

## مدیریت جامع آب کشاورزی در مقیاس حوضه آبریز (IWMsim) با رویکرد پویایی سیستم

مریم سلطانی<sup>۱</sup> و حمزه علی علیزاده<sup>۲\*</sup>

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ایلام؛ ایلام؛ ایران

(۲\*) استادیار گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ایلام؛ ایلام؛ ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [h.alizadeh@ilam.ac.ir](mailto:h.alizadeh@ilam.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲

### چکیده:

دستیابی به توسعه پایدار سیستم‌های منابع آب، مستلزم ارزیابی و بررسی اثرات بلندمدت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طرح‌های توسعه و مدیریت منابع آب می‌باشد. از این رو توسعه مدلی که بتواند ابعاد مختلف طرح‌های توسعه منابع آب و برهم‌کنش اتخاذ شیوه‌های مختلف بهره‌برداری را شبیه‌سازی کند و با آن مدل بتوان راهکارهای مدیریتی مختلف را سنجید، می‌تواند کمک زیادی به مدیران و تصمیم‌گیران حوزه آب بنماید. در این مطالعه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها یک مدل جامع و پویا موسوم به IWMsim برای ارزیابی سیاست‌های مدیریتی مختلف و کمک به تصمیم‌سازی در سطوح کلان مدیریت منابع آب توسعه داده شد. در مدل IWMsim برای بررسی اثرات متقابل اقتصادی- زیست‌محیطی طرح‌های توسعه منابع آب دو شاخص کلان هزینه‌های ملی و درآمد ملی توسعه داده شد. سپس مدل ارائه شده با استفاده از اطلاعات اقلیمی و هیدرولوژیکی بلندمدت محدوده مطالعاتی ورامین واسنجدی و صحت‌سنجی شد. مدل با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطا (RMSE)، حداکثر خطا (ME) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر است متغیرهای کلیدی عملکرد نسبی محصولات زراعی (RMSE=14.2%، ME=20% و  $R^2=0.92$ )، تراز آب زیرزمینی (RMSE=0.37m، ME=0.45m و  $R^2=0.99$ ) و شوری آب زیرزمینی (RMSE=57  $\mu\text{S/cm}$  و  $R^2=0.79$ ) را با دقت مناسب شبیه‌سازی نماید.

**کلید واژه‌ها:** تراز آب زیرزمینی؛ توسعه پایدار؛ درآمد ملی؛ هزینه‌های ملی

### مقدمه

از راه‌های دستیابی به توسعه پایدار سیستم‌های منابع آب، ارزیابی سیاست‌های مدیریتی و کمک به تصمیم‌سازی در سطوح کلان است. با توجه به اهمیت توسعه پایدار، کمی کردن توسعه پایدار توسط شاخص‌های کلان مدیریت پایدار منابع آب و با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی صورت می‌گیرد. از این رو توسعه مدلی که بتواند تمامی ابعاد طرح‌های منابع آب و برهم‌کنش اتخاذ شیوه‌های مختلف بهره‌برداری را شبیه‌سازی کند و با آن مدل بتوان راهکارهای طراحی و

آب محور و محرک توسعه است. در کشورهای کم آبی مانند ایران تامین غذای بشر از طریق آبیاری و طرح‌های توسعه منابع آب صورت می‌گیرد. عوامل متعددی بر موفقیت برنامه‌های مدیریت منابع آب تأثیر دارند و هر تغییری در هر یک از این عوامل، خود به وجود آورنده بازخوردهای دیگر در سیستم می‌گردد. این مسئله موجب پیچیدگی ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌های توسعه منابع آب می‌گردد. یکی

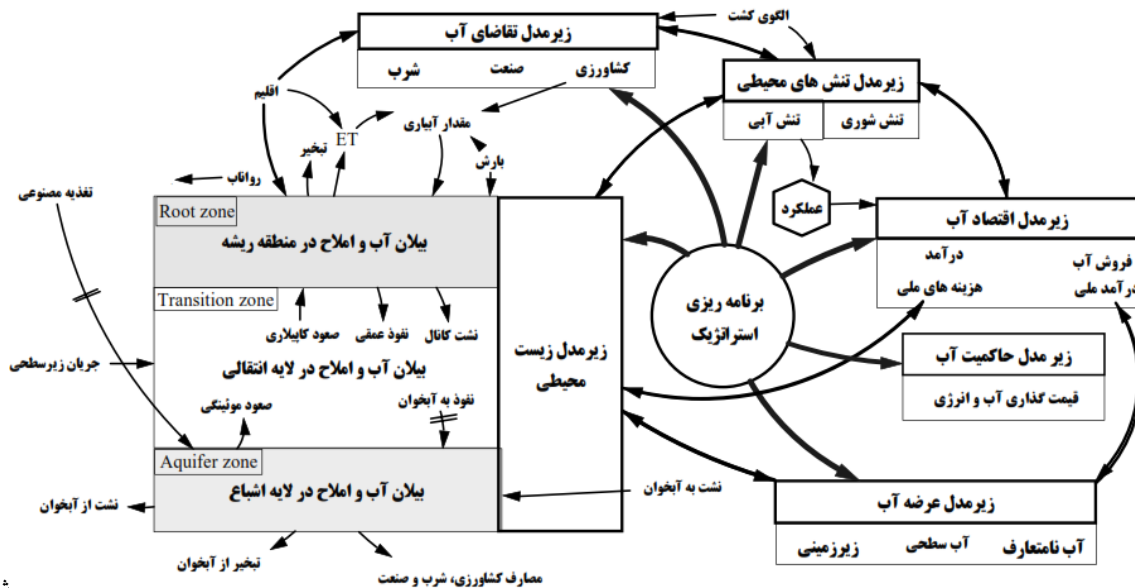
تقاضای منابع آب (Adeniran and Bamiro, 2010)؛ *et al.*, (Bhatkoti 2011 و Goldani *et al.*, 2012)، تجزیه و تحلیل تعارضات موجود در مدیریت آب‌های زیرزمینی (Giordano, 2012)، بهینه‌سازی تخصیص منابع آب (Li *et al.*, 2009 و Madani and mariano, 2009)، برنامه‌ریزی استفاده از آب‌های برگشتی (سهرابی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Nasiri *et al.*, 2013 و Li and Hung, 2012)، بررسی مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی شیرین‌سازی آب دریا (Udono and Sitte, 2008)، مدیریت کم‌آبی (Masike, 2011 و Susnik *et al.*, 2012)، مدیریت آب شهری (Xi and Poh, 2013)، بهره‌برداری از زهاب‌های کشاورزی (Nozari and Liaghat, 2014)، تحلیل اثرات توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳)، تحلیل طرح‌های انتقال آب (Gastelum *et al.*, 2010)، مدیریت بهره‌وری آب کشاورزی (نظری و همکاران، ۱۳۹۲)، مدیریت کاربری اراضی جهت دستیابی به پایداری (Yu *et al.*, 2003) و سیاست‌گذاری مالی مدیریت سیستم‌های آب و فاضلاب (Rehan *et al.*, 2011) استفاده شده است.

علاوه بر روش پویایی سیستم، روش‌های مدل‌سازی دیگری مانند شبکه‌های بیزین (BNs)، شبکه عصب مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک (GAs) برای مدل‌سازی محیط‌های پیچیده معرفی شده است. لیکن برخی از این روش‌ها نیاز به اطلاعات بسیار زیادی برای آموزش شبکه جهت تقلید خروجی سیستم داشته و همچنین هیچ یک از این روش‌ها اجازه تعیین قطعی رفتار پویایی سیستم که در آن علل و اثرات می‌تواند با زمان در مرزهای سیستم تغییر کنند را نمی‌دهد. بنابراین، استفاده از رویکرد پویایی سیستم برای تجزیه و تحلیل مشکلات بیوفیزیکی و ادغام آنها با جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی برای استنتاج پیامدهای سیاست‌گذاری تصمیم‌گیری‌های

مدیریتی مختلف را سنجید، می‌تواند کمک زیادی به حل مسایل این بخش کند. پویایی سیستم‌ها یک روش مدل‌سازی مبتنی بر تفکر سیستمی با تاکید بر قیدها، بازخوردها، و تاخیرها است که برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی رفتار مسائل پیچیده و ارزیابی پیامد سیاست‌گذاری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش پویایی سیستم‌ها در زمینه مدل‌سازی پیچیدگی‌های منابع آب ابزار بسیار قدرتمندی می‌باشد. Bala و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها مدلی ارائه کردند که حجم آب مورد نیاز مزرعه، زمان آبیاری و تاثیر آن بر بازدهی محصول را پیش‌بینی می‌کند. Saysel و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها، الگوی کشت، میزان محصول و آلودگی کشاورزی را در جنوب ترکیه شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که سیاست‌های اتخاذ شده فعلی در مدیریت پروژه‌های مذکور آسیب‌های جدی زیست‌محیطی را در پی خواهد داشت. Fernandez و Selma (۲۰۰۴) مدل پویای پایداری زیست‌محیطی کشاورزی آبی و تغییر کاربری اراضی اسپانیا را ارائه نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که کاهش اراضی تحت آبیاری به منظور تعادل عرضه و تقاضای آب نه تنها باعث از بین رفتن مشکل کمبود آب می‌شود، بلکه موجب بهبود مشکلات محیط زیستی که در اثر آبیاری اراضی کشاورزی به وجود آمده نیز می‌گردد. Li و همکاران (۲۰۰۹) از مفهوم پویایی سیستم‌ها برای تهیه بیان اراضی شالیزاری استفاده کردند. مدل مذکور مولفه‌های مختلف بیان آب نظیر تبخیر و تعرق واقعی، نفوذ عمقی، رواناب سطحی و صعود مویینه‌ای را در مقیاس روزانه شبیه‌سازی و سناریوهای لازم برای مواجهه با محدودیت منابع آبی را مورد ارزیابی قرار داد. در سال‌های اخیر از روش پویایی سیستم برای مدل‌سازی و حل بسیاری از مسائل پیچیده مدیریت منابع آب از جمله مدیریت یکپارچه منابع آب (Hjorth and Bagheri, 2006) و (Zarghami and Akbariyeh, 2012)، مدیریت عرضه و

مانند مدیریت منابع آب می‌باشد. در این مطالعه از محیط Vensim برای برنامه‌نویسی و تدوین مدل پویا استفاده شد. مدل ارائه شده شامل زیرمدل‌های تقاضای آب (کشاورزی، صنعت و شرب)، عرضه آب شامل کمیت و کیفیت آب (منابع آب زیرزمینی، منابع آب سطحی و آب‌های برگشتی)، تنش‌های محیطی (تنش‌های شوری و کم‌آبی)، حاکمیت آب (تعرفه‌گذاری و قیمت‌گذاری آب و انرژی)، اقتصاد آب (هزینه‌های انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کف شکنی چاه‌ها، درآمد و ...) و محیط‌زیست (بیلان آب و نمک در خاک و آب زیرزمینی) می‌باشد.

در شکل ۱ ساختار کلی مدل مفهومی مدیریت یکپارچه منابع آب به همراه ارتباط بین زیرمدل‌های مختلف ارائه شده است. در بخش زیست‌محیطی مدل مبتنی بر اصل بقا جرم و تئوری حاکم بر حرکت آب و املاح در خاک در سه مخزن (لایه) خاک سطحی (منطقه توسعه ریشه)، لایه غیراشباع (منطقه انتقالی) و لایه اشباع (آبخوان) می‌باشد.



شکل

۱. مدل مفهومی مدیریت جامع منابع آب در مقیاس کلان

مدیریت منابع آب نیازی اساسی است (Khan et al., 2009).

در این مطالعه برای ارزیابی طرح‌های توسعه و مدیریت منابع آب یک مدل جامع مدیریت منابع آب (موسوم به IWMsim) با لحاظ کلیه عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی توسعه، واسنجی و صحت‌سنجی شده است. این مدل قادر است اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بلندمدت سیاست‌گذاری‌های کلان مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز را شبیه‌سازی نماید. مدیران و سیاستگذاران بخش آب با اجرای این مدل می‌توانند اثرات بلندمدت سناریوهای مدیریتی خود را در قالب مدل یکپارچه سنجیده و بهترین تصمیم ممکن را اتخاذ نمایند.

