Journal of Agroecology
Vol. 13, No.3, Fall 2021, p. 449-470

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص ۴۷۰-۴۴۹

مقاله علمی- پژوهشی

پایداری بوم‌شناختی در "بازگشت انرژی به سرمایه (EROI)" و تبیین ارتباط آن با ساختار سیمای‌سرزمین کشاورزی (مطالعه موردی: استان قزوین)

مریم یوسفی[1]، شهیندخت برق‌جلوه[2]*، آصف درویشی[1] و نغمه مبرقعی دینان[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

یوسفی، م.، برق‌جلوه، ش.، درویشی، آ.، و مبرقعی دینان، ن.، ۱۴۰۰. پایداری بوم‌شناختی در "بازگشت انرژی به سرمایه (EROI)"و تبیین ارتباط آن با ساختار سیمای‌سرزمین کشاورزی (مطالعه موردی: استان قزوین). بوم‌شناسی کشاورزی ۱۳(۳): ۴۷۰-۴۴۹.

چکیده

مداخله انسان در تغییر فرآیندهای بوم‌شناختی، جریانات انرژی و هدایت آن‌ها در رفع نیازهای رشد جمعیت انسانی، فرآیندهای یکپارچه سیستم سیمای‌سرزمین را تحت تأثیر قرار داده است. با افزایش تقاضای انسان، مسئله بهره‌وری انرژی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی زیرساخت‌های اقتصادی به‌ویژه کشاورزی مطرح است. تاکنون ارزیابی بهره‌وری انرژی، در محاسبه بازده انرژی نسبت به ورودی‌های سرمایه‌گذاری شده خلاصه شده است که چنین نسبت ورودی-خروجی ساده از حامل‌های انرژی، به‌ناچار عملکرد داخلی سیستم را درون جعبه سیاه پنهان می‌نماید. این امر جریان‌های بوم‌شناختی در سیستم که توسط حامل‌های انرژی، دوباره به چرخه رانده می‌شوند و به سرمایه برمی‌گردند، را نادیده می‌گیرد. شاخص پایداری بازگشت انرژی به سرمایه (EROI) یکی از رویکردهای نوین در این حوزه است که در تلاش برای رفع این مشکل، سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی را به‌عنوان نهادی فضایی، متشکل از حلقه‌های انرژی فیمابین طبیعت و ساختاربندی جامعه انسانی می‌بیند و رویکرد یکپارچه بوم‌شناختی-جامعه‌شناختی را در تحلیل پیچیدگی سیمای‌سرزمین اتخاذ می‌نماید. هدف از مطالعه حاضر بررسی نظریه و روش‌شناسی این رویکرد است که در استان قزوین به‌عنوان مطالعه موردی به‌تفکیک دهستان اجرا و ارتباط آن با ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین منبعث از برنامه‌ریزی کاربری اراضی که با متریک سیمای‌سرزمین ارزیابی شده است، بررسی گردید. نتایج نشان داد که چگونه الگوهای چرخه انرژی با ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین هر دهستان ارتباط پیدا کرده و بهره‌وری انرژی را تحت تأثیر قرار داده است. همچنین، خروجی‌های همبستگی بین شاخص‌های محاسبه شده بهره‌وری انرژی و ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین، نشان می‌دهد که بین این دو متغیر همبستگی معکوس برقرار است. نتایج دلالت بر سوء مدیریت سرزمین دارد، چنان‌که سازوکار چرخه‌های انرژی در بستر الگوهای ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین منبعث از برنامه‌ریزی کاربری‌راضی، از سازوکار چرخه‌های انرژی منبعث از الگوهای طبیعی ساختار سرزمین پیروی نمی‌کنند. لذا، در این خصوص لازم است یا از الگوهای ناهمگنی سرزمین تقلید شود و یا از الگوهای ناهمگنی نوینی در راستای توسعه سازمان‌دهی ساختار سیمای‌سرزمین استفاده گردد، به‌گونه‌ای که انسجام ناهمگنی فرآیندی اتخاذ شده، شرایط کاهش آنتروپی و توسعه روندهای سایبرنتیک در سازوکارهای زیستی سیمای‌سرزمین را فراهم نماید. نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌های آمایش سرزمین به‌منظور ادغام ملاحظات انرژی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مطالعات طرح جامع توسعه کشاورزی، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بوم‌شناسی سیمای‌سرزمین، بهره‌وری انرژی، زیست‌توده بازگشتی ، سیستم بوم‌شناختی-جامعه‌شناختی

مقدمه

۱- دانشجوی دکتری گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

(*- نویسنده مسئول: Email: s-barghjelveh@sbu.ac.ir)

DOI:10.22067/jag.v13i3.85655

مداخله انسان در تغییر فرآیندهای بوم‌شناختی، جریانات انرژی و هدایت آن‌ها در رفع نیازهای رشد جمعیت انسانی، پویایی فرآیندهای یکپارچه سیستم سیمای‌سرزمین[1] را تحت تأثیر قرار داده است (Atlaso et al., 2015; Darvishi et al., 2014, 2016 and 2021). بنابراین، با افزایش تقاضای انسان از یک سو و محدودیت-های بوم‌شناختی سرزمین از سوی دیگر و نظر به ضرورت استفاده از انرژی بر پایه ملاحظات محیط زیستی در راستای توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی (Zahedi et al., 2014)، مسئله بهره‌وری انرژی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی زیرساخت‌های اقتصادی به‌ویژه کشاورزی مطرح شده است. امروزه آگاهی از جریانات چرخه انرژی در نظام‌های تولید کشاورزی، رویکردی مناسب در جهت افزایش بهره-وری انرژی و کاهش ردپای محیطزیستی انرژی به‌حساب می‌آید (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019; Darvishi et al., 2020). تجزیه و تحلیل انرژی در تعیین چگونگی بهبود بهره‌وری انرژی از نظر بازده تولید بالاتر نسبت به مقدار ورودی انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک محصول خاص نقش بسزایی دارد (Alder et al., 2016). در این حیطه تخمین مشابه برای اقدامات انسان و نتایج آن‌ها در سیستم سیمای‌سرزمین نیز می‌تواند اعمال شود، که نخستین بار توسط هال و همکاران (Hall et al., 1986) انجام شده است و اکنون به‌عنوان بازگشت انرژی به سرمایه یا EROI[2] شناخته می‌شود. بازگشت انرژی به سرمایه مفهومی است که در اصل از بوم‌شناسی مشتق شده است (Odum, 1973; Capellán-Pérez, 2019) و در حقیقت، یک سنجه ترمودینامیکی است که می‌تواند فرآیندهای فنی بوم‌شناختی و اقتصادی متفاوت را در تعامل با محیط، با یکدیگر مقایسه کند (Yousefi et al., 2020). با وجود تحقیقات درازمدتی که به این جنبه مهم اختصاص یافته است، هرگونه ارزیابی پایداری و تجزیه و تحلیل انرژی در مقیاس سیمای‌سرزمین بسته به سؤال تحقیق مطرح شده و رویکردهای روش‌شناختی اتخاذ شده داشته است (Pelletier et al., 2011; Yousefi et al., 2021)، که خود بازتابی از چالش‌های معرفت‌شناختی هنگام برخورد با یک واقعیت پیچیده و سلسله مراتبی مانند سیستم سیمای‌سرزمین است (Tello et al., 2016).

تاکنون مطالعاتی در مورد تجزیه و تحلیل و بهره‌وری انرژی بوم-نظامی در ایران، متمرکز بر بخش کشاورزی به‌عنوان بخش تولیدی که در ارتباط مستقیم با محیطزیست است، انجام گرفته است.

فیض‌بخش و همکاران (Feiz Bakhsh et al., 2019) به ارزیابی شاخص‌های انرژی در تولید محصول سیب‌زمینی پرداخته‌اند و اطلاعات مربوط به به‌کارگیری ماشین‌آلات، نهاده‌های ورودی مانند کود، سوخت‌فسیلی و سموم جمع‌آوری و میزان انرژی ورودی و خروجی، شاخص‌های ارزیابی انرژی در کشت این محصول را محاسبه نموده‌اند. همچنین کاظمی و زارع (Kazemi & Zare, 2014) با استفاده از شاخص‌هایی مانند کارایی مصرف انرژی، انرژی قابل تجدید، انرژی غیرقابل تجدید و انرژی ورودی و خروجی، بهره‌وری انرژی را در مزارع گندم در دو شهرستان گرگان و مرودشت بررسی نموده‌اند و این شهرستان‌ها را از لحاظ بهره‌وری انرژی رتبه‌بندی نموده‌اند. مرتضوی و همکاران (Mortazavi et al., 2014) به بررسی کارایی انرژی محصولات مختلف در دشت قزوین پرداخته و تولیدات کشاورزی را از نظر بهره‌وری انرژی نسبت به انرژی ورودی و خروجی مقایسه نموده‌اند. زاهدی و همکاران (Zahedi et al., 2014) با استفاده از شاخص‌های عملکرد زراعی، کل انرژی مصرفی، انرژی خروجی، بهره‌وری انرژی برای تهیه محصول و هزینه‌های تولید، به برآورد و تجزیه و تحلیل انرژی در نظام تولید گیاه گلرنگ پرداخته‌اند. در این مطالعه شاخص‌های قیمت، ارزش ناخالص تولید هزینه‌ها و عملکرد برآورد گردیده است.

همچنین مطالعاتی در این حوزه در بخش کشاورزی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است که به بررسی بهره‌وری انرژی با توجه به ورود و خروج انرژی به سیستم کشاورزی پرداخته‌اند که می‌توان به مطالعات بایلیس اسمیت (Bayliss-Smith, 1982)، کانفورتی و گیامپیترو (Conforti & Giampietro, 1997)، بالوق و همکاران (Balogh et al., 2012) و گیامپیترو و همکاران (Giampietro et al., 2013) اشاره کرد.

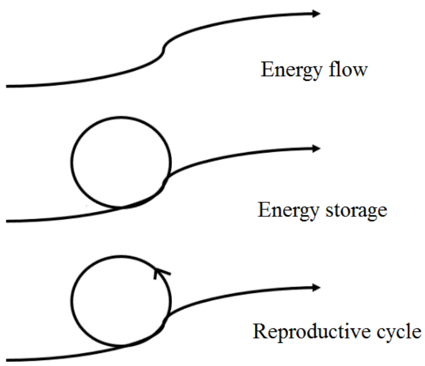
با توجه به تحقیقاتی که تاکنون در حوزه بهره‌وری انرژی انجام شده، می‌توان استنباط کرد که بسیاری از تجزیه و تحلیل‌های انرژی با در نظر گرفتن یک مرز سیستم اجتماعی و یک رویکرد ورودی و خروجی برای ارزیابی اینکه تا چه میزان یک بوم‌نظام کشاورزی به‌عنوان یک تأمین‌کننده یا مصرف‌کننده انرژی رفتار می‌کند، انجام شده است. این دیدگاه نیاز به محاسبه بازده انرژی حاصل، نسبت به

1- Landscape
2- Energy return on investment

ورودی‌های سرمایه‌گذاری شده دارد. اگرچه این امر به خودی خود معقول است، امّا چنین نسبت ورودی- خروجی ساده از حامل‌های انرژی، به‌ناچار عملکرد داخلی سیستم را درون جعبه سیاه پنهان می‌کند. هر گونه تلاشی برای باز کردن این جعبه سیاه باید توأم با در نظر گرفتن حلقه‌های جریان‌های بوم‌شناختی در سیستم که توسط حامل‌های انرژی، دوباره به چرخه رانده می‌شوند و به سرمایه برمی‌گردند، باشد (Giampietro et al., 2013; Guzmán & González De Molina, 2015). دیگر نقطه مشترک همه مطالعات انجام شده این است که بوم‌نظام کشاورزی را یک سیستم بسته در نظر گرفته که انرژی به آن وارد و از آن خارج می‌شود و برآورد نسبت آن‌ها را به‌عنوان کارایی انرژی در نظر گرفته‌اند. امّا مشخصه مهم در جهان کنونی ما، پیچیدگی شبکه‌ای در هم تنیده بوم‌نظام‌هایی است که در ارتباط با یکدیگر بوده، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند و بر هم اثر می‌گذارند، است (Darvishi et al., 2021). بنابراین، جدا کردن یک سیستم از یک سیستم بزرگ‌تر و پیچیده، خطای انسانی را در برآورد و ارزیابی رفتار انرژی بالاتر می‌برد (Naveh, 2000).

