

Biomass to bioenergy value-chain and optimizing costs of transportation network

Sattar Ezzati*

Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: sattar.ezzati@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 08.13.2024

Revised: 09.29.2024

Accepted: 10.19.2024

Keywords:

Modeling,
Optimization,
Remote sensing,
Residue biomass,
Transportation

ABSTRACT

Background and Objectives: Lignocellulosic biomass, a promising renewable resource, has gained attraction as a potential alternative for biofuel production and climate change mitigation. Agricultural practices often generate significant quantities of lignocellulosic residues (e.g., crop stalks), which are frequently abandoned or burned, leading to adverse environmental impacts. Wisely collection and conversion of these residues into bioenergy could offer a twofold benefit: reducing environmental harm and partially displacing fossil fuels. The study aimed at evaluating the potential of lignocellulosic biomass from agricultural activities in Golestān province as a sustainable source for renewable energy production; and estimating the transportation costs associated with the biomass feedstock within the context of a pilot project.

Materials and Methods: Satellite image processing (Sentinel-2 and Landsat 8) was employed to generate land-use maps and identify the spatial distribution of biomass supply sources from four major crops (wheat, soybean, rice, and rapeseed) and estimate the available biomass volume from each crop in energy units (kWh). Subsequently, an optimization model was developed to design a biomass-to-energy supply chain network for the study area.

Results: The overall classification accuracy and kappa coefficient for wheat and rapeseed using Sentinel images were 82% and 0.74, respectively. Soybean and rice classifications using Landsat images achieved 76% and 0.63 accuracy, respectively. Area estimation identified 84,104 farms exceeding 2 ha, encompassing a total area of 468,000 ha. This represents an 11% bias compared to statistics provided by Iran's Ministry of Agriculture organization for the same period. The optimistic scenario suggests a potential harvest of 3.8 million kWh of energy from the identified farms. The optimization model, considering both fixed and variable transportation costs, determined that locating three biorefineries would be sufficient to process the biomass and generate electricity. Transportation costs for this scenario were: US\$222 million fixed cost, US\$1.599 billion variable cost, and a total cost of US\$1.821 billion. The optimal scenario also minimized transportation distances, with a maximum on-site distance of 81 km and an average distance of 27 km. These distances represent a significant reduction compared to single-site (74% decrease) and two-site (34% decrease) scenarios.

Conclusion: The results highlight the potential of utilizing agricultural biomass for biofuel production in Golestān province. Developing a diversified energy portfolio that reduces dependence on fossil fuels and mitigates their environmental impacts necessitates further research in designing biomass-to-bioenergy value-chain networks.

Cite this article: Ezzati, Sattar. 2024. Biomass to bioenergy value-chain and optimizing costs of transportation network. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (3), 71-95.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22711.2072

