فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰

۳۰۶-۲۸۷

مقاله پژوهشی

ارزیابی پایداری پیوند سیستم های آب – انرژی - غذا در محصول های کشاورزی (مطالعه موردی شهرستان دهگلان)

صلاح مفاخری[۱]، هادی ویسی[۱*]، کورس خوشبخت[۱] و محمدرضا نظری[۲]

[۱] گروه اگرواکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] گروه اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶

مفاخری، ص.، ه. ویسی، ک. خوشبخت و م.ر. نظری. ۱۴۰۰. ارزیابی پایداری پیوند سیستم‌های آب - انرژی - غذا در محصول‌های کشاورزی (مطالعه موردی شهرستان دهگلان). فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۴): ۲۸۷-۳۰۶.

سابقه و هدف: امروزه مدیریت منابع کشاورزی به‌دلیل ضرورت رسیدگی به موضوع‌های چالش برانگیز بین بخش‌های عرضه و تقاضا، یک وظیفه اساسی برای مدیران و برنامه‌ریزان است. بر این اساس، بسیاری از محققان تأکید می‌کنند که آب، انرژی و غذا در جهان دچار تنش و کمبود قابل توجهی شده‌اند و تقاضا برای این منابع طی دهه‌های آینده به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه روشی برای تصمیم‌گیران در تجزیه و تحلیل پیوند آب، غذا و انرژی در سیستم تولید محصول‌های زراعی در سطح منطقه‌ای و انجام ارزیابی کمی از آن است، که می‌توان از آن برای ایجاد الگوی کشت مناسب و بهینه با توجه به منابع موجود منطقه استفاده کرد.

مواد و روش‌ها: مقاله حاضر به‌منظور ارزیابی پیوند آب – انرژی - غذا محصول‌های کشاورزی در شهرستان دهگلان انجام شد. داده‌های مورد نیاز از طریق مصاحبه رودرو با کشاورزان و آمار جهاد کشاورزی جمع‌آوری شد. روش پیشنهادی این مقاله، براساس شش سنجه مصرف آب و انرژی، بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی معرفی شد. براساس مجموعه این سنجه‌ها، یک سنجه پیوند آب – انرژی - غذا (WEFNI) برای هر محصول محاسبه شد. این روش برای ارزیابی ۷ محصول اصلی گندم، سیب‌زمینی، یونجه، خیار، جو، هویج و کلزا در مزرعه‌های آبی شهرستان دهگلان در سال آبی ۹۹ - ۱۳۹۸ اعمال شد.

نتایج و بحث: نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که یونجه و سیب‌زمینی در بین این محصول‌ها به‌ترتیب بیشترین مصرف آب (۱۳۱۳۱ مترمکعب در هکتار) و انرژی (۸۵۴۰۴ مگاژول در هکتار) را به خود اختصاص دادند. کمترین مصرف آب (۴۱۹۷ مترمکعب در هکتار) و انرژی (۳۱۳۹۴/۴ مگاژول در هکتار) در محصول جو به‌دست آمد. مصرف کودهای شیمیایی بیشترین سهم را در بخش انرژی (بجز یونجه) داشتند. در محصول یونجه با توجه به بالا بودن عملیات مکانیزاسیون، ماشین‌آلات بیشترین سهم مصرف انرژی را داشت. بیشترین بهره‌وری مصرف آب (۷/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) و انرژی (۱/۰۳ کیلوگرم بر مگاژول) را محصول هویج به خود اختصاص داد. همچنین کمترین بهره‌وری مصرف آب و انرژی برای کلزا به‌ترتیب با ۰/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۰۶ کیلوگرم بر مگاژول محاسبه شد. در سنجه بهره‌وری

* Corresponding Author: *Email Address*. h_veisi@sbu.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1078
http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1400.19.4.15.3

اقتصادی آب و انرژی بیشترین مقدار به‌ترتیب برای خیار (۹۲۹۵۹ ریال بر مترمکعب) و هویج (۱۳۲۰۲ ریال بر مگاژول) به‌دست آمد. کمترین بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی با ۱۵۴۹ ریال بر مترمکعب برای هویج و ۱۰۶۸۸ ریال بر مگاژول برای کلزا محاسبه شد. این مطالعه نشان داد که WEFNI محاسبه شده برای محصول‌های هویج، خیار، سیب‌زمینی، گندم، جو، کلزا و یونجه در شهرستان دهگلان، به‌ترتیب برابر با ۰/۸۶، ۰/۷۳، ۰/۵۱، ۰/۴۱، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲۶ می‌باشد. هویج بالاترین امتیاز WFENI (بهترین امتیاز) و یونجه کمترین امتیاز (بدترین امتیاز) را به خود احتصاص دادند. اگر چه سیب‌زمینی که یکی از محصول‌های آبی با سطح بالای کشت در منطقه می‌باشد و مصرف آب و انرژی بالایی دارد، ولی به‌دلیل بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی بالا، سومین نمره سنجه کل را به‌دست آورد.

نتیجه‌گیری: در این تحقیق محصول‌های کشاورزی براساس سنجه‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی مقایسه شدند. براساس این سنجه‌ها، سنجه پیوند آب، انرژی و غذا محاسبه شد. همچنین نتایج می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تعیین استراتژی‌های مناسب الگوی کشت، مدیریت منابع آب و انرژی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد و مبنایی برای برنامه‌ریزی و سیاست‌های کشاورزی استان شود.

واژه‌های کلیدی: پیوند آب – انرژی - غذا، بهره‌وری فیزیکی، بهره‌وری اقتصادی، دهگلان.

مقدمه

امروزه مدیریت منابع کشاورزی به‌دلیل ضرورت پرداختن به موضوع‌های چالش برانگیز بین بخش‌های عرضه و تقاضا، یک وظیفه اساسی برای مدیران و برنامه‌ریزان است. بر این اساس، بسیاری از محققان تأکید می‌کنند که آب، انرژی و غذا در جهان دچار تنش و کمبود قابل توجهی شده است و تقاضا برای این منابع طی دهه‌های آینده به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت (Bizikova *et al.*, 2013; Endo *et al.*, 2015; El-Gafy *et al.*, 2017a; El-Gafy, 2017). بخش کشاورزی به‌عنوان مهمترین بخش تولیدکننده مواد غذایی نه‌تنها مصرف‌کننده انرژی است بلکه مهمترین عرضه‌کننده انرژی نیز محسوب می‌رود. نظر به اینکه بخش کشاورزی ازیک‌طرف با محدودیت منابع تولید روبرو بوده و از سوی دیگر تأمین‌کننده امنیت غذایی جمعیت در حال رشد است، باید تعادل و توازنی بین جریان برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و میزان تولید محصول‌های کشاورزی ایجاد شود. درواقع روند استفاده از منابع تولید باید به شکل پایدار و در راستای توسعه پایدار باشد. توسعه پایدار براساس تعریف سال ۱۹۹۲ «کنفرانس زمین» عبارت است از «رفع نیازهای نسل حاضر بدون مصالحه با نسل‌های آینده در راستای تأمین نیازهایشان» (Shahmohamadi *et al.*, 2017). بنابر برآوردهای سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد (فائو)، بخش کشاورزی برای تأمین نیاز افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باید تولیدهای خود را تا ۷۰ درصد افزایش دهد (Wise, 2013). افزون بر نیاز به افزایش ۷۰ درصدی تولیدها، براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی IEA (2010) مقدار مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۵ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین براساس پیش‌بینی‌های فائو تا سال ۲۰۵۰ حدود ۱۰ درصد مصرف آب آبیاری افزایش خواهد داشت. درنتیجه با رشد تقاضا، رقابت بر سر منابع نیز افزایش خواهد یافت. همپنین در منطقه آسیا تضمین فراهمی آب، انرژی و غذا و امنیت هر سه بخش بدون کاهش منابع طبیعی به‌عنوان یک چالش بزرگ شناخته می‌شود. (UN, 2015).

گزارش مخاطرات جهانی که توسط مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۱ منتشر شد، بیان داشت که وقتی افزایش سریع جمعیت جهان و تقاضای رفاه در نظر گرفته شود، در چند دهه آینده تقاضا برای منابع اولیه به‌طور تقریبی ۳۰ - ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین این گزارش ادعا می‌کند که خطرهای ناشی از پیوند آب – انرژی - غذا یکی از سه گروه مشکل‌های حیاتی است که جامعه جهانی با آن روبرو خواهد شد (World Economic Forum, 2011).