در این حوزه اخیراً تللو و همکاران (Tello et al., 2016) رویکردی نوین و کارآمد برای تجزیه و تحلیل انرژی در مقیاس سیمای‌سرزمین کشاورزی با هدف ارزیابی پایداری انرژی تحت عنوان EROIهای چندگانه ارائه نموده‌اند. این رویکرد، سیمای‌سرزمین را به‌عنوان مجموعه‌ای از حلقه‌های انرژی فیمابین طبیعت و جامعه می‌بیند و یک دیدگاه بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی در سطح سیمای‌سرزمین اتخاذ می‌کند.

EROI یک اصل واحد برای اقتصاد و پایداری (Hall, 2016) و یک معیار مهم برای ارزیابی بهره‌وری انرژی در یک سیستم به‌شمار می‌آید. این رویکرد تحت تأثیر اصول سازوکار[1] انرژی در هر سیستم زنده‌ای است که قادر به حفظ پایداری پویا و به دور از تعادل ترمودینامیکی است. بنابراین، سیستم زنده می‌تواند پیچیدگی خود را افزایش دهد، ظرفیت ذخیره انرژی خود را بالابرده، توان انرژی را بهبود بخشد و روند رو به رشدی را آغاز کند. در این شرایط راهی برای بازتولید و نمو گشوده می‌شود (Morowitz, 2002; Ho & Ulanowicz, 2005). در حقیقت، ساختار پیچیده و پویا در فضا و زمان در یک موجود زنده، راز پایداری آن است (Ho, 2013). این تئوری را نیز می‌توان به سیستم‌های بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی سیمای‌سرزمین تعمیم داد. شکل ۱ چگونگی جریان، ذخیره و چرخه‌های باز تولید انرژی در یک سیستم زنده را نشان می‌دهد. امّا این امر در سیستم سیمای‌سرزمین با افزایش پیچیدگی حلقه‌های به هم‌پیوسته انجام می‌شود که بهره‌وری انرژی ورودی را به‌دنبال دارد، در حالی که اتلاف انرژی و آنتروپی[2] به خارج را به حداقل می‌رساند (Ho, 2013; Tscharntke et al., 2012 a,b).



شکل ۱- جریان، ذخیره و چرخه بازتولید انرژی در یک سیستم زنده (Ho, 2013)

Fig. 1-Flow, storage and reproductive energy cycle in a living system (Ho, 2013)

تشخیص پایداری بوم‌نظام‌ها وابسته به ویژگی‌هایی از جمله تنوع زیستی، بهره‌وری، استفاده کارآمد از انرژی و نیل به‌سمت کاهش آنتروپی است (Marull et al., 2010). استفاده از این ایده در سیستم‌های بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی همچون سیستم سیمای‌سرزمین‌کشاورزی، نیاز به کمی‌سازی ناهمگونی ساختار در فضا- زمان، برآورد کارایی انرژی و حد بسته شدن چرخه‌های بیوفیزیکی انرژی و مهم‌تر از همه تعادل موجود بین بهره‌برداری انسان از منابع طبیعی و ظرفیت تاب آوری[3] بوم‌نظام‌ها دارد (Ho & Ulanowicz, 2005). بنابراین، فرض بر این است که با افزایش ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین، بهره‌وری انرژی به‌دلیل بالارفتن پیچیدگی جریانات انرژی افزایش خواهد یافت (Darvishi et al., 2015).

مطالعه حاضر با هدف تبیین نظریه و روش‌شناسی EROIهای چندگانه، به بررسی بهره‌وری جریان انرژی در سیستم سیمای‌سرزمین

1- Metabolism

2- Entropy

3- Resilience

کشاورزی قزوین به‌تفکیک دهستان پرداخته است. همچنین به‌منظور توصیف چگونگی تأثیر ترکیب[1] ساختار سیمای‌سرزمین (چیدمان فضایی کاربری اراضی)، ارتباط بین بهره‌وری انرژی و ناهمگونی ساختار که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون مورد آزمون قرار گرفته است.

در این مطالعه، روش محاسبه EROIهای چندگانه جانشین روش‌های مرسوم محاسبه کارایی انرژی شده‌اند. نکته قابل توجه در این موضوع بررسی جریانات داخلی انرژی بازگشتی در سیستم است که تاکنون در مطالعات دیگر مورد توجه واقع نشده است. همچنین محاسبه این شاخص در سطح سیمای‌سرزمین این امکان را فراهم می‌آورد که بوم‌نظام‌های مرتبط با یکدیگر به‌طور جامع در یک سیستم بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی مطالعه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان قزوین با مساحت ۱۵۶۲۷ کیلو مترمربع، سهمی کمتر از یک درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان یکی از مهم‌ترین استان‌های ایران به‌لحاظ تنوع زیستی می‌باشد (Darvishi et al., 2021). سیمای‌سرزمین استان قزوین از تنوع بالایی برخوردار است، به‌طوری که در ناحیه شرقی دارای اراضی نیمه‌بیابانی و در دشت مرکزی شاهد اراضی کشاورزی فشرده و در شمال منطقه مراتع رشته کوه البرز و اراضی پرشیب و مراتع متراکم تا کم تراکم را شاهد هستیم، و در نواحی جنوبی تپه ماهور و مراتع کم تراکم تا پرتراکم را می‌توان مشاهده کرد. این استان دارای شش شهرستان و ۴۶ دهستان است که در شکل ۳ نشان داده شده است (Darvishi et al., 2020).

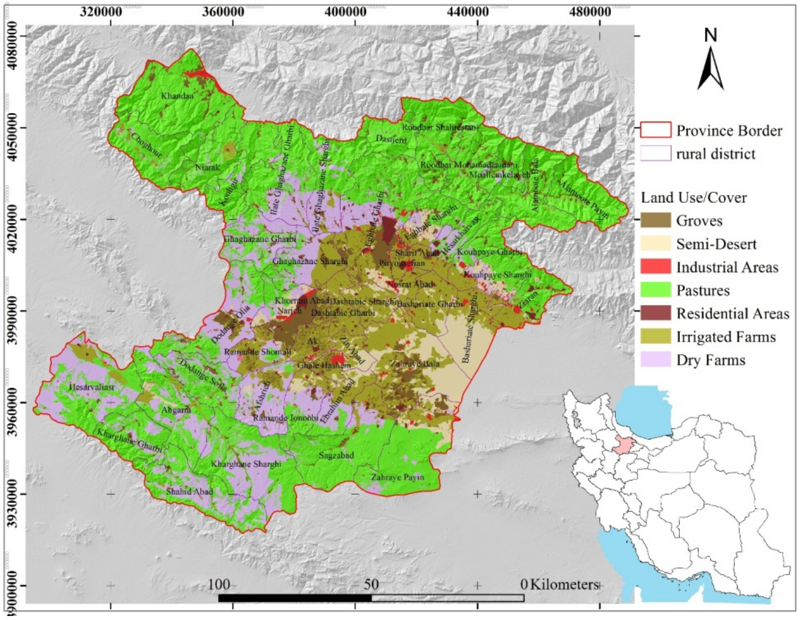
استان قزوین به‌عنوان یکی از قطب‌های تولید کشاورزی در کشور شناخته می‌شود، به‌طوری‌که حدود سه درصد از کل ارزش افزوده کشور متعلق به بخش کشاورزی استان قزوین است (Census center of Iran, 2017). از این رو، روند صنعتی شدن تولید کشاورزی در دشت قزوین در سال‌های اخیر شدت گرفته است (Darvishi et al., 2020)، لذا مطالعه بهره‌وری انرژی استان قزوین در جهت کمک به برآورد پایداری و برنامه‌ریزی فضایی استان و نیل به حداکثر بهره‌وری انرژی می‌تواند در بازه زمانی کوتاه‌مدت و درازمدت اثر بخش باشد.

روش‌شناسی

در این پژوهش جریان‌های بیوفیزیکی بین بوم‌نظام‌های مورد مطالعه در سراسر سیمای‌سرزمین به‌عنوان حامل‌های انرژی بیان می‌شوند. در سیستم‌های ترمودینامیکی باز، مانند سیستم کشاورزی، آنتالپی یک ماده، انرژی ذخیره شده در درون آن است که در شرایط خاصی که معمولاً تعریف شده است می‌تواند به گرما تبدیل شود. با تکیه بر اصولی که در مقدمه بررسی گردید، می‌توان فرض کرد که چرخه‌های داخلی انرژی، یک معیار مهم برای ارزیابی و در نهایت، توسعه پایداری انرژی هستند. آنتروپی را می‌توان با اتصال به چرخه‌های زنده در سراسر سیمای‌سرزمین به حداقل رساند، به‌طوری که فرآورده‌های فرعی از یک چرخه ممکن است برای یک سیستم دیگری، تبدیل به منبع شوند (Ho, 2013). این مدل‌سازی باید بر اساس یک نمای گسترده‌تر از انرژی نسبت به ورودی- خروجی خطی باشد. امّا چگونه می‌توان بازگشت انرژی به سرمایه را در یک چرخه انرژی و نه در یک هدررفت خطی محاسبه کرد؟ تللو و همکاران (Tello et al., 2016) استفاده از چندین جریان انرژی EROI در بخش‌های مختلف ساختار سیمای‌سرزمین کشاورزی را اندازه‌گیری کرده‌اند. اساس این روش بر پایه مقایسه انرژی‌های ورودی توسط اجتماع در سیستم سرمایه‌گذاری شده، با خروجی انرژی نهایی به‌دست آمده برای تأمین نیازهای سیستم سیمای‌سرزمین، بنا شده است.

این رویکرد مفهومی تنها یک رویکرد بهره‌وری اقتصاد بوم‌شناختی یا صرفاً محیطزیستی نیست بلکه یک حسابداری مشترک بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی از جریانات انرژی است (Worster, 1990). شکل ۲ روش‌شناسی این رویکرد را از منظر زیرسیستم‌های انرژی نشان می‌دهد که در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

1- Composition



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه استان قزوین به‌تفکیک دهستان

Fig. 2- The counties of Qazvin province as the study area

گفتنی است هدف نشان دادن همه جوانب عملکرد در سیستم سیمای‌سرزمین نیست، بلکه بیشتر بیانگر مفاهیمی است که در ارزیابی انرژی به‌کار رفته است. در این رویکرد مدیریت سیستمی (بوم-شناختی- جامعه‌شناختی) که مسئولیت بهره‌وری اقتصادی خروجی-های انرژی جاری را داراست (Darvishi et al., 2014)، از طریق مجموعه چرخه‌هایی از جریانات انرژی در درون بوم‌نظام‌های کشاورزی، مرتع‌داری و دام‌داری متصل می‌شود. در این روش هدف آن است که ویژگی‌های اساسی بوم‌شناختی سیستم سیمای‌سرزمین در یک جعبه سیاه مبتنی بر ورود و خروج انرژی پنهان نشود تا مشخص شود که چه مؤلفه‌های کلیدی مسئول پشتیبانی خدمات در ارتباط با حفظ تنوع زیستی و خدمات سیستم سیمای‌سرزمین هستند و جریان چرخه‌های انرژی بنیادین آن‌ها چگونه است. مطابق این رویکرد، فتوسنتز که توسط تولیدکنندگان اولیه در سیستم کشاورزی و مرتع داری انجام می‌شود، تابش خورشیدی (SR)[1] را به زیست‌توده گیاهی تبدیل می‌کند که همان تولید بالفعل زیست‌توده (NPP_{act})[2] در کل سیمای‌سرزمین، شامل پوشش‌های گیاهی در بوم‌نظام‌های کشاورزی و مرتعی بوده و به‌عنوان تولید ناخالص اولیه واقعی شناخته می‌شود.

با وجود زیست‌توده برداشت نشده (UPH)[3] (آن دسته از زیست-توده که بعد از برداشت محصول کشاورزی و یا بعد از چرای دام در مراتع، در بوم‌نظام باقی می‌ماند و برای ارائه خدمات و پشتیبانی از تنوع زیستی قابل استفاده است)، زیرسیستم‌ها تا حدی با هم ادغام می‌شوند، زیرا در واقع با یکدیگر یکپارچگی دارند. با وجود UPH و زیستگاه‌های به‌وجود آمده توسط اراضی کشاورزی، تنوع زیستی وابسته به کشاورزی قادر به حیات هستند و خدمات تنظیمی سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی را به‌وجود می‌آورند.

