2019, Vol.6, No.2, Pages 1 to 8
Journal of Water and Sustainable Development

سال ششم، شماره ۲، ۱۳۹۸، صفحات ۱ تا ۸
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Application of Modeling in Management of Water, Energy, and Food Nexus

Z. Eslami[1], S. janatrostami[2*], A. Ashrafzadeh[3]

1, 2, 3- M.Sc. Graduate, Assistant Professor, and Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

*(Corresponding Author Email: janatrostami@guilan.ac.ir)

Received: 14-07-2018
Accepted: 02-01-2019

کاربرد مدل‌سازی در مدیریت رابطه پیوندی آب، غذا و انرژی

زینب اسلامی[۱]، سمیه جنت‌رستمی[۲*]، افشین اشرف‌زاده[۳]

۱، ۲ و ۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، استادیار و دانشیار مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: janatrostami@guilan.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۲۳
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۲

Abstract

Three vital sources of Water-Energy-Food (WEF) are inextricably interrelated so that may also produce environmental impacts such as greenhouse gas emissions in production/delivery process. Therefore, green-house-gas emission control plays a key role in WEF nexus management. Effective planning and management of limited WEF resources to meet current and future socioeconomic demands for sustainable development is challenging. Nexus management for WEF security necessitates integrated tools that are useful for effective planning and management strategies and policies. Hence, the comprehensive tools should be used for identifying the trade-offs and interactions among various sectors of water, energy, and food. In this study, the nexus in the integrated management of the sources by optimisation method is investigated. Also, a hypothetical optimisation model of the water, energy, and food nexus is examined. This model is applied to quantitatively analyse the interrelationships and trade-offs among system components including energy supply, electricity generation, water supply-demand, food production, and mitigation of environmental impacts. The results demonstrated how these types of analyses could be helpful for decision makers and stakeholders to make cost-effective decisions for optimal WEF management.

Keywords: Optimisation, Sustainable development, Social and economic demands, Environmental impacts.

چکیده

سه منبع حیاتی مهم آب، انرژی و غذا با یکدیگر در ارتباط هستند که ممکن است در فرآیند تولید و توزیع این منابع، اثرات زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز ایجاد شود. بنابراین در مدیریت ارتباط بین این سه منبع، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب منابع محدود آب، انرژی و غذا برای تأمین نیازهای اقتصادی و اجتماعی جامعه در راستای توسعه پایدار، همواره مسئله‌ای چالش برانگیز است. روش مدیریت رابطه پیوندی در راستای برقراری امنیت آب، انرژی و غذا، یک روش جامع‌نگرانه است که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های سیاسی و اقتصادی یک منطقه مفید باشد. بنابراین برای شناسایی و بررسی تعاملات و برهم‌کنش‌های بین بخش‌های آب، انرژی و مواد غذایی لازم است از ابزارهای یکپارچه و جامع‌نگرانه‌ای استفاده شود. در این مقاله، دیدگاه رابطه پیوندی در مدیریت یکپارچه منابع با رویکرد بهینه‌سازی معرفی می‌شود. در این راستا، یک مدل مدیریتی بهینه‌سازی پیوند آب، انرژی و غذا به‌صورت فرضی بررسی شد. در این مدل، تعاملات و برهم‌کنش‌های بین اجزای سیستم مانند تأمین انرژی، تولید برق، تقاضای تأمین آب، تولید مواد غذایی و همچنین کاهش اثرات زیست‌محیطی ارزیابی شد. نتایج بررسی‌ها در مدل‌سازی نشان داد که چگونه این نوع آنالیزها می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان یک منطقه کمک کند تا تصمیمات مقرون به صرفه‌ای در مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و غذا بگیرند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، توسعه پایدار، نیازهای اقتصادی و اجتماعی، اثرات زیست‌محیطی.

DOI: 10.22067/jwsd.v6i2.74126

مقدمه

در سراسر جهان، آب، انرژی و مواد غذایی منابع حیاتی مهمی برای تأمین نیازهای اقتصادی-اجتماعی و رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی هستند. این منابع به طور جدایی‌ناپذیری با یکدیگر در ارتباط هستند، به طوری که هر یک از این منابع وابستگی قابل توجهی نسبت به یکدیگر دارند. آب نقش مهمی را در هر یک از مراحل توسعه انرژی شامل استخراج، تولید و فرآوری سوخت‌های فسیلی، تولید برق و تصفیهٔ ضایعات مربوط به فعالیت‌های انرژی ایفا می‌کند. حدود ۹۰ درصد از برق تولیدی در ایالات متحده، با استفاده از نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود، که در آن، مقادیر قابل توجهی از آب برای خنک کردن، مصرف می‌گردد. از طرف دیگر، آب و انرژی برای تولید مواد غذایی در کشاورزی مورد نیاز است، که عمدتاً برای آبیاری، تولید و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می‌گردد (Kaddoura و Khatib، ۲۰۱۷). بزرگترین مصرف‌کنندهٔ آب در سطح جهان، بخش کشاورزی است، به طوری که در قرن گذشته، ۹۰ درصد از مصرف جهانی آب شیرین برای تولیدات کشاورزی صرف شده است. در مدیریت آب، برای عملیات پمپاژ، جمع‌آوری، تصفیه و توزیع آب، لازم است انرژی مصرف شود. انرژی در تولید مواد غذایی و پردازش مکانیزه، آماده‌سازی زمین، تولیدات کود، ابزارهای کشاورزی، آبیاری، بسته‌بندی، فرآوری و ذخیره‌سازی مواد غذایی مورد نیاز است، که طبق بررسی‌های انجام شده، حدود ۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان مربوط به مراحل تولید و عرضهٔ مواد غذایی است. در متون علمی، روابط به هم پیوسته بین سه منبع حیاتی آب، انرژی و مواد غذایی، تحت عنوان رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا[1] نامیده می‌شود. رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا یک چشم‌انداز کلی از پایداری است که تلاش می‌کند بین اهداف مختلف، منافع و نیازهای مردم و محیط‌زیست تعادل برقرار کند (شاه‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۶). کلمهٔ پیوند[2]، به معنای یک اتصال یا مجموعه‌ای از اتصالات دو یا چند مسئله است. امروزه، با توجه به اهمیت محدودیت این سه منبع حیاتی و افزایش سریع جمعیت جهان، مفهوم رابطه پیوندی در مدیریت منابع آب، انرژی و غذا، توجه محققان زیادی را در سطح بین‌المللی به خود معطوف کرده است. بررسی نرخ رشد جمعیت جهان نشان داد که جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰، ۵۰ درصد نسبت به جمعیت فعلی افزایش خواهد داشت، که این افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای مواد غذایی و به موازات آن باعث افزایش تنش در منابع محدود آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای خواهد شد (IEA، ۲۰۱۰). بنابراین، برنامه‌ریزی مناسب و مصرف بهینه منابع محدود آب، انرژی و غذا برای تأمین نیازهای اجتماعی و اقتصادی یک جامعه در شرایط کنونی و آینده در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست، مسئله‌ای چالش‌برانگیز است.

