



سنجش ردپای بوم‌شناختی دانشگاه بر مبنای رویکرد ارزیابی چرخه حیات (مطالعه موردی: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

سیدحامد میرکریمی^۱، سپیده سعیدی^{۱*}، شقایق ابراهیمی^۱، محسن صالحی^۴، فاطمه چیت‌بند^۱

^۱ - گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: کاربری‌های مختلف شهری از جمله نهادهای آموزشی، به‌ویژه دانشگاه‌ها، سهم چشمگیری در مصرف منابع طبیعی و تولید آلاینده‌ها دارند و در نتیجه تأثیر بسزایی بر محیط‌زیست می‌گذارند. دانشگاه‌ها به‌دلیل ماهیت خدماتی و گستردگی فعالیت‌های آموزشی، پژوهشی و پشتیبانی، مصرف بالایی از انرژی، آب و سایر منابع را به خود اختصاص می‌دهند. از این‌رو، سنجش دقیق و جامع اثرات محیط‌زیستی آن‌ها از طریق شاخص‌هایی مانند ردپای بوم‌شناختی، ضرورتی انکارناپذیر برای مدیریت پایدار منابع و کاهش پیامدهای محیط‌زیستی است.
تاریخچه مقاله:	مواد و روش: پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ردپای بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در محدوده پردیس جدید، با بهره‌گیری از رویکرد ارزیابی چرخه حیات انجام شده است. در این مطالعه، با شناسایی منابع مصرفی و جریان‌های محیط‌زیستی مرتبط، تلاش شده است تا تصویری کمی از اثرات ناشی از فعالیت‌های دانشگاه ارائه گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی الگوهای مصرف، تدوین راهبردهای محیط‌زیستی و حرکت به سوی دانشگاه‌های سبز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به سهم قابل‌توجه دانشگاه‌ها در مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها و نبود ارزیابی‌های جامع و علمی درباره اثرات محیط‌زیستی نهادهای آموزشی در کشور، انجام این پژوهش با رویکرد چرخه حیات، گامی مهم برای بهبود مدیریت پایدار و ارتقای عملکرد محیط‌زیستی دانشگاه‌ها محسوب می‌شود. در این مطالعه علاوه بر ردپای بوم-شناختی با روش EF، ردپای آب با روش AWARE و نیز ردپای کربن با روش IPCC در سال ۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد کل پرسنل و دانشجویان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در واحد پردیس برابر با ۴۱۲۱ نفر است.
کلمات کلیدی:	نتایج: امتیاز نهایی ردپای بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برابر با ۲/۷۵ pt - برآورد شده است. بیشترین اثر سوء بر ردپای اکولوژیک مربوط به برق مصرفی و بر طبقات تغییر اقلیم و سپس مصرف منابع است و بیشترین اثر سازگار با محیط‌زیست بر ردپای اکولوژیک دانشگاه مرتبط با ذخیره آب و سیستم بازچرخانی آب دانشگاه است. نتایج حاصل از بررسی ردپای کربن نشان می‌دهد، عدد نهایی بدست آمده برای ردپای کربن دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان $2/17 \times 10^4$ - کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن است. ذخیره‌سازی آب از جمله مؤثرترین راهکارها در کاهش ردپای کربن به شمار می‌آید، چرا که این اقدام با کاهش وابستگی به عملیات پمپاژ، مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش داده و در نهایت منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. برق مصرفی در دانشگاه منجر به افزایش ردپای کربن در دانشگاه شده است. نمره کل برآورد شده در خصوص ردپای آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برابر با $1/06 \times 10^4$ - است.

موارد ارائه شده اقداماتی مانند ایجاد ذخیره و بازچرخانی آب و فضای سبز در دانشگاه، دارای اثر مثبت و سازگار با محیط‌زیست است. تحلیل ردپای بوم‌شناختی دانشگاه‌ها با رویکرد چرخه حیات، می‌تواند به عنوان الگویی برای دیگر نهادهای آموزشی در جهت کاهش اثرات محیط‌زیستی و برنامه‌ریزی موثر مورد استفاده قرار گیرد.

بحث: این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی‌های دقیق و جامع، گامی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف منابع و حفاظت از محیط‌زیست است. در مجموع، این پژوهش با ارزیابی چندبعدی اثرات محیط‌زیستی، اهمیت مدیریت منابع و اجرای راهکارهای پایدار در دانشگاه‌ها را آشکار کرده و می‌تواند زمینه‌ساز بهبود عملکرد محیط‌زیستی نهادهای آموزشی گردد.

مقدمه

انسان امروز با چالش‌های محیط‌زیستی جدی روبرو است. رشد بی‌رویه جمعیت و مدیریت نادرست منابع طبیعی باعث فشار بر زمین و تهدید پایداری آن شده است. بهره‌برداری ناپایدار از منابع، اکوسیستم‌ها را با مشکلات بیشتری مواجه کرده و تخریب محیط‌زیست به یکی از موانع اصلی توسعه پایدار تبدیل شده است (Cafaro et al., 2022). کاربری‌های شهری مانند مسکونی، صنعتی، تجاری و خدماتی سهم قابل‌توجهی در مصرف منابع طبیعی داشته و نقش مهمی در پایداری محیط پیرامونی ایفا می‌کنند (Alizadeh et al., 2019). در این میان، دانشگاه‌ها به‌عنوان نهادهای خدمات آموزشی، دارای مصرف بالایی از منابع هستند. امروزه یکی از ابزارهای سنجش پیامدهای محیط‌زیستی، سنجش ردپای اکولوژیک است که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی تأثیرات محیط‌زیستی دانشگاه‌ها استفاده می‌شود (See et al., 2016). با افزایش جمعیت دانشگاهی، ردپای اکولوژیک ناشی از فعالیت‌های دانشجویان و کارمندان رو به گسترش است. تردد روزانه، مصرف آب و برق، تولید پسماند و بهره‌برداری از ساختمان‌ها، همگی بر محیط‌زیست تأثیر گذارند و بنابراین، مدیریت مصرف منابع در دانشگاه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است (Mutambo et al., 2024).

یکی از مهم‌ترین پیامدهای محیط‌زیستی دانشگاه‌ها، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در میان این گازها، دی‌اکسید کربن بیشترین سهم را دارد (Lin et al., 2024) و به‌عنوان عامل اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود. با این حال، انتشار دی‌اکسید کربن همیشه شاخص کاملی برای نمایش تخریب محیط‌زیست نیست، چرا که عوامل دیگری نیز در این فرآیند نقش دارند. از این‌رو، برای ارزیابی جامع‌تر، استفاده از شاخصی فراگیر همچون

"ردپای اکولوژیک" ضروری است (Zafar, 2019). یکی دیگر از جنبه‌های ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی دانشگاه‌ها، بررسی ردپای کربن آن‌هاست؛ یعنی میزان گازهای گلخانه‌ای که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از فعالیت‌های آن‌ها منتشر می‌شود (Elsharkawy et al., 2022). این فعالیت‌ها شامل مصرف انرژی، حمل‌ونقل، استفاده از منابع و تولید پسماند است. اندازه‌گیری دقیق و مدیریت این ردپا می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های مؤثر برای کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار در محیط‌های دانشگاهی باشد (Ozawa-Meida et al., 2013). بررسی اثرات گلخانه‌ای دانشگاه‌ها یکی از گام‌های مهم در مسیر ارزیابی پایداری محیط‌زیستی این نهادها است. این اثرات عمدتاً ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش، سرمایش، حمل و نقل و همچنین استفاده از برق و تولید پسماند هستند. در بسیاری از دانشگاه‌ها جهان، بیشترین سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای به مصرف انرژی در ساختمان‌ها و تردد روزانه دانشجویان و کارکنان اختصاص دارد (Valls-Val & Bovea, 2021). تحلیل این منابع انتشار می‌تواند به شناسایی نقاط بحرانی و طراحی راهکارهای کاهش اثرات منجر شود. به‌عنوان نمونه، تحقیق انجام‌شده توسط Nguyen و همکاران (۲۰۲۰) در دانشگاه ملبورن نشان داد که با بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و ارتقاء حمل و نقل پایدار، می‌توان به کاهش چشمگیر گازهای گلخانه‌ای دست یافت. ردپای آب دانشگاه‌ها به میزان کل آب مصرف‌شده مستقیم و غیرمستقیم مرتبط با فعالیت‌های مختلف آن‌ها اشاره دارد. این مصرف شامل آب مصرفی در ساختمان‌ها، آزمایشگاه‌ها، فضای سبز و همچنین آب مورد استفاده برای تولید مواد و خدماتی است که دانشگاه‌ها به کار می‌گیرند. بررسی و ارزیابی ردپای آب می‌تواند به شناسایی نقاط پرمصرف و بهینه‌سازی استفاده از منابع

ردپای اکولوژیک (EFA) بررسی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که ردپای اکولوژیک دانشجویان دانشگاه فردوسی معادل ۱/۵۱ هکتار جهانی بوده که از میانگین جهانی (۲/۸) و ملی (۳/۲) کمتر بوده است. ردپای محاسبه شده در این تحقیق شامل سه جزء انرژی، غذا و سوخت و ساز بود. نتایج نشان داد ردپای غذا با ۵۷/۳ درصد بیشترین سهم را در ردپای دانشگاه فردوسی مشهد داشت. یافته‌های مطالعات متعدد داخلی و خارجی نیز اهمیت کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی رفتارهای مصرفی و توجه به مرحله بهره‌برداری ساختمان‌ها را تأیید می‌کنند.

