

واژه‌های کلیدی: حوزه‌ی آبخیز، تغذیه‌گرایی، آبخیزداری، مدل SWAT و بهره‌برداری از مخزن

ارزیابی اثرات بهترین راهکارهای مدیریتی در حوزه‌ی آبخیز بر بهره‌برداری کمی و کیفی مخزن

#### مقدمه

تغذیه‌گرایی در مخازن از مهم‌ترین پدیده‌های تاثیر گذار در کیفیت آب است که در اثر ورود مواد مغذی به ویژه فسفر و افزایش بیش از حد جلبک‌ها در آب رخ می‌دهد و افزون بر مشکلات کیفیت آب برای مصرف‌کننده، حیات سایر آبزیان را تهدید می‌کند. تغییرات نامطلوب کیفیت آب در سدها و بروز پدیده‌ی تغذیه‌گرایی عمدتاً تحت تاثیر ویژگی‌های حوزه‌ی آبخیز و میزان بار مواد مغذی ورودی از حوزه‌ی آبخیز بالادست مخزن سد می‌باشد. برخورد با مشکل تغذیه‌گرایی بدون در نظر گرفتن حوزه‌ی آبخیز و مواد آلاینده در مقیاس آن امکان‌پذیر نیست. رویکرد حوزه‌ای در مسایل مدیریت کیفی منابع آب بر مبنای این مفهوم است که بهترین راه حل بسیاری از مشکلات کیفیت آب نظیر تجمع آلاینده‌ها و مشکلات کیفی رودخانه‌ها و مخازن سدها، بررسی و شناسایی منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای در سطح حوزه‌ی آبخیز است. فرآیند TMDL<sup>۴</sup> یکی از اجزای ضروری در رویکردهای مبتنی بر کیفیت آب در مدیریت حوزه‌ی آبخیز است که در آن میزان کاهش آلاینده‌ها جهت رسیدن به استانداردها را معین کرده و برای آن اقدام‌های کنترلی تعیین و اجرا می‌شود. در این راستا TMDL مقدار بیشینه‌ی بار مواد مغذی از حوزه تعریف می‌شود که مخزن سد آن را دریافت کند و شرایط تغذیه‌گرایی آن از حد میانگین (مزوتروفیک) فراتر نرود.

کنترل و کاهش بار منابع آلاینده حوزه از راه اعمال بهترین راهکارهای مدیریتی<sup>۵</sup> (BMP) قابل انجام است. BMP عبارت است از کارآمدترین روش‌ها و یا ترکیبی از روش‌های شناسایی شده برای کنترل منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای که در سطح حوزه‌ی آبخیز اعمال می‌شوند. راهکارهای مدیریتی به صورت سازه‌ای نظیر احداث تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، حوضچه‌های رسوب گیر، برکه‌های نگهدارنده<sup>۶</sup> و یا رسوب گیر محافظ<sup>۷</sup> و یا غیرسازه‌ای نظیر اصلاح کاربری اراضی، افزایش پوشش گیاهی، تغییر الگوی کشت و یا آموزش عمومی تقسیم بندی می‌شوند.

محمد کارآموز<sup>۱</sup>، آزاده احمدی<sup>۲</sup> و مسعود طاهریون<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۶

#### چکیده

یکی از مهم‌ترین اهداف احداث سدها، تامین نیازهای آبی پایین دست حوزه‌ی آبخیز با کمیت و کیفیت مطلوب است. بروز پدیده‌ی تغذیه‌گرایی در مخزن ناشی از بار مواد مغذی حوزه‌ی آبخیز بالا دست موجب کاهش کیفیت آب مخزن می‌شود. از سوی دیگر، کاهش بار مواد مغذی حوزه‌ی آبخیز در راستای تضمین سطح مطلوب کیفیت آب مخزن می‌تواند موجب کاهش رواناب ورودی به مخزن سد شود که ممکن است اهداف کمی تامین نیاز آبی پایین دست سد را به مخاطره بیندازد. در این مقاله، از مدل شبیه‌سازی حوزه‌ی آبخیز SWAT برای ارزیابی اثرات اجرای بهترین راهکارهای مدیریتی در کاهش بار فسفر ورودی و کاهش تغذیه‌گرایی مخزن سد ستارخان در حوزه‌ی آبخیز رودخانه‌ی اهرچای در استان آذربایجان شرقی به همراه تامین نیاز آبی پایین دست با کمینه‌سازی هزینه‌های اجرایی استفاده شده است. بمنظور ارزیابی اثرات بهترین راهکارهای مدیریتی، سناریوهای گوناگون در قالب ترکیب گزینه‌های گوناگون در حوزه‌ی آبخیز تعریف شده است. میزان بار آلودگی فسفر کل ورودی به مخزن در سناریوهای گوناگون شبیه‌سازی شده و اثر این بار به وسیله‌ی مدل چاپرا در مخزن سد تخمین زده می‌شود. بررسی تامین نیازهای پایین دست با توجه به رواناب ورودی شبیه‌سازی شده به مخزن از مدل قوانین محدود کننده برای بهره‌برداری مخزن، استفاده شده است. سناریوهای گوناگون توسعه داده شده با توجه به هزینه‌های اجرایی، اطمینان‌پذیری تامین نیاز آبی و شاخص غلظت فسفر کل در مخزن ارزیابی و رتبه‌بندی شده‌اند.

۱- نویسنده‌ی مسئول و استاد دانشکده عمران پردیس فنی دانشگاه تهران

karamouz@ut.ac.ir

۲- استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

aahmadi@cc.iut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران

taherion@ut.ac.ir

4- Total Maximum Daily Load (TMDL)

5- Best Management Practices (BMP)

6- Detention Pond

7- Filter buffer strip

SWAT2000 و مقایسه‌ی سناریوهای گوناگون مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند. سای و یانگ [۷] استراتژی‌های گوناگون کاهش بار آلودگی غیرنقطه‌ای فوسفور ورودی به مخزن را بر اساس شاخص TMDL با استفاده از مدل BASINS برای مخزن Fei- Tsui در تایوان مورد بررسی قرار داده است. کارآموز و همکاران [۸] مدل SWAT را برای حوزه‌ی آبخیز رودخانه اهرچای در آذربایجان شرقی در تخمین بار نیتروژن و فوسفور حوزه‌ی آبخیز به کار برده و نتایج آن را با نتایج بدست آمده از روش‌های تجربی مورد مقایسه و تحلیل قرار دادند.

