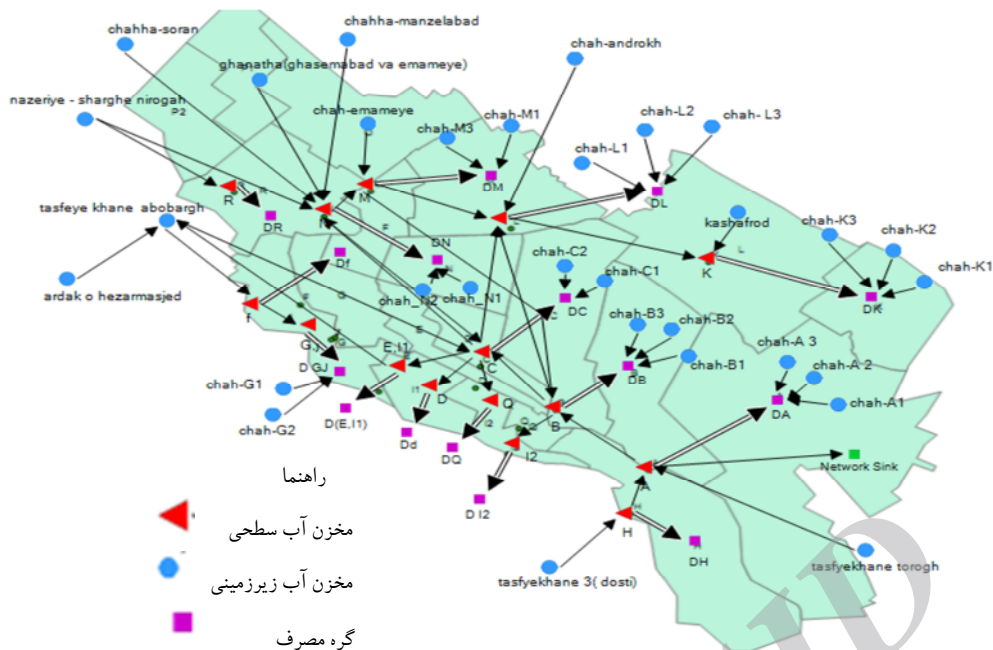
گزارش شد. نتایج دسته بندی کیفی چاهها داخل شهر نشانگر آن است که زون A دارای بیشترین تعداد چاه با محدودیت بالا است که از لحاظ آبدهی مقادیر قابل توجهی دارند. همچنین تمامی چاههای خارج از شهر در دسته بدون محدودیت برای شرب قرار دارند. برای دسته بندی کیفی منابع آب سطحی به بررسی پارامترهای کیفی خروجی تصفیه خانه ها 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 به عنوان نزدیک ترین منبع آب سطحی در دسترس، نمی توان پیش بینی سد بزرگی را در محدوده نزدیک به شهر مشهد داشت و دو پروژه انتقال آب از سد اردک و ارتفاعات هزار مسجد در حال حاضر تنها پروژه های در دست مطالعه و اجرا می باشند. همچنین به دلیل قرارگیری دشت مشهد در محدوده ممنوعه، امکان حفر چاه جدید در این دشت بحرانی وجود ندارد و با توجه به شواهد موجود، ظرفیت آبدهی چاه های دشت مشهد، اعم از شرب و غیر شرب طی سال های 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. به طوری که تا حد امکان با منابع موجود، کلیه نیازهای کمی و کیفی آب شرب شهر برطرف شود و



شکل ۶- پراکنندگی کیفی چاه های داخل شهر

وضعیت های 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 به عنوان حدود تعیین کننده در دسته بندی لحاظ شدند به طوری که اگر مقادیر بالا از حدود مجاز تجاوز کنند، بدون در نظر گرفتن امتیاز کل، منبع در دسته منابع با محدودیت بالا طبقه بندی می شود. شکل ۶ پراکنندگی کیفی چاه های داخل شهر را نشان می دهد. با این برنامه دسته کیفی ۳۴۵ چاه داخل و خارج مشهد مشخص شد و مقادیر پارامترهای بحرانی و بالاتر از حد مجاز