ردپای بوم‌شناختی با اندازه‌گیری میزان زمین و منابع طبیعی مورد نیاز برای تولید کالاها و خدمات مصرفی، فشار وارده بر محیط‌زیست را به صورت کمی بیان می‌کند و ابزاری موثر برای سنجش پایداری و مدیریت منابع طبیعی محسوب می‌شود. همچنین، ارزیابی چرخه حیات به بررسی جامع تأثیرات محیط‌زیستی در تمام مراحل عمر یک سیستم، از استخراج مواد اولیه تا دفع نهایی، می‌پردازد و با شناسایی نقاط بحرانی، امکان بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد. ترکیب این دو روش، تصویری کامل و چندبعدی از اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌های دانشگاهی ارائه داده (Mancini et al., 2024; Zhao et al., 2023) و همانطور که گفته شد امروزه مطالعات ردپای اکولوژیک با استفاده از مفهوم ارزیابی‌ها از رویکرد چرخه حیات با نرم افزار سیماپرو بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ارزیابی تأثیرات محیط‌زیستی مؤسسات آموزش عالی و به‌طور کلی میزان مشارکت آن‌ها در ترویج اصول توسعه پایدار یعنی "عمل کردن به آنچه می‌گوییم" به یک موضوع کلیدی تبدیل شده است (Sonetti et al., 2016 & 2020). با توجه به نقش پررنگ دانشگاه‌ها در مصرف منابع طبیعی و تولید آلاینده‌ها، و همچنین نبود ارزیابی‌های دقیق و چندبعدی از اثرات محیط‌زیستی نهادهای آموزشی در ایران، ضرورت انجام مطالعاتی که به‌طور هم‌زمان به ردپای بوم‌شناختی، ردپای آب و ردپای کربن بپردازند، بیش از پیش احساس می‌شود. نبود اطلاعات کمی و جامع در زمینه مصرف منابع و پیامدهای محیط‌زیستی در دانشگاه‌ها، مانعی جدی در مسیر برنامه‌ریزی محیط‌زیستی، مدیریت پایدار منابع و حرکت به‌سوی دانشگاه‌های سبز است. تحقیق

آبی کمک کند، که در نهایت به کاهش فشار بر منابع آب و ارتقای پایداری محیط‌زیستی دانشگاه‌ها منجر می‌شود (Hoekstra & Ercin, 2014).

شاخص ردپای بوم‌شناختی، ابزاری برای سنجش تفاوت میان منابع قابل‌دسترس طبیعی و میزان مصرف انسان‌ها از این منابع است. این شاخص می‌تواند در تدوین سیاست‌های محیط‌زیستی و الگوهای مصرف مؤثر باشد (Yazdkhasti et al., 2013). این ابزار به‌ویژه در نهادهایی مانند دانشگاه‌ها که مصرف منابع بالایی دارند، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی ارائه کند (Sharma, 2011).

ساختمان‌ها، چه در حال ساخت و چه در حال بهره‌برداری، نقش مهمی در ردپای بوم‌شناختی دارند. مصرف انرژی، تولید زباله و اثرات اقتصادی ناشی از ساخت و نگهداری، همگی باید مورد توجه قرار گیرند (Xue et al., 2020).

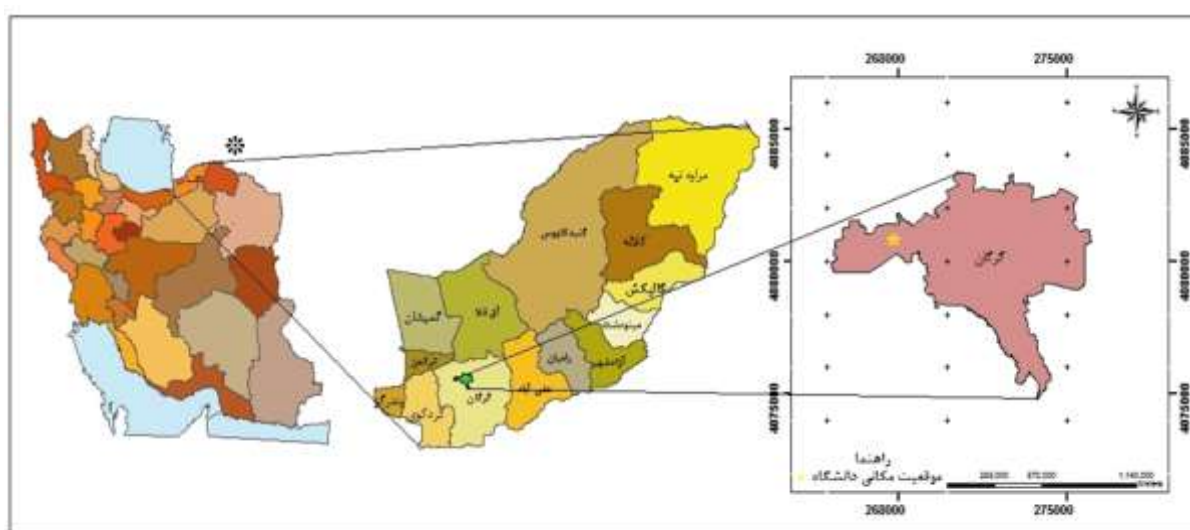
در تحقیقی دیگر Junnila و Horvath (۲۰۱۸)، در مطالعه‌شان به ارزیابی ردپای بوم‌شناختی یک ساختمان اداری با رویکرد ارزیابی چرخه حیات در پنج مرحله حیات آن شامل: مرحله ساخت مصالح ساختمانی، مرحله ساخت ساختمان، مرحله بهره‌برداری و استفاده از ساختمان، مرحله نوسازی ساختمان و نهایتاً مرحله تخریب و انهدام ساختمان پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین اثرات محیط‌زیستی چرخه حیات آن ساختمان متعلق به مرحله ساخت مصالح ساختمانی آن و مصرف الکتریسیته در مرحله بهره‌برداری آن ساختمان است و همچنین پسماندهای تولیدی پرسنل ساختمان از جمله مهم‌ترین عوامل اثرات محیط‌زیستی در بخش بهره‌برداری شناسایی شدند. در مطالعه دیگری Xue و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقشان با استفاده از رویکرد تلفیقی ارزیابی چرخه حیات و ارزیابی چرخه هزینه به ارزیابی ردپای محیط‌زیستی ساختمان‌های اداری و آموزشی دانشگاهی در چین پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد بیشترین اثرات محیط‌زیستی مربوط به کاهش غیرزیستی منابع، مصرف سوخت فسیلی و گرمایش زمین هستند. امروزه ردپای اکولوژیک دانشگاه‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Sonetti et al., 2016 & 2020). Kouchaki و همکاران (۲۰۲۲)، ردپای اکولوژیک دانشجویان دانشگاه فردوسی مشهد را از طریق دو روش، شامل تکمیل پرسشنامه موجود در شبکه جهانی ردپا (EFN) و آنالیز

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان واقع در استان گلستان، شمال شرقی ایران است. این دانشگاه به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین مراکز آموزش عالی در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی در کشور، در سال ۱۳۳۶ تأسیس شده و مساحت آن ۲۳ هکتار است. دانشگاه دارای محیطی نسبتاً وسیع و سرسبز است و ساختمان‌های اداری، آموزشی، آزمایشگاه‌ها، خوابگاه‌ها، مزرعه تحقیقاتی و فضای سبز را در خود جای داده است. این پژوهش فقط بخش پردیس دانشگاه را مورد مطالعه قرار داده است (Iran Modares, 2021; GAU, 2024).

حاضر با بهره‌گیری از رویکرد چرخه حیات و ارزیابی دقیق جریان‌های ورودی و خروجی، می‌تواند خلأ موجود در ادبیات داخلی را پر کرده و الگویی قابل تعمیم برای سایر نهادهای آموزشی فراهم آورد. در پژوهش حاضر شرایط معمول واحد پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۴۰۲ با استفاده از نرم‌افزار SimaPro (ورژن ۹.۰.۰.۳۵) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت مکانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در شهر گرگان و استان گلستان

می‌کند. همچنین، ترکیب EF با رویکرد ارزیابی چرخه حیات (LCA) امکان بررسی چندبعدی و جامع‌تر اثرات محیط‌زیستی از مراحل مختلف فعالیت‌ها را میسر ساخته و به برنامه‌ریزی بهینه برای مدیریت پایدار منابع و کاهش پیامدهای محیط‌زیستی کمک می‌کند. گام‌های چهارگانه رویکرد ارزیابی چرخه حیات به شرح ذیل تشریح می‌شوند (Silva et al., 2017).