اگرچه برخی از تعریف‌ها و شناخت‌ها در مورد پیوند آب - انرژی – غذا (WEFN)[1] از پیش آغاز شده بود، اما اولین بررسی علمی از پیوند با مفاهیم اصلی به‌عنوان مقاله در کنفرانس بن ۲۰۱۱ در همان سال منتشر شد. کنفرانس بن به صراحت نشان داد که با استفاده از یک رویکرد پیوندی می‌توان به امنیت آب، انرژی و غذا دست یافت (Hoff, 2011). یک نقطه عطف دیگر برای ارزیابی پیوند، "پایداری در کنفرانس آب – انرژی - غذا" بود، که برای اقدامی در جهت توسعه راهکارهای جامع ارائه پیوند تلاش می‌کرد (Daher and Mohtar, 2015). پس از این افزایش آگاهی و کارهای علمی، بحث‌های مختلف پیرامون هدف-های توسعه پایدار (معروف به SDG) و سهم احتمالی رویکرد پیوند WEF صورت گرفت (Biggsa *et al.*, 2015). در طول چند سال گذشته، بحث در مورد ارتباط به‌هم پیوسته امنیت آب، انرژی و غذا تبدیل به یک جنبش جهانی شده است. در حالیکه بخش‌های آب، انرژی و غذا هر یک در مواجهه با افزایش تقاضای جهانی ناشی از رشد جمعیت، شهرنشینی، تغییر سبک زندگی و رژیم‌های غذایی و تغییرات آب و هوایی به تنهایی با چالش تأمین مواجه هستند، به‌عنوان بخشی از پیوند امنیت آب، انرژی و غذا نیز به یکدیگر وابسته‌اند (Beisheim, 2013). یک رویکرد پیوند به ما کمک می‌کند تا روابط متقابل پیچیده و پویا بین آب، انرژی و غذا را درک کنیم، بنابراین ما می‌توانیم از منابع محدود خود به‌طور پایدار استفاده کرده و مدیریت کنیم و این کار ما را مجبور می‌کند تا به تأثیرهایی که تصمیم‌گیری در یک بخش می‌تواند نه تنها بر آن بخش، بلکه بر بخش‌های دیگر تأثیر داشته باشد، فکر کنیم. با پیش‌بینی معاملات و هم افزایی‌های احتمالی، می‌توانیم گزینه‌های پاسخگویی را که در بخش-های مختلف قابل اجرا هستند؛ طراحی، ارزیابی و اولویت-بندی کنیم (FAO, 2014).

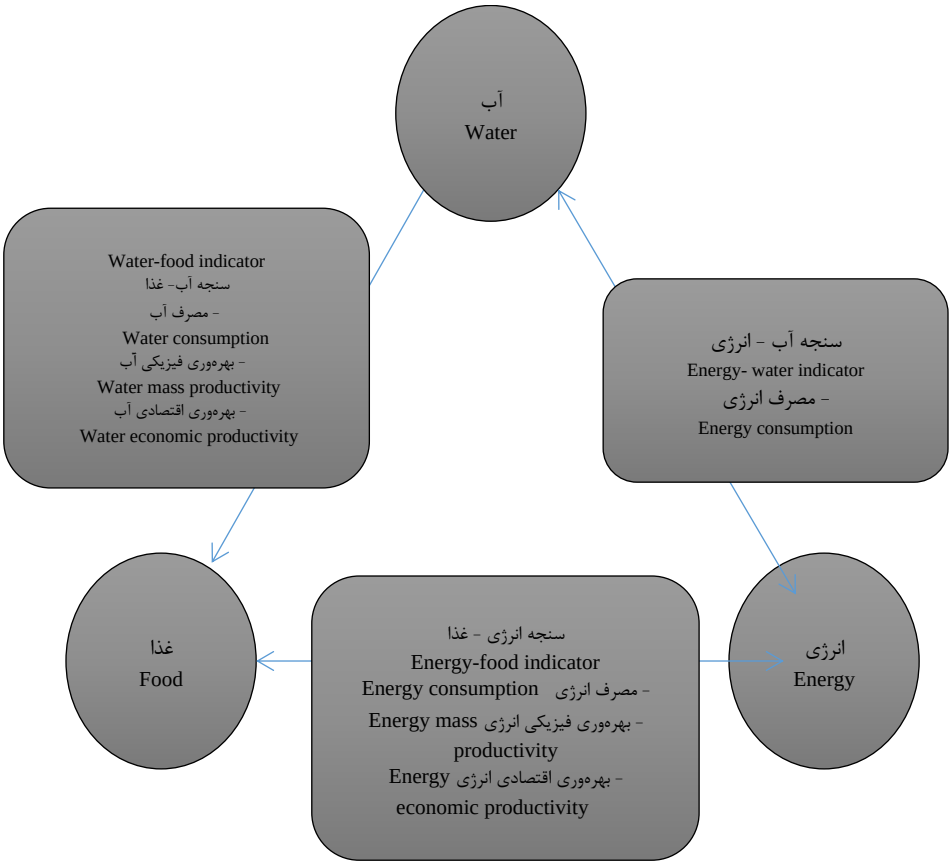
در ایران، براساس گزارش مرکز مطالعات استراتژیک CSS (2017)، از ۱۰۰ چالش موجود کشور، ۱۲ موضوع یعنی؛ بحران آب، طوفان‌های گرد و غبار، بحران آلودگی هوا، تخریب تنوع زیستی، عدم پایداری محیط‌زیست، تخریب خاک، درگیری به‌دلیل پیامدهای بین مرزی آب، تغییر اقلیم، بازده کم انرژی، بازار جهانی انرژی، آلودگی محیط‌زیست و سهم کم کشاورزی در تولید ناخالص به‌طور مستقیم به امنیت آب، انرژی و غذا مربوط می‌شوند. آب برای آبیاری و فرآوری مواد غذایی، خنک‌سازی نیروگاه‌ها، تولید برق در نیروگاه‌های برق آبی، تولید مواد اولیه انرژی زیستی، کنترل انتشار، و ساخت، بهره برداری و نگهداری تأسیسات تولید انرژی مورد نیاز می‌باشد. افزون بر این، انرژی برای تولید کود، ماشین‌آلات کشاورزی، نگهداری و فرآوری مواد غذایی، حمل و نقل و پمپاژ آب آبیاری برای دسترسی به غذا ضروری است.

بنابراین، درک ارتباط متقابل پیچیده در رویکرد پیوند امنیت آب – انرژی - غذا برای توسعه پایدار و آینده امن برای همه کشورها و منطقه‌ها اهمیت یافته است (Mohtar and Daher, 2012; Gulati *et al.*, 2013; Rasul and Sharma, 2016; Cai *et al.*, 2018; Stephan et al., 2018 ;Terrapon-Pfaff *et al.*, 2018). در واقع، رسیدگی به بیش از یک بخش پیچیده و بهم پیوسته در رویکرد پیوند برای دستیابی به نتایج بهتر در نظر گرفته شده است (Hettiarachchi and Ardakanian, 2016). ابزارها و رویکردهای یکپارچه‌ای برای تجزیه و تحلیل امنیت آب، انرژی و غذا از طریق مدیریت پیوند ارائه می-شود. نتایج این آزمون‌ها در سناریوهای عملی تصمیم-گیرندگان و صاحبان منافع مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل مدیریت پیوند WEF باید بتواند رویکردهای بهینه‌ای برای مدیریت آب، انرژی، غذا، سیاست‌ها و رویکردهای مدیریت تأثیرگذار بر همه بخش‌ها باشد.

چارچوب ساختاری پیوند آب – انرژی – غذا

چارچوب پیوند WEF شامل سه قسمت به هم پیوسته آب - غذا، انرژی - غذا و انرژی - آب است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سنجه‌ها ابزارهای مفهومی برای

ارزیابی پایداری هستند که می‌توانند در بسیاری از بخش-ها تأثیرگذار باشند. بنابراین، برای تحقیق حاضر، ارتباط متقابل آب و غذا با مصرف آب، بهره‌وری فیزیکی آب و سنجه بهره‌وری اقتصادی آب اندازه‌گیری شد. همچنین، مصرف انرژی، بهره‌وری فیزیکی انرژی و سنجه بهره‌وری اقتصادی انرژی بیانگر رابطه بین انرژی و غذا هستند.



شکل ۱- چارچوب ساختاری پیوند آب – انرژی - غذا در نظام‌های تولید محصول‌های کشاورزی

Fig. 1– Structural framework of water-energy-food nexus in agricultural production systems

کشاورزی، اصلی‌ترین استفاده‌کننده از منابع آب جهان است و آب برای تولید مواد غذایی ضروری است. در نتیجه، پایداری کشاورزی نیازمند مدیریت کارآمد منابع محدود آب تحت شرایط محدودیت‌های موجود است (Garg and Dadhich, 2014). با این وجود، ایجاد پیوند آب - انرژی - غذا برای ایجاد سنجه‌ای که فقط در یک بخش مانند سنجه‌های قبلی متمرکز نشود بلکه آب و انرژی را نیز بررسی کند و همچنین برای دستیابی به الگوی کشت مطلوب، ضروری است (El-gafi, 2017). از این رو می‌توان از سنجه پیوند آب - انرژی و غذا به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی و تجزیه و تحلیل راهکارهایی استفاده کرد که چندین جنبه را ترکیب می‌کند تا نگرانی‌های اصلی در رابطه با این بخش‌ها را با یک عدد منعکس کند (El-gafi *et al.*, 2017a). El_Gafy *et al.*, (2017) به مطالعه مقایسه رویکردهای پیوند و غیرپیوند برای الگوی کشت بهینه که شامل پارامترهای آب، انرژی و اقتصادی بود، پرداختند. این مطالعه نشان داد که رویکرد پیوندی بهترین روش است. به‌کار بردن آن از طریق سنجه پیوند آب - انرژی و غذا، یک روش جامع را برای شناسایی الگوی کشت بهینه فراهم می‌کند که مصرف آب و انرژی را کاهش می‌دهد و بازده خالص کشاورزی را افزایش می-دهد. Sadeghi *et al.* (2020) پژوهش بررسی کمی پیوند آب – انرژی - غذا در مقیاس حوزه آبخیز را برای کاربری کشاورزی انجام دادند. آن‌ها استفاده از سنجه‌های میزان