بر این اساس، محصولات زراعی (محصولاتی مانند غلات، حبوبات، محصولات ریشه‌ای، سبزیجات و غیره) که از جمله تولیدات زمین (LP)[4] هستند، جریان انرژی به‌سمت زیرسیستم جامعه و یا به‌سمت اهداف انسانی را تشکیل می‌دهند که با تولیدات دام‌داری شامل شیر، گوشت، گوشت مرغ و تخم مرغ (LBP)[5] جریان یکپارچه‌ای را تحت عنوان تولید کل (TP)[6] تشکیل می‌دهند. تولید

1- Solar Radiation
2- Net Primary Procustion Actual

3- Unharvested PHytomass
4- Land Produce
5- Livestock-Barnyard Produce
6- Total Produce

نهایی (FP)[1] بخشی از تولیدات کشاورزی و دامداری است که برای پایداری عملکرد بوم‌نظام کشاورزی مورد نیاز نبوده و برای مصرف انسان در دسترس است. جریان مهم دیگر، بخشی از تولیدات زمین به‌نام استفاده مجدد از زیست‌توده یا زیست‌توده برگشتی (BR)[2] است. این اصطلاح حامل‌های انرژی برداشت شده یا جمع‌آوری شده از اراضی کشاورزی را توصیف می‌کند که دوباره به‌سمت استفاده مجدد در آن هدایت می‌شود (FBR)[3]. FBR بذرهای جمع‌آوری شده برای کاشت در سال آینده و آن دسته از باقیمانده‌های گیاهی که بعد از برداشت در خاک شخم زده می‌شوند، یا برگ درختان که دوباره به خاک برمی‌گردند را شامل می‌شود. همچنین جریان انرژی از کشاورزی به‌سمت بخش دامداری هدایت می‌شود (LBR)[4] که خوراک دام، علوفه، یونجه، کاه و یا سایر تولیدات کشاورزی برای دامداری است.

زیرسیستم دامداری همچنین در پاسخ به زیست‌توده بازگشتی از کشاورزی، جریان انرژی (LBS)[5] شامل کود را به‌سمت بخش کشاورزی و مرتع‌داری روانه می‌کند که شامل کود حیوانی است که هنگام چرای دام به‌جای گذاشته می‌شود. در پاسخ به این جریان، علوفه دام از مراتع به‌سمت بخش دامداری هدایت می‌شود. بخشی از تولیدات کشاورزی یا دامداری به‌درستی مورد استفاده مجدد قرار نمی‌گیرند بلکه از زیرسیستم کشاورزی و یا دامداری خارج می‌شوند که به‌عنوان انرژی خارج شده از کشاورزی (FE)[6] و دامداری (LBE)[7] در نمودار نشان داده شده است. این جریانات نه در بهسازی منابع سیستم سیمای‌سرزمین، نه برای تقویت پیچیدگی درونی آن و نه برآورده کردن نیازهای بشر استفاده می‌شود. بر این اساس، آنتالپی این حامل-های انرژی را نمی‌توان در مدل‌سازی نمودار به‌عنوان جریان‌هایی که به حفظ سازمان سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی کمک می‌کنند، در نظر گرفت. اگر چه این جریانات در چرخه‌های دیگر زیست‌کره متعاقباً دخالت خواهند داشت.

دو زیرسیستم انسانی در مدل، شامل جامعه محلی کشاورزان (FC)[8] و زیرسیستم اجتماعی می‌باشد، که از طریق ورودی‌هایی شامل کارگر، سم، کود شیمیایی، ماشین‌آلات، خوراک وارداتی دام، ادوات مزرعه یا ماشین‌آلات (تراکتور و سوخت) و سموم دفع آفات به زیرسیستم‌های دامداری و کشاورزی متصل می‌شوند (ASI)[9].

جدول ۱ نحوه محاسبه جریانات را نشان می‌دهد.

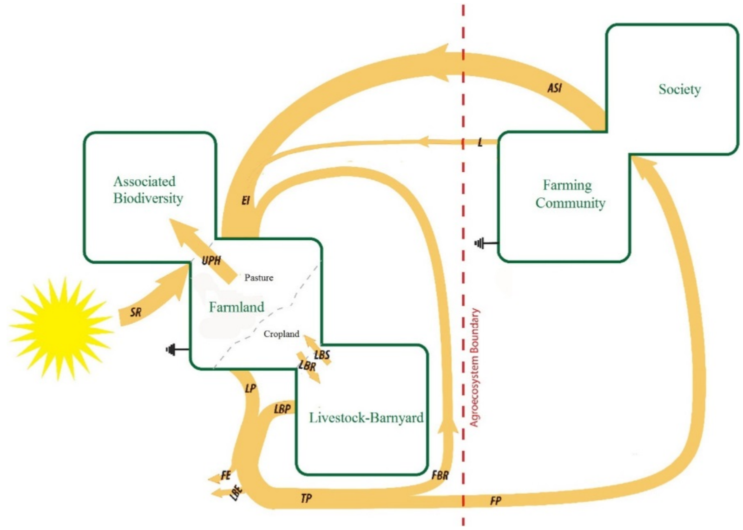
در این مطالعه واحد سیاسی دهستان به‌عنوان واحد مطالعه انتخاب گردید. دو دلیل برای انتخاب دهستان به‌عنوان واحد اصلی تجزیه و تحلیل وجود داشت: (۱) سیاست‌های کشاورزی و مرتع‌داری معمولاً در سطح دهستان اجرا می‌شود (۲) دهستان کوچک‌ترین واحدی است که در آن سرشماری دام‌ها یا داده‌های زراعی در دسترس بوده است. بانک اطلاعاتی این مطالعه موردی از ۴۶ دهستان از سازمان جهاد کشاورزی و نقشه کاربری اراضی مورد استفاده توسط نگارندگان در سال ۱۳۹۶ تهیه شده است (Darvishi et al., 2020). با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های نشان داده در بخش روش‌شناسی، پایگاه داده مبتنی بر زیرسیستم‌های کشاورزی، دامداری، مراتع‌داری تشکیل گردید (جدول ۲).

برای اطلاعاتی که در سطح دهستان موجود نبود از داده‌های در مقیاس استانی استفاده شد و نسبت به سطح کشاورزی و تعداد دام به هر دهستان نسبت داده شد (مانند خوراک وارداتی دام).

قابل ذکر است برای تخمین مقدار کودی که از دام به مراتع بر می‌گردد، با فرض اینکه دام در استان بر اساس نسبت استاندارد تغذیه می‌شود، ابتدا مقدار کود تولیدی و خوراک استاندارد هر نوع دام (نسبت کاه، یونجه، جو، علوفه و غیره) با استفاده از منبع پادرو کامینال (Padró i Caminal, 2018) محاسبه شد، سپس از طریق براورد نسبت بین کود تولیده شده توسط گوسفند و بز و سهم خوراک علوفه‌ای حاصل از چرای آن‌ها مقدار کود تخمین زده شد.

زیست‌توده برداشت‌نشده (UPH) نیز در مزارع شامل علف‌های هرز و قسمتی از زیست‌توده‌ای است که نسبت به نوع محصول تولیدی در کشاورزی یا در مراتع توسط آفات و حیات وحش مصرف شده است که بر اساس مرجع اورک و همکاران (Oerke et al., 1999) محاسبه گردید.

1- Final Produce
2- Biomass Reused
3- Farmland Biomass Reused
4- Livestock Biomass Reused
5- Livestock-Barnyard Services
6- Farmland Exited Energy
7- Livestock Barnyard Exited Energy
8- Community Farming
9- Agroecosystem Societal Inputs



شکل ۳- زیرسیستم‌های چرخه‌های انرژی در سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی (Tello et al., 2016)
تابش خورشیدی (SR)، زیست‌توده برداشت نشده (UPH)، زیست‌توده برگشتی (BR)، تولیدات زمین (LP)، زیست‌توده برگشتی دامداری (LBR)، زیست‌توده برگشتی کشاورزی (FBR)، تولیدات دامداری (LBP)، خدمات بخش دامداری (LBS)، تولید کل (TP)، تولید نهایی (FP)، ورودی جامعه به سیستم کشاورزی (ASI)، ورودی خارجی (EI)، انرژی خارج شده از کشاورزی (FE)، انرژی خارج شده از دامداری (LBE) و جامعه محلی کشاورزان (FC)

Fig. 3- Subsystems of energy cycles in agricultural landscape (Tello et al., 2016)
Solar radiation (SR), unharvested phytomass (UPH), biomass reused (BR), land produce (LP), livestock biomass reused (LBR), farmland biomass reused (FBR), livestock-barnyard produce (LBP), livestock-barnyard services (LBS), total produce (TP), final produce (FP), agroecosystem societal inputs (ASI), external input (EI), farmland exited energy (FE), livestock barnyard exited energy (LBE), community farming (FC)

جدول ۱- جریان‌های انرژی و نحوه محاسبه آن‌ها (Tello et al., 2016)
Table 1- Energy flows and calculation methods (Tello et al., 2016)

جریانات انرژی Energy flows	نحوه محاسبه Calculation method
تولیدزمین	زیست‌توده برگشتی کشاورزی + انرژی خارج شده از کشاورزی + زیست‌توده برگشتی دام‌داری
Land produce	Livestock biomass reused + farmland existed energy + farmland biomass reused
تولیدکل	تولیدات دام‌داری + تولیدات زمین
Total product	Land product+ livestock-barnyard product
تولید اولیه ناخالص واقعی	زیست‌توده برداشت نشده + تولیدزمین
Net primary procustion actual	Unharvested phytomass + land product
زیست‌توده برداشت نشده	تولیدزمین – تولید اولیه ناخالص واقعی
Unharvested phytomass	Net primary procustion actual – land product
زیست‌توده برگشتی	زیست‌توده برگشتی کشاورزی + زیست‌توده مورد استفاده در دام‌داری
Biomass reused	Farmland biomass reused + livestock biomass reused
تولید نهایی	انرژی خارج شده از دام‌داری + انرژی خارج شده از کشاورزی + زیست‌توده برگشتی + تولیدکل
Final product	Total produce - biomass reused + farmland existed energy + livestock barnyard existed energy
ورودی اجتماعی به کشاورزی	علف‌کش + حشره‌کش + کو د+ ماشین‌الات + سوخت
Agroecosystem societal input	Fuel+ machinery+ manure+ pesticide+ herbicide
ورودی خارجی	کارگر + ورودی جامعه به کشاورزی
External input	Agroecosystem societal input + labor
خدمات بخش دام‌داری	مقدار کود دامی که به مراتع بر می‌گردد
Livestock-barnyard services	Harvested pasture to feed livestock

جدول ۲- داده‌های مورد استفاده برای محاسبه EROIs
Table 2- Data used to calculate EROIs

زیرسیستم SUBSYSTEM	جریان FLOW	واحد UNITE
کشاورزی Farmland	سطح کشت Cropland area	هکتار ha
	محصول تولیدی Crop yield for each production separately	تن Tone
	تولیدات جانبی برای هر محصول By product for each crop production	تن Tone
	نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی Agricultural labor	تعداد Number
	تعداد و نوع ماشین‌آلات کشاورزی Farming machinery	تعداد Number
	کودهای شیمیایی Fertilizers	تعداد Tone
	علف‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها Herbicides and pesticides	تن/لیتر Tone/ Liter
	سوخت‌ها/ برق Fossil fuel / electricity power	لیتر/وات Liter, watt
	هدررفت کشاورزی Farm waste	تن Tone
دام‌داری Livestock	سرشماری دام‌داری Livestock censuses	تعداد Number
	تولیدات دامی: شیر، گوشت، تخم مرغ Livestock production: meat, milk and eggs	تن Tone
	کود دامی Livestock Manure	تن Tone
	کارگر بخش دام‌داری Livestock labor	تعداد Number
	سوخت فسیلی/ برق Fossil fuel and electricity power	لیتر/وات Liter/ watt
	هدررفت دام‌داری Livestock waste	تن Tone
	خوراک وارداتی دام Livestock feed	تن Tone
مرتع‌داری Pasture	مساحت مراتع Pasture area	هکتار ha
	تولید مراتع Pasture production	تن Tone
	تولید علوفه برای چرای دام Harvested pasture to feed livestock	تن Tone
	مقدار کود دامی که به مراتع بر می‌گردد Livestock manure return to the pasture	تن Tone

زیست‌توده برگشتی کشاورزی (FBR) شامل محصولات جانبی مانند ساقه و برگ محصول است که پس از برداشت محصول اصلی در زمین باقی مانده، شخم زده می‌شود و دوباره به خاک برمی‌گردد (برای اطلاعات بیشتر از ضرایب استفاده شده به پادرو کامینال (Padró i Caminal, 2018) مراجعه شود). زیست‌توده مورد استفاده در دام‌داری (LBR) شامل آن دسته از محصولات کشاورزی است که

در دام‌داری مورد استفاده قرار می‌گیرد، مانند جو و یونجه.

انرژی خارج شده از کشاورزی(FE) در این مطالعه شاخه‌های درختان هرس شده است که فرض گرفته شده همه آن در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان هیزم استفاده می‌شود. انرژی خارج شده از دام‌داری (LBE) نیز شامل پوست، و امعا و احشام دام‌هایی که سالانه ضبح می‌شوند، بوده است (برای اطلاعات بیشتر از ضرایب استفاده شده به پادرو کامینال (Padró i Caminal, 2018) مراجعه شود).