## مواد و روش‌ها

### مدلسازی پویا

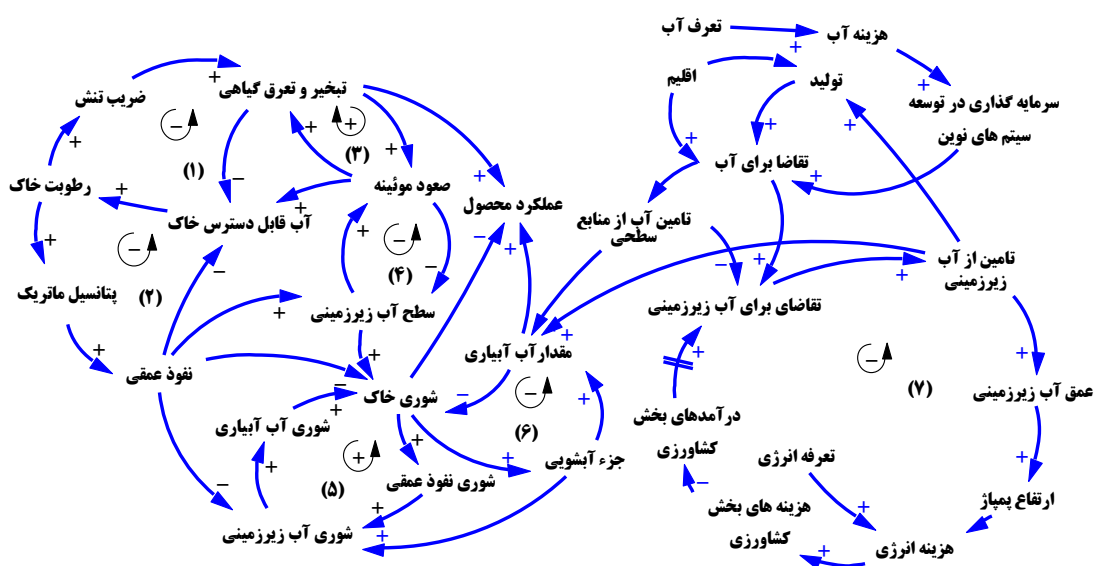
ارزیابی به هم پیوسته سیستم منابع آب در مقیاس حوضه آبریز مستلزم توسعه مدل یکپارچه منابع آب حوضه می‌باشد. رویکرد پویایی سیستم یکی از توانمندترین ابزارهای مدلسازی سیستم‌های پیچیده مانند

### حلقه‌های علت و معلولی

در شکل ۲ چند نمونه از حلقه‌های علت و معلولی تقویت شونده و متعادل کننده در سیستم مدیریت منابع آب ارائه شده است. به عنوان مثال در حلقه شماره دو با افزایش صعود موئینگی به منطقه توسعه ریشه میزان تبخیر و تعرق افزایش پیدا می‌کند و از طرف دیگر افزایش تبخیر از سطح خاک باعث افزایش کشش رطوبتی شده و مقدار صعود کاپیلاری را افزایش می‌دهد (حلقه تقویت کننده). در حلقه شماره هفت افزایش تقاضای آب از منابع آب زیرزمینی باعث افزایش برداشت (مجاز و غیرمجاز) از منابع آب زیرزمینی می‌شود، افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی و به تبع آن افزایش ارتفاع پمپاژ، هزینه انرژی و هزینه استحصال آب می‌شود. افزایش هزینه‌های استحصال آب باعث کاهش درآمد کشاورزان می‌شود. کاهش درآمد کشاورزان در بلندمدت (تاخیر در سیستم) باعث کاهش تقاضا برای برداشت از آبهای زیرزمینی می‌شود. بنابراین در حلقه شماره هفت افزایش تقاضا در بخش آب‌های زیرزمینی به دلیل اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی که دارد خود باعث کاهش تقاضا در بلندمدت می‌شود (حلقه تعادلی).

مدل مدیریت یکپارچه منابع آب ارائه شده (IWMsim) شامل ۳۱۵ متغیر اصلی و کمکی و پنج زیرنگاشت (شامل  $3 \times 5 \times 8 \times 3 \times 4$  پارامتر) قابلیت شبیه‌سازی همزمان حداکثر ۱۴۴۰ حالت را دارا می‌باشد. زیرنگاشت‌ها شامل سه بافت خاک غالب منطقه (لومی، لومی رسی و سیلتی لوم برای شبیه‌سازی رطوبت قابل وصول)، پنج منبع آب آبیاری (آب زیرزمینی، فاضلاب تصفیه شده، فاضلاب خام، رودخانه و سد)، هشت محصول عمده منطقه شامل گندم، جو، خربزه، خیار، سبزیجات، گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای و یونجه (جهت نیاز آبی و تولید)، سه سیستم آبیاری (بارانی، سطحی و قطره‌ای) و چهار سناریوی الگوی کشت می‌باشد که به صورت Subscript (زیرنویس) در مدل تعریف شد.

گام‌های زمانی محاسبات برای بررسی تقاضای آب در بخش کشاورزی ده روزه و در بخش صنعت و شرب ماهانه می‌باشد. افق زمانی واسنجی مدل، واکنش سیستم از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ و افق زمانی صحت‌سنجی مدل از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱ می‌باشد. مدل قابلیت شبیه‌سازی سناریوهای مختلف را در یک بازه ۳۵ ساله از سال شروع شبیه‌سازی دارا می‌باشد.



شکل ۲- برخی از حلقه‌های علت و معلولی سیستم مدیریت منابع آب مورد استفاده در مدل IWMsim

## تئوری حاکم بر شبیه‌سازی متغیرهای کلیدی مدل

در این مرحله روابط بین متغیرها (متغیرهای کلیدی و متغیرهای کمکی) و مقادیر متغیرها (متغیرهای ثابت) تعیین گردید. تقاضای آب در بخش کشاورزی با توجه به نیاز آبی خالص الگوی کشت، الگوی کشت، ضرایب تنش آبی (Ks) و بازده آبیاری (بازده کاربرد وابسته به نوع خاک و سیستم آبیاری، بازده انتقال و توزیع وابسته به نوع منبع آب) شبیه‌سازی شد. برای این منظور اطلاعات اقلیمی به عنوان داده‌های ورودی مدل با فرمت Excel فراخوانی شده و مدل با استفاده از روش فائو پنمن مانیت (Alien *et al.*, 1998) تبخیر و تعرق روزانه را محاسبه می‌کند (رابطه ۱).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + 900/(T + 273) \times \gamma \times u_2(e_s - e_o)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن  $R_n$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $Mj m^{-2} d^{-1}$ )،  $G$  شار گرما به داخل خاک ( $Mj m^{-2} d^{-1}$ )،  $T$  متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری ( $C^\circ$ )،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع دو متری،

$\gamma$  ضریب رطوبتی ( $Kpa C^\circ^{-1}$ )،  $e_s$  فشار بخار اشباع ( $Kpa$ )، فشار بخار واقعی ( $Kpa$ ) و  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $Kpa C^\circ^{-1}$ ) می‌باشد.

نیاز آبی گیاهان زراعی الگوی کشت به صورت روزانه در شرایط پتانسیل از رابطه زیر شبیه‌سازی شد.

$$ET_p = KC \times ET_o \quad (2)$$

که در آن  $Kc$  گیاهان زراعی از جداول فائو استخراج شده و با توجه به اقلیم، عرض جغرافیایی و تاریخ کاشت و برداشت محصول اصلاح می‌شود ( $K_{cad}$ ).

$$K_{cad} = K_{C(tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3)$$

که در آن  $K_{C(tab)}$  ضریب گیاهی ارائه شده در جداول فائو،  $U_2$  سرعت باد در دو متری (متر بر ثانیه)،  $RH_{min}$  حداقل رطوبت نسبی و  $h$  ارتفاع تقریبی محصول در هر

مرحله از رشد گیاه می‌باشد. از آنجا که گیاهان معمولاً تحت شرایط استاندارد قرار نداشته و ممکن است تحت انواع تنش‌های محیطی قرار گیرند لذا برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی گیاه ابتدا باید رطوبت آب در خاک به صورت پویا شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از رطوبت خاک ضریب تنش آبی (Ks) شبیه‌سازی شود. برای شبیه‌سازی رطوبت خاک، تلفات تبخیر از سطح خاک، تلفات نفوذ عمقی و ضریب تنش آبی (Ks) از اصل بقاء جرم (بیان آب در خاک) استفاده شد (رابطه ۴ و شکل ۳).

$$AW(t) = AW(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} (\text{Inflow} - \text{Outflow}) dt \quad (4)$$

در این رابطه متغیر کلیدی  $AW(t)$  رطوبت خاک است که با توجه به نوع گیاه و خاک به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌شود،  $AW(t_0)$  رطوبت اولیه خاک،  $\text{inflow}$  جریان‌های روزانه ورودی به خاک وابسته به نوع گیاه و اقلیم و  $\text{outflow}$  آب خروجی از خاک وابسته به نوع گیاه و خاک می‌باشد. مهمترین آب‌های ورودی به خاک بارش موثر و آبیاری می‌باشد. برای شبیه‌سازی بارش موثر از روابط تجربی فائو استفاده شد. مقدار آب آبیاری به دو طریق الف) عمق آب آبیاری و دور آبیاری گیاهان مختلف در زمان‌های مختلف توسط کاربر وارد می‌شود و ب) شبیه‌سازی عمق آبیاری در دور آبیاری ثابت با توجه به نیاز آبی گیاه و بارش موثر در مدل قابل تعریف می‌باشد. خروجی‌های آب از خاک شامل، تبخیر و تعرق گیاهی، نفوذ عمقی و تبخیر از سطح خاک می‌باشد. جهت شبیه‌سازی تبخیر از سطح خاک از روش فائو استفاده است. در این روش با توجه به موجودیت نسبی آب در خاک ( $W_{rel}$ ) ضریب  $kr$  محاسبه می‌شود (رابطه ۵) و بر اساس  $kr$  و تبخیر و تعرق پتانسیل، تبخیر از سطح خاک (E) شبیه‌سازی می‌گردد (رابطه ۶).

$$0 \leq Kr = \frac{e^{f_k \times W_{rel}} - 1}{e^{f_k} - 1} \leq 1 \quad (5)$$

نمکی که از طریق رواناب شسته می‌شود (kg/ha) و  $\Delta S$  تغییرات املاح خاک (kg/ha) می‌باشد. در این مطالعه از غلظت آب باران و میزان انحلال صرف نظر شده است.