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 به صورت 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 تأمین 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

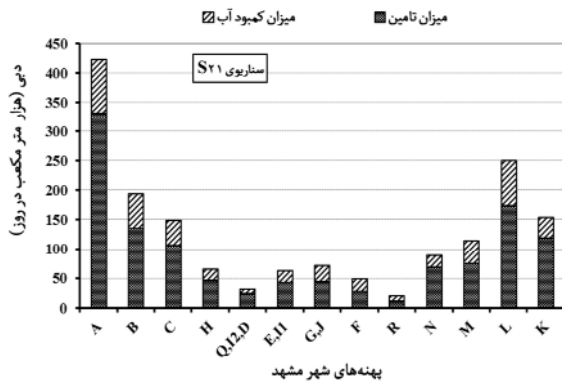
تدوین سناریوها بر اساس اهداف مدل‌سازی انجام می‌گیرد. در این تحقیق به بررسی وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی در دو حالت لحاظ و عدم لحاظ سیاست‌های گوناگون مدیریت کمی آب و طرح‌های مختلف توسعه منابع آب تعریف شده است. تمامی فرضیات و سیاست‌های به‌کار رفته در مدل تا سال ۱۳۹۰ یکسان بوده و در سال ۱۴۲۰ (که دوره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

جدول ۳- بررسی اجمالی سناریوهای توسعه در منطقه مورد مطالعه

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

### ۳-۴-۲- 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 ۱۲- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S22

### ۲-۵- رقیق‌سازی<sup>۱</sup>

زمانی که برای تأمین آب به منظور 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

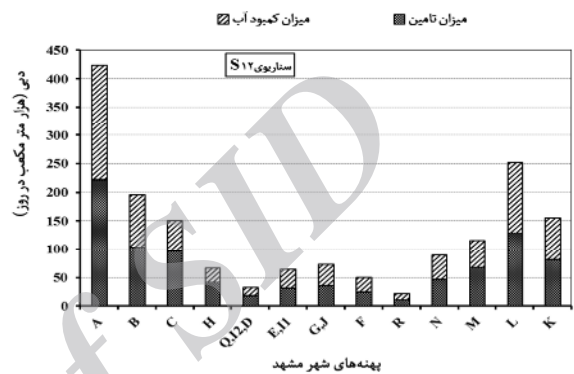
$$C_m = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

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

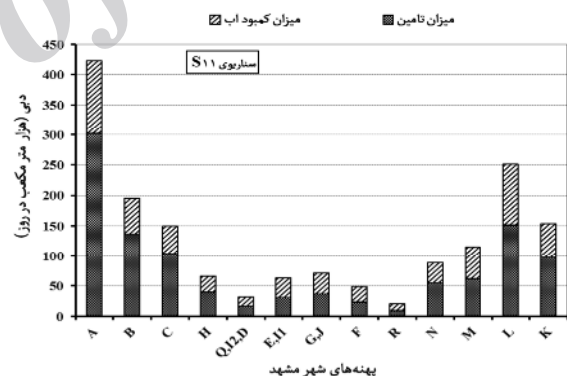
بررسی مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی منابع آب مشهد مشخص می‌کند که چهار پارامتر نیترات، سختی، مواد جامد محلول و سولفات در کیفیت آب این شهر مؤثر هستند. جدول ۴ مقادیر بحرانی این پارامترهای اساسی را در سه دسته کیفی برای زون‌های مختلف نشان می‌دهد.

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.