یکی دیگر از اهداف در مدیریت حوزه‌ی آبخیز، تامین نیاز آبی پایین دست سدها است. پیشینه‌ی مطالعات انجام شده برای توسعه‌ی قوانین بهره‌برداری و مدیریت منابع آب بسیار گسترده است. با وجود مطالعات زیادی که در مورد بهره‌برداری از مخزن وجود دارد، بهره‌برداری از مخزن در شرایط خشکسالی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته و پژوهشگران کم‌تری به آن پرداخته‌اند.

در زمان بهره‌برداری در شرایط عادی، هنگامی که جریان ورودی به مخزن، به میزان کافی باشد، تامین اهداف بهره‌برداری از مخزن با مشکل روبه‌رو نخواهد شد. در این شرایط، ساده‌ترین سیاست بهره‌برداری از مخزن، سیاست معروف به SOP<sup>۳</sup> می‌باشد. در این سیاست خروجی تابعی از آب در دسترس می‌باشد، به این صورت که اگر آب در دسترس کم‌تر و یا برابر با مقدار هدف باشد، کل آب از مخزن خارج می‌شود و اگر آب در دسترس بیش از نیاز باشد، مقدار مازاد در مخزن نگه داشته می‌شود تا پس از پر شدن مخزن از آن سرریز کند (لاکس و همکاران [۱۰]). تو و همکاران [۱۲] قوانین محدودکننده را برای یک سیستم ذخیره‌ی آب در مقیاس بزرگ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح، ضرایب جیره‌بندی برای کاربردهای عمومی و کشاورزی بدست آمده است و بر اساس آن میزان خروجی از مخزن در راستای کاهش شدت خشکسالی تعیین شده است. ایمن [۱] از این روش در تعیین قوانین محدودکننده در زمان خشکسالی برای سد ستارخان استفاده نمود.

دراپر و لاند [۶] در مطالعات خود نشان داده‌اند که بکارگیری قوانین محدودکننده جهت بهره‌برداری از ذخایر مخزن بستگی به ایجاد یک تعادل میان خروجی مفید از مخزن و مقدار ذخیره‌ی آب در مخزن دارد. این عملکرد با یک نگرش تحلیلی بر قوانین محدودکننده و بهره‌برداری از مخزن بدست آمده است. ایشان در این مطالعه سه نوع تابع متفاوت از نوع درجه‌ی دوم، درجه‌ی سوم و تابع توانی را برای توابع سود ناشی از خروجی آب از مخزن و سود ناشی از ذخیره‌ی آب در مخزن در نظر گرفتند. تو و همکاران [۱۲] از یک روش جدید قوانین محدودکننده برای بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه در دوره‌های خشکسالی استفاده کردند. آن‌ها افزون بر ضرایب جیره‌بندی برای کاربردهای گوناگون، منحنی فرمان بهینه‌ی

در این مطالعه چند روش به عنوان بهترین راهکارهای مدیریتی برای کاهش بار آلاینده‌ها در حوزه‌ی آبخیز استفاده شده است که در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

کاهش بار آلاینده‌های نقطه‌ای: در حوزه‌ی آبخیز بارهای نقطه‌ای عمدتاً ناشی از فاضلاب نواحی شهری و روستایی بوده و در صورت مدیریت صحیح این بارهای آلاینده با احداث تصفیه‌خانه و جلوگیری از تخلیه‌ی پساب آن‌ها به رودخانه، مقدار بار فوسفور ورودی به مخزن کاهش چشمگیری خواهد داشت.

احداث برکه‌های نگهدارنده: برکه‌ی نگهدارنده شامل یک برکه‌ی دائمی است که به عنوان یک نگهدارنده‌ی رواناب برای زمان معینی عمل می‌نماید و فرایندهای بیولوژیکی و رسوب‌گذاری که در این برکه‌ها انجام می‌شود، موجب کاهش بار مواد مغذی می‌گردد.

رسوبگیرهای محافظ: رسوبگیرهای محافظ، در حاشیه‌ی منابع آبی (رودخانه، دریاچه و سدها) از گیاهان چمنی متراکم برای به تله انداختن رسوبات و مواد مغذی و آلاینده همراه آن‌ها ایجاد می‌شود و معمولاً عرض آن‌ها از ۱۰ تا ۳۰ متر متغیر است.

آبراهه‌ی چمنی: آبراهه‌ی چمنی یک آبراهه‌ی طبیعی یا مصنوعی است که از گیاه پوشیده شده و در جریان‌های شدید بدون فرسایش رواناب را عبور می‌دهد. این آبراهه افزون بر کاهش اوج جریان موجب کاهش بار مواد مغذی نیز می‌شود.

از اهداف رویکرد حوزه‌ای در مدیریت کیفی منابع آب شناسایی موثرترین و کم‌هزینه‌ترین راهکارهای کنترلی جهت رسیدن به سطح مطلوب استانداردهای کیفیت آب است.