مقدار نمک جذب شده توسط محصولات زراعی بسته به نوع محصول ۳ تا ۵ درصد ماده خشک تولیدی محصول در مدل لحاظ شده است (Van Rensburg *et al.*, 2011, 2012). شوری اولیه خاک، شوری زهکشی و شوری خاک در زمان  $t$  با استفاده از روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) شبیه‌سازی گردید (Ayars *et al.*, 2012).

$$Mis(t_0) = 0.64 \times ECe \times \left( \frac{\theta_s \times D_r}{100} \right) \times 10000 \quad (9)$$

$$Cd(t) = 2fC_e(t) + (1-f)Ci(t) \quad (10)$$

$$Mis(t+dt) = Mis(t) + \Delta S dt \Rightarrow C_e(t+dt) = \frac{Mis(t) + \Delta S dt}{\left( \frac{\theta_s \times D_r}{100} \right) \times 10000} \quad (11)$$

که در آن  $\theta_s$  رطوبت خاک در حالت اشباع،  $D_r$ : عمق توسعه ریشه (متر) و  $C_e$ : شوری عصاره اشباع خاک (mg/lit)،  $ECe$ : هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ds/m)،  $Mis$ : شوری اولیه خاک (kg/ha)،  $C_e(t+dt)$  غلظت عصاره اشباع خاک در زمان  $t+dt$  (mg/lit)،  $f$  راندمان زهکشی و  $Cd$  غلظت آب نفوذ عمقی (mg/lit) می‌باشد. در نهایت شوری عصاره اشباع خاک در هر لحظه به صورت زیر شبیه‌سازی شد:

$$ECe(t) = \frac{Mis(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} (Mis(t)_a - Mis(t)_l) dt}{0.64 \times \left( \frac{\theta_s \times D_r}{100} \right) \times 10000} \quad (12)$$

که در آن  $Mis(t_0)$ ،  $Mis(t)_a$  و  $Mis(t)_l$  به ترتیب شوری اولیه خاک، املاح ورودی به خاک و املاح آبشویی شده (کیلوگرم در هکتار) در زمان‌های مختلف و  $\theta_s$  و  $D_r$  به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و عمق توسعه ریشه می‌باشد. به همین ترتیب برای بررسی تغییرات املاح در منطقه انتقالی و منطقه اشباع (آب زیرزمینی) از

$$E = Kr \times ETo \quad (6)$$

در روابط بالا  $Wrel$  نسبت رطوبت خاک در هر لحظه  $(AW(t))$  به کل آب قابل دسترس خاک ( $TAW$ )،  $fk=4$  ضریب شکل منحنی تبخیر نسبت به رطوبت (معمولا  $E$  و  $fk=4$ ) تبخیر از سطح خاک می‌باشد. لازم به ذکر است که نفوذ عمقی در رابطه (۲) از تفاضل ورودی‌های و خروجی‌های آب در خاک شبیه‌سازی می‌شود.

پارامتر  $Ks$  با توجه به نوع خاک، نوع گیاه، دور آبیاری و سیستم آبیاری با استفاده از بیلان آب در خاک (رابطه ۲ و شکل ۳) شبیه‌سازی شد. عملکرد محصول در شرایط مختلف کمیت و کیفیت آب آبیاری از تلفیق رابطه دورنباس و کسام در رابطه ماس و هافمن (۱۹۷۸) شبیه‌سازی شد:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = (1 - b(EC_{et} - A)) \times (1 - K_Y \left( 1 - \frac{\sum_{t_0}^{t_n} ET_{Ct}}{\sum_{t_0}^{t_n} ET_{Pt}} \right)) \quad (V)$$

که در آن  $EC_{et}$  شوری عصاره اشباع خاک در هر زمان،  $t_0$  زمان کاشت محصول،  $t_n$  زمان برداشت،  $K_Y$  ضریب واکنش گیاه به آب آبیاری (نشریه ۳۳ فائو)،  $A$  و  $b$  به ترتیب شوری عصاره اشباع آستانه کاهش عملکرد و شیب کاهش عملکرد (نشریه فائو ۵۶) می‌باشد.

شوری عصاره اشباع خاک ( $ECe$ ) به صورت پویا مبتنی بر اصل بقاء جرم شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی بیلان املاح در خاک زراعی به صورت زیر می‌باشد:

$$CiWi - CdWd - Mhc + PCp - Msd + Mist_0 + Mfer - MR = \Delta S \quad (8)$$

که در آن  $Ci$ : غلظت آب آبیاری وابسته به منابع آب مصرفی (mg/lit)،  $Wi$ : مقدار آب آبیاری ( $m^3/ha$ )،  $Cd$ : غلظت آب نفوذ عمقی (mg/lit)،  $Wd$ : مقدار نفوذ عمقی ( $m^3/ha$ )،  $Mhc$ : مقدار نمک جذب شده به وسیله گیاهان ( $kg/ha$ )،  $Cp$ : غلظت آب باران (mg/lit)،  $P$ : بارش موثر ( $m^3/ha$ )،  $Msd$ : نمک رسوب شونده در خاک (kg/ha)،  $Mis$ : مقدار اولیه نمک در خاک (kg/ha)،  $Mfer$ : مقدار نمک اضافه شده از طریق کودها (kg/ha)،  $MR$ : مقدار

می‌شود. همچنین عمق آب زیرزمینی در هر لحظه ( $dg(t)$ ) را می‌توان از رابطه زیر شبیه‌سازی نمود.

$$dg(t) = He - H(t) \quad (16)$$

که در آن  $He$  تراز سطح زمین و  $H(t)$  تراز آب زیرزمینی در هر لحظه می‌باشد.

شوری آب زیرزمینی را می‌توان با بستن بیلان نمک در دو منطقه اشباع و غیر اشباع شبیه‌سازی نمود:

$$C_{rI}W_{rI} + C_{rD}W_{rD} + C_rW_r + C_AW_A + C_{rA}W_{rA} + C_{ig}W_{ig} + M_{gw} - C_{gw}(W_I + W_A + W_D) = \Delta S \quad (17)$$

که در آن  $W_D$  و  $W_A$ ،  $W_I$  به ترتیب حجم آب برداشتی برای مصارف صنعت، کشاورزی و شرب (MCM)،  $C_{gw}$ : غلظت آب زیرزمینی (mg/lit)،  $W_{ig}$ : حجم آب ورودی از آبخوان‌های مجاور (MCM)،  $C_{gw}$ : غلظت آب زیرزمینی (mg/lit)،  $C_{ig}$ : غلظت آب آبخوان مجاور (mg/lit)،  $W_{rI}$ : آب برگشتی از صنایع (MCM)،  $C_{ri}$ : غلظت آب برگشتی صنایع (mg/lit)،  $W_{rD}$ : آب برگشتی از شرب (MCM)،  $C_{rD}$ : غلظت آب برگشتی شرب (mg/lit)،  $W_{rA}$ : آب برگشتی از کشاورزی (MCM)،  $C_{rA}$ : غلظت آب برگشتی کشاورزی (mg/lit)،  $M_{gw}$ : مقدار اولیه نمک در آب زیرزمینی (Mg)،  $Cr$ : غلظت آب رودخانه (mg/lit)،  $Wr$ : حجم آب نفوذی از رودخانه (MCM) و  $\Delta S$  تغییرات املاح آب زیرزمینی (mg/lit) می‌باشد. اکثر پارامترهای فوق پیشتر تعریف و بحث شده‌اند.

شوری اولیه آب زیرزمینی با استفاده از رابطه Van Rensburg و همکاران (۲۰۱۱) شبیه‌سازی شد:

$$M_{gw_{t_0}} = V_{GW}(t_0) \times C_{gw} \quad (18)$$

که در آن  $V_{GW}(t_0)$  حجم استاتیک اولیه آب زیرزمینی (MCM) که با استفاده از ضریب ذخیره آبخوان و ضخامت آبخوان محاسبه شد،  $C_{gw}$  غلظت اولیه آب زیرزمینی (mg/lit) در ابتدای شبیه‌سازی می‌باشد.

شوری آب زیرزمینی بر حسب dS/m در هر لحظه با استفاده از رابطه زیر شبیه‌سازی شد:

قانون توازن جرم استفاده شد (Van Rensburg et al., 2011).

برای شبیه‌سازی تغییرات سطح و حجم آبخوان از معادله بقاء جرم استفاده شد:

$$Q_{in} + Q_P + Q_I + Q_{SW} + Q_R + Q_A - (Q_W + Q_{EG} + Q_d + Q_{out}) = \Delta V \quad (13)$$

که در آن  $Q_{in}$ : جریان زیرزمینی ورودی جانبی از سمت ارتفاعات و یا دشت بالادست،  $Q_P$ : تغذیه آبخوان از نفوذ بارش بر سطح دشت،  $Q_I$ : تغذیه آبخوان از آب‌های نفوذی کشاورزی،  $Q_{SW}$ : تغذیه از پساب آب مصرفی شرب و صنعت،  $Q_R$ : تغذیه از جریان‌های سطحی یا رودخانه‌ها،  $Q_A$  میزان تغذیه مصنوعی،  $Q_W$ : مصارف آب زیرزمینی،  $Q_{EG}$ : تبخیر از آب زیرزمینی،  $Q_d$ : زهکشی از آبخوان،  $Q_{out}$ : جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان و  $\Delta V$ : تغییر ذخیره حجم آبخوان می‌باشد. واحد همه پارامترها بر حسب میلیون مترمکعب می‌باشد. حجم استاتیک آبخوان به صورت پویا (متغیر طی زمان) با رابطه زیر شبیه‌سازی می‌شود.

$$V(t+dt) = V(t) + \Delta V(dt) \Rightarrow V_{GW}(t) = V(t_0) + \int_{t_0}^t (GW_{in}(t) - GW_{out}(t)) dt \quad (14)$$

که در آن  $V(t)$  حجم آب موجود در آبخوان در هر گام زمانی،  $GW_{in}(t)$  و  $GW_{out}(t)$  به ترتیب مجموع آبهای نفوذی به آب زیرزمینی و خروجی از آب زیرزمینی در هر گام زمانی،  $t_0$  زمان شروع شبیه‌سازی،  $t_n$  زمان پایان شبیه‌سازی و  $V(t_0)$  حجم آبخوان در ابتدای شبیه‌سازی می‌باشد.

همچنین تراز سطح آب زیرزمینی در هر گام زمانی از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$H(t+dt) = H(t) + \frac{\Delta V(dt)}{dV/dH} \quad (15)$$

که در آن  $H(t+dt)$  سطح آب زیرزمینی در زمان  $(t+dt)$  و  $dV/dH$  تغییر حجم آبخوان به علت افت یک متر سطح آب زیرزمینی که با استفاده از هیدروگراف آبخوان دشت محاسبه شده و توسط کاربر وارد مدل

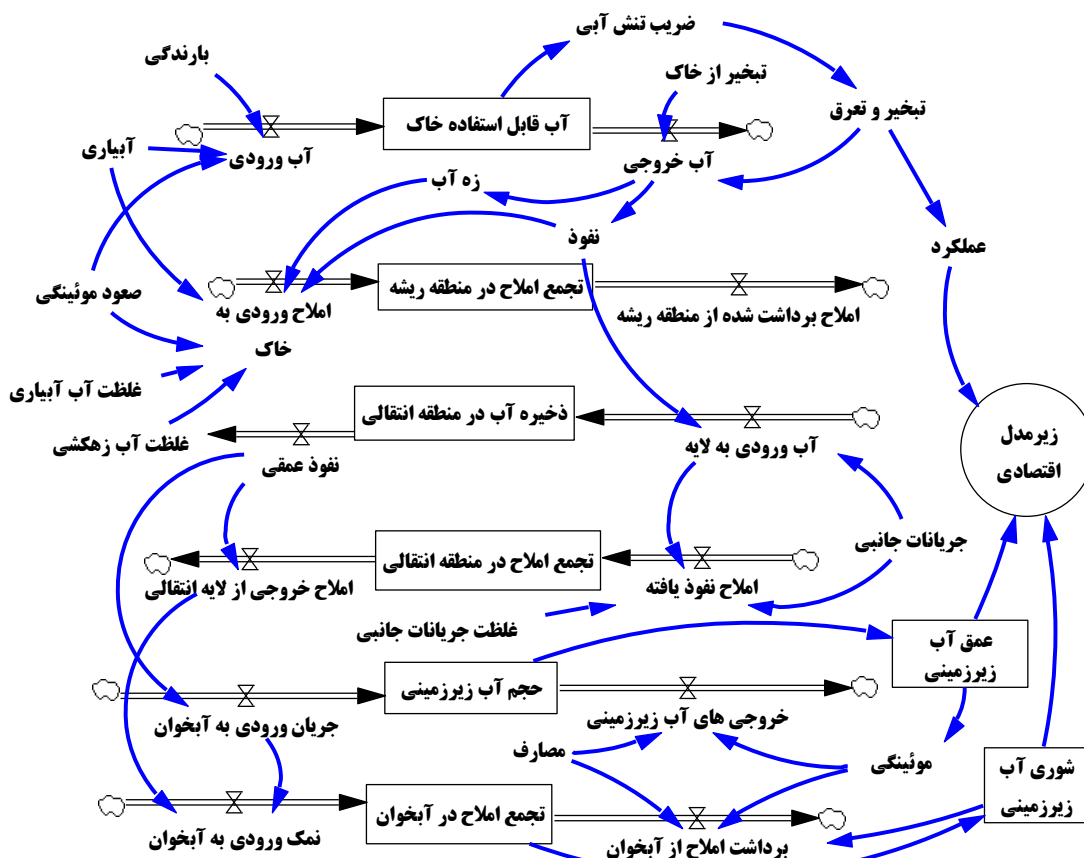
تقاضای آب شرب با استفاده از رشد جمعیت، نرخ رشد جمعیت، سرانه مصرف و کاهش سرانه مصرف از طریق توسعه زیرساخت‌ها و تقاضای آب در بخش صنعت با توجه به آب مورد نیاز برای تولید هر شغل و برنامه ایجاد اشتغال محاسبه شد.