در نهایت، همه شاخص‌های مورد بحث با استفاده از ارزش کالری ناخالص پیرو تحقیقات گوزمن و همکاران (Guzmán et al., 2014) برای همه حامل‌های انرژی بر حسب گیگاژول و برای تمام ورودی‌ها و خروجی‌های زیرسیستم‌ها محاسبه گردیده است (Galán et al., 2016).

گوزمن و همکاران (Guzmán et al., 2014) ارزش کالری ناخالص را برای همه گونه‌های گیاهی کشاورزی، مرتعی، انواع درختان، میوه و برگ آن‌ها محاسبه نموده است.

جهت براورد ارزش کالری ناخالص کودهای شیمیایی، از طریق محاسبه ترکیب نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در آن‌ها و جمع ارزش کالری ناخالص هر یک از عناصر محاسبه گردید.

انرژی که هر کارگر بخش کشاورزی و دام‌داری صرف می‌کند نیز با استفاده از ضرایب استفاده شده در مطالعه گالان و همکاران (Galan et al., 2016) محاسبه شد.

در ادامه نحوه محاسبه EROIهای چندگانه براساس شاخص‌های عنوان شده در شکل ۲ توضیح داده شده است.

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه نهایی (FEROI)[1]

این شاخص ورودی‌های خارجی و زیست‌توده بازگشتی را به محصول نهایی که از مرزهای سیستم عبور می‌کند، مرتبط می‌کند. از این رو، ارزیابی می‌کند تا چه حد یک بوم‌نظام به‌عنوان یک ارائه‌دهنده خالص و یا به‌عنوان یک مصرف‌کننده خالص انرژی در سطح سیمای-سرزمین عمل می‌کند. معادله ۱، نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد (Tello et al., 2016).

$$\text{Final EROI (or FEROI)} = \frac{FP}{EI+BR} \qquad \text{(۱) معادله}$$

این شاخص ارزیابی می‌کند که چقدر حامل‌های انرژی خارجی (EI)[2] و داخلی (BR) برای تولید صرف شده است تا بتواند یک سبد تولید نهایی مصرفی انسانی (FP) را ارائه دهد.

FEROI می‌تواند به شاخص خارجی EFEROI[3] و داخلی IFEROI[4] تجزیه شود.

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه داخلی (IFEROI)

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه داخلی نیز سهمی از تولید زمین است که با هدف برگشت به سرمایه یا زیست‌توده بازگشتی به بخش کشاورزی بر می‌گردد که با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌گردد (Tello et al., 2016).

$$\text{Internal Final EROI (or IFEROI)} = \frac{FP}{BR} \qquad \text{(۲) معادله}$$

این شاخص نشان می‌دهد چه سهمی از زیست‌توده بازگشتی برای تولید نهایی برای جامعه صرف شده است.

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه خارجی (EFEROI)

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه خارجی، شامل انرژی تولید شده و مصرف شده در سیستم است که ارزیابی می‌کند تا چه وسعتی در ارتباط با زیرسیستم اجتماع یک تولیدکننده صرف یا مصرف‌کننده صرف است. این شاخص طبق معادله ۳ محاسبه می‌گردد (Tello et al., 2016).

$$\text{External Final EROI (or EFEROI)} = \frac{FP}{EI} \qquad \text{(۳) معادله}$$

شاخص بازگشت انرژی به سرمایه تولید ناخالص واقعی (NPPEROI)[5]

FEROI بازده انرژی سرمایه‌گذاری شده در ایجاد و نگهداری سیستم‌های زراعی از نظر محصول نهایی به‌دست آمده که توسط انسان قابل مصرف است را بیان می‌کند. از آنجا که در این معادله نقشی را که زیست‌توده برداشت نشده (UPH) در حمایت از دیگر گونه‌های غیراهلی ایفا می‌کند، نادیده گرفته می‌شود، نمی‌توان تنها با افزایش یا کاهش بازده انرژی نهایی (FEROI) ظرفیت سیستم برای میزبانی از تنوع زیستی و حفظ خدمات بوم‌شناختی را ارزیابی نمود.

1- Final Energy Return on Investment

2- External Input
3- External Final Energy Return on Investment
4- Internal Final Energy Return on Investment
5- Actual Net Promary Production Energy Return on Investment

برای غلبه بر این کمبود، باید FEROI را با تولید ناخالص واقعی (NPP_{act}) مرتبط نمود، که بیانگر بازده انرژی سرمایه‌گذاری شده بر حسب کل زیست‌توده موجود در تولید اولیه خالص است که از فتوسنتز موجود در سیستم به‌دست آمده است. NPP_{act} کل زیست‌توده در دسترس برای حفظ انسان و سایر انواع گونه‌های هتروتروفیک است که به‌طور مستقیم از طرف انسان مدیریت نمی‌شوند، ولی خدمات بوم‌نظام‌های مورد نیاز آن‌ها تحت تأثیر جریان انرژی و اطلاعاتی است که جامعه سرمایه‌گذاری می‌کند.

بنابراین، این شاخص ورودی‌های انرژی و زیست‌توده بازگشتی را با NPP_{act} ارتباط می‌دهد تا نشان دهد سهم تولید کل سرزمین برای حمایت از دیگر گونه‌ها چقدر است که با استفاده از معادله ۴ قابل محاسبه است (Tello et al., 2016).

$$\text{NPPact EROI (or NPPEROI)} = \frac{\text{NPPact}}{\text{EI+BR}}$$ معادله (۴)

روش برآورد NPP_{act} که برای ارزیابی تخصیص انسان از تولید ناخالص واقعی استفاده شده است، یک شاخص تجمعی است که منعکس‌کننده مقدار مساحت مورد استفاده انسان و شدت استفاده از زمین است (معادله ۵).

$$\text{NPP act} = \text{UPH} + \text{LP}$$ معادله (۵)

محاسبه ناهمگونی ساختاری سیمای‌سرزمین (L)

آگاهی از نحوه استفاده از زمین به‌عنوان اطلاعات اساسی مورد نیاز برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که بر تعاملات بین ساختار و عملکرد سیمای‌سرزمین اثرگذار است. در این بخش جهت تبیین ساختار سیمای‌سرزمین به محاسبه متریک مربوطه پرداخته شده است. متریک‌های سیمای‌سرزمین ابزار مهمی برای درک ساختار و تغییرات سیمای‌سرزمین هستند که معمولاً با استفاده از نقشه کاربری اراضی قابل استخراج هستند. طبقات کاربری اراضی شامل اراضی باغی، نواحی صنعتی، مرتع، نواحی مسکونی، اراضی کشاورزی آبی و دیم بوده است. در این مطالعه ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین بر اساس دو جزء اصلی محاسبه می‌گردد که عبارتند از تعداد کاربری و پوشش اراضی و درصد تحت پوشش مکانی هر یک از کاربری‌ها است (Marull et al., 2019) و ترکیب[1] عناصر سیمای‌سرزمین را نشان می‌دهد (Gökyer, 2013; Letiao & Ahern, 2002). معادله ۵ نحوه محاسبه این متریک (L) را نشان می‌دهد.

$$L = \left(-\sum_{i=1}^{k} p_i \log_k p_i\right)(1 - p_u)$$ معادله (۵)

در این معادله، k: کاربری و پوشش اراضی مختلف در هر واحد سیمای‌سرزمین (دهستان) و p_i: درصد هر کاربری را نشان می‌دهد. p_u: درصد کاربری‌های غیرتولیدی مانند نواحی شهری را نشان می‌دهد.

در نهایت، جهت بررسی همبستگی بین ناهمگونی ساختار و بهره‌وری انرژی، ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار IBM SPSS Statistics v19.0.0.329 اجرا گردیده است.

نتایج و بحث

شکل ۴ توزیع فضایی شاخص‌های مرتبط با بازگشت انرژی به سرمایه در مقیاس دهستان را نشان می‌دهد. در شاخص FEROI که در شکل ۴ (A) نشان داده شده است. FEROI نسبت بین تولید در سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی و مجموع زیست‌توده برگشتی و ورودی‌های خارجی به سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی است که بیشترین مقدار را دهستان بشاریات شرقی با ۰/۲۶۵ و کمترین را خرقان غربی با ۰/۰۱۸ داراست. بشاریات شرقی با مساحت حدود ۱۲ هزار هکتار اراضی باغی، دیم و آبی، دهستانی نه چندان وسیع در مقایسه با دیگر دهستان‌ها تلقی می‌گردد که به‌نسبت، از تولید کشاورزی و دامداری بالایی برخوردار است. بالاتر بودن این شاخص نشان‌دهنده بهره‌وری بیشتر انرژی در دهستان بشاریات شرقی می‌باشد. خرقان غربی نیز جزو دهستان‌هایی با مساحت پایین اراضی تولیدی در مقایسه با دیگر دهستان‌هاست و تولید کشاورزی و دامداری نسبتاً پایین‌تر در مقایسه با دیگر دهستان‌ها را دارا بوده است. بر اساس مطالعات گینگریچ و همکاران (Gingrich et al., 2018) و مارول و همکاران (Marull et al., 2019)، مقادیر پایین‌تر FEROI نشان‌دهنده وجود ساختارهایی متشکل از ارتباط بین زیرسیستم‌های سیمای‌سرزمین کشاورزی (کشاورزی، دامداری و مرتع‌داری) با آنتروپی بالا است، که منجر به افزایش هدررفت انرژی در کل سیستم می‌گردد. بنابراین، زیست‌توده برگشتی و ورودی‌هایی همچون کود شیمیایی و سوخت فسیلی بیشتری باید وارد سیستم شود تا تولید ارائه شود.

1- Composition

بازگشت انرژی به سـرمایه داخلـی (IFEROI) در شـکل ۴ (B) نشان داده شده است. دهستان نرجه با ۰/۹۵ بیشترین و شهیدآباد بـا ۰/۱۶۸ کمترین مقدار این شاخص را دارا بوده‌اند. این شاخص نسـبت بین تولید در سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی و زیست‌توده برگشتی را نشان می‌دهد. جهـت بررسـی علـت بـالا بـودن ایـن شـاخص در دهستان نرجه درصد کاربری اراضی این دهستان را مورد توجـه قـرار گرفت. مشاهده گردید که درصد نسبتاً بالایی از این دهستان را باغات انگور تشکیل داده است. بنابراین، زیست‌توده برگشتی کمتری نسـبت به دیگر دهستان‌ها به‌سمت دام‌داری عرضه می‌کند. این مسئله باعث می‌شود عدد این شاخص بسیار بالاتر از دیگر دهستان‌ها باشد. پایین‌تر بودن IFEROI نشان می‌دهد، زیست‌توده بازگشـتی بیشـتری بـرای تولید یک واحد محصول نیاز است و سعی دارد با بسـتن چرخـه‌هـای بیوفیزیکی، بازتولید را در سیستم حفظ کند که تنها استراتژی عملـی برای حفظ بهره‌وری بالا در صورت عدم وجود ورودی‌های کشاورزی و دام‌داری نظیر کودهای شیمیایی و یا ماشین‌آلات می‌باشد (Marco, 2018). از طرفی تللو و همکاران (Tello et al., 2016) به این نکته اشاره می‌کنند که بالاتر بودن زیست‌توده بازگشتی یک ویژگی بارز از کشاورزی ارگانیک به‌حساب می‌آید که نتیجه آن تلاش برای پایداری سیستم تولیدی است.

بازگشت انرژی به سرمایه خارجی (EFEROI) کـه در شـکل ۴ (C) نشان داده شده است، بیشتر مشابه روش محاسبه بازگشت انرژی به سرمایه و یا بهره‌وری انرژی مرسوم است،که بیشترین میزان ایـن ضریب را بشاریارت غربی با ۰/۶۶۶ و کمتـرین را خرقـان غربـی بـا میزان ۰/۰۲۰ دارا بوده است. مقادیر بالای این شاخص نشـان‌دهنـده بالا بودن تولید در بخش‌های کشاورزی و دام‌داری نسبت به ورودی-های خارجی مانند سم، کود، سوخت فسیلی، بدون دخالت زیست‌توده برگشتی به سیستم و در نهایت، بهره‌وری بیشتر اسـت. در مـواردی، یکی از علل پایین بـودن ایـن شـاخص را افـزایش ورودی انـرژی از طریق سوخت فسیلی در سیستم کشاورزی مطرح کـرده‌انـد (Smil, 2013; Guzmán et al., 2018)، از این رو، با مقایسه میزان مصرف سوخت فسیلی در کشاورزی و دام‌داری این دو دهستان مشخص شد که میزان سوخت فسیلی استفاده شده در خرقان غربی بسیار بالاتر از بشاریات غربی بوده است. یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بـر EFROI کمتر خرقان غربی، وجود کاربری اراضی دیم در این دهسـتان بـوده است که بیشترین میزان سوخت فسیلی را به خود اختصاص داده بود.