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

زنجیره تأمین زیست‌توده- انرژی و بهینه‌سازی هزینه‌های شبکه حمل‌ونقل

ستار عزتی*

نویسنده مسئول، استادیار گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: sattar.ezzati@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸</p> <p>واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، حمل‌ونقل، زیست‌توده، سنجش‌ازدور، مدل‌سازی</p>	<p>سابقه و هدف: زیست‌توده لیگنوسلولزی به‌عنوان یکی از جایگزین‌های نویدبخش برای تولید سوخت‌های زیستی و مقابله با تغییرات اقلیمی مطرح است. بخش عمده زیست‌توده حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در عرصه یا رهاشده و یا سوزانده می‌شود. نتیجه این عمل، برجای گذاشتن تأثیرات نامطلوب بر روی محیط‌زیست است، اما جمع‌آوری هدفمند آن می‌تواند هم اثرات نامطلوب محیطی مانند آلودگی هوا در اثر سوزاندن را کاهش داده و هم بخشی از نیاز کشور به استفاده از انرژی‌های فسیلی را مرتفع سازد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی پتانسیل منابع لیگنوسلولزی حاصل از برداشت نهایی محصولات کشاورزی شامل گندم، برنج، سویا و کلزا به‌عنوان مواد اولیه جهت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی الکتریسیته) به‌عنوان یک طرح پابلوت در استان گلستان در شمال ایران می‌باشد.</p> <p>مواد و روش‌ها: ابتدا نقشه کاربری اراضی و پراکنش مکانی منابع عرضه زیست‌توده از ۴ کشت عمده (گندم، سویا، برنج و کلزا) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای (سنیتل-۲ و لندست ۸) تهیه شد. حجم زیست‌توده قابل‌عرضه از هر یک از کشت‌ها به واحد انرژی (کیلووات ساعت) برآورد گردید. در مرحله بعد، یک مدل بهینه‌سازی جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده- انرژی در سطح منطقه مورد‌مطالعه توسعه داده شد.</p> <p>نتایج: نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، صحت کلی و ضریب کاپا طبقه‌بندی برای محصول گندم و کلزا معادل ۰/۸۲ و ۰/۷۴ به ترتیب و برای محصول سویا و برنج معادل ۰/۷۶ و ۰/۶۳ به ترتیب بوده است. نتایج برآورد مساحت تعداد ۸۴۱۰۴ مزرعه (بالای ۲ هکتار) با مساحت ۴۶۸ هزار هکتار را شناسایی نمود که با آمار ارائه‌شده توسط جهاد کشاورزی اریبی ۱۱٪ را نشان می‌دهد. مقدار زیست‌توده قابل‌برداشت از این مزارع معادل ۳/۸ میلیون کیلووات انرژی در راه‌حل خوش‌بینانه بوده است. نتایج مدل بهینه‌سازی پیشنهاد احداث ۳ پالایشگاه زیستی برای فرآوری زیست‌توده و تبدیل به انرژی الکتریسیته را ارائه داد. در نقطه بهینه، هزینه</p>

حمل و نقل معادل ۲۲۲ میلیون دلار، هزینه متغیر ۱۵۹۹ میلیون دلار و مجموع هزینه‌ها معادل ۱۸۲۱ میلیون دلار بوده است. حداکثر فاصله حمل و نقل به ازای هر سایت ۸۱ کیلومتر و متوسط آن ۲۷ کیلومتر است که به اندازه ۷۴٪ نسبت به راه حل ۱ (یک سایت در کل عرصه) و ۳۴٪ نسبت به راه حل ۲ (دو سایت در کل عرصه) کاهش نشان داد.

نتیجه گیری: انجام چنین پژوهش‌هایی به منظور تنوع بخشی به منابع انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در کشور ضروری بوده و در این راه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به عنوان ابزاری ارزان و مناسب در پتانسیل سنجی منابع لیگنوسلولزی برای طراحی زنجیره تأمین زیست توده- انرژی دارای اهمیت است.

استناد: عزتی، ستار (۱۴۰۳). زنجیره تأمین زیست توده- انرژی و بهینه سازی هزینه‌های شبکه حمل و نقل. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۳)، ۹۵-۷۱.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22711.2072



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

سلولز و لیگنین جزو غنی‌ترین پلیمرهای زیستی بر روی زمین هستند. زیست‌توده حاصل از مواد لیگنوسلولزی به‌عنوان یکی از جایگزین‌های نویدبخش برای تولید سوخت‌های زیستی و سایر تولیدات صنعتی تجدیدپذیر در سطح گسترده در دنیا مطرح هستند (۱). بسیاری از کشورهای درحال توسعه، مانند ایران که از نظر سطح فنآوری و مدیریت جامع تولید و توزیع مواد لیگنوسلولزی در رده‌های پایین‌تر به نسبت کشورهای توسعه‌یافته قرار دارند، با حجم عظیمی از پسماندهای زیستی در بخش کشاورزی شامل باگاس نیشکر، الیاف ساقه کلزا، غلات و ...، روبرو هستند که بعد از برداشت محصول نهایی از چرخه تولید مجدد^۱ خارج می‌شود؛ بنابراین بازیافت و درعین حال مدیریت هدفمند این ضایعات و پسماندها باید به‌منظور تولید محصولات باارزش افزوده بالا مانند انرژی حرارتی و الکتریسیته (۲) و یا بیودیزل (۳) به‌صورت بومی تعریف‌شده و مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به‌این‌ترتیب، می‌توان گفت با اجرای طرح‌هایی مانند تبدیل و فرآوری پسماندهای لیگنوسلولزی به سوخت‌های زیستی و یا انرژی‌های پاک، نه تنها بخشی از این زیان‌هایی که هر سال رخ می‌دهد جبران می‌شود، بلکه به رفع آلودگی محیط‌زیست مانند آلودگی هوا و کاهش دی‌اکسید کربن (۴) و اشتغال‌زایی نیز کمک شایانی می‌نماید. برای سالیان متوالی و در حال حاضر، منابع لیگنوسلولزی بخش کشاورزی به‌عنوان پسماند تلقی شده و مورد بازیافت قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل در خیلی از موارد این منابع سلولزی در عرصه یا رهاشده و یا به‌منظور آماده کردن عرصه برای کشت مجدد سوزانده می‌شود. نتیجه این عمل، برجای گذاشتن تأثیرات نامطلوب بر روی محیط‌زیست مانند از بین