در بخش عرضه مدل قادر به فراخوانی اطلاعات روزانه سدها، موتورپمپ‌ها، پساب و آبهای نامتعارف تحت فرمت Excel می‌باشد. عرضه آب زیرزمینی بر اساس شکاف بین عرضه آب سطحی و تقاضای آب بخش‌های مختلف و با لحاظ حداکثر ظرفیت برداشت آب از چاه‌ها (حداکثر مقدار مجاز) محاسبه شد. در بخش ارزیابی مدل از اطلاعات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت ورامین دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران استفاده شد.

$$EC_{GW} = \frac{(Mgw_{t_0}) + \int_{t_0}^m (SA_{(t)} - SH_{(t)}) dt}{0.64 \times V_{GW}(t)} \quad (19)$$

که در آن  $SH_{(t)}$  و  $SA_{(t)}$  به ترتیب مقدار نمک ورودی به و خروجی از آب زیرزمینی می‌باشد.  $V_{GW}(t)$  حجم آب زیرزمینی در هر لحظه است که از معادله ۱۴ استخراج شد. در شکل ۳ خلاصه ساختار حالت - جریان برخی از متغیرهای کلیدی و چگونگی ارتباط بین آنها در زیرمدل زیست‌محیطی ارائه شده است.

تقاضای آب در بخش شرب با توجه به جمعیت شهری و روستایی سال شروع شبیه‌سازی، نرخ رشد جمعیت شهری، نرخ رشد جمعیت روستایی و سرانه مصرف آب شبیه‌سازی شد. تقاضای آب در بخش صنعت نیز با توجه به آب مورد نیاز برای تولید یک شغل و برنامه ایجاد اشتغال در بخش صنعت شبیه‌سازی شده است.



شکل ۳- خلاصه ساختار حالت جریان متغیرهای کلیدی زیرمدل زیست‌محیطی



## شاخص‌های اقتصادی مورد استفاده در مدل IWMsim

## شاخص مجموع هزینه‌های ملی

طرح‌های منابع آبی به واسطه اثراتی که بر سیستم منابع آب به جای می‌گذارند دارای زیان‌ها و درآمدهای متعددی می‌باشند که در ارزیابی این طرح‌ها باید مد نظر قرار گیرد. برخی از هزینه‌ها توسط کشاورزان و یا بهره‌برداران بخش شرب و صنعت پرداخت می‌شود، برخی هزینه‌ها از بودجه دولت و به صورت تسهیلات و یارانه پرداخت می‌شود و برخی از هزینه‌ها به واسطه اثرات زیست‌محیطی طرح‌های منابع آب ممکن است بر آیندگان تحمیل شوند. لذا ارزیابی طرح‌های منابع آبی باید با لحاظ کلیه اثرات ملموس و غیر ملموس این طرح‌ها به صورت پویا و بلندمدت صورت گیرد. در این مطالعه دو شاخص کلان مدیریت منابع آب، هزینه‌ها ملی و درآمدهای ملی برای ارزیابی طرح‌های منابع آبی توسعه داده شد. به عبارت دیگر کلیه هزینه‌های ملموس و غیر ملموس طرح در قالب شاخص مجموع هزینه‌های ملی و درآمدهای ملموس و غیرملموس طرح در قالب شاخص درآمدهای ملی بیان شد. با این کار می‌توان اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی طرح‌های منابع آبی به صورت کمی و در قالب یک مدل پویا ارائه داد.

جهت استخراج شاخص هزینه‌های ملی، هزینه‌های ملی به دو دسته هزینه‌های ملموس ( $C_C$ ) و غیر ملموس ( $C_{non}$ ) تقسیم‌بندی شد.

$$C_{National} = C_C + C_{non} \quad (20)$$

هزینه‌های ملموس ( $C_C$ ) به صورت پویا از رابطه زیر محاسبه شد.

$$C_C(t) = C_{Ew}(t) + C_w \times V_s + C_{Ei} + C_{Lw} + C_{Li} + C_{WE}(t) + \sum_{j=1}^{j=n} CY_j \times A_j \quad (21)$$

که در آن  $C_w$  هزینه‌های سرمایه‌گذاری استحصال آب طرح‌های جدید و موجود به صورت قیمت تمام شده آب،  $V_s$  حجم آب استحصالی از منابع آب سطحی

(وابسته به سیستم آبیاری و الگوی کشت)،  $C_{Ew}$  هزینه‌های انرژی پمپاژ آب زیرزمینی یا سطحی بر اساس قیمت تمام شده انرژی،  $C_{Ei}$  هزینه‌های انرژی سیستم‌های آبیاری بر اساس قیمت تمام شده انرژی،  $C_{WE}$  هزینه کف‌شکنی چاه‌ها که به صورت پویا با تغییر تراز آب زیرزمینی تغییر می‌کند،  $C_{Li}$  هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌های آبیاری،  $C_{Lw}$  هزینه‌های نگهداری و تعمیرات چاه‌ها،  $C_{Yj}$  هزینه تولید هر هکتار از محصول  $j$  و  $A_j$  سطح زیرکشت همان محصول می‌باشد.

هزینه‌های انرژی پمپاژ آب زیرزمینی به صورت پویا از رابطه زیر محاسبه شد.

$$C_{Ew}(t) = \frac{d_{GW}(t) \times 9.81 \times V_{Gi} \times Ep}{\eta} \quad (22)$$

که در آن  $d_{GW}(t)$  عمق آب زیرزمینی در هر لحظه که از بیلان آب زیرزمینی محاسبه می‌شود،  $V_{Gi}$  حجم آب استحصالی از منابع آب زیرزمینی (وابسته به سیستم آبیاری، الگوی کشت و حجم آب زیرزمینی قابل اختصاص به بخش کشاورزی)،  $Ep$  قیمت تمام شده انرژی و  $\eta$  راندمان پمپاژ است.

هزینه‌های انرژی مصرفی سیستم‌های آبیاری ( $C_{Ei}$ ) هم وابسته به نوع سیستم و سطح زیرکشت از رابطه زیر محاسبه شد.

$$C_{Ei} = \frac{h \times 9.81 \times Ep}{\eta_i} \times \sum_{j=1}^{j=n} Ai_j \times \frac{ET_j}{Ea} \quad (23)$$

که در آن  $h$  فشار متوسط مورد نیاز سامانه آبیاری (وابسته به نوع سیستم)  $\eta_i$  راندمان متوسط پمپاژ ثانویه،  $Ai_j$  سطح کشت محصولات مختلف تحت سیستم آبیاری و  $Ep$  قیمت تمام شده انرژی می‌باشد. هزینه سیستم‌های آبیاری با تبدیل هزینه سرمایه‌ای ( $CI_i$ ) به هزینه‌های سالانه و همچنین لحاظ ۱/۵ درصد هزینه‌های سرمایه‌ای به عنوان هزینه‌های نگهداری سیستم‌های آبیاری از رابطه زیر محاسبه شد.

خدمات ز در زمان (t) و Cj مساحت یا تعداد خدماتی که در زمان (t) تسهیلات دریافت می نمایند.

### شاخص مجموع درآمدهای ملی طرح

درآمدهای ملی طرح شامل درآمدهای حاصل از فروش آب به بخش کشاورزی، شرب و صنعت، درآمد حاصل از تولید محصولات کشاورزی، درآمد حاصل از فروش برق و یا سوخت به بخش کشاورزی و درآمد حاصل از ارائه خدمات کارشناسی و حق النظاره می باشد که از رابطه زیر به صورت پویا شبیه سازی می شود.

$$R(t) = WC_{Agric} \times V_{Agric}(t) + WC_{pot} \times V_{pot}(t) + WC_{ind} \times V_{ind}(t) + \sum_{j=1}^{j=n} Y_j \times A_j \times P_j + \left( \frac{h \times 9.81}{\eta_i} \times \sum_{j=1}^{j=n} A_i \times \frac{ET_j}{Ea} + \frac{d_{GW}(t) \times 9.81 \times V_G}{\eta} \right) \times Ep + ES \times V_G \quad (29)$$

که در آب WC<sub>Agric</sub> تعرفه فروش آب به بخش کشاورزی وابسته به منبع آب، WC<sub>pot</sub> تعرفه فروش آب به بخش شرب، WC<sub>ind</sub> تعرفه آب بخش صنعت، V<sub>Agric</sub>، V<sub>ind</sub> و V<sub>pot</sub> به ترتیب حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی، شرب و صنعت از منابع آب مختلف (زیرزمینی یا سطحی)، Y<sub>j</sub>، A<sub>j</sub> و P<sub>j</sub> به ترتیب عملکرد، سطح زیرکشت و قیمت فروش محصول ز، h ارتفاع متوسط پمپاژ سیستم آبیاری مد نظر، η<sub>i</sub> راندمان پمپاژ متوسط سیستم آبیاری در منطقه، Ea راندمان کل آبیاری، η راندمان پمپاژ چاهها، Ep تعرفه انرژی و Es خدمات کارشناسی و حق النظاره به صورت درآمد واحد مترمکعب آب زیرزمینی می باشد. سایر پارامترها قبلا بیان شده اند.

### شاخص مجموع درآمدهای خالص ملی طرح

درآمد خالص ملی طرح از تفاضل مجموع درآمدهای ملی از مجموع هزینه های ملی طرح محاسبه می شود.

$$NB(t) = R(t) - C_{National}(t) \quad (30)$$

بهره وری آب یکی از مهمترین شاخص های ارزیابی طرح های توسعه منابع است که در مدل IWRMsim به

$$C_{Li} = CI_i \times \left[ \frac{i(1+i)}{(1+i)^n} \right] + 0.015 \times t \times CI_i \quad (24)$$

که در آن i نرخ بهره و n عمر مفید سیستم می باشد. هزینه کف شکنی چاهها در اثر افت سطح آب زیرزمینی هم از رابطه زیر محاسبه شد.

$$C_{WE}(t) = d_{GW}(t+dt) - d_{GW}(t) \times WE_p \quad (25)$$

که در آن d<sub>GW</sub>(t) عمق آب زیرزمینی در هر لحظه و WE<sub>p</sub> هزینه هر متر کف شکنی در سال مبنای می باشد. هزینه های غیرملموس شامل ارزش ذاتی منابع آب (ارزشی که آب به صورت ذاتی دارا می باشد، افت کمی و کیفی آب از ارزش آن خواهد کاست) و سایر هزینه های که به واسطه افت کمی و کیفی آب واقع می شود، می باشد. هزینه های غیرملموس شامل هزینه های لازم برای جبران افت کمی و کیفی آبخوان (Compensation cost)، زیان های ناشی از افت کمی و کیفی آبخوان بر درآمد کشاورزان در بلندمدت و تسهیلاتی دولتی (مثلا برای توسعه آبیاری تحت فشار) از روابط زیر شبیه سازی شد.