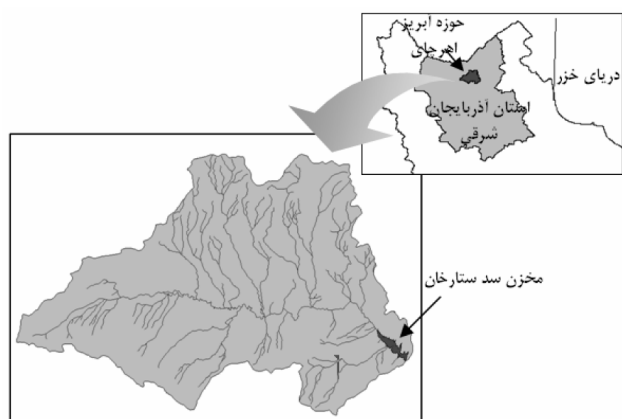
مدل‌های شبیه‌سازی حوزه‌ی آبخیز نظیر SWAT به همراه یک مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن در تعیین اثرات بار آلودگی بر کیفیت آب کاربرد ویژه‌ای دارد. میزان تاثیر اجرای راهکارهای مدیریتی در قالب یک فرآیند TMDL نیز از راه‌چنین ابزاری قابل تعیین خواهد بود. راهکارهای مدیریتی بایستی با نگرش حوزه‌ای جهت کاهش اثر بار مواد مغذی در مخزنی که در شرایط مغذی است و یا پیشگیری و نگهداری برای مخزنی که در شرایط الیگوتروفیک<sup>۱</sup> یا مزوتروفیک<sup>۲</sup> است، ارایه گردد. راهکارهای مدیریتی با توجه به سهم پارامترهای تاثیرگذار و تشدیدکننده در راستای کاهش بار مواد مغذی ورودی به مخزن می‌باشد.

رویکرد حوزه‌ای در مدیریت کیفی منابع آب و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی حوزه‌ی آبخیز و کیفی مخزن در برخی از پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته است. پولرت و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل SWAT منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای نترات را در یک مقیاس میانگین حوزه‌ی کوهستانی شبیه‌سازی کرده است. کاوان و شوامیکر [۵] برای کاهش بار فوسفور ورودی به مخزن Cannonsville در بالادست شهر نیویورک بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) در کشاورزی را با استفاده از مدل

1- Oligotrophic

2- Mesotrophic

3- Standard Operation Policy



شکل ۱ - موقعیت سد ستارخان و حوزه آبخیز رودخانهی اهرچای در استان آذربایجان شرقی

در این حوزه آبخیز به دلیل عدم اجرای برنامه های آبخیزداری و کنترل مواد آلاینده در سطح حوزه که عمده ترین این آلاینده ها شامل پساب کشاورزی، شهر، روستاها و فضولات دامی است، کیفیت آب مخزن کاهش یافته و مشکلاتی را در تامین کیفیت لازم برای کاربردهای گوناگون شهری، صنعتی و کشاورزی ایجاد نموده است.

### مدل SWAT، مدل شبیه ساز حوزه آبخیز

واژه SWAT<sup>۱</sup> معادلی برای عبارت ابزار ارزیابی آب و خاک به وسیله روابط آب- خاک می باشد. این مدل در مقیاس حوزه آبخیز یا حوزه رودخانه به وسیله آرئولند و همکاران [۳] برای سازمان پژوهش های کشاورزی آمریکا (USDA) تدوین گردید. نرم افزار SWAT شبیه سازی پیوسته زمانی با توزیع مکانی برای اجرا در مرحله زمانی روزانه است. این نرم افزار برای ارزیابی اثر مدیریت و اقلیم بر منابع آب رسوب، بازده های شیمیایی و کشاورزی در حوزه های آبخیز و حوزه های رودخانه های بزرگ بکار می رود.

این مدل به داده های ویژه ای درباره آب و هوا، ویژگی های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقدام های مدیریت اراضی در حوزه نیاز دارد و این پروسه های فیزیکی با حرکت و جابه جایی رسوب و چرخه های مواد مغذی شبیه سازی می شوند. در این برنامه، حوزه آبخیز به تعدادی زیر حوزه (Sub-basin) تفکیک می شود و سپس هر زیر حوزه به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۲</sup> (HRU) جزء بندی می شود. چرخه های مواد مغذی، بازدهی رسوب، رشد محصول، راهکارهای مدیریتی، رواناب سطحی و درصد رطوبت آب موجود در خاک برای هر HRU با مقداری برابر

در این مقاله با استفاده از مدل شبیه سازی حوزه آبخیز SWAT حوزه آبخیز رودخانهی اهرچای در بالادست سد ستارخان شبیه سازی شده که با توجه به بار فسفر محاسبه شده از حوزه و ویژگی های مخزن، پتانسیل تغذیه گرای مخزن با استفاده از مدل موازنه جرمی چاپرا [۴] ارزیابی شده است. این مدل به وسیله سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا [۱۵] نیز توصیه شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی بهره برداری از مخزن به وسیله تو و همکاران [۱۲] میزان خروجی در دوره برنامه ریزی تعیین شده که بر اساس آن اطمینان پذیری تامین نیاز آبی پایین دست سد محاسبه شده است. راههای گوناگون در بکارگیری از بهترین راهکارهای مدیریتی حوزه برای کاهش غلظت فسفر در مخزن ارایه شده است که با توجه به اهداف کمی و کیفی ذکر شده، رتبه بندی شده اند و بهترین راهکارهای مدیریتی در بهبود وضعیت کیفی منابع آب در حوزه آبخیز و در راستای نیل به اهداف کمی پیشنهاد شده است.

### مواد و روش ها

در این مقاله بمنظور تعیین سیاست های کنترلی بار آلودگی با نگرش حوزه ای از رویکرد برنامه ریزی چند معیاره بر اساس اهداف بهبود شرایط کیفی مخزن، تامین نیازهای آبی پایین دست سد و کاهش هزینه های اجرای بهترین راهکارهای مدیریتی استفاده شده است. بمنظور ارزیابی حوزه آبخیز در سناریوهای گوناگون مدیریتی از یک مدل شبیه سازی حوزه آبخیز (SWAT) استفاده شده است. با استفاده از نتایج این مدل، اثر بار فسفر ورودی در مخزن بر شرایط تغذیه گرای مخزن شبیه سازی شده است و اثر هر یک از راهکارهای مدیریتی در راستای کاهش بار آلودگی فسفر کل ورودی به مخزن و در نتیجه، تغذیه گرای مخزن بررسی شده است. همچنین بمنظور تخمین اطمینان پذیری تامین نیاز آبی پایین دست سد از یک مدل بهره برداری از سد بر اساس قوانین محدود کننده استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی برای مدیریت سد ستارخان روی رودخانهی اهرچای بکار گرفته شده است. در ادامه توضیحاتی در مورد محدوده مورد مطالعه و مدل های بکار گرفته شده، آمده است.