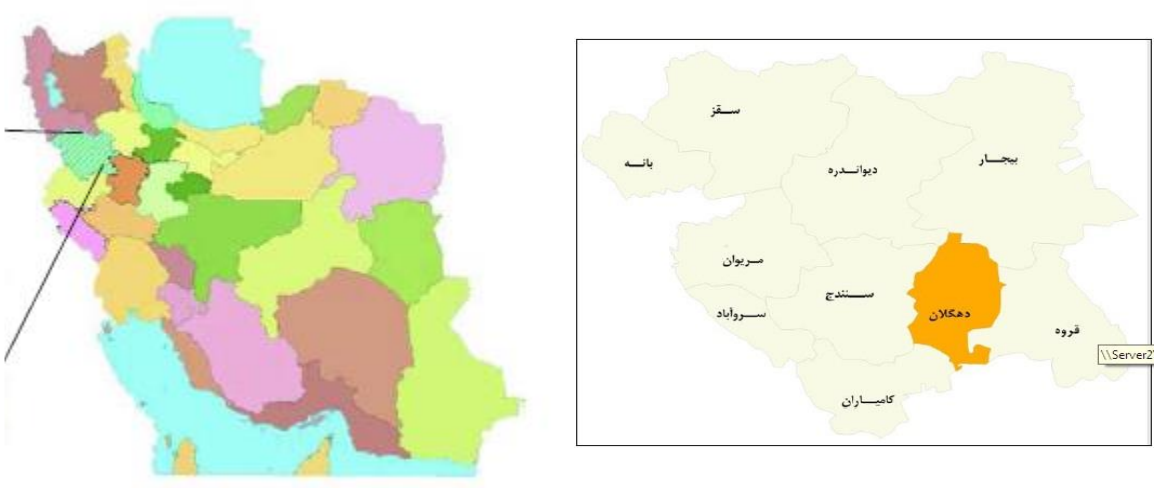
مصرف، بهره‌وری و کارآیی اقتصادی آب در هکتار برای ارتباط متقابل پیوند آب - غذا، سنجه‌های میزان مصرف، بهره‌وری و کارآیی اقتصادی انرژی برای ارتباط متقابل پیوند انرژی - غذا و برای پیوند آب- انرژی، سنجه میزان مصرف انرژی را در نظر گرفتند. براساس این سنجه‌ها، سنجه پیوند آب - انرژی - غذا را برای محصول‌های مورد نظر در سال۱۳۹۳ محاسبه کردند. در بین محصول‌های کشاورزی بادام بیشترین مقدار (۰/۷۹) و سیب‌زمینی و چغندرقند (۰/۱۷) کمترین مقدار سنجه WEF را به خود اختصاص دادند. نتایج پژوهش نشان داد که WEF می‌تواند در تعیین الگوی کشت بهینه و با هدف کاهش میزان مصرف آب و انرژی و افزایش میزان بهره‌وری آب و انرژی مورد استفاده قرار گیرد. El-Gafy (2017) به ارائه روشی برای تصمیم‌گیرندگان برای تجزیه و تحلیل رابطه آب، انرژی و غذا و سیستم تولید چهل و دو محصول‌های زراعی در سطح ملی مصر پرداخت. با روش پیشنهادی، سنجه‌هایی را با در نظر گرفتن مصرف آب و انرژی، بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی پیشنهاد داد. براساس این سنجه‌ها، یک سنجه پیوند آب و غذا و انرژی (WFENI) محاسبه کرد. نتایج او نشان داد که سنجه پیوند آب، غذا و انرژی محاسبه شده در محصول‌های صیفی مصر دارای امتیازهایی از ۰/۲۱ تا ۰/۷۹ است. پیاز بالاترین امتیاز سنجه پیوند آب، غذا و انرژی و برنج کمترین نمره سنجه را در میان محصول‌های غذایی تابستانی به خود اختصاص دادند. همچنین انرژی مصرف شده برای آبیاری ۷/۴٪ از کل انرژی را نشان می‌دهد. مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که برای مقابله با سطح‌های فعلی ناامنی در دسترسی به منابع، یک رویکرد رابطه محور لازم است. در سال‌های اخیر، تمرکز روی رویکردهای بهینه‌سازی پیوند مورد بحث قرار گرفته است (Karnib, 2017; López-Díaz *et al.*, 2017; Dhaubanjar *et al.*, 2017; El-Gafy *et al.*, Stamou and Rutschmann, 2018; González- 2017a; Bravo *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

نتیجه‌گیری از ادبیات موجود نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پیوند آب – انرژی – غذا در کاربردهای مختلف وجود دارد .تحقیق حاضر مطالعه سنجه پیوند آب –انرژی - غذا را برای محصول‌های زراعی در شهرستان دهگلان انجام داد و در این زمینه برای تجزیه و تحلیل سنجه پیوند آب –انرژی - غذا، ۷ محصول زراعی آبی با بیشترین سطح زیر کشت انتخاب و بررسی شدند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان دهگلان یکی از دشت‌های حاصلخیز و قطب کشاورزی مکانیزه استان کردستان می‌باشد؛ که نقش مهمی در اقتصاد مردم و کشاورزی استان ایفاء می‌کند. شهرستان دهگلان از لحاظ طول و عرض جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا و ۴۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه ۳۶ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. میانگین بارش سالانه شهرستان دهگلان معادل ۳۵۲ میلی‌متر بوده و در ارتفاع ۱۸۷۶ متر از سطح دریا قرار دارد. سطح زیر کشت محصول‌های زراعی آبی در شهرستان دهگلان حدود ۱۹۰۰۰ هکتار است که محصول‌های گندم آبی، یونجه، سیب‌زمینی، جو آبی، خیار، کلزا و هویج بیشترین سطح را به خود اختصاص می‌دهند. اطلاعات مورد نیاز تحقیق شامل عملیات زراعی، نوع و میزان نهاده‌های مصرف (شامل کودهای شیمیایی و آلی، سموم شیمیایی، بذر و سوخت مصرفی) و میزان عملکرد محصول (عملکرد دانه و کاه برای گندم و جو، عملکرد دانه برای کلزا، عملکرد علوفه برای یونجه، خیار، سیب‌زمینی و هویج) با استفاده از پرسشنامه و مصاحبه حضوری با ۳۱۵ کشاورز منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲- نقشه منطقه مورد مطالعه (شهرستان دهگلان)

Fig. 2– Map of the study area (Dehgolan County)

کشاورزی شهرستان دهگلان به‌دلیل برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی و منفی شدن بیلان آب منطقه‌ای، با مشکل‌های جدی کمبود آب روبرو است. آبخوان دشت دهگلان اصلی‌ترین و بزرگترین منبع آب زیرزمینی استان می‌باشد و به‌دلیل افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۰ به بعد این دشت با بحران مواجه شده و به‌عنوان دشت ممنوعه معرفی شده است. با این حال، ممنوعیت اعمال شده نیز نتوانسته است در به تعادل رساندن سفره آبی این دشت کارساز باشد (Hegmatan-Ab Consulting Engineers, 2007) از این رو آمارها بیانگر ادامه روند افت سطح سفره‌های زیرزمینی و حتی افت کیفیت آب‌های زیرزمینی است. به طوری که در سال آبی ۹۱- ۹۲ افت سطح آب آبخوان نسبت به سال ۶۶-۶۷ حدود ۲۷ متر برآورد گردیده است (Regional water of Kurdistan, 2013) بنابراین، ضرورت ورود به مرحله مدیریت جامع منابع آبی و به تبع آن منابع انرژی و اقتصاد مردم در آینده بیش از پیش نمایان می‌شود.