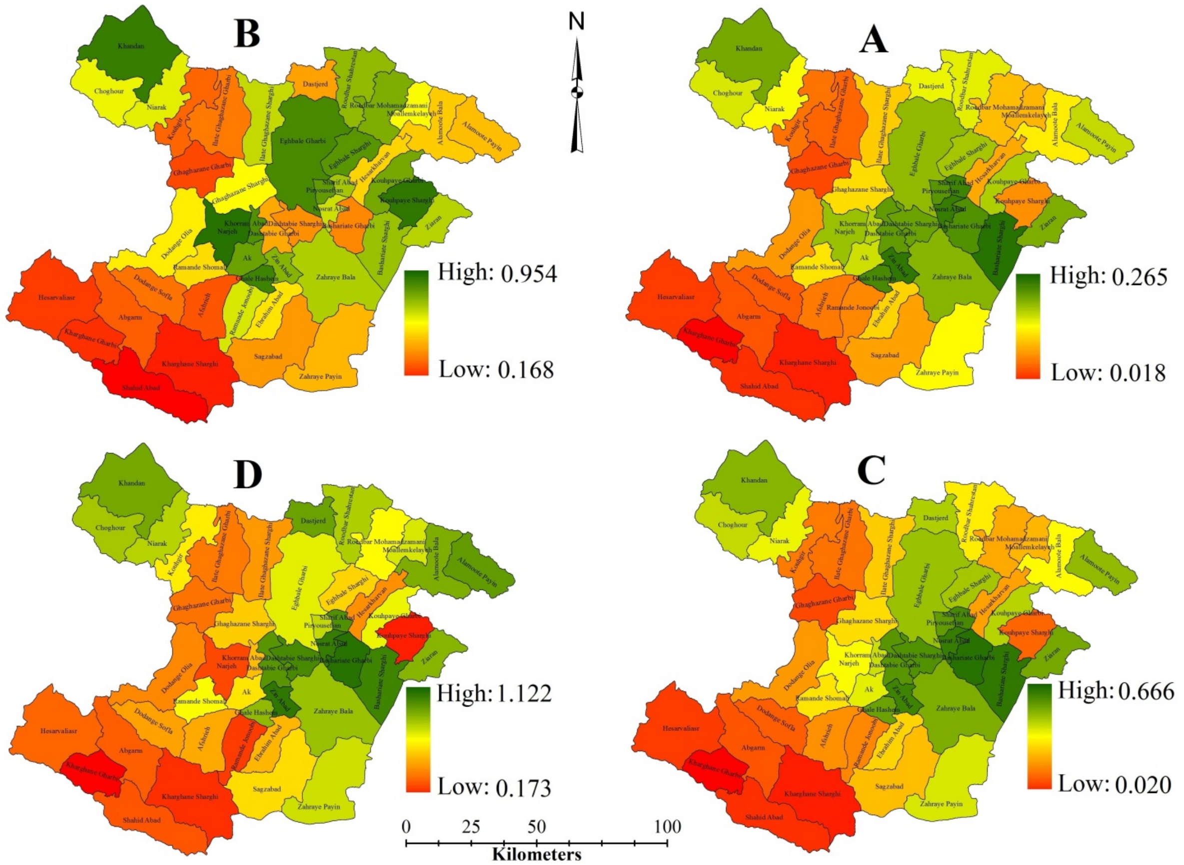
در مطالعـه گـوزمن و آلونسـو (Guzma´n & Alonso, 2008) نیـز کاهش EFEROI به‌واسطه افزایش ورودی‌هـای حاصـل از سـوخت فسیلی به سیستم نیز تأیید شده است. سهم بالای سوخت در انـرژی ورودی اراضی دیم می‌تواند به‌دلیـل اسـتفاده از ادوات و ماشـین‌آلات فرسوده و با بهره‌وری کم نیز باشد که باعث افزایش میـزان سـوخت مصرفی به‌ازای واحد تولید می‌شود (Feiz Bakhsh et al., 2019).

به‌طور کلی، کمتر بودن شاخص EFEROI نسبت بـه IFEROI نشان می‌دهد که مدیریت سیستم به‌سمتی پیش‌رفته است که بـرای یک واحد از تولیـد، مقـدار بیشـتری ورودی نسـبت بـه زیسـت‌تـوده بازگشتی استفاده شده است (Guzmán et al., 2018).

نتایج EROIهای بررسی شده نه تنها تغییرات در بهره‌وری انرژی تولید در سیمای‌سرزمین کشاورزی را ارزیابی می‌کند، بلکه تفاوت‌های عملکردی انرژی ورودی و خروجی را نیز در نظر می‌گیرد (Gloria et al., 2017).

بیشـترین بازگشـت انـرژی بـه سـرمایه تولیـد ناخـالص واقعـی (NPPEROI) که در شکل ۴ (D) نشان داده شده اسـت را بشـاریات غربی با مقدار ۱/۱۲۲ و کمترین را خرقان غربی با مقـدار ۰/۱۷۳ دارا بوده‌است. خرقان غربی جزو دهستان‌هایی است کـه کمتـرین تولیـد کشاورزی و دامـی را داراسـت و در مقابـل، یکـی از دهسـتان‌هـایی محسوب می‌شود که در سال زراعی مورد پژوهش (۱۳۹۷) بیشـترین میزان ورودی انرژی به بخـش کشـاورزی و دام‌داری (از جملـه کـود شیمیایی، خوراک دام، سوخت فسیلی، علف‌کش و حشره‌کش و نیروی انسانی) را به خود اختصاص داده اسـت کـه ضـرایب محاسـبه شـده موضوع بهره‌وری کمتر انرژی را در این دهستان تأیید می‌کند.

NPPEROI بهره‌وری سیستم را با زیست‌توده باقی‌مانـده بـرای گونه‌های غیراهلی (تنوع زیستی) مرتبط می‌کنـد. در دسـترس بـودن زیسـت‌تـوده بـرای حفـظ زنجیـره‌هـای پیچیـده غـذایی گونـه‌هـای هتروتروفیک لازم است، امّا به‌تنهایی کافی نیست. فاکتورهای دیگـر مانند وجود تنوع در کاربری ارضی، همچون ستونی اسـت کـه تنـوع زیستی را در بوم‌نظام‌های کشاورزی حفظ می‌کنند (Guzmán et al., 2018). در این رابطه، تحقیقات دیگر نشان می‌دهند کـه کشـاورزی سنتی سازمان کاربری اراضی پیچیده‌ری ایجاد و سطح بالایی از تنوع زیستی را حمایت می‌کند (Gonza´lez De Molina &, Guzma´n Casado, 2006; Marull et al., 2010).



شکل ٤- توزیع فضایی شاخص‌های مرتبط با بازگشت انرژی به سرمایه در مقیاس دهستان

A: شاخص بازگشت انرژی به سرمایه نهایی (FEROI)، B: شاخص بازگشت انرژی به سرمایه داخلی (IFEROI)، C: شاخص بازگشت انرژی به سرمایه خارجی (EFEROI) و D: شاخص بازگشت انرژی به سرمایه تولید ناخالص واقعی (NPPEROI)

Fig 4- Spatial distribution of indicators related to energy return on investment at county scale
A: final energy return on investment (FEROI), B: interal final energy return on investment (IFEROI), C: external final energy return on investment (EFEROI) and D: net primmary production energy return on investment (NPPEROI)

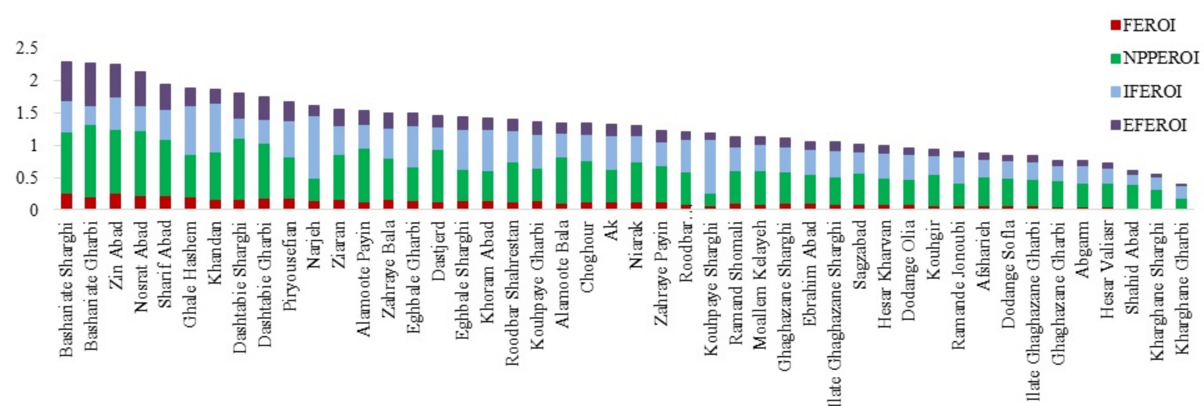
به‌طور کلی، از دیگر عوامل مؤثر بر کارایی انرژی، مـی‌تـوان بـه میزان فرسایش (Vanwalleghem et al., 2011)، کاهش مواد آلـی خاک (Gloria et al., 2017)، نمکی شدن و یا بهره‌برداری بـیش از حد از منابع آب (European Commission, 2013) و از بین رفـتن تنوع زیستی زراعی (Garrido, 2012) اشاره کرد.

در شکل ۵ نمودار هر یک از ضرایب بـر حسـب دهسـتان آمـده است.

در این مطالعه نیز ارتباط ضرایب EROI بـا نـاهمگونی سـاختار سیمای‌سرزمین بررسی شده که در جدول ۳ و شکل ۶ مـورد ارزیـابی قرار گرفته است.

شکل ۶ (A) رابطـه شـاخص FEROI بـا نـاهمگونی سـاختاری سیمای‌سرزمین را نشان می‌دهد. در ایـن نمـودار، شـاهد همبسـتگی معکـوس نـاهمگونی و بهـره‌وری انـرژی هسـتیم، بـه‌طـوری‌کـه در دهستان‌هایی با ناهمگونی کم، شاهد افزایش شاخص FEROI بوده‌ایم که نشان‌دهنده تأثیر ناهمگونی ساختار سیمای‌سـرزمین بـر ایـن شاخص است.

ایـــن ارتبـــاط در شـــاخص‌هـــای EFEROI (شـــکل ۶ C) و NPPEROI (شکل ۶ D) نیز مشاهده می‌گردد. ضرایب همبستگی در جدول ۳ نیز ارتباط منفی و معنادار بین این دو متغیر را اثبات می‌کند.



شکل ۵- نمودار شاخص‌های مرتبط با بازگشت انرژی به سرمایه در مقیاس دهستان
شاخص بازگشت انرژی به سرمایه نهایی (FEROI)، شاخص بازگشت انرژی به سرمایه داخلی (IFEROI)، شاخص بازگشت انرژی به سرمایه خارجی (EFEROI) و شاخص بازگشت انرژی به سرمایه تولید ناخالص واقعی (NPPEROI).

Fig. 5- Diagram of indicators related to energy return on investment at county scale
Final energy return on investment (FEROI), interal final energy return on investment (IFEROI), external final energy return on investment (EFEROI), net primmary production energy return on investment (NPPEROI)

شکل ۶ (B) رابطه ناهمگونی با IFEROI را نشان می‌دهد. در این مورد شاخص مورد بررسی رابطه معنی‌داری با ناهمگونی نداشته و در برخی دهستان‌ها با کاهش ناهمگونی شاخص نیز کم شده، ولی در برخی، رابطه عکس نشان داده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشهود است ضریب همبستگی در این مورد معنی‌دار نبوده است.

یکی از علل رابطه همبستگی معکوس بین بهره‌وری انرژی و ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین در نتایج این مطالعه آن است که در استان قزوین، بالا رفتن ناهمگونی سیمای‌سرزمین منبعث از برنامه‌ریزی کاربری اراضی، در جهت افزایش پیچیدگی چرخه‌های داخلی انرژی (زیست‌توده بازگشتی) عمل نکرده است تا سیستم سیمای‌سرزمین خود سازمان‌ده عمل کند. در نتیجه، جهت جبران آن به ورودی‌های تجدیدناپذیر وابسته شده است. این موضوع با نتیجه مطالعه گالان و همکاران (Galán et al., 2016) که رابطه معنی‌داری بین کاهش زیست‌توده برگشتی وکاهش ناهمگونی سیمای‌سرزمین کشاورزی مشاهده کرده است نیز همسو می‌باشد.