گام اول: تعیین هدف و دامنه سیستم: دامنه و چشم‌انداز باید به نحوی تعریف شود که جزئیات مطالعه با هدف مشخص موردنظر، سازگار باشد و از وسعت و عمق کافی برای رسیدن به دقت اعلام‌شده، برخوردار باشد. محدوده و چشم‌انداز مطالعه در واقع به تشریح پارامترهای مطالعه می‌پردازد، این پارامترها باید با اهداف مطالعه سازگار باشد. در این مطالعه هدف بررسی ردپای

روش کار

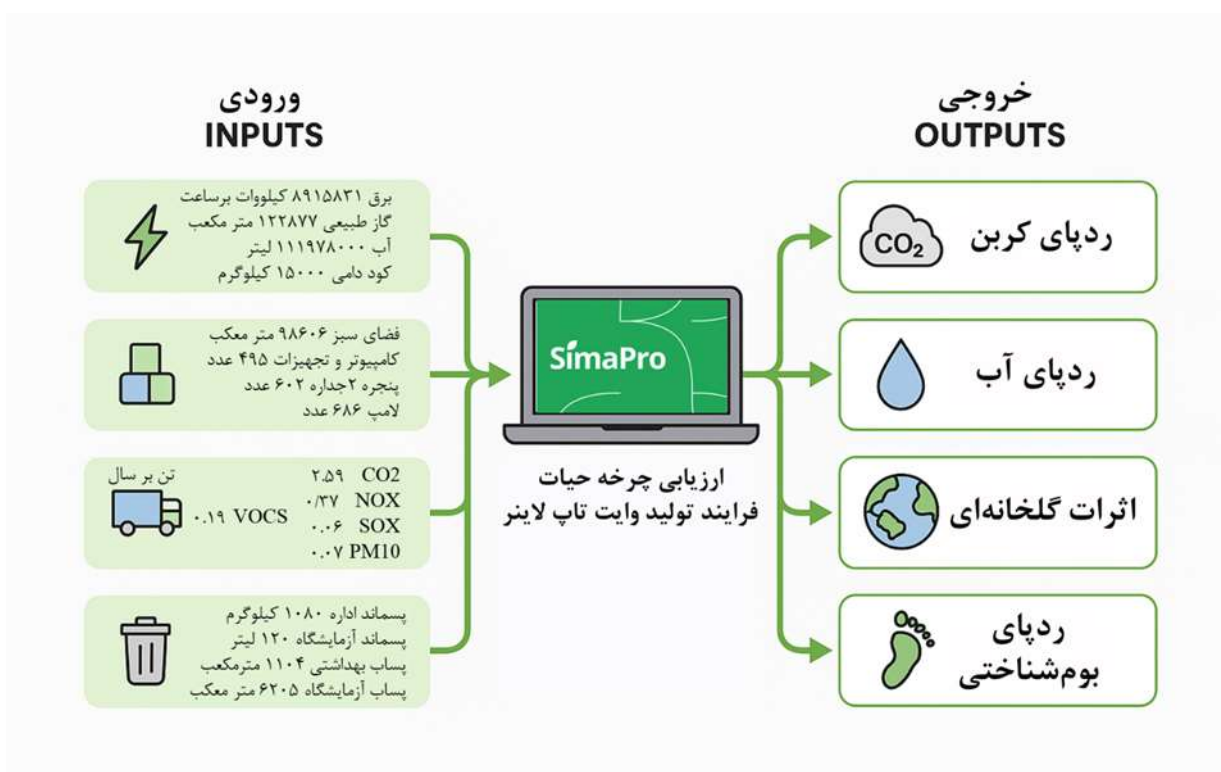
تحقیق حاضر از نوع کاربردی و روش تحقیق توصیفی - تحلیلی است. اطلاعات مورد نیاز از طریق مطالعات اسنادی و میدانی گردآوری خواهد شد. اطلاعات گردآوری شده در نرم‌افزار سیماپرو ورژن ۹.۰.۰.۳۵ وارد خواهند شد و سپس با استفاده از رهیافت ارزیابی چرخه حیات و به کارگیری روش EF^۱ که در ادامه تشریح خواهد شد، ردپای بوم-شناختی دانشگاه محاسبه خواهد شد. دلیل انتخاب روش ردپای بوم‌شناختی (EF) در این پژوهش، توانایی آن در کمی‌سازی و ارزیابی جامع اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌های دانشگاه است. این روش به عنوان ابزاری کاربردی، امکان تحلیل دقیق مصرف منابع و تأثیرات محیط‌زیستی را به صورت معیاری ساده و قابل فهم فراهم

¹ Ecological footprint

کارمندان، اساتید، تجهیزات، سوخت و انرژی مصرفی (آب، برق و گاز)، فضای سبز موجود در محدوده مطالعاتی، نحوه حمل و نقل، مواد خروجی از سیستم شامل انتشارات به آب، خاک، هوا و برآورد میزان پسماند تولیدی در بخش‌های مختلف، نحوه مدیریت پساب و جمع‌آوری پسماند) طی بررسی مدارک و بررسی میدانی از محل دانشگاه انجام شده و تهیه شد. در شکل ۲ اطلاعات جمع‌آوری شده در راستای ورودی‌ها به سیستم و خروجی‌ها از سیستم (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان) را نشان می‌دهد.

بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در پردیس جدید در بازه زمانی یکساله (۱۴۰۲) و مرز سیستم دروازه به دروازه است که محوطه پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منبع طبیعی گرگان است که شامل کلاس‌ها درسی، آزمایشگاه‌ها و بخش اداری دانشگاه است. داده‌های این پژوهش میدانی بوده و واحد عملکردی این پژوهش کل پرسنل و دانشجویان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان واحد پردیس برابر با ۴۱۲۱ نفر است.

گام دوم: فهرست‌نویسی: در این مرحله فهرستی از موارد ورودی به سیستم شامل تعداد دانشجویان،



شکل ۲- ورودی و انرژی‌های دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

با توجه به هدف و کاربرد تحقیق مورد نظر می‌توان از هریک از روش‌های فوق استفاده کرد، در این مطالعه از روش EF که محاسبات آن منطبق با شبکه جهانی ردپا است، استفاده شد. در این روش، ردپای بوم‌شناختی به عنوان زمین و آبی که از نظر بیولوژیکی مصرف می‌شود و جمعیت برای تولید منابع مورد نیاز و امحاء بخشی از زباله‌های تولید شده توسط مصرف سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای به آن نیاز دارند، محاسبه شد.

گام سوم: ارزیابی اثرات (محاسبه ردپای بوم‌شناختی)
با استفاده از منابع ورودی شناسایی‌شده و انتشارات به محیط: روش‌های مختلفی جهت محاسبه ردپای بوم‌شناختی با رویکرد ارزیابی چرخه حیات در نرم افزار سیماپرو ارائه شده است. از پرکاربردترین روش‌ها جهت محاسبه ردپای بوم‌شناختی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: Ecological Scarcity (ES)، Ecological Footprint (EF)، Carbon Foot Printing (CFC) و EF Method (adapted) IPCC 2013 GWP (20 a) -.

در این روش ردپای بوم‌شناختی برابر است با:

$$EF^2 = EF_{direct} + EF_{CO2} + EF_{nuclear}$$

(Sustainability, 2016)

ردپای بوم‌شناختی = مجموع میزان اشغال مستقیم و غیرمستقیم زمین، میزان استفاده از انرژی هسته‌ای و میزان انتشار CO₂ ناشی از مصرف منابع فسیلی برای دستیابی به ردپای بوم‌شناختی دانشگاه ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، مرحله سوم از چرخه حیات شامل چهار گام اصلی است، صورت می‌گیرد و شامل مشخصه‌سازی، نرمال‌سازی، وزن‌دهی و محاسبه نمره نهایی که در ادامه شرح داده می‌شوند:

مشخصه‌سازی (Characterization): در این مرحله، داده‌های مرحله فهرست موجودی به دسته‌های مختلف اثرات محیط‌زیستی مرتبط می‌شوند. روش EF، همه ورودی‌ها و خروجی‌ها (مانند انرژی مصرفی و گازهای آلاینده) را به واحد مشترک هکتار جهانی (gha) تبدیل می‌کند. این تبدیل از طریق ضرایب مشخصه‌سازی انجام می‌شود که در نرم‌افزار SimaPro به‌صورت تعبیه‌شده در دسترس است (European Commission – JRC, 2012).

نرمال‌سازی (Normalization): در این گام، مقادیر مشخصه‌سازی‌شده با داده‌های مرجع جهانی مقایسه می‌شوند. این کار کمک می‌کند تا اهمیت نسبی هر دسته اثر در مقایسه با کل فشار محیط‌زیستی انسانی مشخص گردد. داده‌های مرجع و ضرایب نرمال‌سازی بر اساس دستورالعمل‌های اتحادیه اروپا تعیین شده‌اند (Zampori & Pant, 2019).

وزن‌دهی (Weighting): مرحله وزن‌دهی سومین مرحله از ارزیابی چرخه حیات به‌منظور دستیابی به نمره نهایی واحد است. در مرحله وزن‌دهی، نتایج مرحله نرمال‌سازی هر طبقه اثر در فاکتور وزن‌دهی که نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن طبقه اثر است ضرب می‌شود. بکارگیری فاکتورهای وزن‌دهی که از روش‌های مختلف محاسبه شده‌اند نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند. در روش EF جهت

وزن‌دهی از دو فاکتور وزن‌دهی به شرح ذیل استفاده می‌شود:

- فاکتور وزن‌دهی ۴۰۰ برای شاخص‌های محیط زیستی سطح میانی زیرمجموعه شاخص‌های سطح نهایی سلامت انسان و کیفیت اکوسیستم
- فاکتور وزن‌دهی ۲۰۰ برای شاخص‌های محیط‌زیستی سطح میانی زیرمجموعه شاخص سطح نهایی منابع

از فواید اصلی وزن‌دهی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اعمال اولویت و اهمیت نسبی طبقه آسیب‌ها نسبت به یکدیگر، برای مثال در شیوه‌ی وزن‌دهی روش EF اهمیت نسبی طبقه کیفیت اکوسیستم بیشتر از آسیب به سلامت انسان و طبقه آسیب به منابع کمتر از دو طبقه دیگر است.
- تسهیل در مقایسه، برای مثال وجود شاخص واحد این امکان را فراهم می‌آورد که برای تشخیص سریع کل اثرات محیط‌زیستی یک مجموعه و مقایسه با کل اثرات محیط‌زیستی یک مجموعه دیگر، به نمره نهایی آن‌ها توجه نمود.
- تسهیل در توضیح اثرات محیط زیستی و تفسیر نتایج ارزیابی چرخه حیات (Castellani et al., 2016).