### مطالعه موردی

حوزه آبخیز اهرچای از زیرحوزه های رودخانهی ارس واقع در شمال غرب ایران است. این حوزه بین مختصات جغرافیایی ۲۰° ۳۸' تا ۴۵° ۳۸' عرض شمالی و ۴۶° ۳۰' تا ۴۷° ۴۰' طول شرقی واقع شده است. در شکل (۱) موقعیت حوزه آبخیز رودخانهی مورد مطالعه و سد ستارخان نشان داده شده است. وسعت این حوزه که از غرب به شرق گسترده شده، ۲۲۳۲ کیلومتر مربع و بیش ترین و کم ترین ارتفاع ۱۸۰۰ و ۱۴۰۰ متر از سطح دریاست. میانگین میزان بارش ۳۲۰ میلیمتر بوده و دبی میانگین ورودی به مخزن سد در ایستگاه هیدرومتری حدود ۲/۹

1- Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

2- Hydrologic Response Unit

$$TMDL = LC = \sum WLA + \sum LA + MOS \quad (3)$$

که در آن مقدار تخصیص یافته به منابع نقطه ای بر حسب کیلوگرم در سال و مقدار تخصیص یافته به منابع آلاینده ای غیر نقطه ای بر حسب کیلوگرم در سال است که با توجه به مدل شبیه سازی SWAT تعیین شده و حاشیه ای ایمنی برای عامل عدم قطعیت است که روش ساده ای محاسبه ای آن به صورت درصدی از مقدار TMDL در نظر گرفته می شود [۱۶]. کاهش بار مواد مغذی نیاز به کنترل منابع آلاینده ای نقطه ای و غیر نقطه ای از راه کنترل تخلیه ای فاضلاب های انسانی و برنامه های آبخیزداری و کنترل مواد مغذی در سطح حوزه ای آبخیز را دارد که با استفاده از بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) قابل انجام است.

### تدوین قانون بهره برداری از مخزن

در زمان محتمل بودن خشکسالی و وقوع آن باید محدودیت هایی در تخصیص آب قابل شد. این محدودیت ها به صورت قوانینی که قوانین محدود کننده<sup>۲</sup> نامیده می شوند، تعیین می گردند. استفاده از قوانین محدود کننده باعث می شود که در برخی موردها، حتی در مواقع وجود آب کافی، آب به کل نیازها تخصیص داده نشود تا آب برای رویارویی با خشکسالی های شدیدتر آتی، ذخیره شود. هدف از این قوانین محدود کننده در بهره برداری، کاهش خسارت و ریسک ناشی از یک کمبود شدید به ازای تقبل دوره های کمبود بیش تر، اما با شدت کم تر است.

تابع هدف این مدل بهینه سازی بیشینه سازی تخصیص به نیازهای آبی است که در چارچوب آن بتوان تا حد امکان اثرات دوره های کم آبی را تخفیف داد. به این ترتیب که تأمین تمامی نیازهای صنعت، شرب و زیست محیطی با عنوان نیاز عمومی، در مرتبه ی نخست و تأمین نیاز کشاورزی در مرتبه ی دوم اهمیت قرار دارند. تابع هدف تدوین شده در این مدل به صورت زیر است:

$$Z = \max \sum_{T=1}^T (RP_t \cdot W_p + RA_t \cdot W_\alpha) \quad (4)$$

که در آن  $RP_t$ : آب تخصیص داده شده به نیاز عمومی،  $RA_t$ : آب تخصیص داده شده به نیاز کشاورزی،  $W_p$  وزن اهمیت تأمین نیاز آبی عمومی و  $W_\alpha$  وزن اهمیت تأمین نیاز آبی کشاورزی است. در این مدل در شرایط عادی، فرض بر آن است که تمامی نیازها تأمین شده و تراز مخزن در تراز برای و یا بالاتر از تراز هدف در مخزن قرار دارد، در مقابل در دوره های کم آبی، زمانی که تراز ذخیره ای مخزن به تراز پایین تر از تراز هدف می رسد و بیش تر از منحنی ذخیره ای ثابت باشد، خروجی از مخزن جهت تأمین نیازها بر اساس مقادیر محرک های تعیین شده کاهش می یابد.

در معادله های بالا با توجه به آن که حجم تراز مخزن در ابتدای هر بازه ی زمانی در کدام سطح تراز واقع شود، یکی از مقادیر دارای

در آن شبیه سازی می شود و سپس به وسیله ی میانگین وزن برای هر زیر حوزه جمع بندی می شود. ویژگی های فیزیکی مثل شیب، ابعاد دسترسی و داده های هواشناسی برای هر زیر حوزه مشخص شده و برای اقلیم هر بخش SWAT از داده های نزدیک ترین ایستگاه به مرکز هر کدام از زیر حوزه ها استفاده می کند. نقشه های مدل رقمی<sup>۱</sup> (DEM)، کاربری اراضی و طبقه بندی خاک جزء ورودی های مدل هستند و کیفیت آن ها تأثیر بسیاری بر نتایج شبیه سازی SWAT دارد. فرسایش، کم آبی، سیلاب، بیابان زایی، شوری آب زیرزمینی، آلودگی آب و کاهش آب های آشامیدنی از مشکلاتی هستند که نیاز به ابزار شبیه سازی آب- خاک را محسوس نموده اند و به کمک این مدل انعطاف پذیر و پیوسته در زمان می توان تغییرات ویژگی های زیست محیطی را شبیه سازی کرد. این برنامه قابلیت تدوین و تحلیل سناریو را با هدف کاهش آلودگی و تعیین میزان سهم بار هر یک از منابع آلاینده فراهم می نماید.