$$C_{non}(t) = C_{com}(t) + CF(t) \quad (26)$$

$$C_{com}(t) = (V_{GW}(t_0) - V_{GW}(t)) \times \omega + (EC_{GW}(t) - EC_{GW}(t_0)) \times V_{GW}(t) \times Cd + \sum_{j=1}^{j=n} (1 - Yr(t)_j) A_j Y_p_j Y_c_j \quad (27)$$

$$CF(t) = \sum_{j=0}^{j=n} K(t)_j \times C(t)_j \quad (28)$$

که در آنها C<sub>non</sub> مجموع هزینه های غیر ملموس، C<sub>com</sub> هزینه های لازم برای جبران افت کمی و کیفی آبخوان و هزینه های ناشی از آن بر درآمد کشاورزان، CF تسهیلات پرداختی دولت، V<sub>GW</sub>(t<sub>0</sub>) حجم استاتیک آبخوان در شروع شبیه سازی، V<sub>GW</sub>(t) حجم استاتیک آبخوان زمان (t)، ω هزینه هر مترمکعب تغذیه مصنوعی، Cd هزینه هر مترمکعب شورزدایی (شیرین سازی آب)، Y<sub>rj</sub> عملکرد نسبی محصول ز در واکنش به کیفیت آب در زمان (t)، A<sub>j</sub> سطح تحت پوشش محصول ز و Y<sub>cj</sub> قیمت هر کیلوگرم محصول ز، K<sub>j</sub> میزان تسهیلات ارائه شده برای یک واحد

صورت پویا برای بخش کشاورزی به دو صورت فیزیکی و اقتصادی تعریف شده است.

$$WP_{ph}(t) = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j \times A_j}{\sum_{j=1}^n \frac{A_j \times ET_C(t)}{Ea \times Ed \times Et}} \quad (31)$$

$$WP_{Eco}(t) = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j \times A_j \times P_j}{\sum_{j=1}^n \frac{A_j \times ET_C(t)}{Ea \times Ed \times Et}} \quad (32)$$

در روابط بالا Ea، Ed و Et به ترتیب راندمان کاربرد (وابسته به سیستم آبیاری)، راندمان توزیع و راندمان انتقال (وابسته به سیستم آبیاری و منبع آب) می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه پارامترهای موجود در ۳۲ رابطه اخیر پویا بوده و با گذشت زمان تغییر می‌کنند. به عنوان مثال با تغییر سطح تحت پوشش سامانه‌های آبیاری مختلف متوسط راندمان کاربرد در سطح حوضه طی زمان تغییر کرده و مدل قادر به لحاظ و شبیه‌سازی همه این مسائل می‌باشد.

### پارامترهای ورودی و خروجی مدل

اطلاعات ورودی مدل عبارتند از: اطلاعات اقلیمی شامل میزان بارش در ارتفاعات (جهت محاسبه جریان‌های سطحی و زیرسطحی ورودی به آبخوان)، میزان بارش در دشت (جهت محاسبه بارش موثر و بارش نفوذ عمقی)، پارامترهای لازم برای محاسبه تبخیر به روش فائو پنمن مانتیت و یا میزان تبخیر از تشتک تبخیر در دشت (ایستگاه‌های موجود در دشت)؛ اطلاعات منابع آب شامل کمیت و کیفیت آب‌های سطحی ورودی، کمیت و کیفیت آب‌های سطحی خروجی از حوضه، کیفیت آب‌های زیرزمینی در شرایط حاضر، ضرایب هیدرودینامیک آبخوان (جهت محاسبه حجم استاتیک آبخوان)، اطلاعات مربوط به جمعیت شامل جمعیت شرایط موجود به تفکیک شهر و روستا، نرخ رشد جمعیت به تفکیک شهر و روستا (با توجه به زاد و ولد، مرگ و میر و مهاجرت) و سرانه آب مصرفی فعلی شهر و روستا؛ اطلاعات

کشاورزی شامل سطح زیرکشت، عملکرد و پارامترهای گیاهی (Kc، Ky، شوری آستانه کاهش عملکرد، شیب کاهش عملکرد محصولات مختلف، تاریخ کاشت، و برداشت)؛ پارامترهای آبیاری شامل سطح زیرکشت هر یک از سیستم‌های آبیاری، راندمان آبیاری (انتقال، توزیع و کاربرد وابسته به نوع سیستم آبیاری)؛ پارامترهای اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری واحد هکتار هر یک از سیستم‌های آبیاری، نرخ بهره، هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی (به جز آب، انرژی و سیستم آبیاری) و پارامترهای حاکمیتی شامل تعرفه آب و انرژی. مدل قابلیت فراخوانی اطلاعات مربوط به اقلیم، عرضه روزانه و ماهانه آب به تفکیک منبع، هیدرولوژی، خصوصیات خاکشناسی (شوری عصاره اشباع، بافت خاک، TAW، RAW)، ضرایب گیاهی الگوی کشت (Kc، Ky)، سطح زیرکشت و هزینه‌های کاشت، داشت برداشت در سناریوهای مختلف را از طریق فایل Excel دارا می‌باشد. در شبکه آبیاری ورامین راندمان کاربرد آبیاری ۶۰ درصد، راندمان انتقال و توزیع در صورت استفاده از شبکه ۶۰ درصد و در صورت استفاده از منابع آب زیرزمینی ۸۳ درصد (بی نام، ۱۳۹۳) در نظر گرفته شد. با توجه به سهم حدود ۵۶ درصدی منابع آب زیرزمینی راندمان آبیاری کل دشت ورامین ۴۲/۰ درصد برآورد می‌شود. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات دشت ورامین ارائه شده است. محدوده مطالعاتی ورامین در جنوب شرقی تهران واقع شده است و دارای مساحت ۱۵۸۴ کیلومترمربع است. مهمترین منبع آب تامین نیاز کشاورزی منطقه رودخانه جاجرود می‌باشد. علاوه بر دریافت رودخانه جاجرود از بالادست محدوده مطالعاتی، زهکش‌های مسیل‌های تهران که عموماً از طریق کانال پیروزی جمع‌آوری می‌گردد و همچنین رودخانه کن به این محدوده مطالعاتی تخلیه می‌گردد. این محدوده مطالعاتی از یک آبخوان آبرفتی با وسعت ۱۰۷۵ کیلومترمربع که کلیه گستره دشت را فرا گرفته، تشکیل گردیده است.

جدول ۱. برخی از مشخصات منطقه مورد مطالعه

عنوان	مقدار	واحد	عنوان	مقدار	واحد
جمعیت منطقه (۱۳۸۵)	۸۲۲۸۶۶	نفر	سهم کشاورزی از مصرف آب	۸۷/۲	%
متوسط دما	۱۷/۴	سانتیگراد	کل اراضی کشاورزی آبی	۵۳۴۶۸	هکتار
متوسط بارندگی ارتفاعات	۲۵۲,۳	میلی متر	عمق آب زیرزمینی	۳-۱۵۰	متر
متوسط بارندگی دشت	۱۶۴/۷	میلی متر	ضریب ذخیره آبخوان	۶	درصد
متوسط تبخیر ارتفاعات	۲۴۳۶/۸	میلی متر	آب زیرزمینی تجدیدپذیر	۳۸۱	م.م.م
متوسط تبخیر دشت	۲۵۵۴	میلی متر	حجم استاتیک آبخوان	۴۰۰۰	م.م.م
کسری سالانه آبخوان	۱۰۴	م.م.م	راندمان کاربرد	۶۰	درصد
راندمان انتقال آب سطحی	۶۰	درصد	آب سطحی	۳۶	درصد
و توزیع آب زیرزمینی	۸۳	درصد	راندمان کل آب زیرزمینی	۵۰	درصد

درآمدهای ملی، درآمد خالص ملی، درآمد حاصل از تولیدات کشاورزی، درآمد فروش آب به بخش شرب و صنعت تحت سناریوهای مختلف منابع آب، بررسی اثر سناریوها مختلف حاکمیتی مانند تعرفه آب و انرژی بر شاخص‌های کلیدی، بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب کشاورزی و همچنین ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب از مهمترین خروجی‌های مدل می‌باشد.

#### واسنجی و صحت سنجی مدل

قبل از استفاده از مدل برای ارزیابی گزینه‌های سیاست‌گذاری، می‌باید نسبت به عملکرد صحیح مدل اطمینان حاصل نمود و چنانچه خروجی مدل بیانگر روند مسئله باشد، می‌توان امیدوار بود که مدل شامل عناصر و مکانیزم‌های کلیدی در ایجاد رفتار مورد نظر است. در این مطالعه صحت‌سنجی مدل از دو طریق آزمون ساختار غیرمستقیم و صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای موجود انجام گرفت. آزمون‌های صحت‌سنجی ساختاری غیرمستقیم شامل اجرای تخصصی مدل بوده و می‌تواند عیب‌های مدل را غیرمستقیم مشخص نماید (سیسل و همکاران، ۲۰۰۶).

وسعت ارتفاعات این محدوده مطالعاتی ۵۰۹ کیلومتر مربع می‌باشد. در دشت ورامین جمع مصارف سالانه آب حدود ۷۰۹/۳۵ میلیون متر مکعب است که ۳۵ درصد آن (۲۵۰/۴۷ میلیون متر مکعب) از جریانهای سطحی و چشمه‌های ارتفاعات تامین می‌شود و ۶۵ درصد بقیه (۴۵۸/۸۸ میلیون متر مکعب) از منابع آب زیرزمینی شامل چاه، قنات و چشمه‌های آبرفتی می‌باشد. ۸۷/۲ درصد منابع آب منطقه به مصرف کشاورزی، ۹/۸۵ درصد به مصرف شرب و ۲/۹۵ درصد به مصرف صنعت می‌رسد.

در جدول ۲ وضعیت موجود الگوی کشت، و ترکیب کشت محصولات کشاورزی محدوده مطالعاتی دشت ورامین ارائه شده است. لازم به ذکر است که در حال حاضر حدود ۹۰ درصد اراضی به روش سطحی، ۹ درصد بارانی و یک درصد به روش قطره‌ای آبیاری می‌شوند.

مهمترین متغیرهای کلیدی که به عنوان خروجی مدل تحت سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب قابل شبیه‌سازی هستند عبارتند از: تراز و شوری آب زیرزمینی، شوری خاک، عملکرد محصولات مختلف کشاورزی، هزینه‌های ملی هر یک از سناریوهای مدیریتی منابع آب،

جدول ۲. سطح زیر کشت محصولات کشاورزی دشت ورامین

عنوان	واحد	گندم	جو	سورگوم	یونجه	سبزی	گوجه‌فرنگی	خیار	خریزه	پنبه	سایر	باغات	مجموع
مساحت	ha	۱۶۹۲۶	۱۷۲۷۴	۲۵۱۸	۳۵۵۶	۳۵۲۱	۳۸۶۶	۱۱۲۱	۱۷۷۱	۱۶۴۲	۴۱۷	۸۷۴	۵۳۴۸۶
درصد	ha	۳۱/۶۵	۳۲/۳	۴/۷۱	۶/۶۵	۶/۵۸	۷/۲۳	۲/۱۰	۳/۳۱	۳/۰۷	۰/۷۸	۱/۶۳	۱۰۰

در شکل‌های ۴ تا ۶ حساسیت پارامترهای کلیدی مدل شامل تراز سطح آب زیرزمینی، حجم استاتیک آبخوان، شوری آب زیرزمینی و شوری عصاره اشباع خاک نسبت به برخی از پارامترهای ورودی شامل ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان، سرانه آب مصرفی شرب هر نفر و تبخیر از سطح آبخوان ارائه شده است. در شکل‌های مذکور اجرای ۱ مربوط به شرایط موجود، اجرای ۲ مربوط به ۲۵ درصد کاهش پارامتر ورودی و اجرای سوم مربوط به ۲۵ درصد افزایش پارامتر ورودی می‌باشد. یکی از پارامترهای اثرگذار بر خروجی‌های مدل ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان می‌باشد (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که خروجی مدل به پارامتر ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان حساس بوده و افزایش مقدار آن باعث افزایش حجم استاتیک آبخوان و افزایش کیفیت آب زیرزمینی به سبب رقیق شدن و همچنین کاهش شوری خاک به علت آبتوی می‌شود. با توجه به حجم اندک آب شرب مصرفی دشت ورامین نسبت به حجم آب مصرفی کشاورزی تغییرات ۲۵ درصدی سرانه آب مصرفی هر شخص در دشت تغییرات اندکی در حجم استاتیک و تراز آب زیرزمینی ایجاد نموده و تقریباً بر روی کیفیت آب زیرزمینی و شوری خاک بی اثر می‌باشد (شکل ۵). همچنین با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در دشت ورامین در اغلب دشت دارای عمقی بیشتر از ۳۰ متر قرار دارد نقش تبخیر از سطح آبخوان بر روی بیلان و متغیرهای کلیدی مدل اندک می‌باشد (شکل ۶). شوری خاک هیچ حساسیتی به تبخیر از سطح آبخوان نشان نداده است.