منابع مهم تولید انرژی به صورت تجدیدناپذیر هستند که استفاده از آن‌ها باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود. بسیاری از دانشمندان معتقدند که افزایش انتشارات گازهای گلخانه‌ای به طور قابل توجهی باعث گرم شدن جهانی و تغییر اقلیم می‌شود (IPCC، ۲۰۱۴). به عنوان مثال در ایالت متحده آمریکا، ۵ درصد از کل انتشارات گازهای گلخانه‌ای مربوط به استفاده از انرژی در بخش آب است که این مقدار در خیلی از کشورها به مراتب بیشتر است (Rothausen و Conway، ۲۰۱۱). نیروگاه‌های حرارتی مقادیر قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای را تولید می‌کند و همچنین تکنولوژی‌های موجود در بخش کشاورزی سبب شده است که تقریباً ۳۰ درصد از کل انتشارات گازهای گلخانه‌ای مربوط به این بخش باشد (FAO، ۲۰۱۱). افزایش مصرف انرژی برای برقراری امنیت غذایی در راستای افزایش تقاضای آب، منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در مدیریت منابع با هدف توسعه پایدار، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای برای کاهش اثرات تغییر اقلیم حیاتی می‌باشد. بنابراین در جهت کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی بهتر است در مدیریت روابط پیوندی آب، انرژی و غذا، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کنترل شود (Kaddoura و Khatib، ۲۰۱۷).

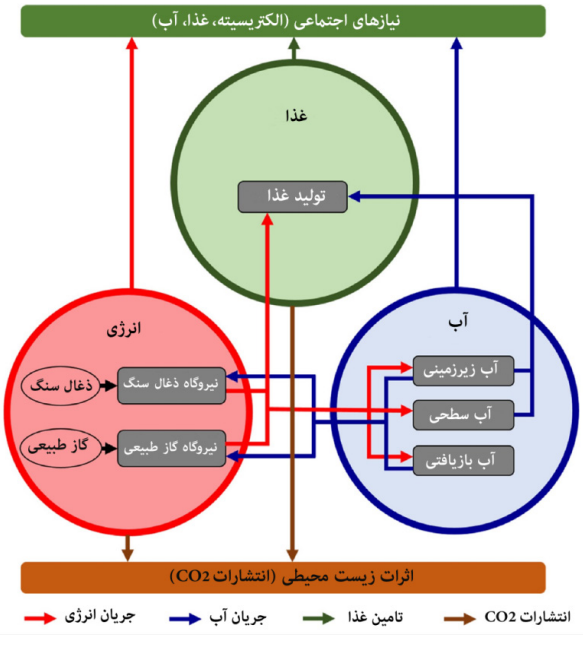
سیستم یکپارچه آب، انرژی و غذا دارای تعاملات و فرآیندهای پیچیده و پویایی هستند، زیرا تغییر هر یک از این بخش‌ها، علاوه بر اینکه بر روی هر یک از سه بخش دیگر در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی تأثیر می‌گذارد، بلکه عوامل مختلف اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فنی و محیط‌زیست نیز متأثر این تغییر است. مدیریت رابطه پیوندی با هدف تأمین امنیت آب، انرژی و مواد غذایی مستلزم استفاده از یک روش یکپارچه و یا ابزاری برای آنالیز یکپارچه سیستم است که توانایی شناسایی تعاملات و برهم‌کنش‌های بین بخش‌های مختلف این سیستم را داشته باشد تا به اهداف برنامه‌ریزی مقرون به صرفه و مدیریت سیاسی و استراتژیکی ایده‌آل برسد. آنالیز مدیریت رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا باید توانایی پاسخگویی به سوالاتی نظیر "به طور همزمان، استراتژی مطلوب برای مدیریت آب، انرژی و غذا چیست؟"، و یا "چگونه اقدامات کاهش گازهای گلخانه‌ای بر توزیع انرژی، تولیدات مواد غذایی و مصرف آب تاثیر می‌گذارد؟" را داشته باشد (Hoff، ۲۰۱۱). تخصیص و مصرف بهینه منابع آب، انرژی و موادغذایی بدون اعمال شرایط و بررسی یکپارچه منابع مختلف و تأیید روابط بین‌المللی امکان‌پذیر نیست (Kaddoura و Khatib، ۲۰۱۷).