### مدل تغذیه گرایی مخزن

با توجه به تعیین کنندگی عامل فسفر در تغذیه گرایی مخزن سد جهت شبیه سازی اثر بار فسفر ورودی در مخزن از مدل بدون بعد چارپا استفاده شده است. فرضیه های مورد استفاده در این مدل عبارتند از: ۱- برقراری شرایط اختلاط کامل در مخزن ۲- فسفر عامل محدود کننده ی تغذیه گرایی است. ۳- معیار فسفر کل برای تعیین شدت تغذیه گرایی مخزن بکار می رود. مدل چارپا که به عنوان مدل بودجه ای فسفر نیز معروف است، با استفاده از معادله ی موازنه جرمی اثر بار ورودی فسفر به مخزن شبیه سازی می گردد. رابطه ی این مدل به شرح زیر است:

$$V \frac{dp}{dt} = W - Qp - vAp \quad (1)$$

که در آن  $W$  کل بار فسفر ورودی بر حسب کیلوگرم در روز،  $p$  غلظت فسفر کل در مخزن بر حسب کیلوگرم در مترمکعب (۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر)،  $t$  زمان بر حسب روز، نرخ ته نشینی فسفر بر حسب متر بر روز و  $A$  مساحت مخزن بر حسب متر مربع،  $Q$  دبی خروجی از مخزن بر حسب مترمکعب در روز می باشد. معادله ی (۱) در شرایط پایدار به صورت معادله ی (۲) در می آید که در این مطالعه به عنوان شاخص تغذیه گرایی مخزن استفاده شده است.

$$p = \frac{W}{Q + vA} \quad (2)$$

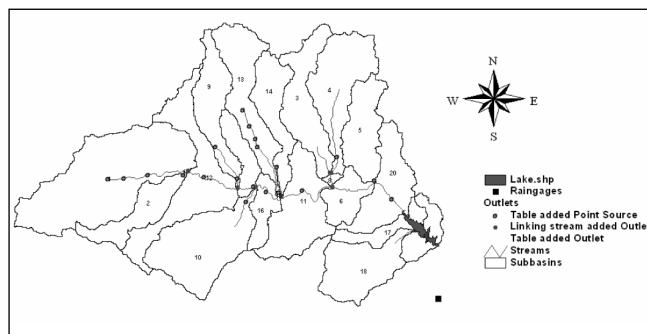
### محاسبه ی بیشینه ی بار روزانه (TMDL)

بیشینه ی بار روزانه (TMDL) در یک حوزه ی آبخیز بر اساس ظرفیت تحمل و کاربری پیکره ی آبی مشخص می شود. در این روش استراتژی های تخصیص بار آلودگی برای منابع آلاینده نقطه ای و غیر نقطه ای مشخص می شود. مقدار TMDL بر اساس معادله ی ۳ محاسبه می شود:

می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، کل حوزه به ۲۰ زیرحوزه و واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم بندی شده است. داده های ورودی مدل SWAT شامل نقشه ی مدل رقم ارتفاعی (DEM)، نقشه ی کاربری اراضی، نقشه ی خاک منطقه و داده های دما و بارش و ویژگی های منابع آلاینده ی نقطه ای است. نقشه ی خاک در ۷ نوع طبقه بندی شده که از ۳ تا ۵ لایه متغیر است. غالب خاک در منطقه از نوع رس و سیلت است که نام فامیلی، زیرگروه و مرتبه ی آن ها بر اساس روش طبقه بندی USDA Soil Taxonomy شامل چهار رده زیر است [۲]:

- 1- Coarse loamy mixed calcareus mesic- Typic Xerofluvent- Entisols
- 2- Fine mixed mesic- Fluventic Xerochrept- Inceptisols
- 3- Fine mixed mesic- Vertic Xerochrept- Inceptisols
- 4- Fine loamy mixed mesic- Typic Xerochrept- Inceptisols

سایر داده ها نظیر پوشش گیاهی و محصولات کشاورزی با توجه به نوع کاربری ها در مدل تعریف شده است. این مدل برای ۴۱ ماه داده از مرداد ۸۱ تا آذر ۸۴ برای پارامترهای دبی و فسفر واسنجی و صحت سنجی شده است. بر اساس نتیجه ی مدل میانگین مقدار سالیانه ی بار فسفر برای دوره ی یاد شده برابر ۱۷/۱ تن در سال است.



شکل ۲- تقسیم بندی حوزه ی آبخیز اهرچای به زیر حوزه ها در مدل شبیه سازی SWAT

#### مدل تغذیه گرای (غنی شدگی) مخزن

مدل تغذیه گرای برای داده های مشاهداتی مخزن کالیبره شده و بر اساس آن ضریب ته نشینی برابر ۴۵ متر در سال برآورد گردیده است. برای محاسبه ی بار مجاز فسفر از معیار تغذیه گرای برای فسفر کل استفاده می شود. استاندارد EPA غلظت فسفر کل بیش تر از ۲۰ میکروگرم در لیتر در مخزن را در رده شرایط غنی شده طبقه بندی می نماید. بر اساس معادله ی ۲ مقدار غلظت فسفر مخزن برابر ۶۱ بدست می آید که مقدار بالایی است. بر اساس رابطه ی ۲ مقدار مجاز بار فسفر ورودی به مخزن برابر ۹۶۰۰ kg/yr بدست

مقدار  $\lambda_{1,t}$ ،  $\lambda_{2,t}$ ،  $\lambda_{3,t}$  و سایر آن ها صفر در نظر گرفته می شود، به این ترتیب مقدار آب تخصیص داده شده به هر یک از نیازها در بازه ی زمانی مورد نظر محاسبه می شود.

$$S_t + I_t - R_t - E_t = S_{t+1} \quad (5)$$

$$S_t = S_{1,t} + S_{2,t} + S_{3,t} \quad (6)$$

$$\lambda_{1,t} \cdot S_{\min} \leq S_{1,t} < \lambda_{1,t} \cdot S_{\text{firm}} \quad (7)$$

$$\lambda_{2,t} \cdot S_{\text{firm}} \leq S_{2,t} < \lambda_{2,t} \cdot S_{\text{target}} \quad (8)$$

$$\lambda_{3,t} \cdot S_{\text{target}} \leq S_{3,t} < \lambda_{3,t} \cdot S_{\max} \quad (9)$$

$$P_t \leq (\lambda_{1,t} \cdot \alpha_1 + \lambda_{2,t} \cdot \alpha_2 + \lambda_{3,t}) \cdot D_t \quad (10)$$

$$\lambda_{1,t}, \lambda_{2,t}, \lambda_{3,t} = 1 \quad (11)$$

$$\lambda_{1,t}, \lambda_{2,t}, \lambda_{3,t} \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (13)$$