### واسنجی

واسنجی مدل برای پارامترهای که در اندازه‌گیری و محاسبه آنها عدم اطمینان وجود دارد مانند ضریب شکل منحنی تبخیر نسبت به رطوبت (fk)، ضریب تلفات نفوذ عمقی (dp) و تلفات نشت از کانال‌های شبکه (ds) صورت گرفت. در شکل ۷ شبیه‌سازی برخی از

در این مقاله آزمون ساختاری مدل برای تک تک زیرمدل‌ها و برای کل مدل به صورت جداگانه از طریق آزمون ساختاری غیرمستقیم (آزمون رفتار ساختارگرا) که به اصطلاح واقعیت مصنوعی نامیده می‌شود، انجام گرفت. در بخش بعد برای آزمون صحت مدل از داده‌های مشاهده‌ای محدوده مطالعاتی ورامین واقع در حوضه آبریز درجه دو دریاچه نمک استفاده شد. برای این منظور مدل با استفاده از اطلاعات اقلیمی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و زیست‌محیطی محدوده مطالعاتی ورامین طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۴ واسنجی و با اطلاعات ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱ همان محدوده صحت‌سنجی شد. برای صحت‌سنجی مدل در برآورد عملکرد که یکی از مهمترین خروجی‌های مدل در مباحث اقتصادی و اجتماعی می‌باشد از مطالعات مشعل و همکاران (۱۳۸۷) استفاده شد (جدول ۳). در مطالعه مورد اشاره که به منظور تعیین تابع تولید ذرت علوفه‌ای در منطقه ورامین انجام شده بود، عملکرد ذرت علوفه‌ای در ۱۲ سطح آبی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درصد اندازه‌گیری و گزارش شده است. در بخش آزمون رفتاری علاوه بر آزمون حدی از پارامترهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب باقیمانده (CRM) و حداکثر خطا (ME) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (30)$$

$$ME = \max |S_i - M_i| \quad (31)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (32)$$

که در آن  $S_i$  و  $M_i$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

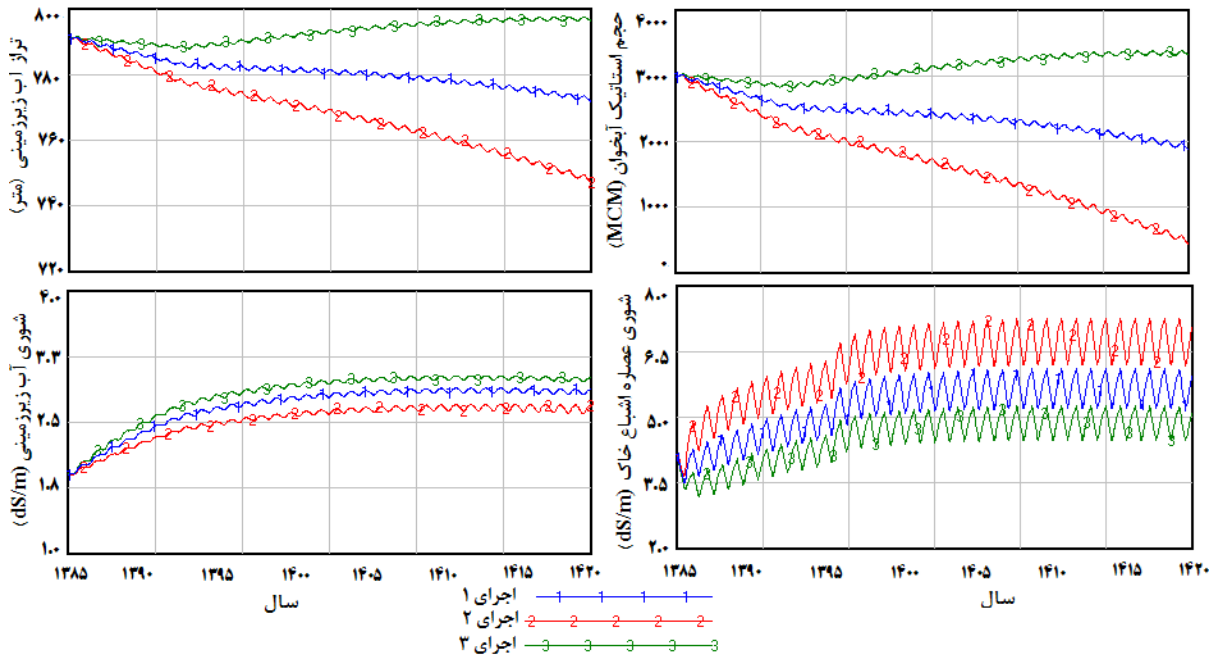
### نتایج

#### آنالیز حساسیت مدل

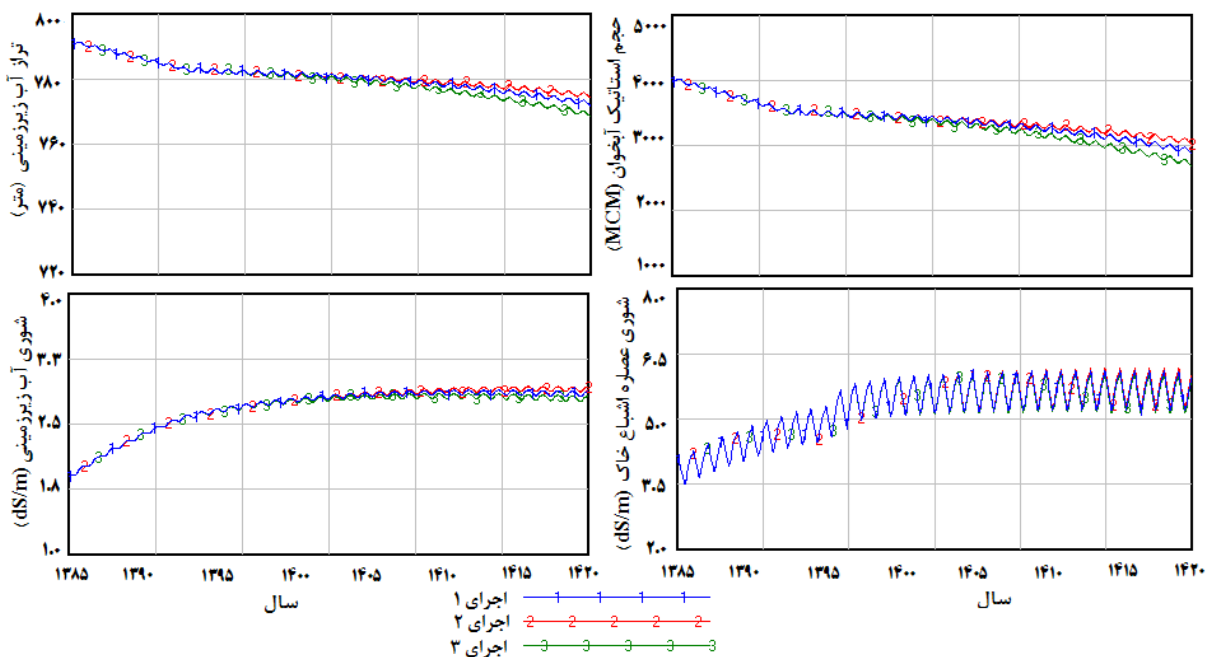
بررسی حساسیت مدل به پارامترهای ورودی با استفاده از ابزار Synthesim نرم افزار Vensim انجام شد.

است. واسنجی متغیرها  $fk$ ،  $ds$  و  $dp$  با تابع هدف کمترین RMSE در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده به ترتیب ۴، ۱۳ درصد مصارف آب سطحی و ۲۳ درصد کل آب مصرفی بخش کشاورزی محاسبه شد

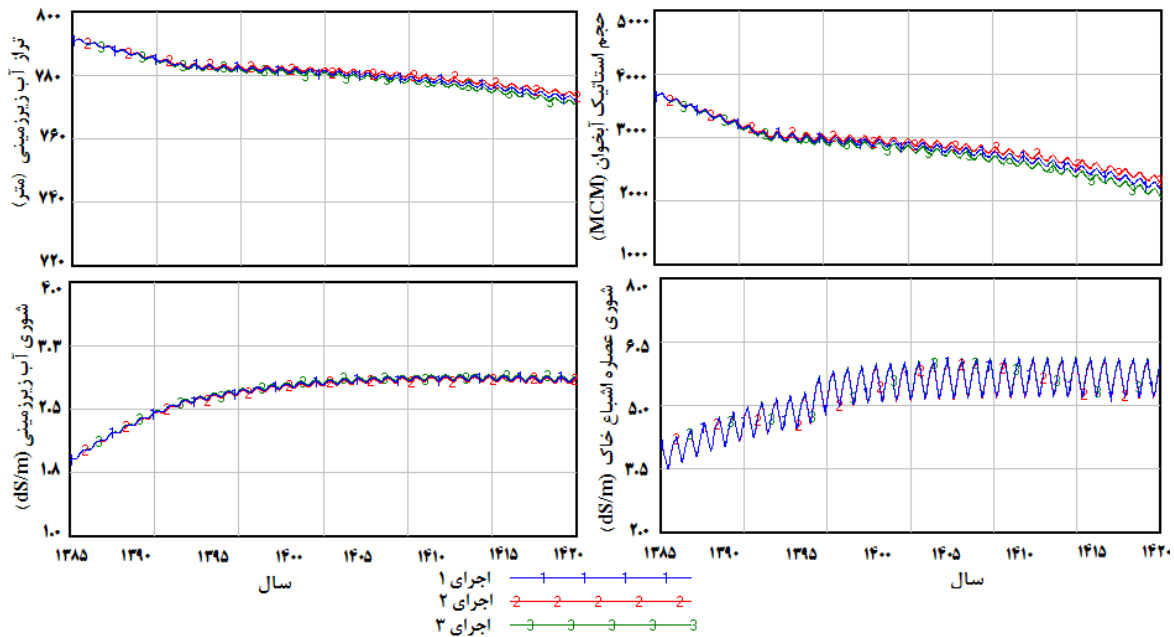
پارامترهای مدل ( $ET_c$ ،  $ET_p$ ،  $ET_o$ )، مقدار آب آبیاری استفاده شده به تفکیک سیستم‌های آبیاری مختلف، کل آب مصرفی در بخش کشاورزی و مقدار آب برگشتی بخش کشاورزی طی دو سال (۷۲ ده روز) ارائه شده



شکل ۴. حساسیت برخی از متغیرهای کلیدی مدل نسبت به ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان (تلفات نفوذ عمقی)