روش‌های مبتنی بر مدل، ابزاری موثر در حل چنین مسائلی در برنامه‌ریزی‌ها هستند. این روش‌ها روابط به هم پیوسته آب، انرژی و مواد غذایی را به صورت کمی بررسی نموده که در تصمیم‌گیری‌های مربوط به سیستم پیچیده آب، انرژی و غذا

مفید می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا انجام شده است که در آن‌ها بر مدیریت رابطه پیوندی منابع در دو حالت بررسی جامع سه بخش منفرد مدیریت منابع آب، سیستم‌های مدیریت انرژی و یا برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی به صورت رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا (Hoff، ۲۰۱۱؛ Halalsheh و همکاران، ۲۰۱۵؛ Daher و Mohtar، ۲۰۱۵) و یا بررسی دو بخش تحت عنوان رابطه پیوندی آب و انرژی (Basheer و Elagib، ۲۰۱۸؛ Dale و Bilec، ۲۰۱۴) و رابطه پیوندی آب و غذا (Grafton و همکاران، ۲۰۱۵؛ Blanco و همکاران، ۲۰۱۲؛ Liu و همکاران، ۲۰۰۷؛ Amarasinghe، ۲۰۰۵) متمرکز شده است. گاهی اوقات، ممکن است به همراه رابطه پیوندی منابع، مسائل خاصی مانند وضعیت اقتصادی آب و یا منابع دیگر نیز بررسی شود. تاکنون، مدل‌های متفاوتی برای بررسی رابطه پیوندی توسعه یافته است که چارچوب آن‌ها با هدف درک بهتر رابطه پیوندی بین منابع مختلف طراحی شده است. به عنوان مثال Lall و Mays (۱۹۸۱)، یک مدل برنامه‌نویسی ریاضی برای مدیریت منابع آب و انرژی پیشنهاد کردند، یا اینکه Dubreuil و همکاران (۲۰۱۳)، ماژولی در مدل سیستم انرژی جهانی۳، برای ارزیابی ارتباط بین انرژی و آب طراحی کردند. Daher و Mohtar (۲۰۱۵)، برای مدل‌سازی رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا، مدل Nexus Tool ۲,۰ را توسعه دادند. با توجه به اینکه، این مدل توانایی مدل‌سازی تعاملات و برهم‌کنش‌های سه منبع را دارد، اما دارای محدودیت‌هایی مانند عدم بررسی همه اثرات زیست‌محیطی نیز می‌باشد. به طور کلی در مدل‌سازی رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا، مدلی که بتواند در یک چارچوب کلی، روابط پیچیده بین سه منبع و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها را برای بهینه‌سازی مدیریت رابطه پیوندی منابع بررسی نماید، وجود ندارد. در این مقاله سعی شده است، چارچوب توسعه یک مدل بهینه‌سازی رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا معرفی شود که توانایی پردازش تصمیمات مدیریتی را داشته باشد. در این مدل، علاوه بر بررسی تقاضای اجتماعی و اقتصادی، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز بررسی می‌شود.

توسعه مدل بهینه‌سازی پیوند آب، انرژی و غذا

در این بخش توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت پیوند آب، انرژی و غذا (WEFO)[۴]، در چند دوره اقتصادی-اجتماعی به صورت یک سیستم فرضی بر اساس مطالعه Zhang و Vesselinov (۲۰۱۷) توصیف می‌شود. تعاملات و برهم‌کنش‌های بین سه منبع در مدل WEFO و همچنین محدودیت‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل۱- نمایش تعاملات و برهم‌کنش‌ها در مدل WEFO

سیستم فرضی مورد بررسی، شامل دو نیروگاه حرارتی (ذغال سنگ و گاز طبیعی) برای تولید برق در سه دوره برنامه‌ریزی پنج ساله است. در این سیستم، آب مورد نیاز برای تولید برق از منابع آب‌های سطحی، زیرزمینی و آب بازیافتی تأمین می‌شود. برق تولیدی برای انتقال آب موردنیاز در نیروگاه‌ها، تولید مواد غذایی و تأمین نیازهای اجتماعی و اقتصادی استفاده می‌شود. برای تولید مواد غذایی و فرآوری آن‌ها، منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی (به دلیل مسائل مربوط به ایمنی سلامت انسان‌ها، آب بازیافتی استفاده نمی‌شود) و انرژی (برق) مورد نیاز است. در فرآیند تولید برق و مواد غذایی، گازهای گلخانه‌ای به خصوص CO_2 منتشر می‌شود. در مدل بهینه‌سازی، چگونگی برنامه‌ریزی منابع انرژی و آب، تولید برق و تولید مواد غذایی برای دستیابی به حداقل هزینه کل سیستم با توجه به کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی می‌شود (نمای کلی مسئله در شکل (۱) آورده شده است). در ادامه، متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی معرفی می‌شود.

متغیرهای تصمیم: متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی شامل مقدار انرژی منابع ذغال سنگ و گاز طبیعی، ظرفیت نیروگاه برای تولید برق، مقدار آب‌های سطحی و زیرزمینی موردنیاز برای تولید مواد غذایی، مقدار آب‌های سطحی و زیرزمینی و آب بازیافتی موردنیاز برای تولید برق و تقاضاهای اجتماعی و اقتصادی برای تولید آب، غذا و انرژی در طول چند دوره بررسی می‌شود.

تابع هدف: هدف بهینه‌سازی مدل مدیریتی WEFO، حداقل کردن کل هزینه سیستم است که هزینه کل از مجموع هزینه‌های تأمین انرژی، تأمین آب، تولید برق، تولید مواد غذایی و هزینه‌های کاهش انتشار CO_2 است (رابطهٔ ۱).

$$\min f=a+b+c+d+e \quad (۱)$$

که در این رابطه، a هزینه‌های تأمین انرژی برای تولید برق؛ b هزینه‌های تولید برق؛ c هزینه‌های تأمین آب؛ d هزینه‌های تولید مواد غذایی و e نیز هزینه‌های کاهش انتشار CO2 است.