سنجه‌های مصرف آب و انرژی

میزان مصرف آب در هر هکتار محصول c در زمان t ($W_{c,t}$) در منطقه دهگلان براساس داده‌های جمع‌آوری شده از مصاحبه با کشاورزان جمع‌آوری شد. ($m^3 . ha^{-1}$)

مصرف انرژی ($E_{c,t}$) عبارتست از مصرف انرژی در هر هکتار محصول c در زمان t. می‌توان آن را به مصرف انرژی غیرمستقیم (به‌عنوان نمونه، بذر، مواد شیمیایی مصرفی، کود دامی و ماشین آلات) و مصرف مستقیم انرژی (به‌عنوان نمونه، نیروی انسانی، سوخت‌های فسیلی و آب آبیاری) دسته‌بندی کرد. $E_{c,t}$ با مجموع انرژی مستقیم و غیرمستقیم ارزیابی شده است. داده‌های معادل انرژی مرتبط با این بخش از مقاله‌های بین المللی استنتاج شد. براساس معادله ۱، میزان انرژی مصرفی برای هر محصول در واحد هکتار محاسبه شد.

$$E_{c,t} = \sum q_h h_{(c,t)} + q_m m_{(c,t)} + q_d d_{(c,t)} + q_f f_{(c,t)} + q_p p_{(c,t)} + q_s s_{(c,t)} + q_w w_{(c,t)} + q_e e_{(c,t)} \quad (۱)$$

در معادله بالا q_h, q_m, q_d, q_f, q_s, q_w و q_e به‌ترتیب معادل انرژی نیروی کار (ژول بر هکتار)، ماشین آلات (ژول بر هکتار)، گازوئیل (ژول بر هکتار)، کود شیمیایی (ژول بر کیلوگرم)، آفتکش (ژول بر کیلوگرم)، بذر (ژول بر کیلوگرم)، آب آبیاری (ژول بر مترمکعب) و الکتریسیته (ژول بر هکتار)، برای هر محصول c است. h(c,t)، m(c,t)، d(c,t) ,f(c,t)، p(c,t)، s(c,t)، w(c,t) و e(c,t) به‌ترتیب ورودی نیروی کار (ساعت بر هکتار)، ماشین‌آلات (ساعت

بر هکتار)، گازوئیل (لیتر بر هکتار)، کود شیمیایی (کیلوگرم بر هکتار)، آفتکش (کیلوگرم بر هکتار)، بذر (کیلوگرم بر هکتار)، آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) و الکتریسیته (کیلو وات بر هکتار)، برای هر محصول c در زمان t است. معادل‌های انرژی از ورودی محصول‌های کشاورزی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- معادل‌های انرژی از ورودی محصول‌های کشاورزی شهرستان دهگلان

Table 1. Energy equivalents of inputs in agricultural production of Dehgolan County

ورودی Input	واحد Unit	معادل انرژی Energy equivalent	منبع Resource
نیروی کار Human labour	ساعت h	1.96	Singh &Mittal, 1992
ماشین‌آلات Machinery	کیلوگرم Kg	62.7	Singh &Mittal, 1992
سوخت Diesel fuel	لیتر L	56.31	Erdal *et al.*, 2007
کود دامی Manure		0.3	
کودهای شیمیایی Chemical fertilizers			
نیتروژن Nitrogen	کیلوگرم Kg	78.1	Singh &Mittal, 1992 Kitani, 1998
فسفات Phosphate	کیلوگرم Kg	17.4	
پتاسیم Potassium		13.7	
آفت کش‌ها Pesticide	لیتر L	120	Mandal *et al.*, 2002
آب آبیاری Water for irrigation	مترمکعب M^3	1.02	Acaroglu, 2005
الکتریسیته Electricity	کیلووات Kwh	20.1	Giampietro *et al.*, 1992
بذر Seed			
گندم Wheat		14.7	Mobtaker *et al.*, 2010
جو Barley		3.6	Ozkan *et al.*, 2004
سیب‌زمینی Potato	کیلوگرم Kg	1	Singh, 2002
خیار Cucumber		6.9	Hoeppner *et al.*, 2005
یونجه Alfalfa		3.6	Ozkan *et al.*, 2004
کلزا Rapeseed		1	Ozkan *et al.*, 2004
هویج Carrot			

سنجه‌های بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی

بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی به‌عنوان سنجه‌های ارزیابی غذایی مورد استفاده قرار گرفت. سنجه بهره‌وری آب و سنجه بهره‌وری فیزیکی انرژی به‌ترتیب با کمک معادله ۲ و ۳ محاسبه شد (El-Gafy, 2017).

$$w_{p,t} = \frac{y_{c,t}}{w_{c,t}} \qquad (۲)$$

در معادله ۲، $Y_{c,t}$ عملکرد محصول c $(kg.\ ha^{-1})$ در زمان t است، $W_{c,t}$ مصرف آب در هکتار محصول c $(m^3.\ ha^{-1})$ در زمان t است. بهره‌وری فیزیکی انرژی $(E_{p,t})$ در زمان t، با نسبت بین عملکرد محصول c و مصرف انرژی آن بنابر معادله ۳ محاسبه شده است (El-Gafy, 2017).

$$E_{p,t} = \frac{y_{c,t}}{E_{c,t}} \qquad (۳)$$

که در آن $E_{p,t}$، بهره‌وری انرژی در زمان t است (MJ^{-1})، $Y_{c,t}$ عملکرد c (کیلوگرم بر هکتار) است و Ec,t مصرف انرژی در هکتار محصول c در زمان t است (ژول بر هکتار).

سنجه‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی

برای برآورد بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری در زمان t $(W_{ev,t})$ (مترمکعب/ریال) از معادله ۴ استفاده شد: (El-Gafy, 2017)

$$W_{ev,t} = (N_{c,t} - C_{c,t})/W_{c,t} \qquad (۴)$$

بهره‌وری اقتصادی انرژی (مگاژول/ریال) با کمک معادله ۵ محاسبه شد (El-Gafy, 2017).

$$E_{ev,t} = (N_{c,t} - C_{c,t})/E_{c,t} \qquad (۵)$$

که در آن $E_{EV,t}$ بهره‌وری اقتصادی انرژی c در زمان t است (مگاژول/ ریال)، $N_{c,t}$، بازده خالص اقتصادی در هر هکتار کشت محصول c. (هکتار/ ریال) در زمان t و $C_{c,t}$، مجموع هزینه‌های نهاده‌های مورد استفاده در هکتار برای کشت محصول c در زمان t.

سنجه پیوند آب – انرژی و غذا (WEFNI)

WEFNI به شرح زیر محاسبه شده است (El-Gafy, 2017):

$$WEFNI = \sum_{i=1}^{n} w_i s_i / \sum_{i=1}^{n} w_i s_i \qquad (۶)$$

که در آن S_i استاندارد سنجه WEFNI است، Wi وزن هر جزء و n تعداد متغیرهای WEFNI است که در محاسبه سنجه اعمال می‌شود. بالاترین و کمترین مقدار یک و صفر به‌ترتیب به بالاترین و کمترین WEFNI برای هر محصول اختصاص یافتند.

از آنجا که مقادیر واقعی سنجه‌های WEFNI در واحدها و اندازه‌های مختلف ارائه شده است، نمی‌توان آن‌ها را به‌طور مستقیم با هم جمع و مقایسه کرد. از این رو، لازم است تا سنجه‌های WEFNI نرمال شوند تا محدوده‌ای یکسان برای مقادیر سنجه‌ها بین دو مقدار صفر و یک با استفاده از معادلات(۷ و ۸) تولید کنند. (Juwana *et al.*, 2012):

$$S_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \qquad (۷)$$

$$S_i = 1 - (\frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}) \qquad (۸)$$

که در آن Si مقدار زیر سنجه برای سنجه i است، Xi مقدار واقعی برای سنجه i است، و X_{min} و X_{max} به‌ترتیب بیانگر مقادیر حداقل و حداکثر آستانه‌های سنجه هستند.

نتایج و بحث

سنجه مصرف آب و انرژی

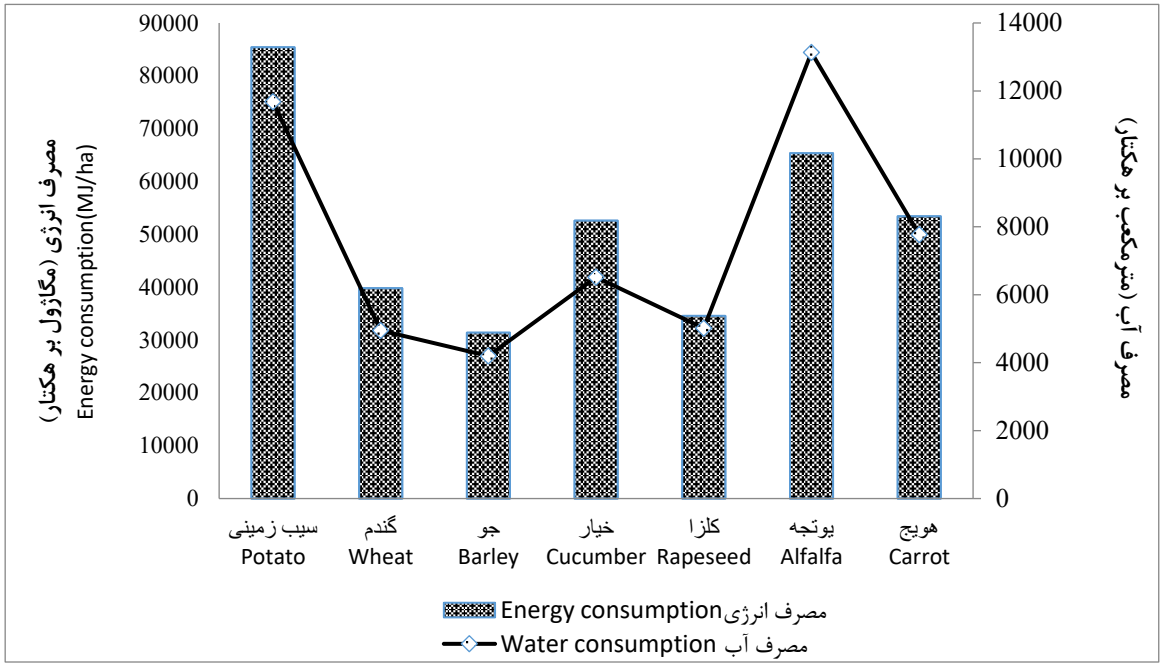
نتایج سنجه مصرف آب بیانگر آن است که از میان محصول‌های زراعی، یونجه بیشترین مصرف آب (۱۳۱۳۱ مترمکعب بر هکتار) را در بین محصول‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داد. یونجه با توجه به اینکه چندین برداشت در فصل‌های بهار و تابستان دارد نیاز به آب زیادی در مقایسه با دیگر محصول‌ها در منطقه دارد. همچنین محصول جو کمترین مصرف آب آبیاری (۴۱۹۷ مترمکعب بر هکتار) را به خود اختصاص داد.