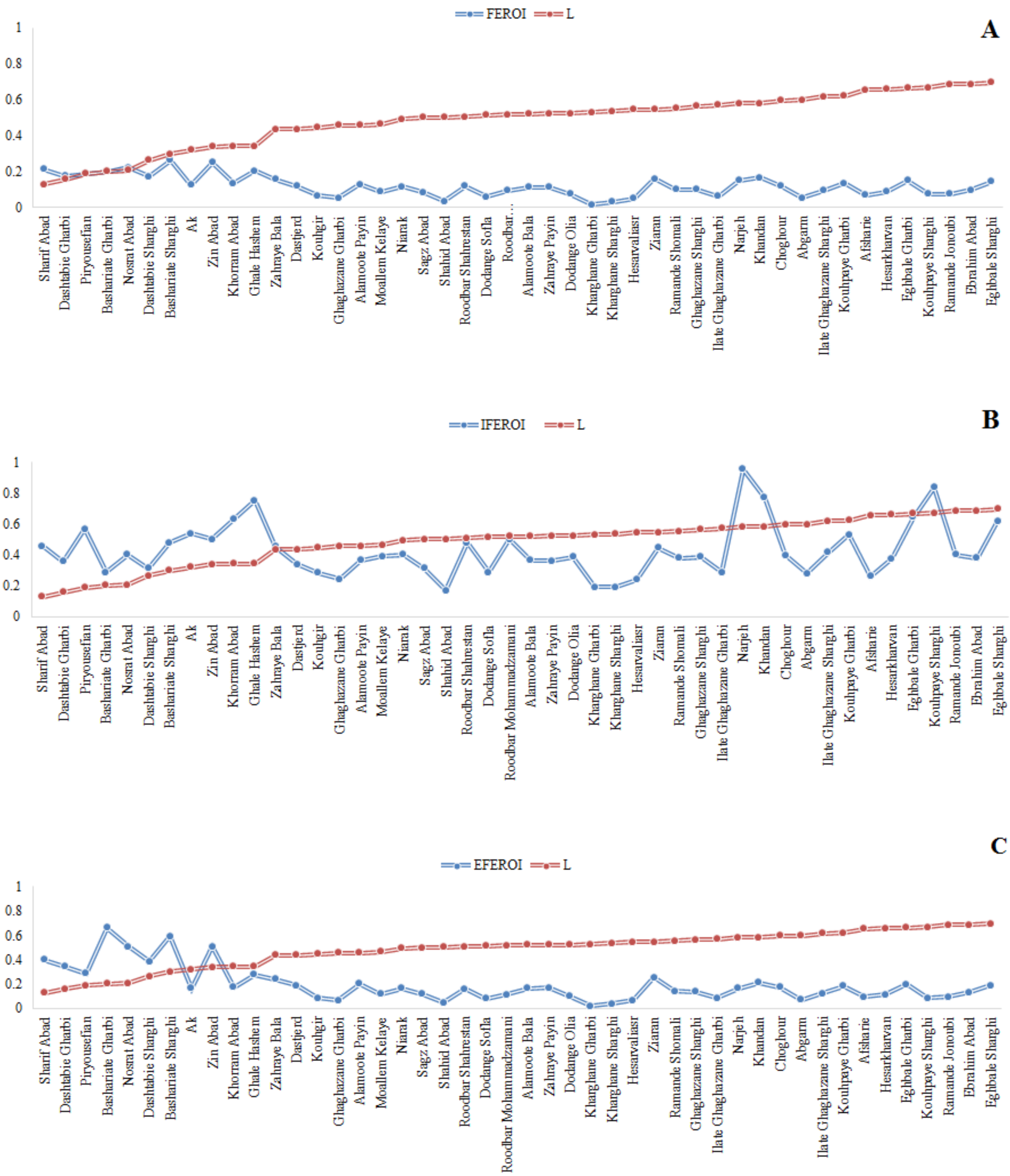
به‌طور معمول، تنوع بوم‌نظام‌های کشاورزی و زیستی از طریق تنوع تولید، تاب‌آوری سیستم را در مقابل آشفتگی‌های انسانی و طبیعی حفظ می‌کند (Gunderson, 2000). مک‌فال و همکاران (MacFall et al., 2015) تنوع تولید را در سه سطح تنوع ژنتیکی، تنوع گونه‌ای و تنوع بوم‌نظام‌ها مورد بررسی قرار داده است.

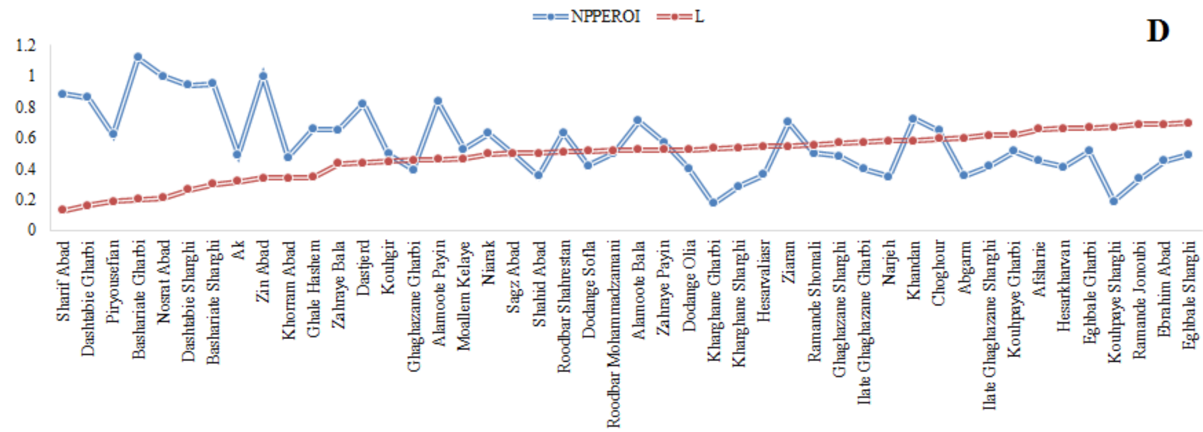
جدول ۳- ضرایب همبستگی بین L و EROIهای چندگانه
Table 3- Correlation coefficients between L and EROIs

EROIs	ضریب همبستگی Correlation coefficient
FEROI	**-0.61****
EFEROI	**-0.74****
NPPEROI	**-0.69****
IFEROI	**0.08ns**

** و ns: به‌ترتیب معنی‌داری و عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** and ns: are significant at 1% probability level and non- significant difference, respectively.


A
FEROI
L
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Sharif Abad
Dashtabie Gharbi
Piryousefian
Bashariate Gharbi
Nosrat Abad
Dashtabie Sharghi
Bashariate Sharghi
Ak
Zin Abad
Khorram Abad
Ghale Hashem
Zahraye Bala
Dastjerd
Kouhgir
Ghaghazane Gharbi
Alamoote Payin
Moallem Kelaye
Niarak
Sagz Abad
Shahid Abad
Roodbar Shahrestan
Dodange Sofla
Roodbar…
Alamoote Bala
Zahraye Payin
Dodange Olia
Kharghane Gharbi
Kharghane Sharghi
Hesarvaliasr
Ziaran
Ramande Shomali
Ghaghazane Sharghi
Ilate Ghaghazane Gharbi
Narjeh
Khandan
Choghour
Abgarm
Ilate Ghaghazane Sharghi
Kouhpaye Gharbi
Afsharie
Hesarkharvan
Eghbale Gharbi
Kouhpaye Sharghi
Ramande Jonoubi
Ebrahim Abad
Eghbale Sharghi
B
IFEROI
L
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Sharif Abad
Dashtabie Gharbi
Piryousefian
Bashariate Gharbi
Nosrat Abad
Dashtabie Sharghi
Bashariate Sharghi
Ak
Zin Abad
Khorram Abad
Ghale Hashem
Zahraye Bala
Dastjerd
Kouhgir
Ghaghazane Gharbi
Alamoote Payin
Moallem Kelaye
Niarak
Sagz Abad
Shahid Abad
Roodbar Shahrestan
Dodange Sofla
Roodbar Mohammadzamani
Alamoote Bala
Zahraye Payin
Dodange Olia
Kharghane Gharbi
Kharghane Sharghi
Hesarvaliasr
Ziaran
Ramande Shomali
Ghaghazane Sharghi
Ilate Ghaghazane Gharbi
Narjeh
Khandan
Choghour
Abgarm
Ilate Ghaghazane Sharghi
Kouhpaye Gharbi
Afsharie
Hesarkharvan
Eghbale Gharbi
Kouhpaye Sharghi
Ramande Jonoubi
Ebrahim Abad
Eghbale Sharghi
C
EFEROI
L
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Sharif Abad
Dashtabie Gharbi
Piryousefian
Bashariate Gharbi
Nosrat Abad
Dashtabie Sharghi
Bashariate Sharghi
Ak
Zin Abad
Khorram Abad
Ghale Hashem
Zahraye Bala
Dastjerd
Kouhgir
Ghaghazane Gharbi
Alamoote Payin
Moallem Kelaye
Niarak
Sagz Abad
Shahid Abad
Roodbar Shahrestan
Dodange Sofla
Roodbar Mohammadzamani
Alamoote Bala
Zahraye Payin
Dodange Olia
Kharghane Gharbi
Kharghane Sharghi
Hesarvaliasr
Ziaran
Ramande Shomali
Ghaghazane Sharghi
Ilate Ghaghazane Gharbi
Narjeh
Khandan
Choghour
Abgarm
Ilate Ghaghazane Sharghi
Kouhpaye Gharbi
Afsharie
Hesarkharvan
Eghbale Gharbi
Kouhpaye Sharghi
Ramande Jonoubi
Ebrahim Abad
Eghbale Sharghi



شکل ٦- نمودار رفتار شاخص‌های EROI براساس تغییر ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین (L)
Fig. 6- Graph of the behavior of EROI indices based on the heterogeneity of the landscape (L)

بدین معنی که با بالا رفتن تنوع بوم‌نظامی و ناهمگنی ساختار، تنوع سیستم‌های تولیدی نیز افزایش یافته و فرصت برای ظرفیت تطبیقی جهت واکنش به تغییر شرایط محیطی افزایش می‌یابد (Hendrickson & Heffernen, 2002). امّا در منطقه مورد مطالعه، به‌دلیل عملکرد مجزای هر سیستم تولیدی به این علت که خروجی یک سیستم به‌عنوان ورودی سیستم دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، افزایش آنتروپی و اتلاف انرژی، در نتیجه کاهش بهره‌وری را به‌دنبال داشته است.

مارول و همکاران (Marull et al., 2019) نیز بر ارتباط بین تنوع کاربری اراضی در سطح سیمای‌سرزمین و ارتباط آن با کاهش بهره‌وری به سیستم اشاره نموده است.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر بهره‌وری تولید در رابطه با کاربری اراضی، این است که ممکن است تولید نهایی از کاربری‌ها یا بخش‌هایی باشد که نیاز به انرژی ورودی بیشتر داشته باشند و در مقابل، تولید کمتری ارائه می‌دهند. با بررسی ارتباط این شاخص‌ها با کاربری و پوشش اراضی هر دهستان مشخص شد که این شاخص‌ها در اراضی دیم، پایین‌ترین حد خود را دارا بوده‌اند. بدین معنی که در استان قزوین بهره‌وری انرژی در اراضی دیم، نسبت تولید به ورودی‌های خارجی که عمدتاً سوخت فسیلی بوده است، پایین بوده و سبب شده است تا ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمینی که با وجود اراضی دیم افزایش یافته است، نتیجه معکوس بر روند بهره‌وری انرژی داشته باشد. این نتیجه در راستای مطالعات کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2016) در جهت بررسی جریان انرژی دیم و آبی در شهرستان شهرکرد و فتحی و همکاران (Fathi et al., 2018) در تحقیقی جهت بررسی کارایی مصرف انرژی تولید گندم دیم در استان ایلام بوده است.

بنا به رابطه بین ساختار، کارکرد و تغییر که به یکی از اصول بنیادین بوم‌شناسی سیمای‌سرزمین اشاره دارد، با اصلاح الگوی تعاملات بین ساختار و جریانات انرژی، سیستم سیمای‌سرزمین به‌سمت تغییر بهینه پیش می‌رود (Forman & Godron, 1986). بنابراین، با اصلاح ترکیب و توزیع عناصر سیمای‌سرزمین که در اینجا کاربری پوشش اراضی است، می‌توان کارکردهای بوم‌شناختی و بهره‌وری جریانات انرژی را بهبود بخشید (Parivar et al., 2009). امّا با کاهش ناهمگنی ساختار سیمای‌سرزمین، تعداد زیستگاه‌ها و غنای گونه‌ای کاهش می‌یابد، یا به عبارت دیگر، وابستگی فزاینده به ورودی‌های خارجی ممکن است با از بین رفتن تنوع زیستی و به‌دنبال آن کاهش خدمات تنظیمی سیمای‌سرزمین کشاورزی همراه باشد (Giampietro, 1997). مدان و همکاران (Medan et al., 2011) نیز بر نقش کشاورزی تشدید شده در کاهش ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین و به تبع آن از دست رفتن گونه‌های تنوع زیستی وابسته به آن تأکید کرده‌اند.