هزینه‌های تأمین انرژی برای تولید برق (a)، با استفاده از رابطهٔ (۲) بدست می‌آید.

$$a=\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{k} ES_{jt}ESC_{jt} \quad (۲)$$

که، ES_{jt} تأمین انرژی j در دوره برنامه‌ریزی t (PJ)؛ ESC_{jt}متوسط هزینه‌های تأمین انرژی j در دوره برنامه‌ریزی t (میلیون‌دلار/PJ)؛ j نوع تأمین انرژی و منبع انرژی مورد استفاده در نیروگاه‌ها؛ m تعداد تأمین انرژی و نیروگاه‌ها و k تعداد دوره برنامه‌ریزی است.

به طور کلی، هیچ محدودیتی برای پارامترهای مختلف مورد استفاده در این مدل وجود ندارد. به عنوان مثال، تعداد نیروگاه‌ها یا دوره‌های برنامه‌ریزی می‌تواند هر عدد صحیح بزرگتر از صفر باشد.

هزینه‌های تولید برق (b)، با استفاده از رابطهٔ (۳) بدست می‌آید.

$$b=\sum_{j=1}^{m} FC_j+\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{k} X_{jt}PC_{jt} \quad (۳)$$

که، FC_j هزینه‌های ثابت نیروگاه j (میلیون دلار)؛ X_{jt} میزان تولید انرژی نیروگاه با استفاده از انرژی j در دوره برنامه‌ریزی t (PJ)؛ و PC_{jt} میانگین هزینه‌های عملیاتی برای تولید برق در نیروگاه j در دوره برنامه‌ریزی t (میلیون دلار/PJ) است.

هزینه‌های تأمین آب برای تولید برق و مواد غذایی (c)، با استفاده از رابطهٔ (۴) بدست می‌آید.

$$c=\sum_{t=1}^{k}(GW_t^F CGW_t^F+SW_t^F CSW_t^F)+\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{k}(GW_{jt}^e CGW_{jt}^e+SW_{jt}^e CSW_{jt}^e+RW_{jt}^e CRW_{jt}^e) \quad (۴)$$

کهGW_t^F وSW_t^F، به ترتیب مقدار آب زیرزمینی و سطحی مورد استفاده برای تولید مواد غذایی در دوره t (gal)؛ CGW_t^F وCSW_t^F، به ترتیب هزینه‌های تأمین آب‌های زیرزمینی و سطحی مورد استفاده برای تولید مواد غذایی در دوره t ($/gal)؛ SW_{jt}^e، GW_{jt}^e و RW_{jt}^e، به ترتیب مقدار آب‌های زیرزمینی، سطحی و بازیافتی مورد استفاده در نیروگاه j در دوره t (gal) و CSW_{jt}^e، CGW_{jt}^e و CRW_{jt}^e، به ترتیب هزینه‌های تأمین آب‌های زیرزمینی، سطحی و بازیافتی برای نیروگاه j در دوره t (gal/$) هستند. هزینه‌های تولید غذا (d)، با استفاده از رابطهٔ (۵) بدست می‌آید.

$$d=\sum_{t=1}^{k} CFO_t FO_t \quad (۵)$$

که FO_t مقدار مواد غذایی تولید شده در دوره برنامه‌ریزی (ton) و CFO_t هزینه هر واحد تولید مواد غذایی در دوره t (million $/ton) است.

هزینه‌های کاهش انتشار CO2 (e)، نیز با استفاده از رابطهٔ (۶) بدست می‌آید.

$$e=\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{k} CEA_t CC_{jt}X_{jt}+\sum_{t=1}^{k} CFA_t FO_t FF_t \quad (۶)$$

که CEA_t هزینه‌های کاهش CO2 در تولید برق دوره t ($/kg)؛ CFA_t هزینه‌های کاهش CO2 در تولید مواد غذایی دوره t ($/ton)؛ CC_{jt} واحد انتشار CO2 بر واحد تولید برق در دوره t (million kg/PJ) و FF_t نیز واحد انتشار CO2 بر واحد تولید مواد غذایی در دوره t (ton/ton) است.

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی: محدودیت‌های مدل شامل موارد زیر است:

۱- بیلان جرمی سوخت‌های فسیلی: برق تولیدی هر نیروگاه در هر دوره برنامه‌ریزی نباید بیشتر از مقدار تأمین انرژی در آن دوره باشد.

$$X_{jt}FE_{jt}\le ES_{jt} \quad \forall_j,t \quad (۷)$$

که در این رابطه، FE_{jt} واحد حامل انرژی در هر واحد تولید برق j در دوره t (PJ/PJ) است.

۲- محدودیت‌های دسترسی به انرژی فسیلی: سوخت‌های فسیلی عرضه شده مانند ذغال سنگ و گاز طبیعی نباید بیشتر از مقدار دسترس بودن آن‌ها طی دوره‌های برنامه‌ریزی باشد.

$$ES_{jt}\le AV_{jt} \quad \forall_j,t \quad (۸)$$

که AV_{jt} در دسترس بودن منبع تأمین انرژی j در دوره t (PJ) است.

تقاضای انرژی برای تولید مواد غذایی: انرژی مصرف شده برای تولید مواد غذایی نباید بیشتر از حداکثر مجاز برق برای تولید مواد غذایی باشد.

$$ER_T^F . FO_t \le AER_{tmax}^F \quad \forall t \quad (۹)$$

کهAER^F_{tmax} حداکثر برق موجود برای تولید مواد غذایی در دوره t (PJ) و ER^F_T تقاضای انرژی واحد برای تولید مواد غذایی در دوره t (PJ/ton) است.

۴- مقدار انرژی موردنیاز برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب: مصرف برق برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب نباید بیشتر از مقدار حداکثر مجاز برق موجود برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب بر حسب PJ (AER^w_{tmax}) باشد.

$$ER_t^w.(GW_t^F+SW_t^F+\sum_{j=1}^{m}(GW_{jt}^e+SW_{jt}^e+RW_{jt}^e))\le AER_{tmax}^w \quad \forall t \quad (۱۰)$$

کهER_t^w تقاضای انرژی واحد برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب در دوره t (PJ/gal) است.