انرژی معادل نیروی انسانی، ماشین‌آلات، گازوئیل، کود، آفت‌کش‌ها، الکتریسیته و آب آبیاری ورودی در هکتار در

محاسبه مصرف انرژی در نظر گرفته شده است. سیب-زمینی با توجه به مصرف زیاد کشاورزان در نهاده‌های ورودی همچون کود شیمیایی بیشترین ورودی انرژی (۸۵۴۰۴ مگاژول بر هکتار) را دارد. Hosainpanahei *et al*. (2011) میزان ورودی انرژی برای سیب‌زمینی در دهگلان را ۹۳۳۳۰ مگاژول بر هکتار محاسبه کردند. دلیل کمتر شدن میزان انرژی ورودی نسبت به سال ۱۳۹۰ مصرف کمتر کودهای شیمیایی به‌عنوان اصلی‌ترین بخش ورودی انرژی می‌باشد. Dargahi *et al*. (2016) میزان انرژی ورودی را برای کشت آبی کلزا در گلستان را ۲۰۴۸۵/۵۹ مگاژول در هکتار گزارش کردند؛ سوخت گازوئیل مصرفی برای ماشین‌آلات ۴۲/۳۳ درصد از این مقدار را شامل بود که بیشترین سهم را در انرژی مصرفی داشت. در مقایسه با کشت کلزا در شهرستان دهگلان (۳۴۵۸۱ مگاژول بر هکتار) میزان انرژی کمتری مصرف شده است که این به‌دلیل مصرف آب آبیاری کمتر و به تبع آن الکتریسیته کمتر در گلستان است. همچنین کودهای شیمیایی بیشترین سهم را در انرژی نهاده‌های مورد استفاده در کشت این محصول داشتند. اختلاف نمودار میله‌ای و خطی (شکل ۳) در محصول یونجه ناشی از مصرف بالای آب و مصرف کم کود شیمیایی و به تبع آن کمتر شدن میزان انرژی ورودی می‌باشد. جدول ۲ مقادیر زیر سنجه‌های پیوند آب – انرژی - غذا ورودی در هر هکتار کشت را برای محصول‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. در شکل شماره ۳ میزان مصرف آب و انرژی در هر هکتار محصول‌های زراعی آبی منطقه نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر سنجه‌های پیوند آب – غذا - انرژی
Table 2. Values of water-to-energy nexus indices

محصول Product	مصرف Consumption		بهره‌وری فیزیکی Mass productivity		بهره‌وری اقتصادی Economic productivity	
	آب Water	انرژی Energy	انرژی Energy	آب Water	آب Water	انرژی Energy
سیب‌زمینی Potato	11680	85404.8	3.59	49.0	34323	4694
گندم Wheat	4949	39808.5	0.99	12.0	14628	1819
جو Barley	4197	31394.4	0.98	13.0	11791	1576
خیار Cucumber	6517	52584.6	2.76	34.0	92959	11520
کلزا Rapeseed	5014	34581	44.0	06.0	10688	1549
یونجه Alfalfa	13131	65330.7	14.1	23.0	16348	3286
هویج Carrot	7771	53402.4	08.7	03.1	90726	13202



شکل۳- سنجه‌های مصرف آب و انرژی محصول‌های کشاورزی در شهرستان دهگلان

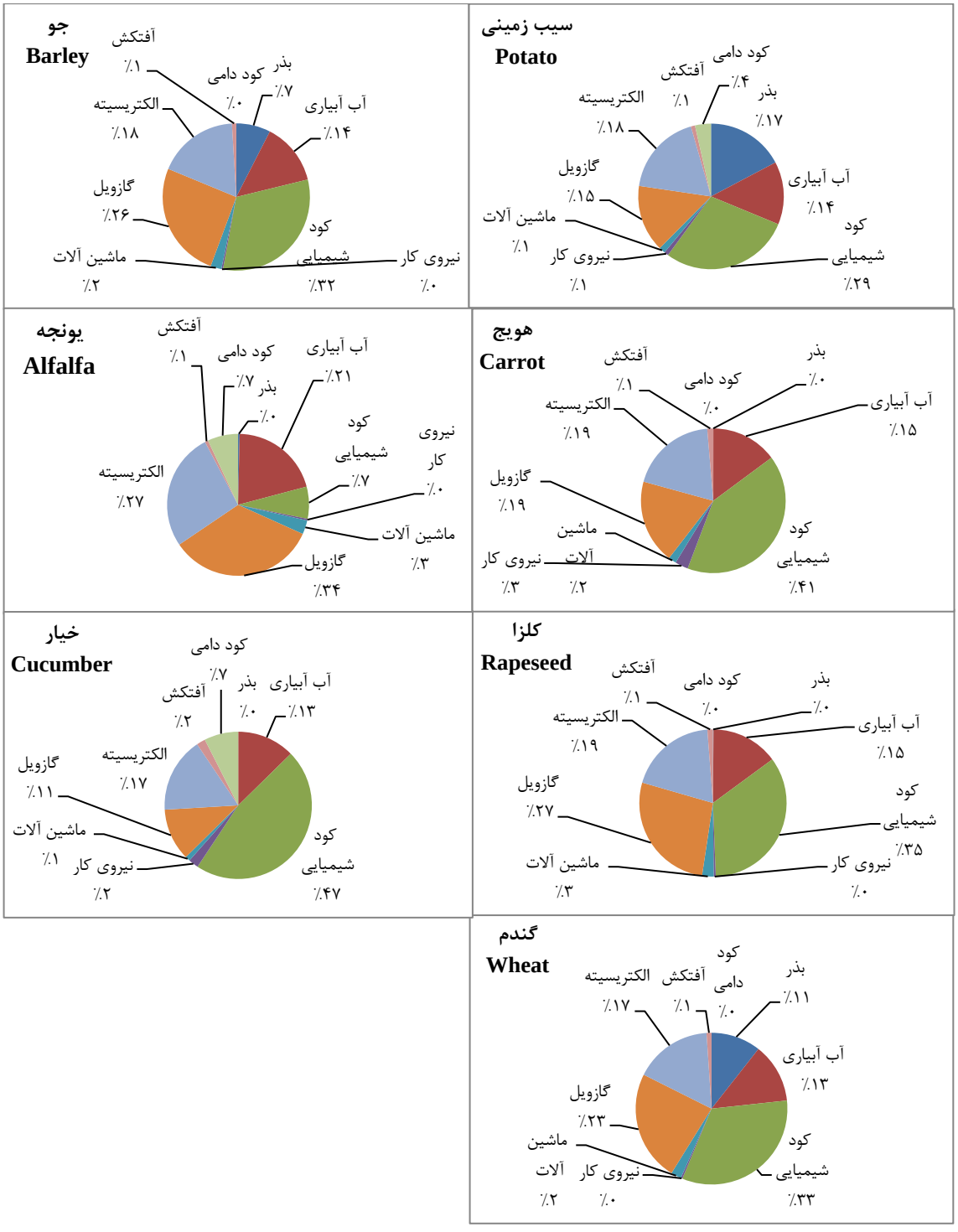
Fig. 3- Water and energy consumption indicators of agricultural products in Dehgolan County

با توجه به شکل ۳، بیشترین درصد مصرف انرژی در محصول‌های مورد مطالعه به جز یونجه، کودهای شیمیایی می‌باشد. بیشترین درصد مصرف انرژی در یونجه مربوط به الکتریسیته می‌باشد که ناشی از مصرف الکتریسیته برای انتقال حجم بالایی از آب آبیاری است. بیشترین و کمترین انرژی مصرفی بذر به‌ترتیب برای سیب زمینی و هویج به‌دست آمد. در مصرف انرژی معادل آب و الکتریسیته، یونجه و جو، مصرف انرژی معادل کودهای شیمیایی، سیب‌زمینی و یونجه، مصرف انرژی معادل نیروی کار، هویج و جو، مصرف انرژی معادل ماشین آلات و گازوئیل، یونجه و خیار، مصرف معادل آفتکش‌ها، خیار و جو به‌ترتیب بیشترین و کمترین درصد را به خود اختصاص دادند. در مقایسه انرژی معادل بذر مصرفی، سیب‌زمینی بیشترین درصد انرژی ورودی بذر مصرفی را داشت. Sadeghi *et al.* (2020) پیاز و سیب‌زمینی را به‌ترتیب به‌عنوان بیشترین مصرف‌کننده انرژی بین سال‌های ۲۰۰۶ - ۲۰۱۴ معرفی کردند. Hosainpanahei *et al.* (2011) میزان مصرف انرژی در مزرعه‌های سیب‌زمینی دهگلان را برای مواد شیمیایی، سوخت‌های فسیلی و ماشین‌آلات، بذر، آب آبیاری، کود دامی و نیروی انسان را به‌ترتیب ۴۲/۵، ۲۵، ۱۵/۴۶، ۱۰/۴۷، ۴/۳۴ و ۱/۶۷ درصد اعلام کردند. شکل ۴ سهم نهاده‌های کشاورزی به کل انرژی مصرفی برای تولید محصول‌های کشاورزی را نشان می‌دهد.