دیگر مطالعات نشان می‌دهند که پیچیدگی جریان انرژی در سیمای‌سرزمین کشاورزی به‌وجود آمده توسط جامعه کشاورزان و تعامل آن با ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین می‌تواند نقش حمایتی

در وجود زیستگاه‌ها و اتصال اکولوژیکی مورد نیاز برای تنوع زیستی مرتبط با بوم‌نظام‌های کشاورزی ایفا کند (Marull et al., 2019).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از EROIهای چندگانه به ارزیابی جریانات انرژی در سیستم سیمای‌سرزمین کشاورزی و تخمین برگشت انرژی به سرمایه سیمای–سرزمین کشاورزی پرداخته شد و سعی گردید نقش ساختار سیمای‌سرزمین در بهره‌وری انرژی تبیین گردد.

یکی از نقاط قوت روش مورد بررسی این است که جریانات داخلی انرژی یا زیست‌توده بازگشتی در سیستم در محاسبات بهره‌وری انرژی دخالت داده شده است که مطالعات انجام شده سعی در نادیده گرفتن این پیچیدگی داشته‌اند. تحقق پایداری در سیستم سیمای-سرزمین کشاورزی در گرو برقراری تعادل بین جنبه‌های بوم‌شناختی و ساختاربندی جامعه‌شناختی می‌باشد که دستیابی به این مهم مستلزم افزایش عملکرد و نیل به‌سمت خودسازمان‌دهی این سیستم است. با محاسبه زیست‌توده بازگشتی می‌توان تخمین زد تا چه حد یک سیستم سیمای‌سرزمین در عدم اتکا به ورودی‌های خارجی و تجدیدناپذیر موفق بوده است که رکن اساسی، در پایداری بوم‌شناختی سیستم کشاورزی به‌شمار می‌آید. همچنین با توجه به ضرورت توجه به تنوع زیستی در هر بوم‌نظام، این روش با محاسبه NPPEROI سعی در تخمین نقش حمایتی بوم‌نظام کشاورزی از تنوع زیستی مربوطه داشته است.

با توجه به نتایج، بازده انرژی می‌تواند با افزایش تولید نهایی در هر واحد از کل ورودی‌های مصرفی بهبود یابد. نظر به اینکه تا حدی می‌توان زیست‌توده بازگشتی و ورودی‌های خارجی را با یکدیگر جایگزین نمود، راهکار ممکن برای افزایش نهایی EROI در یک سیستم تولیدی می‌تواند به‌کار گرفتن تکنیک‌هایی برای پیچیدگی چرخه‌های انرژی، به‌منظور دستیابی به بازدهی بیشتر، امکان افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به‌منظور کاهش ورودی‌های خارجی مصرف شده در یک واحد تولیدی باشد. از طرف دیگر، تکیه بر ورودی‌های خارجی به‌عنوان تنها انرژی ورودی به سرزمین و نادیده گرفتن زیست‌توده بازگشتی منجر به ایجاد همگنی در سیستم سیمای‌سرزمین تولید می‌شود.

در این مطالعه فرض بر این بود که با افزایش ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین، بهره‌وری انرژی به‌دلیل بالارفتن پیچیدگی جریانات انرژی افزایش می‌یابد که با رابطه منفی در ازمون همبستگی اثبات نگردید. چنین رابطه معکوس و معنی‌دار بین این دو متغیر حاکی از آن است که دخالت انسان شناختی در ترکیب‌بندی ساختار سیمای‌سرزمین کشاورزی قزوین و نوع چیدمان کاربری‌ها در هر یک از دهستان‌ها، یکی از مسببین کاهش بهره‌وری انرژی در این استان به‌شمار می‌آید، که این دلالت بر سوء مدیریت سرزمین دارد، چنان‌که سازوکار چرخه-های انرژی در بستر الگوهای ناهمگونی ساختار سیمای‌سرزمین منبعث از برنامه‌ریزی کاربری راضی، از سازوکار چرخه‌های انرژی منبعث از الگوهای طبیعی ساختار سرزمین پیروی نمی‌کنند. در این خصوص لازم است یا از الگوهای ناهمگنی سرزمین تقلید شود و یا از الگوهای ناهمگنی نوینی در راستای توسعه سازمان‌دهی ساختار سیمای‌سرزمین استفاده گردد، به‌گونه‌ای که انسجام ناهمگنی فرآیندی اتخاذ شده، شرایط کاهش آنتروپی و توسعه روندهای سایبرنتیک سازوکارهای زیستی سیمای‌سرزمین را فراهم آورد. زیرا، برخلاف جریانات فیزیکی طبیعت (در روند نزول به منتها درجه همگنی مواد و انرژی)، در جریانات فیزیکی– زیستی طبیعت توسعه نظم و سازمان‌دهی در وجود ناهمگنی مواد و اطلاعات اتفاق می‌افتد. و از این رو، برعکس سیستم‌های بسته که به‌سمت افزایش آنتروپی حرکت می‌کنند، سیستم‌های باز قادر می شوند به‌واسطه ارتباطات فرا-سیستمی خود شرایط ضد– آنتروپی فراهم نمایند که این امر موجب افزایش نظم سازمان‌دهی در ناهمگنی زیستی می‌گردد. لذا، مسئله بنیادین برنامه‌ریزی سیمای‌سرزمین، توسعه پیچیدگی ناهمگنی فرآیندی و سازمان‌دهی فیزیکی– زیستی نوین سرزمین در برنامه-ریزی سیمای‌سرزمین است.

تجزیه و تحلیل جریان انرژی به‌روشی که در این پژوهش دنبال گردید به‌طوری‌که کاربری‌های مختلف اراضی را به جریان انرژی پیوند می‌دهد، به یک رویکرد منسجم ارزیابی در ساختاربندی سیستم سیمای‌سرزمین اشاره دارد. این مطالعه تبیین نمود که چگونه محاسبه چند ضریب بهره‌وری انرژی اطلاعات کامل‌تری نسبت به روش‌های مرسوم در جهت تصمیم گیری ارائه می‌دهد. همچنین بررسی ارتباط آن با ساختار سیمای‌سرزمین که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته بود، تصویری کلی از کاربرد رویکرد بوم‌شناسی سرزمین در استان قزوین را ارائه داد. نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌های آمایش‌سرزمین به‌منظور ادغام ملاحظات انرژی در برنامه-

ریزی کاربری‌اراضی و مطالعات طرح جامع توسـعه کشـاورزی، مـورد استفاده قرار گیرد.

References

Alder, D., Gao, W.D., and Khodaei, A., 2016. Energy return on investment: Impact of societal energy yields on economic sustainability. North American Power Symposium in 2016 (NAPS), p. 1-5.

Atlason, R.S., Kjærheim, K.M., Davíðsdóttir, B., and Ragnarsdottir, K.V., 2015. A comparative analysis of the energy return on investment of organic and conventional Icelandic dairy farms. Icelandic Agricultural Sciences 28: 29-42.

Balogh, S., Hall, C., Guzman, A., Balcarce, D., and Hamilton, A., 2012. The potential of Onondaga County to feed its own population and that of Syracuse New York: past, present, and future. In: Global Economic and Environmental Aspects of Biofuels. CRC Press, p. 273–320.

Bayliss-Smith, T., 1982. The Ecology of Agricultural Systems. Cambridge UniversityPress, Cambridge. P: 112.

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., and González, L.J.M., 2019. Dynamic energy return on energy investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. Energy Strategy Reviews 26: 100399.

Conforti, P., and Giampietro, M., 1997. Fossil energy use in agriculture: an international comparison. Agriculture, Ecosystems and Environment 65: 231–243.

Darvishi, A., Fakheran, S., Soffianian, A., and Ghorbani, M., 2014. Quantifying landscape spatial pattern changes in the caucasian black grouse (*Tetrao mlokosiewiczi*) Habitat in Arasbaran biosphere reserve. Iranian Journal of Applied Ecology 2(5): 27-38. (In Persian with English Summary)

Darvish, A., Ghorban, M., Fakheran, S., and Soffianian, A., 2014. Network analysis and key actors toward wildlife management (case study: habitat of Caucasian Black Grouse, Arasbaran Biosphere Reserve). Iranian Journal of Applied Ecology 3(9): 29-41. (In Persian with English Summary)

Darvishi, A., Fakheran, S., and Soffianian, A., 2015. Monitoring landscape changes in Caucasian black grouse (*Tetrao mlokosiewiczi*) habitat in Iran during the last two decades. Environmental Monitoring and Assessment 187(7): 1-13.

Darvishi, A., Fakheran, S., Soffianian, A., and Ghorbani, M., 2016. Change detection and land use/cover dynamics in the Arasbaran Biosphere Reserve. Journal of Natural Environment 68(4): 559-572. (In Persian)

Darvishi, A., Mobarghaee Dinan, N., Barghjelveh, S., and Yousefi, M., 2020. Assessment and spatial planning of landscape ecological connectivity for biodiversity management (Case study: Qazvin province). Iranian Journal of Applied Ecology 9(1): 15-29. (In Persian with English Summary)

Darvishi, A., Mobarghaee, N., Yousefi, M., & Barghjelveh, S., 2021. Using the method of “Effective Mesh Size” for qualitative evaluation of regional protected areas (Case study: Qazvin province). Journal of Environmental Studies 46(4): 539-554. (In Persian with English Summary)

Darvishi, A., Yousefi, M., and Marull, J., 2020. Modelling landscape ecological assessments of land use and cover change scenarios. Application to the Bojnourd Metropolitan Area (NE Iran). Land Use Policy 99: 105098.

Darvishi, A., Yousefi, M., and Mobarghaee Dinan, N., 2021. Evaluating the correlation between pollination ecosystem service and landscape pattern metrics (Case study: Qazvin province). Iranian Journal of Applied Ecology 10(1): 51-63. (In Persian with English Summary)

Darvishi, A., Yousefi, M., and Mobarghei Dinan, N., 2020. Investigating the effect of socio-economic disturbance resulting from human activities on landscape ecological function using HANPP index (Case Study: Qazvin Province). Journal of Natural Environment 73(3): 471-484. (In Persian with English Summary).

Darvishi, A., Yousefi, M., Mobarghei Dinan, N., and Angelstam, P., 2021. Assessing levels, trade-offs and synergies of landscape services in the Iranian province of Qazvin: towards sustainable landscapes. Landscape Ecology 36(11).

European Commission., 2013. Report from the commission to the council and the European parliament on the implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2008–2011. Brussels, 4-10.

Fathi, R., Amjadpour, K., and Azizpanah, P., 2018. Pattern and efficiency of energy consumption of rainfed wheat production with the help of data envelopment analysis approach, Case study: Chardavol city, Ilam province. Iranian Rainfed Agriculture 7: 33-46. (In Persion with English Summary)

Feiz Bakhsh, M.T., Dori, M.A., and Rezvan Talab, N., 2019. Evaluation of energy indices and its impact on global warming potential for potato production: A case study, Golestan province. Journal of Agroecology 11(1): 53-65. (In Persian with English Summary)

Forman, R.T.T., 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology 10(3): 133-142.

Gabriel, D., Sait, S.M., Kunin, W.E., Benton, T.G., 2013. Food production versus biodiversity: Ccomparing organic and conventional agriculture. Journal of Appied Ecology 50: 355–364.

Galán, E., Padró, R., Marco, I., Tello, E., Cunfer, G., Guzmán, G.I., De Molina, M.G., Krausmann, F., Gingrich, S., Sacristán, V. and Moreno-Delgado, D., 2016. Widening the analysis of energy return on investment (EROI) in agro-ecosystems: socio-ecological transitions to industrialized farm systems (the Vallès County, Catalonia, c. 1860 and 1999). Ecological Modelling 336: 13-25.

Giampietro, M., 1997. Socioeconomic constraints to farming with biodiversity. Agriculture, Ecosystem and Environment 62(2–3): 145–167.

Giampietro, M., Mayumi, K., and Sorman, A.H., 2013. Energy Analysis for Sustainable Future: Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism. Routledge, London.

Giampietro, M., Mayumi, K., Sorman, A.H., 2012. The Metabolic Pattern of Societies: Where Economists Fall Short. Routledge, London.

Gingrich, S., Theurl, M.C., Erb, K., and Krausmann, F., 2018. Regional specialization and market integration: Agroecosystem energy transitions in Upper Austria. Regional Environmental Change 18: 937-950.