نمره نهایی (Single Score): در مرحله پایانی، با ترکیب نتایج نرمال‌سازی و وزن‌دهی، شاخص ترکیبی نهایی محاسبه شد. این شاخص، فشار کلی سیستم بر منابع زیستی زمین را در قالب واحد ۳pt نشان می‌دهد.

در این مطالعه علاوه بر استفاده از روش EF برای بررسی ردپای بوم‌شناختی، از روش AWARE برای بررسی ردپای آب و از روش IPCC برای بررسی ردپای کربن در نرم افزار سیماپرو با پایگاه داده Ecoinvent استفاده است.

ردپای آب – روش AWARE: روش AWARE یکی از جدیدترین روش‌های ارزیابی اثرات مصرف آب در تحلیل

^۲ یک pt برابر با یک هزارم بار محیط‌زیستی سالانه به ازای هر فرد است. هر چه این عدد کوچکتر باشد بیانگر اثرات سوء کمتر و در نتیجه ردپای اکولوژیک کمتری بر محیط است.

^۲ ردپای بوم‌شناختی برابر است با مجموع زمان اشغال مستقیم و غیرمستقیم زمین بعلاوه میزان استفاده از انرژی هسته‌ای و انتشارات CO₂ ناشی از مصرف منابع فسیلی

تفسیر، مرحله پایانی LCA است که تحلیل فهرست‌نویسی و ردپای بوم‌شناختی برای رسیدن به نتایج نهایی و پیشنهادات با هم ادغام می‌شوند. نتایج این تفسیر می‌تواند به صورت نتایج و توصیه‌های متناسب با هدف و محدوده مطالعه برای تصمیم‌گیران به کار رود. با توجه به ایزو ۱۴۰۴۰:۲۰۰۶، تفسیر می‌تواند (ISO, 2020) شامل موارد زیر باشد:

- تشخیص و تعیین مسائل حائز اهمیت بر مبنای نتایج مراحل دوم و سوم

- نتایج، محدودیت‌ها و پیشنهادات

یکی از اهداف اصلی و کلیدی تفسیر چرخه حیات، تعیین سطح اطمینان در نتایج نهایی و مرتبط ساختن آن‌ها به صورت عادلانه، کامل و دقیق است. در این مرحله نتایج حاصل در ارتباط با هدف تحقیق تفسیر شده و راهکارهای مدیریتی ارائه خواهد شد.

نتایج

نتایج ردپای اکولوژی

مشخصه‌سازی ردپای اکولوژی: در گام مشخصه‌سازی اثر مداخلات محیط‌زیستی تخصیص داده‌شده به یک طبقه اثر مشخص‌شده و بر اساس واحد متعارف برای همان طبقه، کمی می‌شود و مجموع اثرات به‌صورت عددی در محدوده $1 \pm$ تا $100 \pm$ ارائه می‌شود. بدین‌صورت که مقدار هر ماده در ضریبی که نشان‌دهنده سهم نسبی آن از اثرات محیط‌زیستی است، ضرب می‌شود. در گام مشخصه‌سازی اثرات وارد بر یک طبقه اثر، قابل‌مقایسه با اثرات وارد بر یک طبقه اثر دیگر نیستند و تنها می‌توان عواملی را که در اثرات محیط‌زیستی وارد بر یک طبقه اثر نقش دارند شناسایی کرد. در این پژوهش طبق جدول ۱ و شکل ۳ ذخیره آب بیشترین اثر سازگار به محیط‌زیست را در تمامی طبقات دارد. بیشترین اثر منفی هم مرتبط با مصرف برق دانشگاه است.

چرخه حیات است که به منظور سنجش تأثیرات مصرف آب بر دسترسی منابع آب شیرین منطقه‌ای توسعه یافته است. ردپای آب به مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در کل مجموعه، می‌پردازد. در روش AWARE به این سوال پاسخ داده می‌شود که محصول و یا فعالیت مورد مطالعه به چه میزان پتانسیل محروم کردن سایر مصرف‌کنندگان (انسان یا اکوسیستم) را به واسطه مصرف آب در حین فرآیند تولید محصول و یا انجام فعالیت خود دارد. این روش با در نظر گرفتن دسترسی نسبی به منابع آب در هر منطقه، اثرات مصرف آب را به صورت شاخصی بدون واحد گزارش می‌کند که امکان مقایسه بین مناطق مختلف را فراهم می‌سازد. AWARE به‌عنوان استاندارد در ارزیابی اثرات آب مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط پروژه‌های بین‌المللی مانند ILCD پشتیبانی می‌شود (Boulay et al., 2018).

ردپای کربن - روش IPCC GWP: ردپای کربن مقیاسی از مقدار کل خروجی دی‌اکسید کربن (CO_2) و متانول (CH_4) مربوط به یک سیستم یا فعالیت معین با در نظر گرفتن همه منابع، فرونشست‌ها و ذخایر در محدوده زمانی و مکانی آن سیستم یا فعالیت است. این مقیاس به صورت معادل دی‌اکسیدکربن (CO_2eq) با استفاده از پتانسیل گرمایش جهانی ۲۰ ساله (GWP20) محاسبه می‌شود. این روش برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی در تحلیل چرخه حیات، بر اساس شاخص‌های گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی است. داده‌های IPCC به‌روزرسانی شده و در گزارش‌های سالانه و دوره‌ای این سازمان منتشر می‌شوند. این روش به کمک مقادیر گازهای گلخانه‌ای طی دوره‌های زمانی مشخص اثرات تغییر اقلیم را در قالب معادل CO_2 گزارش می‌کند (IPCC, 2014; Myhre et al., 2013).

گام چهارم: تفسیر نتایج: تفسیر نتایج و اتخاذ تصمیم (مقایسه داده‌های مربوط به تحلیل فهرست و مرحله محاسبه ردپای بوم‌شناختی جهت شناسایی شاخص‌ترین اثرات و ارائه راهکارها):

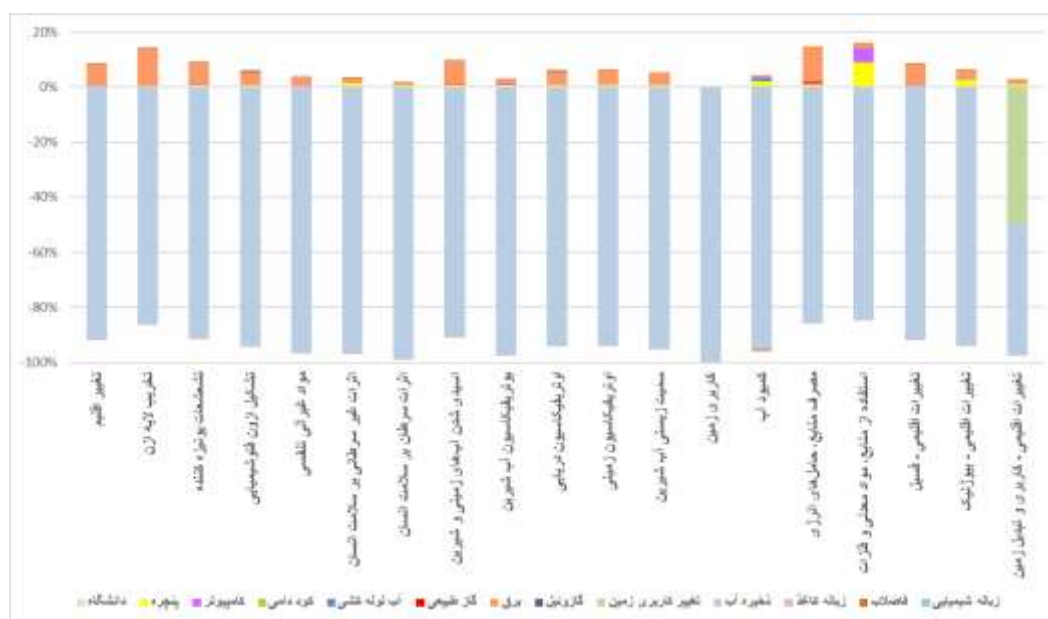
جدول ۱- مشخصه‌سازی ردپای اکولوژی دانشگاه به‌روش Ecological Footprint