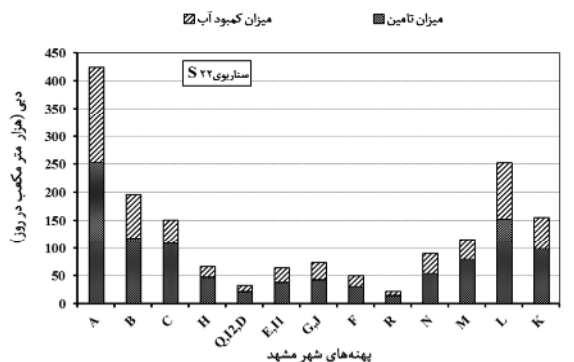
<sup>1</sup> Dilution



شکل ۹- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S11



شکل ۱۰- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S12

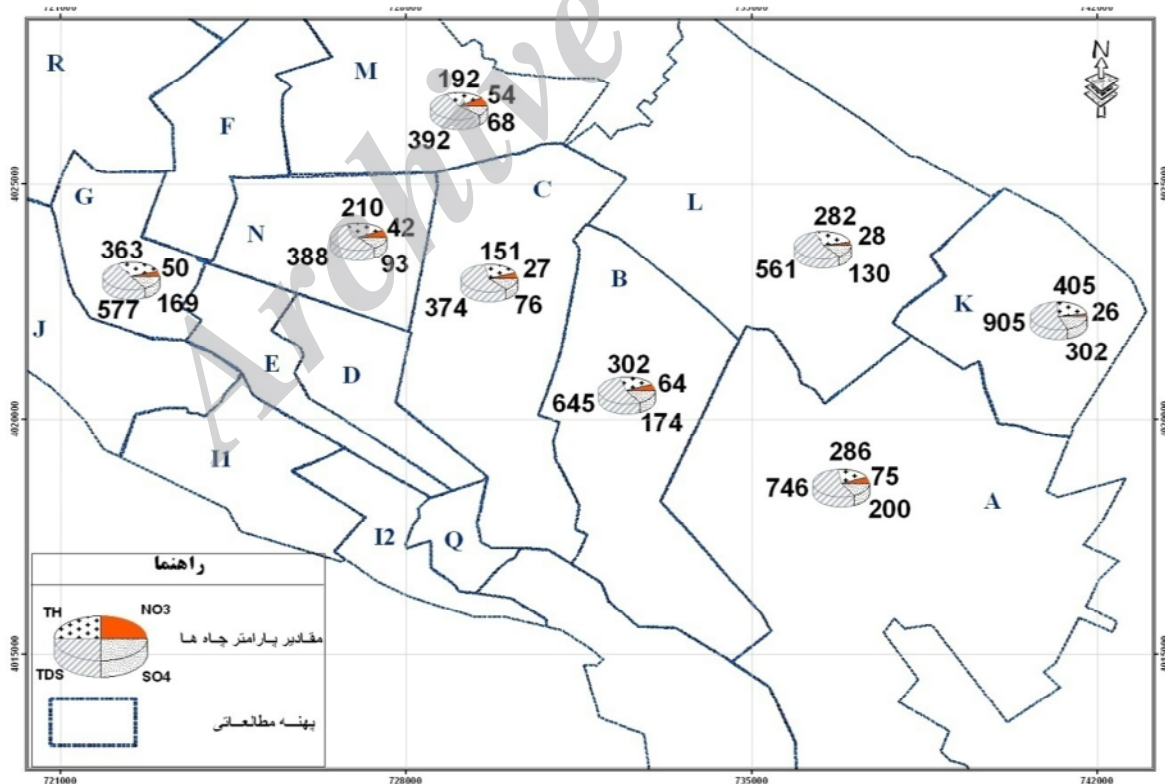


شکل ۱۱- میزان کسری آب در هر زون در افق طرح S21

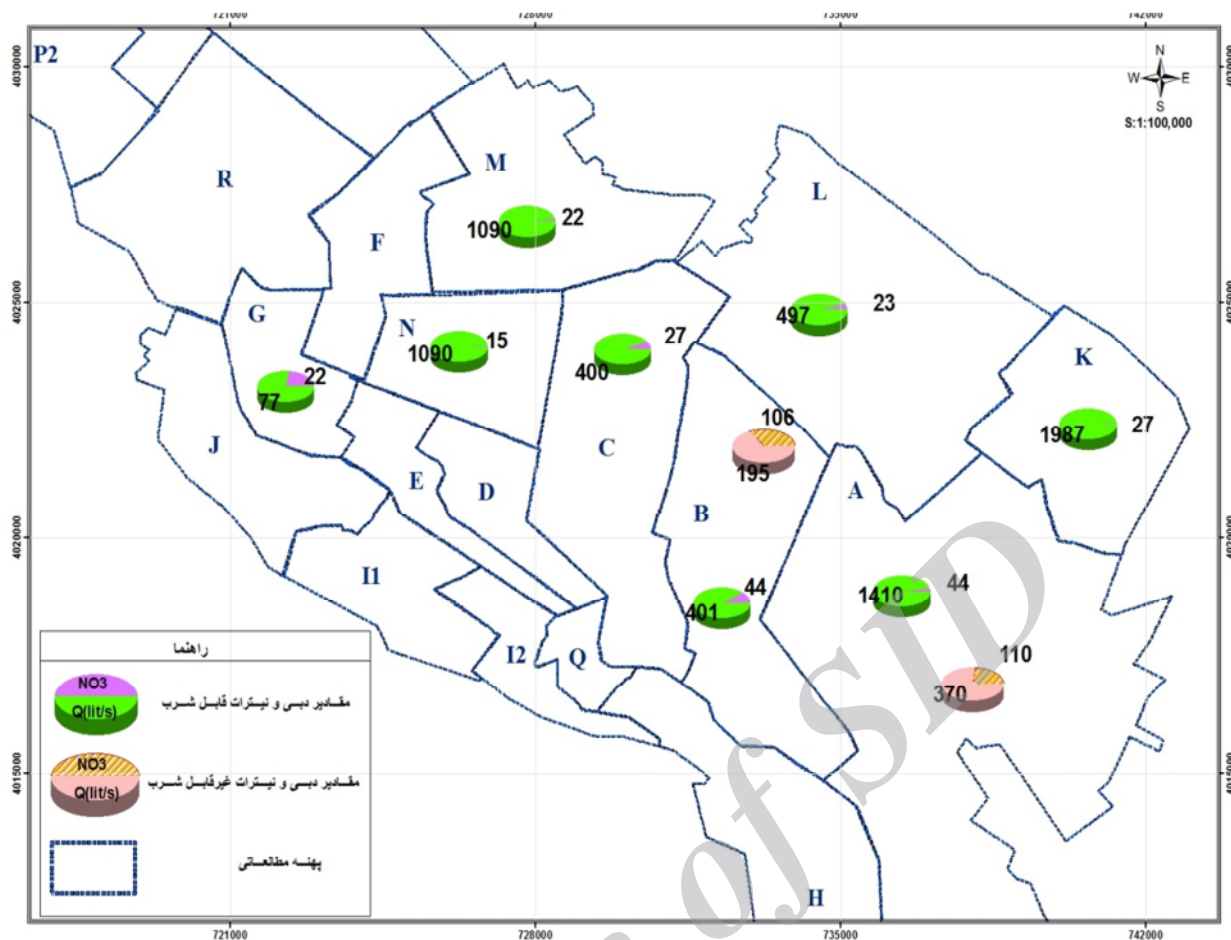


جدول ۴- مقادیر پارامترهای بحرانی در سه دسته کیفی برای زون‌های مختلف

Q(lit/s)	Tds (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	TH	NO <sub>3</sub> (mg/L)	دسته کیفی	پهنه های فشاری
۶۶۴	۹۳۷	۲۹۴	۳۵۸	۱۱۱	با محدودیت بالا	A
۱۸۵	۷۱۹	۱۵۰	۲۵۲	۶۱	با محدودیت متوسط	
۴۸۶	۴۹۷	۹۱	۲۰۱	۳۲	بدون محدودیت	
۱۹۴	۸۳۲	۲۵۳	۴۲۲	۱۰۶	با محدودیت بالا	B
۱۸۳	۶۵۷	۱۷۰	۳۱۶	۶۶	با محدودیت متوسط	
۲۱۸	۴۷۲	۱۱۰	۱۸۶	۲۶	بدون محدودیت	
-	-	-	-	-	با محدودیت بالا	C
۹۱	۴۱۴	۶۷	۲۳۸	۶۹	با محدودیت متوسط	
۳۰۹	۳۶۳	۷۹	۱۲۶	۱۵	بدون محدودیت	
-	-	-	-	-	با محدودیت بالا	M
۴۱	۴۳۸	۷۷	۳۰۱	۱۱۳	با محدودیت متوسط	
۷۰	۳۶۶	۶۳	۱۲۹	۲۰	بدون محدودیت	
۱۰۱	۵۱۳	۱۶۰	۳۲۰	۶۸	با محدودیت بالا	N
-	-	-	-	-	با محدودیت متوسط	
۱۵۰	۳۰۴	۴۸	۱۳۷	۲۶	بدون محدودیت	
۱۶۶	۱۵۳۵	۵۹۹	۶۶۴	۲۹	با محدودیت بالا	K