شکل ۵. حساسیت برخی از متغیرهای کلیدی مدل نسبت به سرانه آب مصرفی شرب



شکل ۶. حساسیت برخی از متغیرهای کلیدی مدل نسبت به تبخیر از سطح آب زیرزمینی

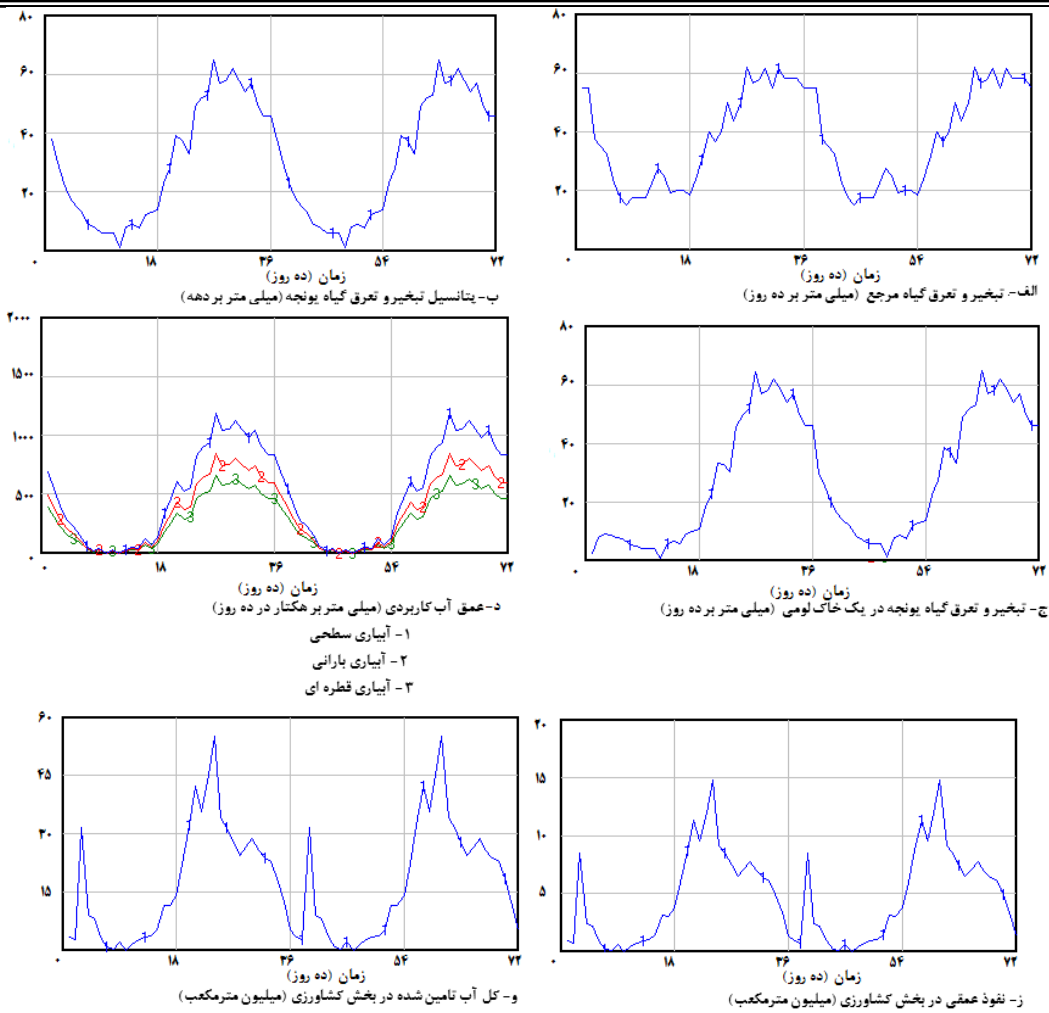
دیگر در صورت افزایش تعرفه‌های انرژی استفاده از سیستم‌های آبیاری با راندمان بالا به واسطه کاهش مصرف آب، کاهش هزینه‌های استحصال آب از چاه‌ها و هزینه انرژی کمتر نسبت سیستم‌های آبیاری سطحی توجیه‌پذیری بیشتری خواهند داشت. همانطور که ملاحظه می‌شود رفتار مدل در شرایط حدی افزایش انرژی منطقی می‌باشد. علاوه بر آزمون حدی افزایش قیمت آب، آزمون‌های حدی دیگری مثل اثر حذف آبیاری بر روند افت سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی و همچنین افزایش ناگهانی تعرفه آب بر اقتصاد کشاورزی دشت ورامین مورد بررسی قرار گرفت که همگی بیانگر صحت مدل در شرایط حدی بود.

#### صحت‌سنجی مدل

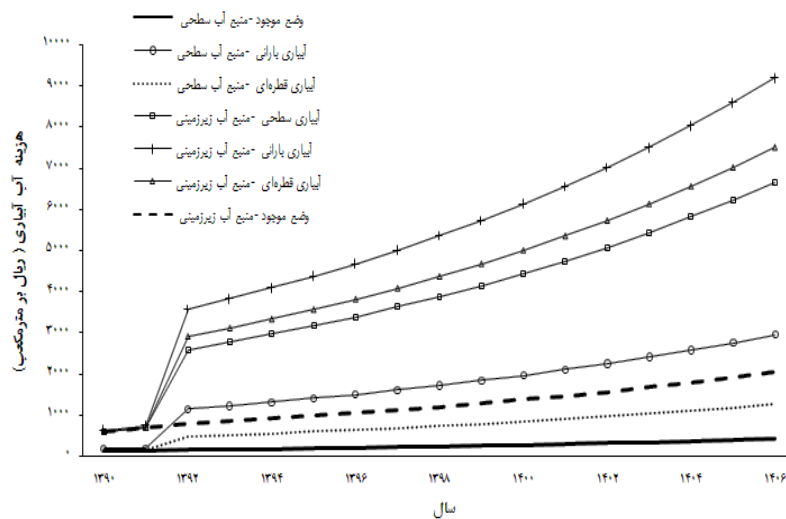
در جدول (۳) عملکرد شبیه‌سازی شده با مدل IWMsim در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است. نتایج ارزیابی نشان از دقت مدل در برآورد عملکرد نسبی در بازه ۴۰ تا ۱۰۰ درصد نیاز آبی می‌باشد.

در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب رفتار متغیرهای کلیدی هزینه استحصال و توزیع هر مترمکعب آب و هزینه استحصال و توزیع آب برای آبیاری هر هکتار اراضی حوضه به شرایط حدی افزایش ناگهانی قیمت انرژی [به قیمت تمام شده] به تفکیک سیستم آبیاری و منبع آب ارائه شده است. نتایج آزمون حدی نشان می‌دهد که با افزایش ناگهانی تعرفه انرژی، هزینه استحصال و توزیع هر مترمکعب آب بسته به منبع آب و سیستم آبیاری متفاوت می‌باشد. افزایش تعرفه انرژی بهره‌برداران آبهای زیرزمینی را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد (شکل ۸). با افزایش تعرفه انرژی، هزینه توزیع و استحصال هر مترمکعب آب در سیستم‌های آبیاری تحت فشار بیشتر از سیستم‌های آبیاری سطحی می‌باشد. لیکن اگر هزینه استحصال و توزیع آب برای آبیاری هر هکتار لحاظ شود (شکل ۹)، نتایج متفاوت خواهد بود.

با افزایش تعرفه انرژی، هزینه استحصال و توزیع آب برای هر هکتار در سیستم‌های آبیاری سطحی بیشتر از سیستم‌های آبیاری تحت فشار افزایش می‌یابد. به عبارت

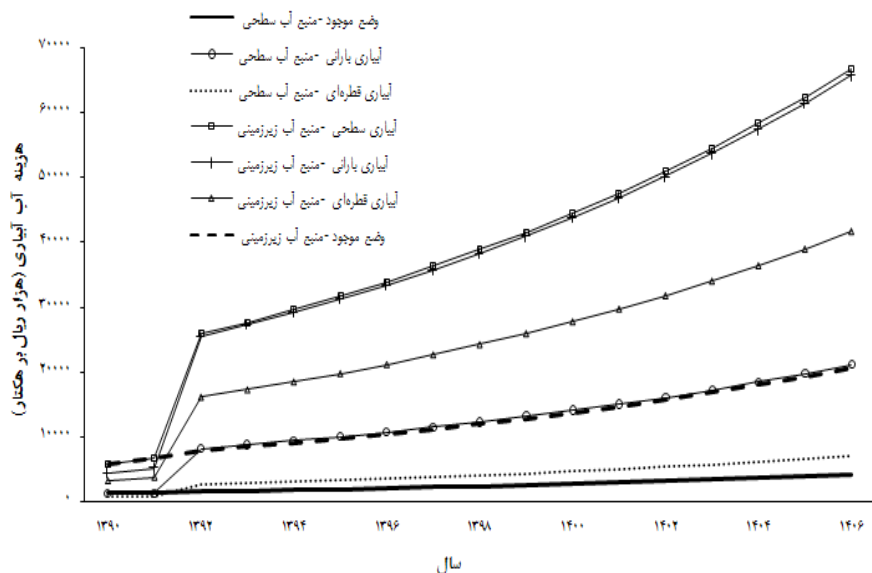


شکل ۷. شبیه سازی برخی از پارامترهای اساسی پیلان آب در خاک حین واسنجی مدل (مهر ۱۳۸۱ تا مهر ۱۳۸۳)



شکل ۸. آزمون حدی مدل برای شرایط حدی افزایش ناگهانی قیمت انرژی (هزار ریال بر مترمکعب)





شکل ۹. آزمون حدی مدل برای شرایط حدی افزایش ناگهانی قیمت انرژی (هزار ریال بر هکتار)

محدوده‌های کم‌آبیاری اقتصادی، مدل IWMSim دارای قابلیت‌های بالاتری نسبت به مدل‌های زراعی مانند Aquacrop و غیره دارا می‌باشد.

با توجه به پارامترهای مورد نیاز کم، واسنجی ساده، قابلیت لینک با مدل‌های سطح حوضه آبریز، پویایی ناشی از تغییرات زمانی بلندمدت و همچنین برآورد قابل قبول در

جدول ۳. مقادیر عملکرد مشاهده‌ای ذرت در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده آن با مدل IWMSim

مدل IWMSim	عملکرد نسبی مشاهده‌ای	درصد تامین نیاز آبی
۰/۲۹	۰/۱۲	۱۰
۰/۳۸	۰/۲۸	۲۰
۰/۴۸	۰/۳۲	۳۰
۰/۵۸	۰/۵۵	۴۰
۰/۶۷	۰/۷۰	۵۰
۰/۷۵	۰/۷۹	۶۰
۰/۸۲	۰/۸۴	۷۰
۰/۹۰	۰/۹۱	۸۰
۰/۹۷	۱/۰۰	۹۰
۱	۱/۰۰	۱۰۰
۱	۰/۹۱	۱۱۰
۱	۰/۸۱	۱۲۰

جدول ۴. مقادیر مشاهده‌ای شوری و تراز آب زیرزمینی در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده آن با مدل SD

تراز آب زیرزمینی (متر)			شوری آب زیرزمینی (میکرو موس بر سانتیمتر)		
زمان	مشاهده	SD	زمان	مشاهده	SD
۸۴/۰۷	۷۹۱/۰۰	۷۹۱/۰۰	۸۵/۰۲	۱۸۲۳	۱۷۹۱
۸۵/۰۷	۷۹۰/۹۶	۷۹۰/۵۰	۸۵/۰۷	۱۷۴۴	۱۸۱۱
۸۶/۰۷	۷۸۹/۹۱	۷۸۹/۴۵	۸۶/۰۲	۱۸۵۱	۱۸۶۱
۸۷/۰۷	۷۸۶/۷۱	۷۸۷/۵/۰	۸۶/۰۷	۱۹۸۰	۱۹۱۱
۸۸/۰۷	۷۸۳/۶۲	۷۸۳/۹۳	۸۷/۰۲	۱۹۲۳	۱۸۹۱
۸۹/۰۷	۷۸۱/۳۳	۷۸۱/۶۵	۸۷/۰۷	۱۸۸۲	۱۹۶۱
۹۰/۰۷	۷۷۹/۷۲	۷۸۰/۲۰	۸۸/۰۲	۲۰۳۲	۱۹۷۱
۹۱/۰۷	۷۷۹/۸۷	۷۷۹/۵۰	۸۸/۰۹	۲۱۴۶	۲۰۵۱
-	-	-	۸۹/۰۲	۲۰۹۸	۲۰۴۱
-	-	-	۸۹/۰۹	۱۹۸۴	۲۰۵۱
-	-	-	۹۰/۰۲	۲۰۲۹	۲۰۳۱
-	-	-	۹۰/۰۷	۲۲۵۹	۲۱۱۱