مقدار نهایی	واحد اندازه‌گیری	طبقه اثر	
$-2/5 \times 10^{-4}$	kg CO ₂ eq	Climate change	تغییر اقلیم
$-0/0141$	kg CFC11 eq	Ozone depletion	تخریب لایه ازن
-857	kBq U-235 eq	Ionising radiation, HH	تشعشعات یونیزه کننده
-83/5	kg NMVOC eq	Photochemical ozone formation, HH	تشکیل ازن فتوشیمیایی
$-0/0187$	disease inc.	Respiratory inorganics	مواد غیرآلی تنفسی
$-0/00386$	CTUh	Non-cancer human health effects	اثرات غیر سرطانی بر سلامت انسان
$-0/0154$	CTUh	Cancer human health effects	اثرات سرطان بر سلامت انسان
-86/2	mol H ⁺ eq	Acidification terrestrial and freshwater	اسیدی شدن آب‌های زمینی و شیرین
-6/84	kg P eq	Eutrophication freshwater	یوتروفیکاسیون آب شیرین
-23/3	kg N eq	Eutrophication marine	اوتروفیکاسیون دریایی
-256	mol N eq	Eutrophication terrestrial	اوتروفیکاسیون زمینی
$-2/49 \times 10^{-4}$	CTUe	Ecotoxicity freshwater	سمیت زیستی آب شیرین
$-2/91 \times 10^{-6}$	Pt	Land use	کاربری زمین
$-1/06 \times 10^{-4}$	m3 depriv.	Water scarcity	کمبود آب
$-1/56 \times 10^{-5}$	MJ	Resource use, energy carriers	مصرف منابع، حامل‌های انرژی
$-0/0562$	kg Sb eq	Resource use, mineral and metals	استفاده از منابع، مواد معدنی و فلزات
$-2/04 \times 10^{-4}$	kg CO ₂ eq	Climate change – fossil	تغییرات اقلیمی – فسیل
-12/2	kg CO ₂ eq	Climate change – biogenic	تغییرات اقلیمی – بیوژنیک
-16/6	kg CO ₂ eq	Climate change - land use and transform.	تغییرات اقلیمی – کاربری و تبدیل زمین

وزن‌دهی و نمره نهایی ردپای اکولوژیک: مرحله

وزن‌دهی سومین مرحله از ارزیابی چرخه حیات به‌منظور دستیابی به نمره نهایی واحد است. در مرحله وزن‌دهی، نتایج مرحله نرمال‌سازی هر طبقه اثر در فاکتور وزن‌دهی

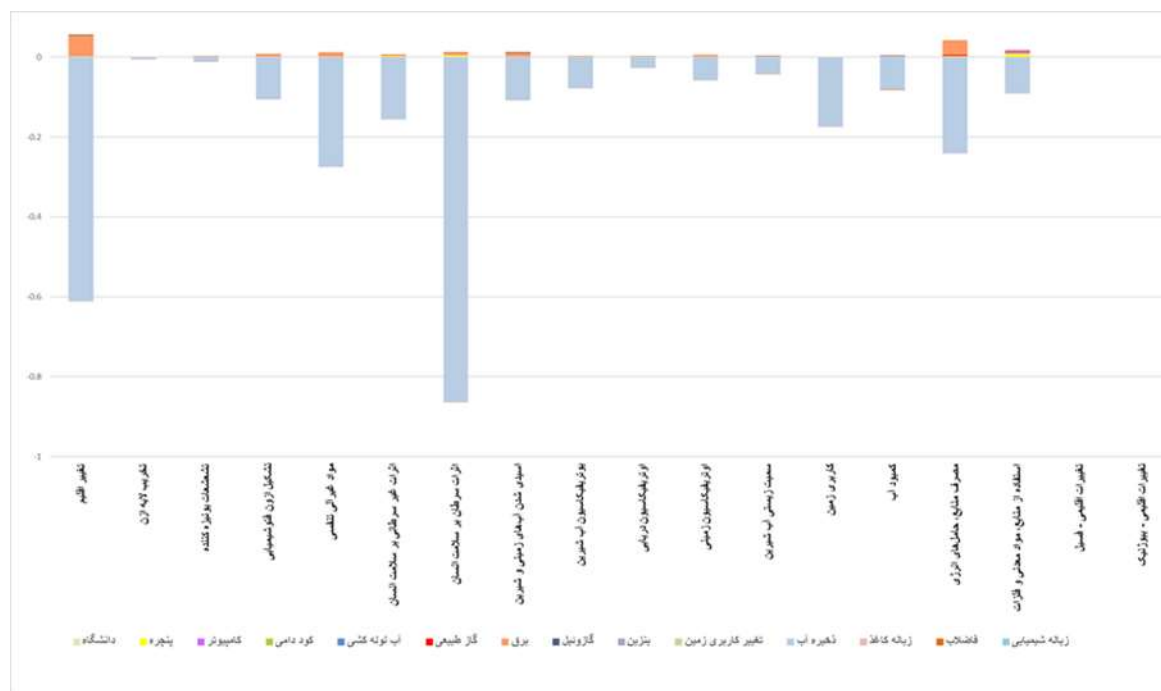
که نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن طبقه اثر است ضرب می‌شود. نتایج مربوط به بخش وزن‌دهی در جدول ۲ و شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳- نمودار مربوط به مرحله مشخصه‌سازی به روش EF

جدول ۲- وزن دهی ردپای اکولوژی دانشگاه به روش Ecological Footprint

مقدار نهایی	واحد اندازه‌گیری	طبقه اثر
-۰/۵۵	Pt	Climate change
-۰/۰۰۴	Pt	Ozone depletion
-۰/۰۱	Pt	Ionising radiation, HH
-۰/۰۹	Pt	Photochemical ozone formation, HH
-۰/۰۲۶	Pt	Respiratory inorganics
-۰/۱۵	Pt	Non-cancer human health effects
-۰/۸۵	Pt	Cancer human health effects
-۰/۰۹	Pt	Acidification terrestrial and freshwater
-۰/۰۷	Pt	Eutrophication freshwater
-۰/۰۲	Pt	Eutrophication marine
-۰/۰۵	Pt	Eutrophication terrestrial
-۰/۰۴	Pt	Ecotoxicity freshwater
-۰/۱۷	Pt	Land use
-۰/۰۷	Pt	Water scarcity
-۰/۱۹	Pt	Resource use, energy carriers
-۰/۰۷	Pt	Resource use, mineral and metals
۰	Pt	Climate change - fossil
۰	Pt	Climate change - biogenic
۰	Pt	Climate change - land use and transform.
-۲/۷۵	Pt	مقدار نهایی



شکل ۴- نمودار مربوط به مرحله وزن دهی به روش EF

است و بیشترین اثر سازگار با محیط زیست بر ردپای اکولوژیک دانشگاه مرتبط با ذخیره آب و سیستم بازچرخانی آب دانشگاه است.

ردپای کربن: هدف از بکارگیری روش IPCC GWP، بررسی ردپای کربن سیستم است. نتایج بدست آمده در جدول ۳ و شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج مربوط به بررسی ردپای کربن در دانشگاه

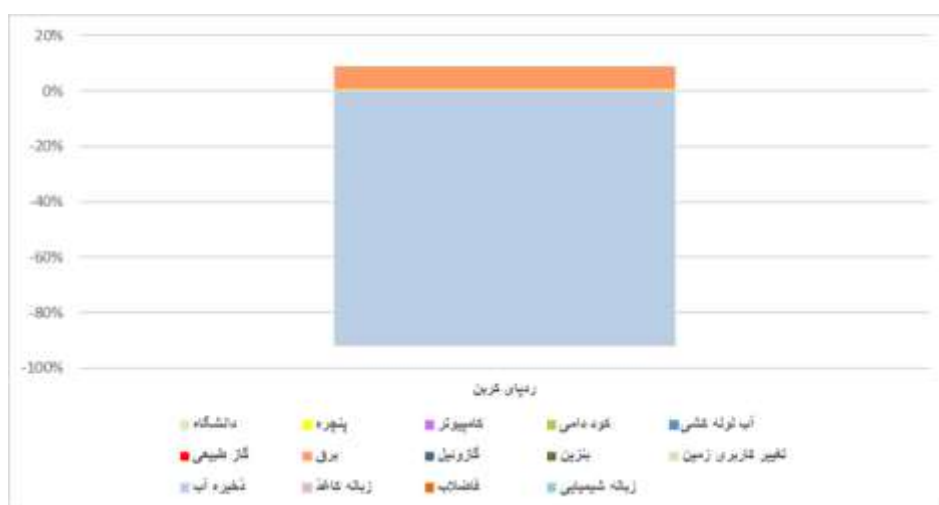
IPCC GWP	طبقه اثر
kg CO2 eq	واحد
$2/17 \times 10^4$	کل
۱۳۵	پنجره
۲۵/۴	کامپیوتر
۰/۱۴	کود دامی
۱/۸۶	آب لوله کشی
۲۷/۳	گاز طبیعی
$1/97 \times 10^3$	برق
۷/۷۴	گازوئیل
۱۵/۹	بنزین
-۹/۲۴	تغییر کاربری زمین
$-2/39 \times 10^{-4}$	ذخیره آب
-۰/۱۷	زباله کاغذ
۱/۱۷	فاضلاب
-	زباله شیمیایی

پس از اجرای مرحله وزن دهی، نمره نهایی ردپای بوم‌شناختی واحد مورد بررسی محاسبه خواهد شد. مطابق جدول زیر امتیاز نهایی ردپای بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برابر با $2/75$ pt - برآورد شده است. مطالعه‌ای که ردپای ۴۰ دانشگاه را بررسی کرده است نشان می‌دهد که عملکرد متوسط دانشگاه‌ها معادل حدود $2/5$ برابر ظرفیت محیط‌زیستی زمین بوده است (Beckmann et al., 2013). بنابراین، مقدار $2/75$ pt برای دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به نظر می‌رسد، نه تنها پایین‌تر از میانگین جهانی است، بلکه در مقایسه با بسیاری از دانشگاه‌ها نیز عملکرد مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. در این مطالعه، همان‌طور که در راهنمای تفسیر نتایج LCA آمده است، مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش خالص در آثار محیط‌زیستی هستند که ناشی از اقدامات دوست‌دار و سازگار با محیط‌زیست است (ISO, 2006). پس هر چه این عدد کوچکتر باشد بیانگر اثرات سوء کمتر و در نتیجه ردپای اکولوژیک کمتری بر محیط است. وجود علامت منفی در برخی از طبقات اثر مورد بررسی بیانگر اثرات سازگار با محیط‌زیست و نتیجه اعمال اقدامات دوست‌دار و سازگار با محیط‌زیست در دانشگاه است که در نتیجه از بالا رفتن نمره نهایی (شاخص Pt) جلوگیری می‌کند. بیشترین اثر سوء بر ردپای اکولوژیک مربوط به برق مصرفی در دانشگاه

میانگین ردپای کربن سالانه یک فرد در کشورهای توسعه یافته حدود ۵ تن (۵۰۰۰ کیلوگرم) دی اکسید کربن است (Beckmann *et al*, 2013). مقدار به دست آمده در دانشگاه گرگان نشان دهنده تلاش های قابل توجه در کاهش ردپای کربن است، چرا که این عدد به طور قابل توجهی کمتر از استانداردهای جهانی است.