که در آن:  $S_t$ : حجم مخزن در ابتدای دوره ی زمانی  $t$ ،  $S_{t+1}$ : حجم مخزن در انتهای دوره ی زمانی  $t$ ،  $I_t$ : ورودی به مخزن در دوره ی زمانی  $t$ ،  $E_t$ : حجم تلفات در دوره ی زمانی  $t$ ،  $R_t$ : خروجی در دوره ی زمانی  $t$ ،  $S_{\min}$ : کمینه ی حجم ذخیره و  $S_{\max}$ : بیشینه ی حجم ذخیره ی مخزن،  $S_{\text{firm}}$ : میزان ذخیره ی ثابت مخزن،  $S_{\text{target}}$ : میزان ذخیره ی مطلوب جهت تأمین نیاز،  $D_t$ : مجموع نیازهای آبی در زمان  $t$  (بر حسب میلیون مترمکعب)،  $S_t$ : حجم ذخیره ی مخزن که به سه بخش  $S_{1,t}$ ،  $S_{2,t}$ ،  $S_{3,t}$  (متغیرهای غیر منفی) تقسیم شده است،  $\lambda_{1,t}$ ،  $\lambda_{2,t}$ ،  $\lambda_{3,t}$ : متغیرهایی که تنها دارای مقادیر صفر و یک هستند و  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$ : درصدهای در نظر گرفته شده برای تأمین نیاز می باشند.

در مدل بهینه سازی ارایه شده، متغیرهای تصمیم شامل مقادیر سطح مخزن در تراز هدف و مطلوب، به ترتیب  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  می باشند. برای حل مدل، قیود غیر خطی (۷ تا ۱۰) با استفاده از یک تبدیل به قیود خطی تبدیل شده اند. فرض کنید در این تبدیل عامل غیر خطی  $Z$  از دو ترم متغیر حقیقی  $r$  و متغیر صحیح  $\beta$  تشکیل شده است:

$$z = r\beta \quad (14)$$

در این صورت اگر  $\beta=0$  باشد،  $z=0$  و اگر  $\beta=1$  باشد،  $z=r$  است. تبدیل پیشنهاد شده به وسیله ی ویلیام [۱۴] می تواند رابطه ی غیر خطی بالا را به رابطه ای خطی به صورت زیر تبدیل کند:

$$z = r_{\min} \cdot \beta + y \quad (15)$$

$$y - (r_{\max} - r_{\min}) \cdot \beta \leq 0$$

$$-r + y \leq -r_{\min}$$

$$r - y + (r_{\max} - r_{\min}) \cdot \beta \leq r_{\max}$$

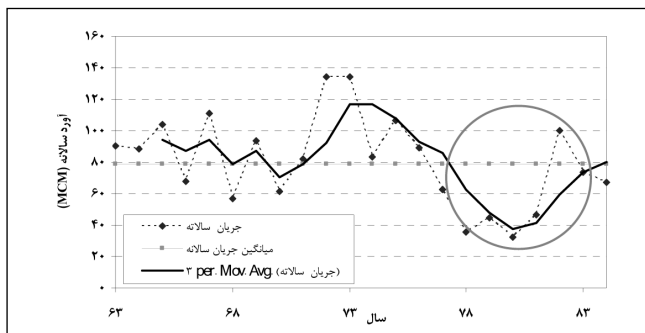
که در آن  $r_{\min}$  حد پایین  $r$  و  $r_{\max}$  حد بالای  $r$  و  $y$  متغیر غیر صفر است، بنابراین افزون بر دو متغیر جدید  $y$  و  $\beta$ ، دو متغیر  $z$  و  $r$  نیز به متغیرهای مجهول اضافه می شوند. برای حل مدل بهینه سازی بالا از روش برنامه ریزی خطی استفاده شده است.

#### نتایج

##### مدل حوزه ی آبخیز SWAT

شکل (۲) مدل SWAT را برای حوزه ی آبخیز اهرچای نشان

در شکل (۳)، سری زمانی جریان سالانه، میانگین محرک سه ساله‌ی ورودی به مخزن سد در ایستگاه اورنگ نشان داده شده است. با توجه به این که رواناب مشاهداتی در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ کم‌تر از میانگین دراز مدت رواناب ورودی به مخزن سد است، بمنظور کاهش شدت خشکسالی از قوانین محدودکننده برای بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی برای تدوین قوانین بهره‌برداری، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای برای نیاز عمومی برابر ۱ و ۰/۹۶ و برای نیاز کشاورزی برابر ۰/۷۵ و ۰/۵۶ بدست آمده است.



شکل ۳- تغییرات سالانه‌ی جریان ورودی به مخزن سد در طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴

ارزیابی اثرات بهترین راهکارهای مدیریتی در این پژوهش راهکارهای سازه‌ای در مدل SWAT شبیه‌سازی شده و اثرات آن‌ها در کاهش بار فسفر در مخزن، هزینه‌ی اجرای آن

می‌آید. با در نظر گرفتن ۱۰ درصد مقدار TMDL به عنوان حاشیه‌ی ایمنی جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از مدل شبیه‌سازی، مقدار مجموع تخصیص بارهای نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به معادله‌ی ۴ می‌باشد:

$$\Sigma WLA = \Sigma LA = TMDL + MOS = 8640 \quad (16)$$

بنابراین لازم است مقدار بار موجود فسفر ورودی به مخزن برابر  $1710 \text{ kg/yr}$  به میزان ۴۹/۵٪ کاهش یابد. تا سطح تغذیه‌گرای در مخزن از مرز مزوتروفیک فراتر نرود.

کاهش این بار نیاز به کنترل منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای از راه کنترل تخلیه‌ی فاضلاب‌های انسانی و برنامه‌های آبخیزداری و کنترل مواد مغذی در سطح حوزه‌ی آبخیز دارد که از راه اجرای بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) قابل انجام است.