۵- محدودیت‌های تقاضای برق: برق تولیدی نیروگاه‌ها باید بتواند پس از تأمین مواد غذایی و جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب، نیازهای اجتماعی و اقتصادی برق را تأمین کند.

$$\sum_{j=1}^{m}X_{jt}-ER_t^F.FO_t-ER_t^w.(GW_t^F+SW_t^F+\sum_{j=1}^{m}(GW_{jt}^e+SW_{jt}^e+RW_{jt}^e))\ge D_t^e \quad \forall t \quad (۱۱)$$

که D_t^e نیازهای اقتصادی و اجتماعی در دوره t (PJ) است.

۶- محدودیت‌های تقاضای آب برای تولید مواد غذایی: آب عرضه شده، باید بتواند نیازهای آبی تولید مواد غذایی را تأمین کند.

$$(1-\delta)(GW_t^F + SW_t^F) \geq WF_t . FO_t \quad \forall t \qquad (۱۲)$$

که δ عامل تلفات تحویل آب به زیر سیستم غذا و WF_t مقدار واحد مصرف آب در واحد تولید مواد غذایی در دوره t (gal/ton) است.

۷- محدودیت‌های تقاضای آب برای تولید برق: آب مورد نیاز برای تولید برق باید تأمین شود.

$$(1-\mu j).(GW_{jt}^e + SW_{jt}^e + RW_{jt}^e) \geq \alpha j . X_j \quad \forall t \qquad (۱۳)$$

که μj فاکتور تلفات تحویل آب به نیروگاه j، و αj تقاضای آب واحد برای هر واحد تولید برق در نیروگاه j (gal/GWh) است.

۸- محدودیت‌های منابع آب در دسترس: مقدار تخصیص آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی نمی‌تواند از حداکثر مقدار آب زیرزمینی و سطحی قابل در دسترس دوره t، بیشتر باشند.

$$GW_t^F + \sum_{j=1}^{m} GW_{jt}^e \leq SY_t \quad \forall t \qquad (۱۴)$$

$$SW_t^F + \sum_{j=1}^{m} SW_{jt}^e \leq ASW_t \quad \forall t \qquad (۱۵)$$

همچنین مقدار تخصیص آب بازیافتی نیز نمی‌تواند از حداکثر مجاز آب قابل بازیافت بیشتر باشد.

$$\sum_{j=1}^{m} RW_{jt}^e \leq ARW_t \quad \forall t \qquad (۱۶)$$

در این روابط، SY_t و ASW_t به ترتیب مقدار آب زیرزمینی و سطحی در دسترس (gal) و ASW_t حداکثر مجاز آب بازیافتی در دسترس (gal) است.

۹- محدودیت‌های تقاضای غذا: مقدار غذای تولید شده باید نیازهای غذایی اجتماعی و اقتصادی را تأمین کند. در رابطه (۱۷)، D_t^F، مقدار نیاز غذایی در دوره t (ton) است.

$$FO_t \geq D_t^F \quad \forall t \qquad (۱۷)$$

۱۰- محدودیت‌های کنترل انتشار CO2: مقادیر CO2، تولید شده نباید بیشتر از حداکثر مجاز انتشار CO2 در دوره زمانی موردنظر باشد.

$$\sum_{J=1}^{m}\sum_{t=1}^{k} X_{jt} CC_{jt}(1-\emptyset_{jt}) + \sum_{t=1}^{k} FO_t FF_t \leq TMCC \qquad (۱۸)$$

که $\emptyset_{jt}$ راندمان متوسط کاهش انتشارات CO2 در نیروگاه j در دوره t و TMCC حداکثر انتشار CO2 در طول دوره‌های زمانی (million ton) است.

۱۱- محدودیت‌های غیر منفی بودن متغیرهای تصمیم:

$$X_{jt}, ES_{jt}, FO_t, GW_t^F, SW_t^F, GW_{jt}^e, SW_{jt}^e, RW_{jt}^e \geq 0 \quad \forall j,t \qquad (۱۹)$$

روش حل مدل بهینه‌سازی: به دلیل اینکه تمام معادلات و روابط موجود بین متغیرهای تصمیم در توابع هدف و محدودیت‌ها به صورت خطی هستند، بنابراین مدل بهینه‌سازی به صورت خطی بوده و با استفاده از روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی (الگوریتم سیمپلکس[۵]) حل می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات: پارامترهای مربوط به هزینه، مقادیر ثابت و محدودیت‌های مدل در سه دورهٔ ۵ ساله در جدول‌های (۱) تا (۳) آورده شده است. علاوه بر این، هزینه‌های ثابت تولید برق در نیروگاه‌های ذغال‌سنگ و گاز طبیعی به ترتیب ۶۵ و ۷۵ میلیون دلار است. آب موردنیاز برای هر واحد برق تولیدی در نیروگاه‌های ذغال‌سنگ و گاز طبیعی به ترتیب ۰/۳۳ gal/KWh و ۰/۴۴ است. تلفات آب در نیروگاه‌های ذغال‌سنگ و گاز طبیعی و همچنین در تولید مواد غذایی به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۵ درصد است. بازده متوسط کاهش CO2 در نیروگاه‌های ذغال‌سنگ و گاز طبیعی در طی سه دورهٔ برنامه‌ریزی، ثابت و برابر با ۸۰ و ۸۵ درصد است. همچنین، مقدار انتشار CO2 به ازای هر واحد تولید مواد غذایی در سه دورهٔ برنامه‌ریزی نیز ثابت و برابر با ۰/۴۸ ton/ton است.