محاسبه سنجه‌های بهره‌وری فیزیکی انرژی و آب

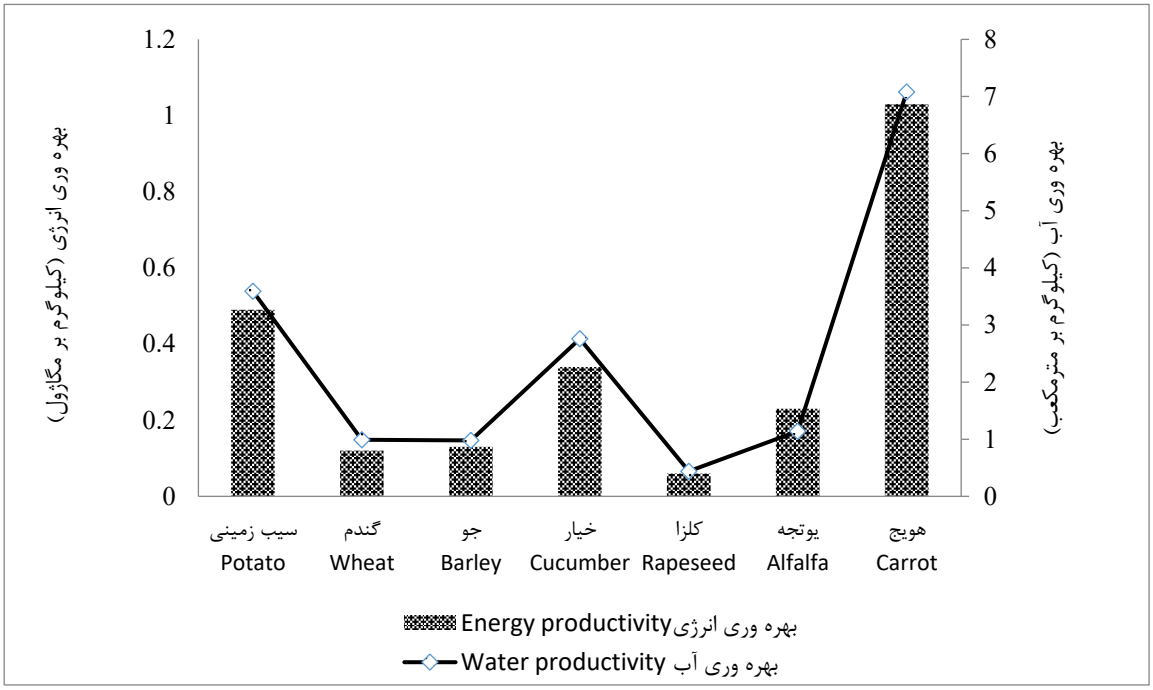
نتایج سنجه‌های بهره‌وری آب و انرژی در شکل ۵ نشان داده شده است. بهره‌وری بالای آب به این معنی است که محصول می‌تواند بیشترین بهره‌وری انرژی را داشته باشد (El-Gafy *et al.*, 2017b). نتایج نشان داد که در بین محصول‌های کشت شده، هویج بالاترین بهره‌وری انرژی (۱/۰۳ کیلوگرم بر مگاژول) و آب (۷/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) را دارد، دلیل این امر، عملکرد (تن بر هکتار) بالای محصول هویج می‌باشد. بعد از هویج بیشترین میزان بهره وری انرژی و آب را سیب‌زمینی به خود اختصاص داده است. El-Gafy *et al.* (2017b) میزان بهره‌وری فیزیکی انرژی و آب در سیب‌زمینی را به‌ترتیب ۰/۵۱ کیلوگرم بر مگاژول مصرفی و ۴/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی به‌دست آورد؛ نتایج برای مطالعه حاضر به-

ترتیب ۰/۴۹ و ۳/۵۹ محاسبه شد. در مقایسه با نتایج Hosainpanahei *et al.* (2011) در دهگلان که بهره‌وری فیزیکی انرژی سیب‌زمینی را ۰/۳۸ کیلوگرم بر مگاژول گزارش کردند؛ که نشان از افزایش بهره‌وری انرژی کشاورزان منطقه دهگلان در طول یک دهه اخیر می‌باشد. کمترین بهره‌وری انرژی و آب محاسبه شده برای کلزا می‌باشد. دلیل بهره‌وری پایین در محصول کلزا، عملکرد پایین آن می‌باشد.



شکل۴- سهم نهاده‌های کشاورزی به کل انرژی مصرفی برای تولید محصول‌های کشاورزی

Fig. 4- Contribution of agricultural inputs categories to the total energy used for the food crops production

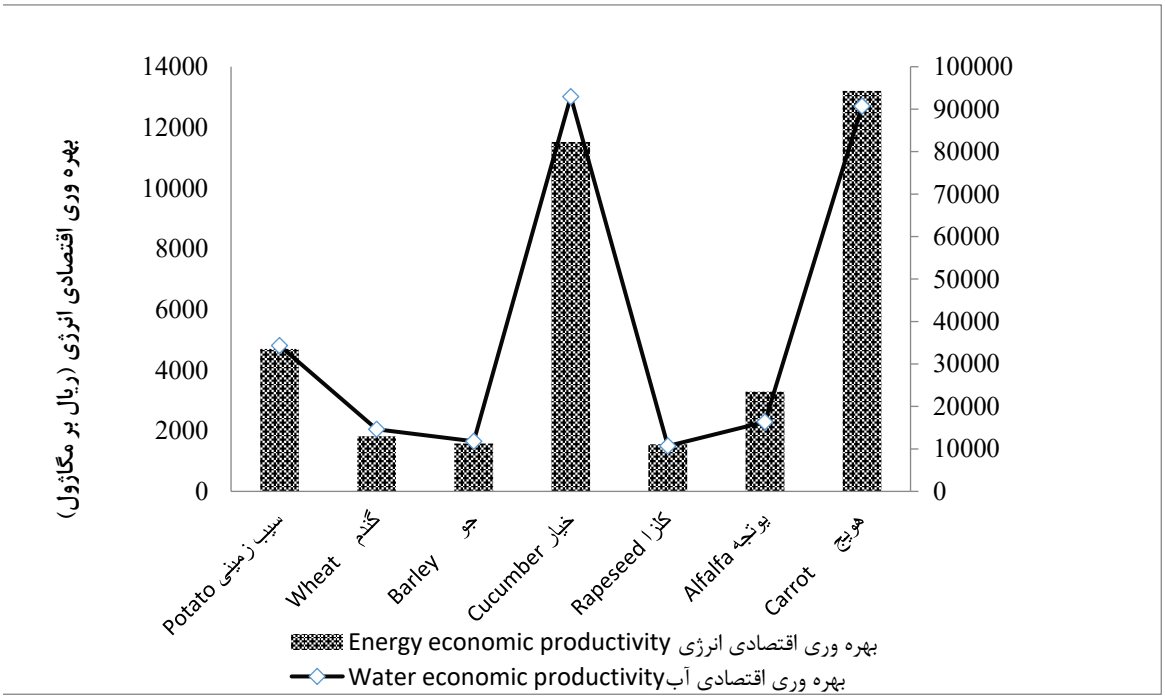


شکل ۵- سنجه‌های بهره‌وری آب و انرژی محصول‌های کشاورزی در شهرستان دهگلان

Fig. 5- Water and energy productivity indicators of agricultural products in Dehgolan County

محاسبه سنجه‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی

سنجه‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی محصول‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، هویج و خیار به‌ترتیب بالاترین بهره‌وری اقتصادی انرژی و آب (۱۳۲۰۲ ریال بر مگاژول و ۹۲۹۵۹ ریال بر مترمکعب) را در بین محصول‌ها دارند. بهره‌وری اقتصادی آب بالای خیار نسبت به هویج به‌دلیل آب مصرفی کمتر می‌باشد.