ردپای آب: هدف از بکارگیری روش AWARE بررسی ردپای آب سیستم است. نتایج بدست آمده در جدول ۴ و شکل ۶ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۵ که نتایج حاصل از بررسی ردپای کربن را نشان می دهد، اصلی ترین عوامل موثر بر کاهش ردپای کربن ذخیره آب است چرا که این اقدام باعث کاهش نیاز به پمپاژ آب، کاهش مصرف انرژی و در نهایت کاهش انتشار گازهای گلخانه ای شده است، در حالی که برق مصرفی در دانشگاه منجر به افزایش ردپای کربن در دانشگاه شده است. عدد نهایی بدست آمده برای ردپای کربن دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی $2/17 \times 10^4$ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن به ازای هر نفر است. برای مقایسه، بر اساس گزارش های بین المللی،

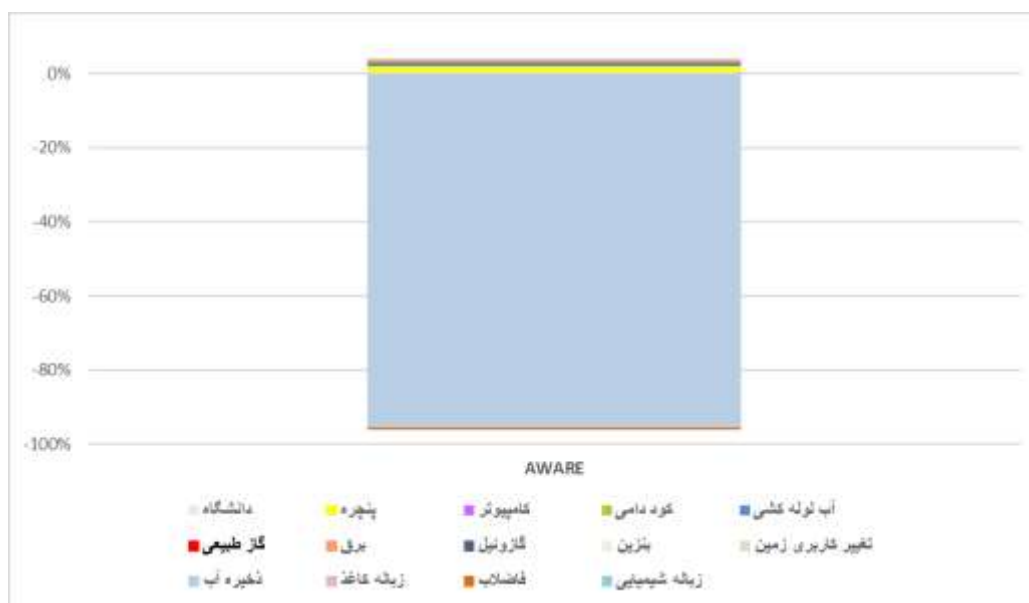


شکل ۵- نمودار مربوط به بررسی ردپای کربن

توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۶ نمره کل برآورد شده در خصوص ردپای آب برابر با $1/06 \times 10^4$ است. این مقدار نسبتاً بالا و منفی نشان دهنده کاهش قابل توجه مصرف آب و ردپای آب پایین دانشگاه است. برای مقایسه، تحقیقات بین المللی نشان می دهد که دانشگاه های مشابه در بازه ای بین $0/8 \times 10^4$ تا $1/2 \times 10^4$ متر مکعب به ازای هر نفر قرار دارند (Anderson *et al.*, 2018). بنابراین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در زمینه کاهش ردپای آب عملکرد مطلوبی دارد. موارد ارائه شده در جدول فوق هر یک در سابقه محیط زیستی خود به طور مستقیم و یا غیر مستقیم فرآیند استخراج، تولید، نگهداری در مصرف آب نقش داشته اند. در بررسی ردپای آب دانشگاه، ذخیره آب و مقدار کمی فاضلاب اثر سازگار با محیط زیست دارد و بیشترین اثر منفی هم مرتبط با پنجره و برق مصرفی است.

جدول ۱- نتایج مربوط به بررسی ردپای آب

Water use	طبقه اثر
m3	واحد
$-1/06 \times 10^4$	کل
۲۲۹	پنجره
۳/۶۶	کامپیوتر
۰/۰۵	کود دامی
۱۰۱	آب لوله کشی
۰/۰۳	گاز طبیعی
۱۰۰	برق
۰/۵	گازوئیل
۰/۸۱	بنزین
-۰/۰۱	تغییر کاربری زمین
$-1/09 \times 10^4$	ذخیره آب
-۰/۲۹	زباله کاغذ
-۷۰	فاضلاب
۰	زباله شیمیایی



شکل ۶- نمودار مربوط به بررسی ردپای آب

بحث

در این پژوهش، به منظور ارزیابی ردپای بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، از نرم‌افزار سیمپرو و رویکرد ارزیابی چرخه‌حیات استفاده شد. داده‌های مربوط به مصرف انرژی، آب و سایر منابع در سال تحصیلی ۱۴۰۲ جمع‌آوری گردید. برای محاسبه ردپای بوم‌شناختی از روش EF، ردپای کربن با روش IPCC GWP و ردپای آب با روش AWARE بهره گرفته شد. سپس داده‌ها تحلیل شده و نتایج مربوط به سهم هر عامل در ردپای کلی به صورت جداگانه ارائه گردید.

از مدل ردپای بوم‌شناختی می‌توان به عنوان ابزاری به منظور مدیریت دقیق مصرف منابع در بخش‌های مختلف استفاده نمود. در این پژوهش به منظور ارزیابی اثرات محیط زیستی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال تحصیلی ۱۴۰۲ به عنوان یک مرکز آموزشی، از مدل ردپای بوم‌شناختی در نرم‌افزار سیمپرو استفاده شد. امتیاز جمع نهایی ردپای بوم‌شناختی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برابر با $2/75$ pt - برآورد شد. بر اساس نتایج مطالعه انجام‌شده، بیشترین اثر منفی بر ردپای اکولوژیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان مربوط به برق مصرفی است. دلیل این امر آن است که بخش

عمده‌ای از برق تولیدی در ایران از منابع فسیلی حاصل می‌شود که منجر به انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای و تخریب منابع طبیعی می‌گردد (Gholami et al., 2021). از طرفی، در محیط‌های دانشگاهی مصرف انرژی عمدتاً به روشنایی، تهویه مطبوع، تجهیزات آزمایشگاهی و پمپاژ آب اختصاص دارد و این امر تأثیر اکولوژیک را افزایش می‌دهد (Bala & Yusuf, 2022). در مقابل، سیستم ذخیره‌سازی و بازچرخانی آب دانشگاه، با کاهش نیاز به منابع آب جدید، کاهش مصرف انرژی پمپاژ و افزایش رطوبت و پوشش گیاهی، بیشترین اثر مثبت و سازگار با محیط‌زیست را بر ردپای اکولوژیک دارد (Moradi-Joo et al., 2023). نتایج نشان داد که بیشترین اثرات سوء محیط‌زیستی مرتبط با ردپای اکولوژیک دانشجویان، اساتید و کارمندان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، بر طبقات اثر تغییر اقلیم و مصرف منابع به دلیل برق مصرفی دانشگاه وارد می‌شود. باتوجه به نتایج تحقیق حاضر، بیشترین ردپای اکولوژیک مربوط به مصرف انرژی است و نتایج حاصل با تحقیقات مشابه انجام شده در دانشگاه‌های سایر نقاط جهان همچون پرتغال (Nunes et al., 2013)، ردلندز آمریکا (Venetoulis, 2001) و تورنتو کانادا (Conway et al., 2008) هم‌خوانی دارد. این مطالعات نیز نشان داده‌اند که بخش انرژی به دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی،

بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات محیط‌زیستی دارد.