با توجه به کمبود اطلاعات، همه پارامترهای ذکر شده در جدول (۱) و بعضی از پارامترهای جدول (۲) دارای عدم قطعیت هستند که دامنه عدم اطمینان هر یک از این پارامترها داخل پرانتز آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مربوط به محدودیت‌های منابع

	دوره‌های پنج ساله متوالی، k		
	k=۱	k=۲	k=۳
تقاضای برق (PJ)	۱۰۵(۱۰۴، ۱۰۶)	۱۱۵(۱۱۴، ۱۱۶)	۱۲۶(۱۲۵، ۱۲۷)
تقاضای غذا (ton)	۶۷۰۰۰(۶۶۹۰۰، ۶۷۱۰۰)	۷۱۰۰۰(۷۰۹۰۰، ۷۱۱۰۰)	۷۵۰۰۰(۷۴۹۰۰، ۷۵۱۰۰)
دسترسی به ذغال‌سنگ (PJ)	۲۸۵(۲۸۲، ۲۸۶)	۲۶۵(۲۶۲، ۲۶)	۲۴۰(۲۳۷، ۲۴۱)
دسترسی به گاز طبیعی (PJ)	۱۲۹(۱۲۷، ۱۳۲)	۱۱۷(۱۱۵، ۱۱۹)	۱۰۵(۱۰۳، ۱۰۹)
حداکثر آب زیرزمینی در دسترس (billion gal)	۵۰(۴۹، ۵۱)	۴۸(۴۷، ۴۹)	۴۶(۴۵، ۴۷)
حداکثر مقدار آب موجود در آب (billion gal)	۳۲(۳۱، ۳۳)	۳۰(۲۹، ۳۱)	۲۷(۲۶، ۲۸)
حداکثر مقدار قابل بازیافت (billion gal)	۳۰(۲۹، ۳۱)	۲۷(۲۶، ۲۸)	۲۴(۲۳، ۲۵)
حداکثر انتشار CO2 (million ton)	۱۵/۲(۱۵، ۱۵/۴)		

جدول۱- مقادیر هزینه تأمین انرژی و آب، تولید برق، تولید مواد غذایی و کاهش CO_2 در سه دوره ۵ساله

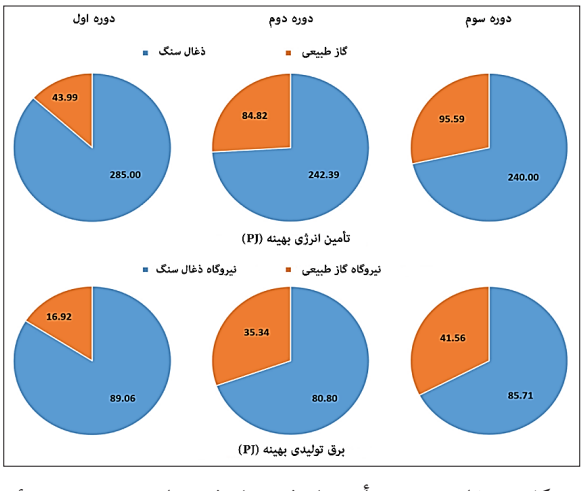
	دوره‌های پنج ساله متوالی، k		
	k=۱	k=۲	k=۳
میانگین هزینه‌های عملیاتی برای تأمین انرژی ذغال سنگ (million $/PJ)	۲/۸۶(۲/۳، ۳/۲)	۳/۰۷(۲/۵، ۳/۵)	۳/۲۲(۲/۳،۶/۶)
میانگین هزینه‌های عملیاتی برای تأمین انرژی ذغال سنگ (million $/PJ)	۴/۷۳(۴/۱، ۵/۱)	۴/۹۱(۴/۲، ۵/۵)	۵/۲۶(۴/۵ ،۵/۸)
میانگین هزینه‌های عملیاتی برای تولید برق در نیروگاه‌های ذغال سنگ (million $/PJ)	۰/۱۶(۰/۱، ۰/۳)	۰/۱۸(۰/۱، ۰/۳)	۰/۲۲(۰/۲، ۰/۳)
میانگین هزینه‌های عملیاتی برای تولید برق در نیروگاه‌های گاز طبیعی (million $/PJ)	۰/۵۲(۰/۴، ۰/۷)	۰/۵۵(۰/۴، ۰/۷)	۰/۵۸(۰/۴، ۰/۷)
هزینه‌های واحد تولید مواد غذایی ($/ton)	۱۴۹/۵(۱۳۵، ۱۶۵)	۱۶۵/۵(۱۵۰، ۱۸۰)	۱۸۰(۱۶۵ ،۱۹۵)
هزینه‌های کاهش CO_2 برای تولید برق ($/million kg)	۱۲۶۰۰(۱۱۴۰۰ ،۱۳۰۰۰)	۱۴۵۰۰(۱۳۱۰۰ ،۱۶۹۰۰)	۱۶۲۰۰(۱۵۲۰۰ ،۱۶۸۰۰)
هزینه‌های کاهش CO_2 برای تولید مواد غذایی ($/ton)	۱۰/۸(۹، ۱۳)	۱۱/۹(۹/۵ ، ۱۴/۵)	۱۳/۱(۱۰، ۱۶)
هزینه‌های تأمین آب زیرزمینی برای تولید مواد غذایی($/$10^3$gal)	۱/۹۶(۱/۶، ۲/۶)	۲/۴۲(۱/۹، ۲/۹)	۲/۸۳(۲/۵ ، ۳/۵)
هزینه‌های تأمین آب سطحی برای تولید مواد غذایی ($/$10^3$gal)	۲/۲۳(۱/۶ ، ۲/۸)	۲/۵۶(۲/۱، ۳/۱)	۳/۳۸(۲/۹، ۳/۹)
هزینه‌های تأمین آب زیرزمینی برای تولید برق نیروگاه ذغال سنگ ($/$10^3$gal)	۲/۰۷(۱/۶، ۲/۶)	۲/۴۹(۱/۹، ۲/۹)	۲/۹۸(۲/۲، ۳/۵)
هزینه‌های تأمین آب زیرزمینی برای تولید برق نیروگاه گاز طبیعی ($/$10^3$gal)	۱/۷۵(۱/۲، ۲/۵)	۲/۱۹(۱/۶، ۲/۸)	۲/۶۲(۱/۸، ۳)
هزینه‌های تأمین آب سطحی برای تولید برق نیروگاه ذغال سنگ ($/$10^3$gal)	۱/۸۲(۱/۲، ۲/۸)	۲/۱۹(۱/۵، ۳)	۲/۵۷(۱/۷، ۳/۲)
هزینه‌های تأمین آب سطحی برای تولید برق نیروگاه گاز طبیعی ($/$10^3$gal)	۲/۱۸(۱/۶، ۲/۸)	۲/۶۷(۲، ۳/۳)	۳/۱۵(۲/۳، ۳/۶)
هزینه‌های تأمین منابع آب بازیافت شده برای تولید برق نیروگاه ذغال سنگ ($/$10^3$gal)	۴/۱۵(۳/۶، ۴/۹)	۴/۳۷(۳/۸، ۵/۲)	۴/۵۲(۴، ۵/۵)
هزینه‌های تأمین منابع آب بازیافت شده برای تولید برق نیروگاه گاز طبیعی ($/$10^3$gal)	۴/۳۲(۳/۸، ۴/۹)	۴/۴۸(۳/۹، ۵/۲)	۴/۶۶(۴، ۵/۲)