جدول ۱- نیاز آبی در پایین دست سد (میلیون مترمکعب)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ماه	۱/۷۶	۲/۷۳	۸/۰۵	۱۰/۶۶	۱۳/۸۸	۱۴/۴۳
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
	۷/۹۹	۳/۴۶	۲/۳۳	۱/۸۱	۱/۷۸	۱/۷۸

#### مدل بهره‌برداری مخزن

با توجه به نیاز آبی کشاورزی، شهری، زیست محیطی و صنعتی، نیاز آبی مجموع به تفکیک ماه‌های سال در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج تحلیل سناریوهای گوناگون کاهش بار فسفر ورودی به مخزن

ردیف	سناریوی کاهش بار فسفر		درصد کاهش بار فسفر ورودی به مخزن	هزینه (میلیون ریال)	اطمینان پذیری تامین نیاز آبی (%)	تابع هدف برای رتبه بندی
	بار غیر نقطه‌ای					
	تمام زیر حوزه‌ها	نوع BMP				
۱	-	برکه‌های نگهدارنده	۳۹٪	۱۰۰/۰۰۰	۴۳	۰/۷۹
۲	-	رسوبگیرهای محافظ	۲۷٪	۱۵/۰۰۰	۵۰	۲/۲۳
۳	-	آبراهه چمنی	۲۶٪	۱۶/۰۳۰	۶۵	۲/۲۰
۴	کاهش ۶۰٪	آبراهه چمنی	۴۱٪	۳۲/۴۶۲	۶۳	۱/۴۷
۵	کاهش ۶۰٪	رسوبگیرهای محافظ	۴۱٪	۳۱/۴۳۲	۶۴	۱/۵۰
۶	کاهش ۶۰٪	برکه‌های نگهدارنده	۴۰٪	۱۱۶/۴۳۲	۴۷	۰/۷۹
۷	کاهش ۸۰٪	برکه‌های نگهدارنده	۵۶٪	۱۲۱/۹۰۹	۴۵	۰/۸۸
۸	-	هر سه نوع بالا	۴۵٪	۱۳۱/۰۳۰	۴۰	۰/۷۶
۹	کاهش ۶۰٪	-	۳۵٪	۱۶/۴۳۲	۶۸	۲/۲۴
۱۰	کاهش ۸۰٪	-	۴۹٪	۲۱/۹۰۹	۶۶	۱/۹۳

### جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، برای ارزیابی اثرات راهکارهای مدیریتی در حوزه‌ی آبخیز اهرچای بر کاهش بار مغذی ورودی به مخزن ستارخان به همراه تامین نیازهای پایین دست از مدل شبیه سازی حوزه‌ی آبخیز SWAT استفاده شده است. بمنظور ارزیابی اثرات بهترین راهکارهای مدیریتی، سناریوهای گوناگون در قالب ترکیب گزینه‌هایی شامل تصفیه فاضلاب بارهای نقطه‌ای و راهکارهای کاهش بارهای غیر نقطه‌ای شامل برکه‌های نگهدارنده، آبراهه‌ی چمنی و رسوبگیرهای محافظ در حوزه‌ی آبخیز تعریف شده است. با توجه به این که اجرای راهکارهای مدیریتی مستلزم صرف هزینه است و همچنین ممکن است جریان ورودی به مخزن سد و در نتیجه اطمینان پذیری تامین نیاز آبی کاهش می‌یابد، در انتخاب بهترین راهکار مدیریتی افزون بر کاهش بار مواد مغذی، بایستی هزینه‌های اجرایی آن‌ها و تاثیر بکارگیری آن‌ها بر اطمینان پذیری تامین نیاز پایین دست نیز در نظر گرفته شود. با توجه به این که حوزه‌ی آبخیز اهرچای واقع در آذربایجان شرقی، در سال‌های اخیر دوره‌های کم آبی را تجربه کرده است، از قوانین محدود کننده و نتایج بدست آمده از شبیه سازی مدل SWAT برای تعیین خروجی از مخزن استفاده شده است. همچنین میزان بار آلودگی فسفر کل ورودی به مخزن از نتایج شبیه سازی مدل SWAT در سناریوهای گوناگون بدست آمده و اثر این بار به وسیله‌ی مدل چاپرا بر میزان تغییرات غلظت فسفر به عنوان شاخص تغذیه گرای مخزن سد بررسی شده است.

سناریوهای گوناگون در قالب ترکیب گزینه‌هایی شامل تصفیه‌ی فاضلاب بارهای نقطه‌ای و راهکارهای کاهش بارهای غیر نقطه‌ای شامل برکه‌های نگهدارنده، آبراهه‌ی چمنی و رسوبگیرهای محافظ تعریف شده است. سپس با رویکرد چند معیاره و با استفاده از روش وزنی، رتبه‌ی هر سناریو بر اساس درجه‌ی برآوردسازی اهداف افزایش تامین نیاز آبی، کاهش بار فسفر ورودی به مخزن و کاهش هزینه‌ی اجرای راهکارهای مدیریتی تعیین شده است و بر اساس آن، کاهش ۶۰ درصد بارهای نقطه‌ای و استفاده از رسوب گیرهای محافظ در سطح حوزه‌ی آبخیز به عنوان بهترین راهکارهای مدیریتی پیشنهاد شده است. به عنوان توسعه‌ی مدل بکار رفته در این مقاله، می‌توان تغییر یا بهینه سازی الگوی کشت با هدف کاهش مصرف سموم، کودهای شیمیایی و تولید زهاب کمتر تغییر کاربری اراضی یا جلوگیری از تغییر آن را به عنوان راهکارهای مدیریتی در نظر گرفت و اثر آن را بررسی نمود.