امتیاز نهایی ردپای کربن دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی $10^4 \times 2/17$ - کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن است. در مورد اثر ذخیره آب در ردپای کربن دانشگاه، مطالعات نشان می‌دهد که فرآیندهای مربوط به استخراج، پمپاژ، تصفیه و توزیع آب، انرژی‌بر هستند. لذا کاهش مصرف آب در دانشگاه‌ها منجر به کاهش تقاضا برای این فرایندها شده و در نتیجه ردپای کربن به‌صورت غیرمستقیم کاهش می‌یابد (Chini & Stillwell, 2018). از سوی دیگر، با توجه به اقلیم شمال کشور و وابستگی دانشگاه‌های کشاورزی به سیستم‌های سرمایشی، روشنایی و تجهیزات آزمایشگاهی، مصرف برق به‌طور معمول در این نوع دانشگاه‌ها بالا است. از آن‌جا که در ایران بخش عمده برق از نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی تولید می‌شود، مصرف بیشتر برق مستقیماً به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن منجر می‌شود (IEA, 2022). این امر در مورد دانشگاه گرگان نیز صادق است و یافته‌های این پژوهش مؤید همین موضوع است. همچنین، مطالعات در حوزه ردپای کربن دانشگاهی نشان داده‌اند که در دانشگاه‌های کشاورزی به دلیل وجود فضاهای سبز و تأسیسات مرتبط با گلخانه و کشاورزی، الگوی مصرف منابع با دانشگاه‌های فنی یا علوم انسانی متفاوت است (Gao et al., 2016) که می‌تواند باعث تقویت نقش مصرف آب یا برق در ردپای کربن شود. همزمان، اقدامات دانشگاه در حوزه ذخیره و بازچرخانی آب و ایجاد فضاهای سبز که باعث افزایش ذخیره کربن بیوژنیک و بازچرخانی منابع می‌شود، یک اثر مثبت و سازگار با محیط‌زیست بر محیط داشته‌اند؛ این الگو مشابه مطالعاتی است که نشان داده‌اند پوشش گیاهی شهری و زیرساخت‌های سبز می‌تواند جذب دی‌اکسیدکربن و کاهش اثر گرمایش شهری را تا حد زیادی تسهیل کند (Pune Sprawl, 2025). فضای سبز دانشگاه به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش ردپای کربن و بهبود شرایط محیط‌زیستی شناخته می‌شود. دانشگاه با ایجاد و حفظ فضاهای سبز و استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، نقش مؤثری در جذب کربن بیوژنیک و بهبود رطوبت محیطی دارد. با این حال، مدیریت پسماندهای جامد و مایع دانشگاه به‌طور جامع در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی

دقیق وضعیت مدیریت پسماند و ارائه راهکارهای بهینه جهت کاهش اثرات محیط‌زیستی ناشی از پسماندهای دانشگاه، می‌تواند در مطالعات آینده لحاظ شود.

نمره کل بدست آمده در خصوص ردپای آب برابر با $10^4 \times 1/06$ - مترمکعب است که ذخیره آب بیشترین اثر سازگار با محیط‌زیست را دارد. تقریباً آب در تمام فرآیندهای تولید و تبدیل در بخش انرژی از جمله استخراج و پردازش سوخت (سوخت‌های فسیلی، هسته‌ای و همچنین سوخت‌های زیستی) و تولید برق (ترمواالکترونیک، انرژی آبی و فناوری‌های تجدیدپذیر) عنصر حیاتی و ضروری است (Binejad et al., 2019). انرژی آبی به عنوان یک بخش انرژی تغییر یا گسترش می‌یابد و در واقع منابع آب منطقه‌ای در تولید سوخت و برق بسیار مهم و تأثیر گذار هستند و در نتیجه مصرف برق در یک مجموعه بر ردپای آب آن مجموعه اثر خواهد داشت. با توجه به بازچرخانی قابل توجه آب در بخش‌های مختلف دانشگاه و همچنین تصفیه آب و استفاده از آبیاری قطره‌ای در فضای سبز، از مهم‌ترین اقدامات زیست دوست‌در کاهش ردپای آب هستند. نتایج این پژوهش منجر به ارائه رویکردهای مدیریتی مناسب جهت کاهش پیامدها و اثرات منفی به کار رود. علاوه بر آن، پیشنهاد می‌شود چارچوب ارائه شده به‌عنوان یک الگوی واحد برای ارزیابی و سنجش این دانشگاه در سال‌های آتی و همچنین دیگر مراکز آموزشی کشور در سال‌های متوالی پیش‌رو مورد استفاده قرار گیرد تا روند تغییرات ممکن در میزان ردپای بوم‌شناختی مراکز قابل ارزیابی گردد. این تحقیق با محدودیت‌هایی همراه بود که باید در نظر گرفته شوند. نخست، داده‌های مرتبط با برخی بخش‌های دانشگاه مانند رستوران‌ها به دلیل شرایط پاندمی کرونا در دسترس نبود. همچنین، اطلاعات دقیق و تفکیکی مصرف انرژی و آب در ساختمان‌ها و واحدهای مختلف جمع‌آوری نشده است. این محدودیت‌ها می‌تواند تأثیراتی بر دقت برآورد ردپای بوم‌شناختی داشته باشد. علاوه بر این، عدم بررسی جامع مدیریت پسماند و نبود داده‌های طولی برای پایش روند تغییرات، از دیگر محدودیت‌های این مطالعه به شمار می‌روند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، داده‌های کامل‌تر و گسترده‌تری جمع‌آوری شده و ارزیابی‌های بلندمدت انجام شود. پیشنهادات ما در این پروژه شامل:

- campuses. Proceedings of the 13th International Australasian Campuses Towards Sustainability (ACTS) Conference, Sydney, Australia, pp. 1–16.
- 4- **Binejad, A., Ahmadpour Borazjani, M., Ziaei, S. and Mohammadi, H., 2019.** Barrasi-ye rabete-ye masraf-e āb va toolid-e enjerji dar Iran taye dore-ye 1357 ta 1395 ba roykard-e model-e STAR [Investigating the relationship between water consumption and energy production in Iran during 1979–2016 using the STAR model]. *Majalleh-ye Ecohydrology*, 6(2), pp.493–503. <https://doi.org/10.22059/ije.2019.275286.1047>
 - 5- **Boulay, A.M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M.J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A.V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S. and Pfister, S., 2018.** The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), pp.368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
 - 6- **Cafaro, P., Hansson, P. and Götmark, F., 2022.** Overpopulation is a major cause of biodiversity loss and smaller human populations are necessary to preserve what is left. *Biological Conservation*, 272, p.109646.
 - 7- **Castellani, V., Benini, L., Sala, S. and Pant, R., 2016.** A distance-to-target weighting method for Europe 2020. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), pp.1159–1169. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1079-8>.
 - 8- **Chini, C.M. and Stillwell, A.S., 2018.** The water intensity of the urban water supply system. *Environmental Research Letters*, 13(1), p.014009.
 - 9- **Conway, T.M., Dalton, C., Loo, J. and Benakoun, L., 2008.** Developing ecological footprint scenarios on university campuses: a case study of the University of Toronto at Mississauga. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 9(1): 4-20.
 - 10- **Elghamry, Y. and Hassan, A., 2021.** The impact of window parameters on energy consumption, environmental impact and CO₂ emissions in hot, semi-arid climates. *Energy and Buildings*, DOI available via MDPI.
- برآورد اطلاعات دقیق و پژوهشی مشابه در مورد دیگر فضاهاى دانشگاه از قبیل خوابگاه دختران، پسران، جنگل آموزشی شصت‌کلا و مزارع آموزشی
 - برآورد اطلاعات دقیق مربوط به جزئیات فنی تجهیزات مستقر در دانشگاه (مانند: کامپیوترها، مودم‌ها، سرورها، صندلی‌ها، دیتاپروژکتورها، تجهیزات سرمایشی، گرمایشی، آزمایشگاهی)
 - برآورد اطلاعات دقیق مربوط به واحد رستوران (سلف سرویس) دانشگاه (در این گزارش با توجه به این که جمع‌آوری اطلاعات مربوط به دوره پاندمی کرونا بوده است، اطلاعات این بخش لحاظ نشده است).
 - نصب کنتور آب و برق به تفکیک ساختمان‌ها و واحدهای مختلف جهت برآورد میزان دقیق مصرف
 - بررسی راهکارهای احتمالی در جهت مدیریت و اصلاح الگوی مصرف برق و گاز طبیعی (با توجه به این که این دو عامل نقش اصلی را در ردپای بوم‌شناختی دانشگاه داشته‌اند) و همچنین مدیریت بهتر آب و پسماند و فاضلاب
 - تکرار متناوب این مطالعه در سال‌های آتی جهت پایش میزان عملکرد دانشگاه در کاهش ردپای اکولوژیک

منابع

- 1- **Alizadeh, H., Lotfi, V. and Veysi, S., 2019.** Arzyabi-ye asarat-e zist-mohiti-ye karbarihaye amoozeshi ba estefade az model-e radpa-ye boom-shenakhti: motale'e-ye moredi-ye Daneshgah-e Kordestan [Environmental impact assessment of educational land uses using the ecological footprint model: A case study of University of Kurdistan]. *Motale'at-e Shahri – Daneshgah-e Kordestan*, 8(32), pp.77–88.
- 2- **Anderson, P., Green, T. and Hall, S., 2018.** Water footprint assessments in academic institutions: Benchmarking and improvement strategies. *Journal of Sustainable Water Management*, 5(2), pp.87–99.
- 3- **Beckmann, H., Rickards, S. and Barrett, J., 2013.** Ecological footprint benchmarking of 40 tertiary education