شکل ۶- سنجه‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی محصول‌های کشاورزی در شهرستان دهگلان

Fig. 6- Water and energy economic productivity of agricultural products in Dehgolan County

سنجه پیوند آب – غذا – انرژی محصول‌های مورد مطالعه

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، سنجه‌های استاندارد شده مصرف انرژی، آب، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی محاسبه شد. براساس سنجه‌های قبلی (سنجه-های مصرف آب و انرژی، سنجه‌های بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی و سنجه‌های بهره‌وری اقتصادی)، سنجه پیوند آب – غذا - انرژی محصول‌های اصلی کشاورزی شهرستان دهگلان برای سال زراعی ۹۹ - ۱۳۹۸ تعیین شد. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای برای محصول‌های کشاورزی براساس سنجه پیوند آب – غذا - انرژی آن‌ها انجام شد. این مطالعه نشان داد که سنجه پیوند آب – غذا - انرژی محاسبه شده در محصول‌ها دارای امتیازهای از ۰/۲۶ تا ۰/۸۶ است، با توجه به جدول شماره ۳، هویج (بالاترین امتیاز WFENI) ۰/۸۶ (بهترین امتیاز) و یونجه (۰/۲۶) کمترین WFENI را در میان محصول‌ها دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده سنجه WFEN در بعضی از محصول‌ها به‌عنوان نمونه در سیب‌زمینی با توجه به مصرف بالای آب و انرژی که دارند ولی امتیاز بالایی را به خود اختصاص داده‌اند؛ که این ناشی از بهره‌وری بالا در بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی است. با توجه به شرایط کنونی منطقه و کاهش سالانه سطح آب زیرزمینی، نیاز است که دولت با برنامه‌های حمایت اقتصادی بویژه برای بالا بردن سودآوری محصول‌ها با نیاز آبی کم برنامه‌ریزی کند. همچنین با ایجاد سیستم-های نوین آبیاری قطره‌ای برای محصول‌هایی که این امکان را دارند که با سیستم نوین قطره‌ای آبیاری شوند، می‌توان میزان آب مصرفی را (برای نمونه محصول‌های هویج و سیب زمینی) کاهش داد. به تبع کاهش در مصرف آب مصرفی، میزان انرژی مصرفی نیز کاهش می‌یابد و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی این محصول‌ها نیز بهبود خواهد یافت که این می‌تواند به تعادل رساندن سطح آب‌های زیرزمینی منطقه و پایداری آن کمک کند.

جدول۳- سنجه استاندارد شده پیوند آب -انرژی - غذا (WEFNI) محصول‌های کشاورزی شهرستان دهگلان
Table 3. Standardized index of water-energy-food nexus (WEFNI) of agricultural products of Dehgolan County

محصول Product	مصرف Consumption		بهره‌وری فیزیکی Mass productivity		بهره‌وری اقتصادی Economic productivity		WFENI
	آب Water	انرژی Energy	آب Water	انرژی Energy	آب Water	انرژی Energy	
سیب زمینی Potato	0.14	0	0.78	0.82	0.67	0/66	0.51
گندم Wheat	0.94	0.72	0.25	0.09	0.21	0/27	0.41
جو Barley	1	1	0.21	0.12	0.05	0/05	0.4
خیارCucumber	0.76	0.66	0.62	0.46	1	0/87	0.73
کلزا Rapeseed	0.88	0.95	0	0	0	0	0.3
یونجه Alfalfa	0	0.2	0.43	0.21	0.31	0/39	0.26
هویج Carrot	0.64	0.6	1	1	0.91	1	0.86

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با معرفی و کاربرد سنجه WFEN، مبنای معتبری را برای تصمیم گیرندگان جهت تجزیه و تحلیل پیوند آب و غذا و انرژی در سیستم‌های تولید محصول‌های کشاورزی معرفی کرده که می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های کاربری زمین‌ها و امنیت غذایی استفاده شود. در یک دیدگاه همه جانبه‌نگر، این تحقیق سنجه ترکیبی WFENI را پیشنهاد و در یک مطالعه موردی محاسبه کرده است به‌طوریکه در رابطه با مصرف آب و انرژی (انرژی نیروی انسانی، ماشین‌آلات، گازوئیل، کود، آفتکش‌ها و ورودی‌های آب آبیاری در سیستم تولید محصول در نظر گرفته شد.)، بهره‌وری فیزیکی انرژی و

آب، و بهره‌وری اقتصادی انرژی و آب را برای ۷ محصول زراعی اصلی شهرستان دهگلان که در سال ۹۹ - ۱۳۹۸ کشت شده بود، ارزیابی نمود. در این رابطه، نتایج نشان داد که مقادیر WFENI برای محصول‌های مورد نظر از ۰/۲۶ تا ۰/۸۶ متغیر است. که در مقام مقایسه، هویج (با مقدار ۰/۸۶) بالاترین مقدار و یونجه (۰/۲۶) کمترین مقدار WFENI را در میان محصول‌ها داشتند. با استفاده از این نتایج می‌توان پیشنهاد کرد که از سطح زیرکشت محصول‌ها با WFENI کم کاسته و به محصول‌های با WFENI بالا افزوده شود.

یکی از نمودهای ناپایداری این سنجه و مرید نتایج این تحقیق، کاهش چشمگیر آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه است که توسط Kavosh-Abkhan Consultant Engineers (2011) اشاره شده است و بیانگر نبود سیاست‌گذاری بدون توجه به سنجه WFEN است. از این رو ضرورت دارد الگوی مدیریت فعلی با توجه به سنجه ترکیبی WFENI تغییر یابد. شایان توجه است که این تغییر باید بخش‌های آب، انرژی و غذا را همزمان مدنظر قرار دهد. برای نمونه برنامه‌های جدید و اصلاحی به جوامع کشاورزی اجازه دهد تا بهره‌وری مصرف آب کشاورزی و مصرف انرژی را افزایش دهند، و از این طریق به کاهش افت سطح آب زیرزمینی و یا برقراری تعادل آب سفره در دشت دهگلان کمک نمایند. بدیهی است چنین اصلاح‌هایی مستلزم تسهیل نوسازی بخش کشاورزی از طریق برنامه‌های انتقال و گسترش تکنولوژی، همزمان با اعمال سیاست‌ها و مقررات تکمیلی برای بهبود نظارت و مدیریت آب‌های زیرزمینی است.

درک پیوند WFE، امکان برنامه‌ریزی، توسعه، سیاستگذاری، نظارت و ارزیابی اثربخش‌تر را فراهم می‌کند. از این رو لازم است با هدف نهادینه‌سازی این دیدگاه کل‌نگر در همه سطح‌ها از سطح‌های محلی، منطقه‌ای و ملی و برنامه‌های آموزشی مدنظر قرار گیرد. موضوعی که در حال حاضر در سطح جهانی، منطقه‌ای توسط شبکه جهانی NEXUS پیگیری می‌شود. بدیهی است که استفاده از این تجربه‌ها می‌تواند در تسریع و بهینه شده آموزش‌ها و فرایند نهادینه‌سازی مؤثر باشد. و بالاخره اینکه سنجه‌های پیشنهادی در این تحقیق، می‌تواند برای مقایسه تغییر در روابط آب، انرژی و غذا در سیستم تولید محصول‌های کشاورزی در طی سال‌های مختلف استفاده شود. در واقع سنجه WEFN می‌تواند عملکرد سالانه مدیریت پیوند آب - انرژی و غذا را ارزیابی و راهنمودهایی برای اصلاح شرایط موجود ارائه کند و از این طریق به توسعه استراتژی‌های مربوط به الگوی کشت بهینه محصول‌های کشاورزی کمک نماید.

پی‌نوشت

[1]Water- Energy- Food Nexus

منابع

Acaroglu , M., 2005. The cultivation and energy balance of Miscanthus_giganteus production in Turkey. Biomass Bioenergy. 29, 42–8.

Beisheim, M., 2013. The water, energy and food security nexus: how to govern complex risks to sustainable supply Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP) Comments. German Institute for International and Security Affairs. 32, 1-8.

Biggsa, E.M., Bruceb, B., Boruffc, J.M., Duncana, J., Horsleyc, N., Paulic, K., McNeilld, A., Neefd, F.V., Ogtrope, J., Curnowf, B. and Haworthb, S., 2015. Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. Environmental Science Policy. 54. 389–397.

Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H.D. and McCandless, M., 2013. The Water- energy-food Security Nexus: Towards a Practical Planning and Decision-support Framework for Landscape Investment and Risk Management. International

Institute for Sustainable Development., Winnipeg, Manitoba, Canada.

Cai, X., Wallington, K., Shafiee-Jood, M. and Marston, L., 2018. Understanding and managing the food-energy-water nexus − opportunities for water resources research. Advances in Water Resources. 111, 259–273.

Center for Strategic Studies., 2017. Futures Studies in Iran. Available online at: http://css.ir/vkfedt (In Persian with English abstract).

Dargahi, M.R., Jahan, M., Naseri, M.T. and Ghorbani, R., 2016. Energy balance evaluation and economical analysis of canola production in Golestan province. Agronomy Journal. 112, 50-62. (In Persian with English abstract).

Dhaubanjar, S., Davidsen, C. and Bauer-Gottwein, P., 2017. Multi-objective optimization for analysis of changing trade-offs in the Nepalese water-energy-food nexus with hydropower development. Water. 9, 1–26.

El-Gafy, I., 2017. Water–food–energy nexus index: analysis of water-energy-food nexus of crop's production system applying the indicators approach. Applied Water Science. 7, 2857–2868.

El-Gafy, I., Grigg, N. and Reagan, W., 2017a. Water-food-energy: nexus and non-nexus approaches for optimal cropping pattern. Water Resource Management. 31, 4971–4980.

El-Gafy, I., Grigg, N. and Reagan, W., 2017b. Water-food-energy nexus index to maximize the economic water and energy productivity in an optimal cropping pattern. Water International. 42, 495–503.

Endo, A., Burnett, K., Orencio, P.M., Kumazawa, T., Wada, C.A., Ishii, A., Tsurita, I. and Taniguchi, M., 2015. Methods of the water-energy-food nexus. Water. 7, 5806–5830.

Erdal, G., Esengun, K., Erdal, H. and Gunduz, O., 2007. Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. Energy. 32, 35–41.

FAO., 2014. Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative, Environment and Natural Resources Working Paper No. 58. Rome.