### منابع

۱- ایمن، س. ۱۳۸۶. تدوین الگوی برنامه ریزی شرایط اضطراری در مدیریت خشکسالی، پایان نامه کارشناسی ارشد،

و اطمینان پذیری تامین نیاز آبی پایین دست سد بررسی شده است. بمنظور انتخاب بهترین سناریوی مدیریتی، رتبه‌ی هر سناریو بر اساس رابطه‌ی زیر تعیین شده است:

$$Ra = w_1Z_1 + w_2Z_2 + w_3Z_3 \quad (17)$$

که در آن مقادیر نرمال شده‌ی درصد کاهش بار فسفر ورودی به مخزن، نرمال شده‌ی هزینه (بیشینه‌ی هزینه در کل سناریوها به هزینه‌ی هر سناریو) و نرمال شده‌ی اطمینان پذیری تامین نیاز آبی (درصد به درصد بیشینه در کل سناریوها) و وزن مربوط به هر هدف است که در این پژوهش با توجه به این که هدف تامین نیاز آبی با کیفیت مطلوب مدنظر بوده است، وزن‌های اهداف اول و سوم برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

در جدول (۲)، ده سناریوی گوناگون اعمال بهترین راهکارهای مدیریتی با هدف کاهش بار فسفر ورودی به مخزن بررسی شده است. در سناریوی نخست برکه‌های نگهدارنده در تمامی زیرحوزه‌ها به غیر از ۵ زیرحوزه ۱۸، ۱۹، ۱۷، ۵ و ۸ که تاثیر BMP در آن‌ها بسیار کم است، اعمال شده که موجب کاهش ۳۹ درصد بار فسفر ورودی به مخزن می‌شود و همچنین میزان جریان ورودی به سد و اطمینان پذیری تامین نیاز نیز کم شده است. احداث رسوب گیر محافظ به عرض ۲۰ متر در زیرحوزه‌های اشاره شده بر اساس سناریوی دوم جدول (۲) مشخص کننده‌ی ۲۷ درصد کاهش بار فسفر است که اطمینان پذیری تامین نیاز در حد میانگین قرار دارد. آبراهه‌ی چمنی نیز در سناریوی سوم مورد بررسی قرار گرفته است که با اعمال آن در زیرحوزه‌های موثر اشاره شده در جدول (۲)، به میزان ۲۶ درصد مقدار بار فسفر حوزه کاهش یافته است، ولی جریان ورودی به سد نسبت به سناریوهای دیگر کاهش چشمگیری نداشته است. بر اساس سناریوهای چهار تا هشت جدول (۲) و (۵) حالت سناریوهای گوناگون ترکیبی کنترل بارهای نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده‌ی آن است که کاربرد همزمان کنترل بارهای نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای اثر تجمعی کمی در کاهش بار ورودی به مخزن دارد که استفاده از برکه‌های نگهدارنده موجب کاهش جریان ورودی به مخزن سد می‌شود و اطمینان پذیری تامین نیاز آبی را کاهش می‌دهد. سناریوهای نه و ده برای BMP بار نقطه‌ای است که بر اساس نتایج مدل در صورت کاهش ۶۰ و ۸۰ درصد بارهای نقطه‌ای در تمامی زیر حوزه‌ها بار فسفر ورودی به مخزن به ترتیب ۳۵ و ۴۹ درصد کاهش خواهد یافت. در سناریوی نه ملاحظه می‌شود که با کاهش ۶۰ درصد بارهای نقطه‌ای هزینه‌ی چندانی به سیستم وارد نمی‌شود و همچنین اطمینان پذیری تامین نیاز آبی که از اهداف تاسیس سد می‌باشد، در حد مطلوب قرار گرفته است. با توجه به رابطه‌ی ۱۷، سناریوهای گوناگون رتبه بندی شده اند که از بین آن‌ها سناریوی ۹، کاهش ۶۰ درصدی بارهای نقطه‌ای و همچنین سناریوی دو، استفاده از رسوبگیرهای محافظ پیشنهاد می‌شود. در این دو سناریو هزینه‌ی اجرای بهترین راهکارهای مدیریتی نسبتاً کم است و درصد

9- Kaini, P., S. Attita, K.S. and Nicklow, J.W. 2008. "Designing BMPs at a watershed-scale using SWAT and a genetic algorithm" In Proceedings of ASCE- Environment and Water Resources Institute Conference 2008.

10- Loucks, D.P., Stedinger, J.R. and Haith, D.A. 1981. Water resource systems planning and analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

11- Pohlert, T., Huisman, J.A., Breuer, L. and Frede, H-G. 2005. Modeling of point and nonpoint source pollution of nitrate with SWAT in the river Dill, Germany, *Advances in Geosciences* 5: 7-12.

12- Tu, M.Y., Hsu, N.S. and Yeh, W.G. 2003. "Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules" *J. Water Resour. Plan. Manage.* 129: 86- 97.

13- Tu, M.Y., Hsu, N.S., Tsai, F. and Yeh, W.G. 2008. "Optimization of Hedging Rules for Reservoir Operations" *J. Water Resour. Plan. Manage.* 134(1): 3-13.

14- Williams, H. P. 1999. Model building in mathematical programming, 4th Ed., Wiley, Chichester, U.K.

15- U.S.EPA, 1990. The Lake and Reservoir Restoration and Guidance Manual. EPA/440/4-90/006. Office of Water, Washington, DC.

16- U.S. EPA. 1999. Protocol for Developing Nutrient TMDLs (First Edition).

3- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and J.R., Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development, *J. American Water Resources Association* 34(1):73-89.

4- Chapra, S. 1997. Surface Water Quality Modeling, Mc-Graw Hill Int.

5- Cowan, D.M. and Shoemaker, C.A. 2007. Assessing Phosphorus BMP Effectiveness in the Cannonsville Watershed Using SWAT2000, In Proceedings of ASCE- Environment and Water Resources Institute Conference 2007

6- Draper, A.J. and Lund, J.R. 2004. "Optimal Hedging and Carry-over Storage Value" *J. Water Res. Planning and Mgmt.* 130: 83-87

7- Hsieh, C.D. and Yang, W.F. 2006. Study of Total Maximum Daily Load and Nonpoint Source Pollution Control Strategies for Reservoir Watershed, *Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt.* 10(3): 134- 143.

8- Karamouz, M., Taheriyoun, M., Emami, F. and Rouhanizadeh, B. 2008. Assessment of Watershed Nutrient Load Input to Reservoir, A case study, In Proceedings of ASCE- Environment and Water Resources Institute Conference 2008.