Gökyer, E., 2013. Understanding Landscape Structure using Landscape Metrics. In: Advances in Landscape Architecture. IntechOpen. Pp: 663-677.

Gunderson, L.H., 2000. Ecological resilience—in theory and application. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 31: 25–439

Guzma´n, G.I., Alonso, AM., 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. Agricultural Systems 98: 167–176.

Guzmán, G., Aguilera, E., Soto, D., Cid, A., Infante, J., Garcia-Ruiz, R., Herrera, C., Villa, I., and González de Molina, M., 2014. Methodology and Conversion Factors toEstimate the Net Primary Productivity of Historical and ContemporaryAgroecosystems (I). Sociedad Espa˜nola de Historia Agraria-Documentos detrabajo p. 1407.

Guzmán, G.I., and González de Molina, M., 2015. Energy efficiency in agrarian systems froman agro-ecological perspective. Agroecology and Sustainable Food Systems 39: 924–952.

Guzmán, G.I., de Molina, M.G., Fernández, D.S., Infante-Amate, J., and Aguilera, E., 2018. Spanish agriculture from 1900 to 2008: A long-term perspective on agroecosystem energy from an agroecological approach. Regional Environmental Change 18: 995-1008.

Hall, C.A., 2016. Energy Return on Investment: A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability. Springer, New York. P: 174.

Hall, C.A.S., Cleveland, C.J., and Kaufmann, R., 1995. Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process, Wiley, New York. P:577, https://www.jstor.org/stable/29769810.

Hendrickson, M., and Heffernen, W., 2002. Opening spaces through relocalization: Locating potential resistance in the weaknesses of the global food system. Sociologia Ruralis 42: 347–36.

Ho, M.W., 2013. Circular thermodynamics of organisms and sustainable systems. Systems 1: 30–49.

Ho, M.W., Ulanowicz, R.U., 2005. Sustainable systems as organisms? Biosystems 82: 39–51.

Kazemi, H., Alizadeh, P., and Nehbandani, A., 2016. Investigation of energy flow in rainfed and irrigated wheat fields of Shahrekord city under two tillage methods. Agricultural Ecology 8: 281-295. (In Persian with English Summary)

Kazemi, H., and Zare, S., 2014, Investigation and comparison of energy flow in wheat fields of Gorgan and Marvdasht townships. A Quarterly Journal Cereal Research 4(3): 211-227. (In Persian)

Letiao, B.A., and Ahern, J., 2002. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. Landscape and Urban Planning 59: 65-93.

MacFall, J., Lelekacs, J.M., LeVasseur, T., Moore, S., and Walker, J., 2015. Toward resilient food systems through increased agricultural diversity and local sourcing in the Carolinas. Journal of Environmental Studies and Sciences 5: 608-622.

Marco Lafuente, I., 2018. Dialogues between Nature, Class and Gender: Revisiting Socio-Ecological Reproduction from Past Advanced Organic to Industrial Agricultures (Sentmenat, Catalonia, 1860-1999). Ph.D. Dissertation, Faculty of Econmic, Univrsity of Barclona, Barclona.

Marull, J., Cattaneo, C., Gingrich, S., De Molina, M.G., Guzmán, G.I., Watson, A., MacFadyen J, Pons, M., and Tello, E., 2019. Comparative energy-landscape integrated analysis (ELIA) of past and present agroecosystems in North

America and Europe from the 1830s to the 2010s. Agricultural Systems 175: 46-57.

Marull, J., Pino, J., Tello, E., and Cordobilla, M.J., 2010. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region. Land Use Policy 27: 497-510.

Medan, D., Torretta, J.P., Hodara, K., Elba, B., and Montaldo, N.H., 2011. Effects of agriculture expansion and intensification on the vertebrate and invertebrate diversity in the Pampas of Argentina. Biodiversity and Conservation 20: 3077-3100.

Morowitz, H.J., 2002. The Emergence of Everything: How the World Became Complex. Oxford University Press, Oxford. P: 224

Mortazavi, S.A., Hezareh, R., and Mousavi, S.H., 2014, Energy Efficiency Analysis in Agriculture, Case Study: Qazvin Plain, First National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran, 30 January 2014. (In Persian)

Naveh, Z., 2000. What is holistic landscape ecology? A conceptual introduction. Landscape and Urban Planning 50: 7-26.

Odum, H.T., 1973. Environment, Power and Society. Wiley Interscience: New York, NY, USA. P: 331.

Oerke, E., Dehne, H., Schönbeck, F., and Weber, A., 1999. Crop Production and Crop Protection: Estimated Losses in Major Food and Cash Crops. Elsevier, Amsterdam. P: 808.

Omidmehr, Z., 2019. Comparison of energy productivity and global warming potential in rain-fed sunflower (*Helianthus annuus* L.) production systems. Journal of Agroecology 11(2): 739-755. (In Persian with English Summary)

Padró i Caminal, R., 2018. Agroecological Landscape Modelling as a Deliberative Tool, Learning from Social Metabolism Assessment of Historical Transitions to Industrial Agriculture for Future Sustainable Food System. Ph.D. Dissertation, Faculty of Agriculture, Univrsity of Barclona, Barclona.

Parivar, P., Yavari, A., Faryadi, S.H., and Sotoudeh, A., 2009. Landscape ecological structure analysis of Tehran to develop strategies for improving environmental quality. Journal of Environmental Studies 35(50): 45-56. (In Persian with English Summary)

Pelletier, N., Audsley, E., Brodt, S., Garnett, T., Henriksson, P., Kendall, A., Kramer, K., Murphy, D., Nemecek, T., and Troell, M., 2011. Energy intensity of agriculture and food systems. Annual Review of Environment and Resources 36: 223–246.

Smil, V., 2013. Harvesting the Biosphere. What we have taken from nature. MIT Press, Cambridge. P: 317.

Tello, E., Galán, E., Sacristán, V., Cunfer, G., Guzmán, G.I., De Molina, M.G., Krausmann F, Gingrich S, Padró, R., Marco, I., and Moreno-Delgado, D., 2016. Opening the black box of energy throughputs in farm systems: a decomposition analysis between the energy returns to external inputs, internal biomass reuses and total inputs consumed (the Vallès County, Catalonia, c. 1860 and 1999). Ecological Economics 121: 160-174.

Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T., Jackson, C., Motzke, L., Perfecto, M., Vandermeer, J., and Whitbread, A., 2012 a. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricul-tural intensification. Biological Conservation 151(1): 53–59.

Tscharntke, T., Tylianakis, J.M., Rand, T.A., Didham, R.K., Fahring, L., Batáry, P., Bengtsson, J.,Clough, Y., Crist, T.O., Dormann, C.F., Ewers, R.M., Fründ, J., Holt, R.D., Holzschuh, A., Klein, A.M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D.A., Laurance, W., Lindemayer, D., Scherber, C., Sofhi, N., Steffan-Dewenter, I., Thies, C., van der Putten, W.H., and Westphal, C., 2012 b. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes—eigth hypotheses. Biological Reviews 87: 661–685.

Vafabakhsh, J., and Mohammadzadeh, A., 2019. Energy flow and GHG emissions in major field and horticultural crop production systems (Case study: Sharif Abad plain). Journal of Agroecology 11(2): 365-382. (In Persian with English Summary)

Vanwalleghem, T., Infante-Amate, J., Gonza´lez De Molina, M., Soto Ferna´ndez, D., and Go´mez, J.A., 2011. Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. Agriculture, Ecosystems and Environment 142:341–351

Worster, D., 1990. Transformations of the earth: toward an agroecological perspective in history. Journal of American History 76(4): 10.

Yousefi, M., Darvishi, A., Padró, R., Barghjelveh, S., Dinan, N.M., and Marull, J., 2020. An energy-landscape integrated analysis to evaluate agroecological scarcity. Science of the Total Environment 739: 139998.

Yousefi, M., Darvishi, A., Tello, E., Barghjelveh, S., Dinan, N. M., and Marull, J., 2021. Comparison of two biophysical indicators under different landscape complexity. Ecological Indicators 124: 107439.

Zahedi, M., Eshghizadeh, H., and Mondani, F., 2014. Evaluation of energy use efficiency and economical indices in safflower (*Carthamus Tinctorius* L.) production system in Isfahan province. Journal of Agroecology 4(2): 45-53. (In Persian with English Summary)

Journal of Agroecology
Vol. 13, No.3, Fall 2021, p. 449-470

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص ۴۷۰-۴۴۹

Ecological Sustainability in "Energy Return on Investment (EROI)" and its Correlation with Agricultural Landscape Heterogeneity (Case Study: Qazvin Province)

M. Yousefi[1], S. Barghjelveh*[2] A. Darvishi[1] and N. Mobargaee Dinan[2]
Submitted: 18-09-2020
Accepted: 12-01-2021

Yousefi, M., Barghjelveh S., Darvishi, A., and Mobargaee Dinan, N., 2021. Ecological sustainability in "Energy Return on Investment (EROI)" and its correlation with agricultural landscape heterogeneity (Case study: Qazvin province). Journal of Agroecology 13(3):449-470.

Introduction

The problem of energy efficiency is one of the key pillars of economics, especially agricultural sector. In term of energy efficiency, a similar estimation for human actions and their consequents can be applied to the landscape system, which first introduced by Hall et al. (1986), and now referred to Energy Return on Investment (EROI). Many energy analyzes have been done, take into account a social system boundary and an input and output approach. This approach will inevitably hide the system's internal performance inside a black box. Recently, Tello et al. (2016) have proposed a novel approach for analyzing energy at the agricultural landscape scale with the aim of evaluating energy sustainability under multiple EROIs that views the landscape as a set of energy cycles between nature and society. The proposes of this study have been to consideration the theory and methodology of multiple EROIs, to investigate the efficiency of energy flow in Qazvin agricultural landscape and, to examine the relationship between energy efficiency and landscape heterogeneity in order to describe the interaction of landscape structure and energy efficiency.

Materials and Methods

The database of this case study was prepared from 46 counties of Agricultural Organization of Iran and land use map. Agricultural database was created based on agriculture, livestock, and pasture subsystems. Agricultural yield for each crop, number of agricultural, and horticultural labors, number and type of agricultural machinery, amount of fertilizers, herbicides and fungicides, used fossil fuels, electricity, and agricultural waste belonged to the agricultural sub-sector. Census of livestock, livestock and poultry production, livestock and poultry feed, livestock and poultry production, workers and machinery, fossil fuel and electricity needed and livestock waste were collected for the livestock sector. Pasture production used for livestock grazing, amount of livestock manure going back to rangelands were belong to pasture sector. All energy flows were converted to gross caloric value following research by Guzmán et al. (2014). In this method, the calculation of multiple EROIs has replaced the conventional methods of energy efficiency calculation. Landscape heterogeneity calculated using landscape metrics. Correlation coefficient was performed using SPSS between EROIs and heterogeneity.

1- Ph.D. Candidate in Department of Planning and Design of the Environment, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Planning and Design of the Environment, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
(*- Corresponding Author Email: s-barghjelveh@sbu.ac.ir)
DOI:10.22067/jag.v13i3.85655

Results and Discussion

The highest value of FEROI was found in Bashariyate Sharghi with 0.25 and the lowest was in Kharghane Gharbi with 0.018. EFEROI, which is the most similar to the conventional method of energy efficiency, had the highest rate with 0.666 in Bashariate Gharbi and the lowest rate with 0.020 in Kharqan Gharbi. IFEROI was 0.95 in Narjah and the lowest was in Shahidabad with 0.168. Lower IFEROI indicates a higher return biomass in the production system, which seeks to maintain reproduction in the system by closing the biophysical cycles. The highest NPPEROI were reported by Bashariate Gharbi at 1.122 and lowest by Kharqan Gharbi at 0.173.In this study the relationship between the EROIs index and the heterogeneity of the landscape structure was shown. The results have showed the inverse correlation between heterogeneity and energy efficiency, indicating the heterogeneous impact of landscape structure on these indicators. It can be deduced that the heterogeneity created by human in Qazvin province has reduced energy efficiency. To explain this inverse correlation between energy efficiency and the heterogeneity of the landscape, it should be noted that one of the factors affecting efficiency is that may final production come from land uses that needed more input energy and produce less output. By examining the relationship between these indices with land use and land cover of each county, it was found that these indices had their lowest level in dry farming. It means that in Qazvin province, energy efficiency in dry farming is low, and relay on external inputs, which was mainly fossil fuel.

Conclusion

This study has explained how the calculation of several energy efficiency coefficients provides more complete information than conventional methods for decision making. The results of this study can be applied in land use planning to integrate energy considerations in planning and comprehensive agricultural development plan.

Keywords: Biomass reused, Ecological-social system, Energy efficiency, Landscape ecology