- Available at:
<https://www.iranmodares.com/article-index.php?ID=447>.
- 21- **ISO, 2020. ISO 14040: 2006/AMD 1: 2020.** Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework–Amendment 1. Junnila S., Horvath A. (2018). Life-cycle Environmental effects of an office building. *Infrastructure systems*;9(4):157–66.
 - 22- **Kouchaki, A., Nasiri, M. and Javadi, M., 2022.** Assessment of ecological footprint of students at Ferdowsi University of Mashhad. *Agricultural Ecology Journal*, 14(3), pp.399–413. Available at:
<https://civilica.com/doc/1570870>.
 - 23- **Lin, X., Cai, H. and Zhao, S., 2024.** An Empirical Analysis of Carbon Emissions in Higher Education Institutions: A Case Study of Zhejiang Ocean University Using Emission Factor Methodology. *Sustainability*, 16(21), p.9412. [online] Available at:
<https://doi.org/10.3390/su16219412>.
 - 24- **Mancini, L., et al., 2024.** Ecological footprint as a tool for sustainability assessment: recent advances and challenges. *Environmental Research Communications*.
 - 25- **Mutambo, N., Peirson-Smith, A., KeChi-Okafor, C., Irving-Munro, A., Sheridan, K.J., Prendergast-Miller, M.T., Namdeo, A., Stanton, T., Gallidabino, M.D. and James, A., 2024.** Mapping the environmental impact assessment landscape in the fashion and textile industries: critical gaps and challenges. *Sustainability*, 16(19), p.8377.
 - 26- **Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. and Zhang, H., 2013.** Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
 - 11- **Elsharkawy, M.A.M.M., Hegazy, I., Elbeltagi, I. and Elshaer, I.A., 2022.** Carbon footprint at institutions of higher education. *Science of the Total Environment*, 804, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150158>.
 - 12- **Ercin, A.E. and Hoekstra, A.Y., 2014.** Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environmental International*, 64, pp.71–82. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>
 - 13- **European Commission – JRC, 2012.** Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Publications Office of the European Union. Available at:
<https://data.europa.eu/10.2788/62262>
 - 14- **Gao, T., Shen, L. and Shen, M., 2016.** Urban building sustainability: An overview on performance assessment tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, pp.881–891.
 - 15- **Global Footprint Network, 2017.** National footprint accounts. Available at: <https://www.footprintnetwork.org> [Accessed 9 August 2025].
 - 16- **Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GAU), 2024.** Darbare-ye daneshgah [About the university]. Gau.ac.ir. Available at:
<https://www.gau.ac.ir/page?pageid=6>.
 - 17- **IEA (International Energy Agency), 2022.** CO₂ emissions from fuel combustion – Highlights. [online] Available at:
<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview> [Accessed 2 Jul. 2025].
 - 18- **International Organization for Standardization, 2006.** Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). ISO, Geneva.
 - 19- **IPCC, 2014.** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
 - 20- **Iran Modares, 2021.** Daneshgah-e ‘Olum-e Keshavarzi va Manabe’-e Tabii-ye Gorgan: Tarikhcheh va mo’arrefi [University of Agricultural Sciences and Natural Resources of Gorgan: History and introduction]. Iranmodares.com.

- 36- Sustainability, P., 2016. SimaPro database manual Methods library. SimaPro: Utrecht, The Netherlands.
- 37- Tettey, U. et al., 2022. Literature review on estimating the impact of glazing on energy demand. *Energies*, 16(11), p.4429. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4429>.
- 38- Valls-Val, M. and Bovea, M.D., 2021. Carbon footprint in higher education institutions: A literature review and prospects for future studies. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), pp.1-18. Available at: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-021-00454-6>.
- 39- Venetoulis, J., 2001. Assessing the ecological impact of a university: the ecological footprint for the University of Redlands. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2(2):197-180.
- 40- Xue, Z., Liu, H., Zhang, Q., Wang, J., Fan, J. and Zhou, X., 2020. The Impact Assessment of Campus Buildings Based on a Life Cycle Assessment–Life Cycle Cost Integrated Model. *Sustainability*, 12(1), 294.
- 41- Yazdkhasti, B., Hajilou, F. and Alizadeh Aghdam, M., 2013. Examining the relationship between ecological literacy and ecological footprint: Case study of Tabriz citizens. *Urban Sociological Studies (Motale'at-e Jame'e-shenakhti-ye Shahri)*, 3(7), pp.77–103. Available at: <https://www.sid.ir/paper/210368/fa>.
- 42- Zafar, M.W., Zaidi, S.A.H., Khan, N.R., Mirza, F.M., Hou, F. and Kirmani, S.A.A., 2019. The impact of natural resources, human capital, and foreign direct investment on the ecological footprint: the case of the United States. *Resources Policy*, 3, p.101428.
- 43- Zampori, L. and Pant, R., 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 29682 EN. <https://doi.org/10.2760/424613>.
- 44- Zhao, X., et al., 2023. Life cycle assessment applications for environmental sustainability: current trends and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 382, p.135233.
- 27- Nguyen, H., Wiedmann, T. and Lenzen, M., 2020. The carbon footprint of a major university. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119742. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119742>
- 28- Nunes, L., Catarino, A., Teixeira, M.R. and Cuesta, E., 2013. Framework for the inter-comparison of ecological footprint of universities. *Ecological Indicators*, 32: 276-284.
- 29- Ozawa-Meida, L., Brockway, P., Letten, K., Davies, J. and Vaughan, N., 2013. Measuring carbon performance in a UK university through a consumption-based carbon footprint: De Montfort University case study. *Journal of Cleaner Production*, 56, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.028>.
- 30- Pune Sprawl (Koparde and Chalke), 2025. Urban sprawl reduces carbon sequestration by 34% in Pune. *Times of India*, June 2025.
- 31- See, T.A., Wai, C.W. and Zen, I.S., 2016. Ecological Footprint of Research University Students: A Pilot Case Study in Universiti Teknologi Malaysia. In *MATEC web of conferences* (Vol. 66, p. 00073).
- 32- Sharma, A., Saxena, A, Sethi, M. and Shree, V., 2011. Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1; 15(1):871-5.
- 33- Silva, D., Nunes, A.O., da Silva Moris, A., Moro, C. and Piekarski, T.O.R., 2017. How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. In *Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica*, Medellin, Colombia (pp. 10-15).
- 34- Sonetti, G., Barioglio, C. and Campobenedetto, D., 2020. Education for Sustainability in Practice: A Review of Current Strategies within Italian Universities. *Sustainability*, 12(13), 5246. <https://doi.org/10.3390/su12135246>
- 35- Sonetti, G., Lombardi, P. and Chelleri, L., 2016. True Green and Sustainable University Campuses? *Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. <https://doi.org/10.3390/su8010083>





Assessment of the Ecological Footprint of the University Based on the Life Cycle Assessment Approach (Case Study: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources)

Seyedhamed Mirkarimi¹, Sepideh Saeidi^{*1}, Shaghayegh Ebrahimi¹, Mohsen Salehi¹, Fatemeh Chitband¹

1*- Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Original Article

Received:
2025.07.07

Accepted:
2025.08.24

Keywords:
Ecological Footprint, Water Footprint, Carbon Footprint, Greenhouse Gas Emissions, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Abstract

Introduction: Urban land uses, including educational institutions, especially universities, have a significant share in the consumption of natural resources and the production of pollutants, and consequently exert considerable impacts on the environment. Due to the service-oriented nature and the wide range of educational, research, and support activities, universities consume large amounts of energy, water, and other resources. Therefore, accurate and comprehensive assessment of their environmental impacts through indicators such as the ecological footprint is an undeniable necessity for sustainable resource management and reducing environmental consequences.

Material and Methods: The present study was conducted with the aim of evaluating the ecological footprint of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources in the new campus area, using the life cycle assessment approach. In this study, by identifying the consumed resources and related environmental flows, an attempt was made to provide a quantitative picture of the impacts resulting from university activities. The results of this research can be used as a basis for optimizing consumption patterns, developing environmental strategies, and moving towards green universities. Considering the significant share of universities in resource consumption and pollutant production, and the lack of comprehensive and scientific assessments of the environmental impacts of educational institutions in the country, conducting this research with a life cycle approach is an important step towards improving sustainable management and enhancing the environmental performance of universities. In this study, in addition to the ecological footprint by the EF method, the water footprint by the AWARE method, and also the carbon footprint by the IPCC method in 2023 were examined. The total number of staff and students of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources in the campus unit is 4,121.

Results: The final estimated ecological footprint score of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources is -2.75 pt. The greatest negative impact on the university's ecological footprint relates to electricity consumption, and in the impact categories, to climate change, followed by resource consumption, while the greatest environmentally compatible effect on the university's ecological footprint is related to water storage and the university's water recycling system. The

results obtained from examining the carbon footprint show that the final value obtained for the carbon footprint of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources is -2.17×10^4 kilograms of carbon dioxide equivalent. Water storage is one of the most effective solutions in reducing the carbon footprint, since this action, by reducing dependence on pumping operations, significantly reduces energy consumption and ultimately leads to a reduction in greenhouse gas emissions. Electricity consumption at the university has increased its carbon footprint. The total estimated score for the water footprint of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources is -1.06×10^4 .

Discussion: The measures presented, such as creating water storage and recycling systems and green spaces at the university, have positive and environmentally compatible effects. Analysis of the ecological footprint of universities using the life cycle approach can be used as a model for other educational institutions to reduce environmental impacts and for effective planning. This study shows that accurate and comprehensive assessments are an effective step in optimizing resource consumption and protecting the environment. Overall, this research, through a multidimensional evaluation of environmental impacts, reveals the importance of resource management and the implementation of sustainable solutions in universities and can pave the way for improving the environmental performance of educational institutions.