Garg, N.K. and Dadhich, S.M., 2014. Integrated non-linear model for optimal cropping pattern and irrigation scheduling under deficit irrigation. Agric. Water Management. 140, 1–13.

Giampietro, M., Cerretelli, G. and Pimentel, D., 1992. Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. Agricultural and Ecosystems Environment. 38, 219–244.

González-Bravo, R., Sauceda-Valenzuela, M., Mahlknecht, J., Rubio-Castro, E. and Ponce-Ortega, J.M., 2018. Optimization of water grid at macroscopic level analyzing watere ‐nergy- food nexus. ACS Sustainable Chemistry and Engineerin. 6, 12140–12152.

Gulati, M., Jacobs, I., Jooste, A., Naidoo, D. and Fakir, S., 2013. The Water–energy–food Security Nexus: challenges and opportunities for food security in South Africa. Aquatic Procedia. 1, 150–164

Gundogmus, E., 2006. Energy use on organic farming; A comparative analysis nonorganic versus conventional apricot production on small holding in Turkey. Energy Conversion and Management. 47, 3351–3359.

Hegmatan-Ab Consulting Engineers., 2007.

Identification of surface and underground water sources in the study area of Ghorveh-Dehgolan. Published Report, Hamadan. (In Persian with English abstract).

Hettiarachchi, H. and, Ardkanian, R. 2016. Managing water, soil, and waste in the context of global change. Environmental resource management and the nexus approach. Springer Cham Press,. pp, 5-7.

Hoeppner, J.W., Ent, M.H., McConkey, B.G., Zentner, R.P. and Nagy, C.N., 2005. Energy use and efficiency in two Canadian organic and conventional crop production systems. Renewable Agriculture and Food Systems. 21, 60-67.

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

Hosainpanahei, F. and Mohammad, K., 2011. Evaluation of energy balance and its productivity in potato production farms of Kurdistan province, Case study: Dehgolan plain. Journal of Agroecology. 4, 159-169.

IEA, 2010., World Energy Outlook, Available online at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010.

Karnib, A., 2017. Water-energy-Food Nexus: a coupled simulation and optimization framework. Journal of Geoscience and Environment Protection. 5(04), 84-98.

Regional water basic studies of Kurdistan province., 2013. Report on the extension of the ban in Dehgolan plain. Kavosh-Abkhan Consultant Engineers. (In Persian with English abstract).

Kitani, O., 1998. Handbook of Agricultural Engineering. 5. Energy and Biomass Engineering. St Joseph, ASAE Publication.

López-Díaz, D.C., Lira-Barragán, L.F., Rubio-Castro, E., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M. and Ponce-Ortega, J.M., 2017. Optimization of biofuels production via a waterenergy- food nexus framework. Clean Technologies and Environmental Policy. 20 (7), 1–24.

Mandal, K.G., Saha, K.P., Ghosh, P.K., Hati, K.M. and Bandyopadhyay, K.K., 2002. Bioenergy and economic analysis of soybean-based crop production systems in central India. Biomass Bioenergy. 23, 337–345.

Mobtaker, H.G., Keyhani, A., Mohammadi, A., Rafiee, S.H. and Akram, A., 2010. Sensitivity analysis of energy inputs for barley production in Hamedan Province of Iran. Agricultural and Ecosystems Environment. 137, 367–372.

Mohtar, R.H. and Daher, B., 2012. Water, Energy, and Food, The Ultimate Nexus. Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering. CRC Press, Taylor and Francis Group.

Mohtar, R.H. and Daher, B., 2016. Water-energy-food nexus framework for facilitating multi-stakeholder dialogue. Water International. 41(5), 655-661.

Ozkan, B., Akcaoz, H. and Fert, C., 2004 .Energy input–output analysis in Turkish agriculture. Renew Energy. 29, 39–51.

Rasul, G. and Sharma, B., 2016. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. Climate Policy. 16, 682–702.

Sadeghi, S, H., Sharifi Moghadam, E., Delavar, M., and Zarghami, M., 2020 .Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a

watershed scale. Agricultural Water Management. 233, 106-107.

Shahmohamadi, A., Mafakheri, S., Veisi, H. and Khoshbakht, K., 2017. An approach to achieving sustainable development of water, food and energy linkages. Available online at - http://www.css.ir/fa/content/114418.

Singh, J.M., 2002. On farm energy use pattern in different cropping systems in Haryana, India. MS.c. Thesis. International Institute of Management University of Flensburg, Germany.

Singh, S. and Mittal, J.P., 1992. Energy in Production Agriculture. Mittal Publications, New Dehli, India.

Stamou, A.T. and Rutschmann, P., 2018. Pareto optimization of water resources using the Nexus approach. Water Resource Management. 32, 5053–5065.

Stephan, R.M., Mohtar, R.H., Daher, B., Embid Irujo, A., Hillers, A., Ganter, J.C., Karlberg, L., Martin, L., Nairizi, S., Rodriguez, D.J. and Sarni, W., 2018. Water-energy-food nexus: a platform for implementing the sustainable development goals. Water International. 43, 472–479

United Nations, 2015. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Trends in International Migrant Stock: The 2015 Revision. United Nations database, POP/DB/MIG/ Stock/ Rev.2015.

Wise, T.A., 2013. Can we feed the world in 2050 A scoping paper to assess the evidence, Global Development and Environment Institute Working Paper. 13, 11-13

World Economic Forum., 2011, Water Security: The Water- Food-Energy-Climate Nexus, World Economic Forum, Island Press, Washington, DC.

Zhang, J., Campana, P.E., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F. and Yan, J., 2018. The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. Applied Energy. 227, 449–464.

Environmental Sciences Vol.19 / No.4 / Winter 2022

287-302

Original Article

Evaluation of water-energy-food nexus in agricultural products of Dehgolan County

Salah Mafakheri,[1] Hadi Veisi,[1*] Koros Khoshbakht[1] and Mohammad Reza Nazari[2]

[1] Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[2] Environment and Natural Resources Economics Department, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2021.09.01 Accepted: 2021.11.07

Mafakheri, S., Veisi, H., Khoshbakht, K. and Nazari, M.R., 2022. Evaluation of water- energy- food nexus in agricultural products of Dehgolan County. Environmental Sciences. 19(4): 287-306.

Introduction: Today, agricultural resource management is a fundamental task for managers and planners due to the need to address the challenging issues between the supply and demand sectors. Accordingly, many researchers have emphasized that water, food, and energy in the world are experiencing significant stress and scarcity, and demand for these resources will increase significantly in the coming decades. The main purpose of this study is to provide a method for decision-makers in analyzing the link between water, energy, and food in the crop production system at the regional level and to perform a quantitative evaluation of it, which can be used to create a suitable and optimal cultivation pattern with pay attention to the available resources of the area.

Material and methods: The present study was conducted to evaluate the water-food-energy relations of agricultural products in Dehgolan County. The required data were collected through face-to-face interviews with farmers and agricultural jihad statistics. The method of this paper was based on six indicators of water and energy consumption, mass productivity of water and energy, and economic productivity of water and energy. Based on these indicators, a water-food-energy index (WFENI) was calculated for each product. This method was applied to evaluate 7 main crops of wheat, potato, alfalfa, cucumber, barley, carrot, and rapeseed in water farms of Dehgolan County in the years 2019-2020.

Results and discussion: The results of data analysis showed that alfalfa and potatoes had the highest water consumption (13131 cubic meters per hectare) and energy (85404 megajoules per hectare), respectively. Barley had the lowest water consumption (4197 cubic meters per hectare) and energy consumption (31394.4

* Corresponding Author: *Email Address*. h_veisi@sbu.ac.ir

megajoules per hectare). The use of chemical fertilizers had the largest share in the energy sector (except alfalfa). In the alfalfa crop, due to high mechanization operations, machinery had the largest share of energy consumption. Carrot was the most productive in water consumption (7.08 kg/m^3) and energy (1.03 kg/mJ). Also, the lowest water and energy efficiency for canola (0.44 kg/m^3) and energy (0.06 kg/MJ) were obtained. In the economic index of water and energy productivity, the highest values were obtained for cucumber (92959 Rials per cubic meter) and carrot (13202 Rials per megajoule), respectively. The lowest economic efficiency of water and energy was calculated 1549 Rials per cubic meter for carrots and 10688 Rials per megajoule for canola. This study showed that the WEFNI was calculated 0.86, 0.73, 0.51, 0.41, 4 / 0, 0.3, and 0.26 for carrot, cucumber, potato, wheat, barley, canola, and alfalfa crops , respectively, in Dehgolan city. Carrots received the highest WFENI score (best score) and alfalfa the lowest (worst score). Although potato, which is one of the water crops with a high level of cultivation in the region, had high water and energy consumption, due to its high physical productivity and economic productivity, it obtained the third score of the total index.

Conclusion: In this study, agricultural products were compared based on indicators of water and energy consumption, physical productivity of water and energy, and economic productivity of water and energy. Based on these indicators, the water, food, and energy link index were calculated. The results can also be used as an effective tool to determine appropriate strategies for cultivation patterns, management of water and energy resources in the region, and a basis for planning and agricultural policies in the county.

Keywords: Water-Energy-Food Nexus, Mass productivity, Economic productivity, Dehgolan.