۱۰۸	۹۲۶	۲۹۵	۴۳۸	۲۸	با محدودیت متوسط	
۲۳۹	۴۶۰	۱۰۱	۲۱۱	۲۵	بدون محدودیت	
۱۷	۶۷۹	۲۲۱	۴۲۷	۶۶	با محدودیت بالا	G
-	-	-	-	-	با محدودیت متوسط	
۱۵	۴۵۸	۱۰۸	۲۸۸	۳۱	بدون محدودیت	
۳۲	۸۲۷	۱۳۰	۴۸۶	۸۴	با محدودیت بالا	L
۶۷	۶۹۵	۱۷۱	۴۲۰	۲۶	با محدودیت متوسط	
۱۶۵	۴۵۵	۱۱۴	۱۸۷	۱۸	بدون محدودیت	



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



شکل ۱۴- نتایج نهایی ترقیق با منابع سطحی

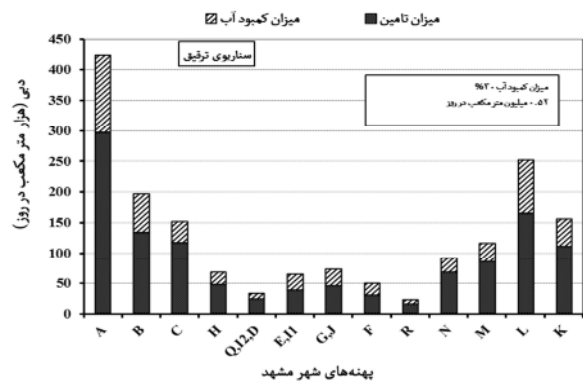
جدول ۵- نتایج سناریوها در پهنه‌های فشاری

سناریو	پهنه فشاری با بیشترین میزان کسری	مقدار (درصد)	پهنه فشاری با کمترین میزان کسری	مقدار (درصد)
S <sub>11</sub>	E, F, R	۵۰	A	۲۹
S <sub>12</sub>	G, J	۵۱	C	۳۶
S <sub>21</sub>	R	۴۱	Q, I <sub>2</sub> , D	۲۱
S <sub>22</sub>	E, I <sub>1</sub> , G, J	۴۱	C, H	۲۸
S <sub>31</sub>	F, E, I <sub>1</sub>	۴۰	C	۲۲

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 تأمین کمی و کیفی شرب زون‌ها در سال ۱۴۲۰ در شکل ۱۵ آمده است. جدول ۵ نتایج سناریوها را در پهنه‌های فشاری نشان می‌دهد.

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 بهره‌گرفته 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 به دلیل عدم دسترسی منابع آب سطحی و یا چاه‌های خارج شهر با کیفیت خوب این مقادیر غیرقابل استفاده برای شرب خواهد بود. شکل ۱۴

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 این رو 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 به خصوص فاضلاب‌های تصفیه شده، لازم است بهسازی شبکه خطوط جمع‌آوری چاهها و آرایش خطوط شبکه توزیع شرب به منظور تأمین یکنواخت شرب صورت گیرد. به عبارت 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.



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

### ۴- مراجع

1. Karamouz, M., Szidarovsky, F., and Zahraei, B. (2003). *Water resources systems analysis*, 2<sup>nd</sup> Ed., Lewis Publishers, USA.
2. Dinar, A., and Resegant, 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, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> Ed., WHO, USA.
14. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2007). *Potable water - the physical and chemical characteristics*, 5<sup>th</sup> 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*, 2<sup>nd</sup> Ed., Mc-Graw-Hill Pub., New York.