جدول ۳- محدودیت‌ها و ثابت‌های مدل بهینه‌سازی

	دوره‌های پنج ساله متوالی، k		
	k=۱	k=۲	k=۳
نیاز واحد انرژی برای تولید مواد غذایی (10^{-6}PJ/ton)	۲/۵۲	۲/۶۴	۲/۷۵
نیاز واحد انرژی برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب (KWh/1000 gal)	۳/۵۶	۳/۷۹	۳/۹۱
آب مورد نیاز برای تولید مواد غذایی (gal/ton)	۶۵۹ × ۱۰^3	۶۷۶ × ۱۰^3	۶۹۴ × ۱۰^3
بیشترین برق در دسترس برای تولید غذا (PJ)	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۷
بیشترین برق در دسترس برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب (PJ)	۱	۱/۱۵	۱/۲۵
واحد حامل انرژی بر واحد تولید برق در نیروگاه ذغال سنگ (PJ/PJ)	۳/۲	۳	۲/۸
واحد حامل انرژی بر واحد تولید برق در نیروگاه گاز طبیعی (PJ/PJ)	۲/۶	۲/۴	۲/۳
انتشار گازهای گلخانه‌ای CO_2 به ازای تولید برق در نیروگاه ذغال‌سنگ (million kg/PJ)	۲۶۱/۰۳	۲۵۴/۸۹	۲۴۷/۰۸
انتشار گازهای گلخانه‌ای CO_2 به ازای تولید برق در نیروگاه گاز طبیعی (million kg/PJ)	۱۵۲/۵۸	۱۴۹/۹۸	۱۴۶/۱۹

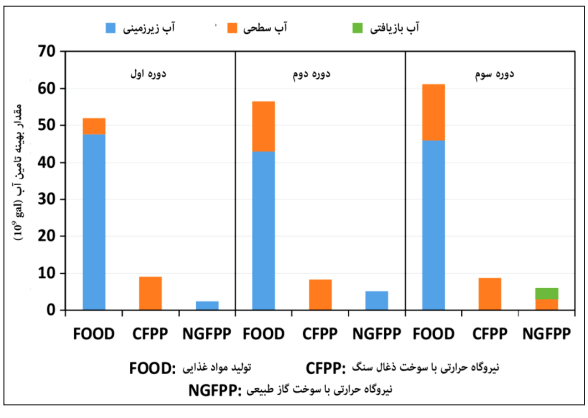
نتایج و بحث

جواب‌های مدل بهینه‌سازی آب، انرژی و غذا برای سیستم‌های انرژی و آب به صورت شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. مقادیر بهینه تولید مواد غذایی در سه دورهٔ برنامه‌ریزی برابر با ۶۷۰۰۰، ۷۱۰۰۰ و ۷۵۰۰۰ تن بدست آمد که مطابق با مقادیر تقاضای اجتماعی و اقتصادی مواد غذایی است (جدول۲). مقادیر بهینهٔ برق تولیدی در سه دوره، به ترتیب برابر با PJ ۱۰۵/۹۸، ۱۱۶/۱۴ و ۱۲۷/۲۷ بدست آمد که کمی بیشتر از مقادیر تقاضای اجتماعی-اقتصادی برق است که در جدول (۲) آورده شده است. مقادیر برق تولیدی اضافی برای تولید مواد غذایی و همچنین جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب، استفاده می‌گردد. از نظر تأمین انرژی، نتایج نشان داد که بهتر است منبع اصلی انرژی در افق برنامه‌ریزی، ذغال‌سنگ با هزینه‌های تأمین کمتر باشد، اما در دوره دوم و سوم، بیشتر از گاز طبیعی برای تولید برق استفاده می‌شود. نسبت گاز طبیعی به کل انرژی تأمین شده در دوره‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۳، ۲۶ و ۲۸ درصد افزایش خواهد یافت که بیانگر محدودیت‌های زیست‌محیطی است. بنابراین با توجه به میزان منبع گاز طبیعی در نیروگاه‌ها، مقدار انرژی تولیدی نیز از دوره اول تا سوم افزایش خواهد یافت (شکل ۲).