جدول ۵. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل

متغیر	R <sup>2</sup>	CRM	ME	RMSE
عملکرد ذرت	۰/۹۲	-۰/۰۷	۲۰ درصد	۱۴/۲ درصد
تراز آب زیرزمینی	۰/۹۹	۰/۰۰	۴۵ سانتیمتر	۳۷ سانتیمتر
شوری آب زیرزمینی	۰/۷۹	-۰/۰۱	۱۴۸ میکرو موس بر سانتیمتر	۷۹ میکرو موس بر سانتیمتر

شوری آب زیرزمینی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل قابلیت خوبی در شبیه‌سازی شوری آب زیرزمینی (RMSE برابر ۵۷ میکروزیمنس بر سانتیمتر، R<sup>2</sup> برابر ۰/۷۹) و ماکزیمم خطای ۱۴۸ میکروزیمنس بر سانتیمتر) و تراز آب زیرزمینی (RMSE برابر ۳۷ سانتیمتر، R<sup>2</sup> برابر ۰/۹۹) و ماکزیمم خطای ۴۵ سانتیمتر) دارا می‌باشد. مطالعات زیادی در زمینه قابلیت مدل‌های پویا در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی صورت گرفته (Giordano, 2012؛ علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳ و نظری، ۱۳۹۲) انجام گرفته است. نتایج بیانگر دقت روش پویایی

Nozari و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد محصولات مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان را شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که روش پویایی سیستم ابزار قدرتمندی در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف می‌باشد که از این حیث با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. برای صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی تراز و شوری آب زیرزمینی از اطلاعات سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱ کموگراف و هیدروگراف دشت ورامین استفاده شد (جدول ۴).

همچنین در جدول ۳ شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در برآورد شاخص‌های کلیدی عملکرد محصول، تراز و

و صحت‌سنجی شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر است متغیرهای کلیدی عملکرد نسبی محصولات زراعی ( $RMSE=14.2\%$ ،  $ME=20\%$  و  $R^2=0.92$ )، تراز آب زیرزمینی ( $RMSE=0.37m$ ،  $ME=0.45m$  و  $R^2=0.99$ ) و شوری آب زیرزمینی ( $RMSE=57 \mu S/cm$  و  $ME=148 \mu S/cm$  و  $R^2=0.79$ ) را با دقت مناسب شبیه‌سازی نماید. با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی بلندمدت طرح‌های توسعه منابع آب در سطح حوضه آبریز مورد ارزیابی قرار داد. همچنین مدل ارائه شده می‌تواند یاری رسان محققان و مدیران بخش آب در ارزیابی بررسی ابعاد مختلف اجرای سناریوهای مختلف قیمت‌گذاری آب و انرژی، الگوی کشت، توسعه آبیاری تحت فشار و استفاده از پساب باشد.

سیستم در شبیه‌سازی آبهای زیرزمینی می‌باشد که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از رویکرد پویایی سیستم یک مدل جامع برای ارزیابی طرح‌های توسعه و مدیریت منابع آب ارائه، واسنجی و صحت‌سنجی شد. مدل مدیریت یکپارچه منابع آب ارائه شده (IWMsim) شامل ۳۱۵ متغیر اصلی و کمکی و پنج زیرنگاشت (شامل  $4 \times 3 \times 8 \times 5 \times 3$  پارامتر) قابلیت شبیه‌سازی همزمان ۱۴۴۰ حالت را دارا می‌باشد. در مدل IWMsim برای بررسی اثرات متقابل اقتصادی- زیست‌محیطی طرح‌های توسعه منابع آب، دو شاخص کلان هزینه‌های ملی و درآمد ملی توسعه داده شد. سپس مدل ارائه شده با استفاده از اطلاعات اقلیمی و هیدرولوژیکی بلندمدت محدوده مطالعاتی ورامین واسنجی

### فهرست منابع

- بی‌نام، ۱۳۹۳. گزارش مطالعات بازنگری و علاج بخشی شبکه آبیاری و زهکشی دشت ورامین. شرکت مهندسان مشاور مهارآب عمران گستر.
- سهرابی ملایوسف، ت؛ لیاقت، ع، علیزاده، ح.ع و نظری، ب. ۱۳۹۳. مدل‌سازی و شبیه‌سازی آثار بلندمدت استفاده از فاضلاب تهران بر منابع آب و خاک دشت ورامین با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵ (۳): ۲۸۱-۲۶۷.
- علیزاده، ح. ع؛ لیاقت، ع و سهرابی ملایوسف، ت. ۱۳۹۳. ارزیابی سناریوهای توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۳ (۴): ۱۰-۱۵.
- مشعل، م، وراوی پور، م، سادات‌نوری، س و زارع زیرک، ا. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی عمق آب مصرفی ذرت با کم آبیاری (مطالعه موردی: دشت ورامین). مجله پژوهش کشاورزی. ۸ (۴): ۱۳۴-۱۲۳.
- نظری، ب.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی پویایی شبکه‌های آبیاری با رویکرد بهره‌وری آب. رساله دکتری رشته آبیاری و زهکشی. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی. دانشگاه تهران. ۱۵۰ صفحه.

Adeniran, A.E., and Bamiro, A.O. 2010. A System Dynamic Strategic Planning Model for a Municipal Water Supply Scheme, 28<sup>th</sup> International Conference of the System Dynamics Society, 25-29 July, Seoul, Korea.

Alien, R.G., Pereira, L.S. and Raes, D., 1998. FAO irrigation and drainage paper No. 56: crop evapotranspiration.

- Amahmid, O., Asmama, S., and Bouhoum, K. 1999. The effect of wastewater reuse in irrigation on the contamination level of food crops by Giardia cysts and Ascaris eggs. *International Journal of Food Microbiology*.49(1-2): 19-26.
- Ayars, J.E., D.L. Corwin, and G.J. Hoffman. 2012. Leaching and root zone salinity control. *ASCE Manual and Report Engineering Practice No 71 Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition)*, ASCE Riston.Chapter 12: 371-403.
- Bala, B. K. Satter, M. A. Halima, M. A., and Talukdar, M. S. U. 1998. Simulation of Crop-Irrigation Systems. *Agricultural Systems (27)* 51-65.
- Bhatkoti, R. and Triantis, P.K. (2011): Quantitative Evaluation of the Performance of Water Management System in the Washington Metropolitan Area, The 29th International Conference of the System Dynamics Society
- Fernández, J.M. and Selma, M.A.E., 2004. The dynamics of water scarcity on irrigated landscapes: Mazarrón and Águilas in south-eastern Spain. *System Dynamics Review*, 20(2), pp.117-137.
- Gastélum, J. R., Valdés, J. B and Stewart, S. 2010. A System Dynamics Model to Evaluate Temporary Water Transfers in the Mexican Conchos Basin. *Water Resources Management* . 24: 1285-1311.
- Giordano, R., Brugnach, M., & Vurro, M. 2012. System dynamic modelling for conflicts analysis in groundwater management (Doctoral dissertation, International Environmental Modelling and Software Society.
- Goldani, M., Amadeh, H., and Zamanipour, M. 2011. A System Dynamics Approach in Water Resource Management and Government Subsidy Policy: A Case Study of Tajan Basin in Iran, the 29th International Conference of the System Dynamics Society.
- Hjorth, P, Bagheri, A. 2006. Navigating Towards Sustainable Development: A System Dynamics Approach. *Futures*, 38 (1): 74-92.
- Khan, S., Yufeng, L., & Ahmad, A. 2009. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modelling & Software*, 24(12), 1363-1372.
- Li, Y.P and Huang, G. H. 2012. A recourse-based nonlinear programming model for stream water quality management. *Stoch Environ Res Risk Assess* 26:207–223.
- Li, Y.P., Huang, G.H and Chen, X. 2009. Multistage scenario-based intervalstochastic programming for planning water resources allocation. *Stoch Environ Res Risk Assess* 23:781–792
- Madani, K., and Mariño, M. A. 2009. System dynamics analysis for managing Iran’s Zayandeh-Rud river basin. *Water resources management*, 23(11), 2163-2187.
- Masike, S. 2011. Application of system dynamic approach for water planning and decision making under water scarcity at Jwaneng diamond mine. *Journal of Geography and Regional Planning*. 4(5): 251-260.
- Nasiri, F., Savage, T., Wang, R., Barawid, N and Zimmerman, J. B. 2013. A system dynamics approach for urban water reuse planning: a case study from the Great Lakes region. *Journal of Stoch Environ Res Risk Assess*. 27:675–691
- Nozari H, Heydari M, Azadi S. 2014. Simulation of a Right Abshar Irrigation Network and Its Cropping Pattern Using a System Dynamics Approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.140(12):05014008.
- Nozari, H. and Liaghat, A., 2014. Simulation of Drainage water quantity and quality using system dynamics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(11), p.05014007..
- Rehan, R., Knight, M.A, Haas, C.T and Unger, A.J.A. 2011. Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems. *Water research* 45: 4737 -4750.
- Saysel, A and Barlas, Y. 2006. Model simplification and validation with indirect structure validity tests. *System Dynamics Review* 22(3): 241–262.
- Susnik, J., Vamvakieridou-Lyroudia, L. S., Savić, D. A., and Kapelan, Z. 2012. Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. *Science of the Total Environment*, 440, 290-306.
- Udono, K., Sitte, R. 2008. Modeling seawater desalination powered by waste incineration using a dynamic systems approach. *Journal of Desalination*. 229:302–317.

- Van Rensburg, B.J., Weyl, O.L.F., Davies, S.J., van Wilgen, N.J., Spear, D., Chimimba, C.T. et al., 2011, 'Invasive vertebrates of South Africa', in D. Pimentel (ed.), *Biological invasions: Economic and environmental costs of alien plant, animal, and microbe species*, pp. 325–378, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Xi, X., and Poh, K. L. (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science*, 16, 157-166.
- Yu, C.H., Chen, C.H., Lin, C.F. and Liaw, S.L., 2003. Development of a system dynamics model for sustainable land use management. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26(5), pp.607-618.
- Zarghami, M. and Akbariyeh, S. 2012. system dynamics modeling for complex urban water systems: application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling*, 60: 99-106.



ISSN 2251-7480

## Integrated water resources management at basin scale (IWMSim) using a system dynamics approach

Maryam Soltani<sup>1</sup> and Hamzeh Ali Alizadeh<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Ms.c. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran

<sup>2\*</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran

\*Corresponding author email: [H.alizadeh@ilam.ac.ir](mailto:H.alizadeh@ilam.ac.ir)

Received: 01-02-2017

Accepted: 04-10-2017

### Abstract

Assessment of the economic, social and environmental effects of water projects is required to achieve sustainable development. Therefore, the development of a model that can simulate the different dimensions of water resource development projects and interactions between different methods of operation, can be helpful to managers and decision makers in the water sector. The main objective of present study was development of water integrated model (IWMSim) to evaluate different management policies and contribute to improve decision-making in large scale systems, using system dynamics modeling approach. The developed model is capable of simulating the impact of various effective factors in the water utilization on economic and environmental sustainability. In this investigation, to study interactions between environmental and economic effects of water resources development projects, two macro indicators of national costs and national revenue were developed. The developed model was calibrated and validated using long-term climatological, hydrological, agricultural and environmental data of Varamin case study. The developed system dynamics model evaluation showed that the model was able to simulate key variables such as relative crop yield (RMSE=14.2%, ME=20% and R<sup>2</sup>=0.92), groundwater levels (RMSE=0.37m, R<sup>2</sup>=0.92 and ME=0.45m) and groundwater salinity (RMSE=57 μS/cm, R<sup>2</sup>=0.79 and ME=148μS/cm) with reasonable accuracy.

**Keywords:** sustainable development, National costs, National revenue, Groundwater level.