شکل۲- مقادیر بهینه تأمین انرژی و انرژی تولیدی در سه دورهٔ برنامه‌ریزی (از چپ به راست)

در بررسی دو منبع آب و انرژی لازم است توجه شود که در تولید مواد غذایی نسبت به تولید انرژی، منابع آب بیشتری مصرف می‌شود. همچنین به دلیل مسائل مربوط به سلامتی در تولید مواد غذایی از آب بازیافتی استفاده نمی‌شود. نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان داد که بخش عمدهٔ آب‌های زیرزمینی به جز درصد کمی در نیروگاه‌های گاز طبیعی، در تولید مواد غذایی استفاده می‌شود. کاهش حداکثر منابع آب‌های زیرزمینی در دسترس باعث ایجاد الگوهای متفاوت مصرف آب برای تولید مواد غذایی در سه دوره شده است. بررسی مقادیر تخصیص منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین آب‌های بازیافتی در شکل (۳) نشان می‌دهد که منابع آب در دسترس و هزینه تأمین آب در نیروگاه‌های مختلف، نقش مهمی در تخصیص منابع آب مورد نیاز برای نیروگاه‌ها دارد.



شکل۳- مقادیر بهینه آب تخصیص داده شده برای تولید مواد غذایی و برق

در حالت بهینه، کل هزینه‌های سیستم مورد بررسی، ۵/۴۰ میلیارد دلار بدست آمد که ۳/۴۷ میلیارد دلار از آن برای تأمین انرژی، ۱/۱۴ میلیارد دلار از آن کاهش میزان انتشار CO_2 و سایر هزینه‌ها نسبتاً کوچک هستند (هزینه‌های تولید برق، تأمین آب و تولید مواد غذایی به ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۵۲ و ۰/۰۳ میلیارد دلار هستند). در ادامه با توجه به بازه‌های عدم قطعیت هر یک از پارامترها، حساس‌ترین پارامترها در هر یک از دوره‌های برنامه‌ریزی با استفاده از آنالیز حساسیت جهانی، می‌تواند بررسی گردد. نتایج بدست آمده در این بخش، نقش مهمی در تعریف سناریوها و تعیین سیاست‌های برنامه‌ریزی در مسئله مورد مطالعه خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، چارچوب مدل بهینه‌سازی رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا به صورت یکپارچه توسعه داده شد. مدل معرفی شده به صورت چند دوره‌ای بود و از آنجا که تمام روابط این مدل به صورت خطی است با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. اجزای مختلف مدیریت پیوندی مدل شامل برنامه‌ریزی تأمین انرژی، برق تولیدی، تأمین آب و تقاضا، تولید مواد غذایی و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. این مدل می‌تواند به طور همزمان تعاملات بین بخش‌های آب، انرژی و غذا را بررسی کرده و تأثیر استراتژی‌ها و سیاست‌های مختلف اجتماعی و اقتصادی در تصمیم‌گیری را در هر یک از بخش‌ها و کل سیستم ارزیابی نماید. نتایج بررسی‌ها در این مقاله نشان داد که مدل بهینه‌سازی رابطه

پیوندی آب، انرژی و غذا می‌تواند به تصمیم‌گیران و ذینفعان یک منطقه کمک کند تا کمبودهای تعاملات پیچیده بین بخش‌های آب، انرژی و مواد غذایی را ارزیابی نموده و از این طریق، برای مدیریت یکپارچه آب، انرژی و مواد غذایی، تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌ای در راستای توسعه پایدار داشته باشند.

پی‌نوشت

1- Water, Energy and Food Nexus (WEF)

2- Nexus

3- TIAM-FR

4- Water, Energy and Food security nexus Optimization model

5- Simplex Algorithm

منابع

شاه‌محمدی، ع.، مفاخری، ص.، ویسی، ه. و خوشبخت، ک. ۱۳۹۶. رهیافتی برای دستیابی به توسعه پایدار پیوند آب، غذا و انرژی. یافته‌های پژوهشی سیاستی، شبکه مطالعات سیاست‌گذاری عمومی.

Amarasinghe U. 2005. PODIUMSIM: CPSP Report 10 Country Policy Support Program. International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi, India.

Basheer M. and Elagib N.A. 2018. Sensitivity of Water-Energy Nexus to dam operation: A Water-Energy Productivity concept. Science of the Total Environment, 616–617: 918–926.

Blanco M., Van Doorslaer B. and Britz W. 2012. Assessing Agriculture-water Relationships: a Pan-European Multidimensional Modelling Approach, 126th Seminar June 27–29 2012 Capri, Italy. European Association of Agricultural Economists. No 126031, 126th Seminar, June 27-29, 2012, Capri, Italy from European Association of Agricultural Economists.

Daher B. and Mohtar R. 2015. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. Water International, 40: 5-6, 748-771.Water Int. 1–24.

Dale A.T. and Bilec M.M. 2014. The Regional Energy & Water Supply Scenarios (REWSS) Model, Part II: Case studies in Pennsylvania and Arizona. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 7: 237–746.

Dubreuil A., Assoumou E., Bouckaert S., Selosse S. and Maizi N. 2013. Water modeling in an energy optimization framework-The water-scarce middle east context. Applied Energy, 101: 268–279.

Grafton R.Q., Williams J. and Jiang Q., 2015. Food and water gaps to 2050: preliminary results from the global food and water system (GFWS) platform. Food Security Food Security, 7 : 209–220.

Halalsheh, M., Ouarda, T. and Al-Jayousi, O., 2015. The Water-Energy-Food Nexus in the Arab Region: Nexus Technology & Innovation Case Studies (Policy Brief 6). s.l:The League of Arab States.

Hoff H. 2011. Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

IEA. 2010. World Energy Outlook 2010. Paris: OECD/ International Energy Agency.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Working Group II Report "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability". IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kaddoura S. and Khatib S.E. 2017. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. Environmental Science and Policy, 77: 114–121.

Lall U. and Mays L.W. 1981. Model for planning water-energy systems. Water Resources Research, 17(4): 853–865.

Liu J., Williams J.R., Zehnder A.J.B. and Yang H. 2007. GEPIC–modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. Agricultural Systems, 94: 478–493.

Rothausen S. and Conway D. 2011. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. Nature Climate Change, 1: 210–219.

Zhang X. and Vesselinov V.V. 2017. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. Advances in Water Resources, 101: 1–10.