رفتن موجودات خاکزی لایه سطحی خاک است. جمع‌آوری و سازمان‌دهی مواد لیگنوسلولزی و تخمین این که چه حجمی از منابع زیست‌توده در یک مقیاس وسیع وجود دارد، یک فعالیت پیچیده و هزینه‌بر است. به لحاظ این که معمولاً مبادی عرضه‌کننده زیست‌توده به‌صورت پراکنده و به‌دوراز منبع مصرف‌کننده/پالایشگاه‌های زیستی قرار دارند که این امر هزینه حمل‌ونقل و جابجایی آن را تقریباً ناممکن می‌سازد (۵). علاوه بر این، بسته به منطقه عرضه‌کننده، تیپ زیست‌توده و فصل برداشت، مواد لیگنوسلولزی دارای سطح رطوبت ۳۵-۶۰٪ هستند که می‌تواند بر هزینه حمل‌ونقل و تحویل نهایی آن به یارد پالایشگاه زیستی تأثیر منفی بگذارد (۶).

مطالعات انجام‌شده در کشورهای اروپایی و شمال آمریکا نشان می‌دهد که یافتن مکان‌های بالقوه جهت پردازش مواد لیگنوسلولزی درشت و تبدیل آن به محصول باارزش کیفی بالاتر در قالب استقرار یک زنجیره تأمین به‌صورت مستمر می‌تواند به اقتصادی بودن این فعالیت کمک نموده و هزینه‌های حمل‌ونقل آن را جبران نماید (۷). ضمن این که از این طریق قیمت تمام‌شده محصول نهایی نیز می‌تواند به حداقل ممکن کاهش یابد. این شیوه یعنی جمع‌آوری هدفمند مواد دورریز لیگنوسلولزی نه تنها به کاهش هزینه‌های احیایی و پاک نمودن عرصه قابل فعالیت (کشاورزی) بعد از برداشت محصول نهایی، کاهش ریسک حریق ناشی از سوزاندن این مقطوعات کمک نموده، بلکه با برداشت و هدایت آن‌ها به‌منظور تولید محصولات باارزش افزوده بالا، بهبود اقتصاد کلان کشور و رهایی از وابستگی به منابع فسیلی را به دنبال دارد. در حال حاضر، از مجموع سبد انرژی‌های پاک در حال حاضر، سهم این انرژی در کشور ایران بسیار ناچیز و معادل ۱/۳ درصد است (۸، ۹). مواد فرعی حاصل از این فرایند مانند بیوپچار نیز می‌تواند به‌عنوان

محافظت‌کننده خاک و به‌خصوص در مناطق خشک، به‌منظور تثبیت خاک و تقویت پوشش گیاهی بکار گرفته شود (۱۰). در کشور ما نیز همانند سایر کشورهای دنیا، با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی، مشکلات ناشی از مصرف سوخت‌های هیدروکربنی (حدود ۶۰٪ سوخت خودروها به آلاینده تبدیل می‌شود) و بالا رفتن هزینه یارانه‌ای سوخت، سیاست‌هایی مانند ضرورت سالم نگه‌داشتن محیط‌زیست، محدودیت برق‌رسانی و تأمین سوخت برای نقاط دورافتاده و هم‌چنین تعهد به اجرای کنوانسیون‌های بین‌المللی (از جمله توافقنامه پاریس)، استفاده از منابع جایگزین مناسب برای تولید سوخت‌های فسیلی همواره در کانون توجه بسیاری از پژوهش‌گران و مدیران ارشد دخیل در انرژی‌های تجدید پذیر بوده است. انجام چنین مطالعاتی در داخل کشور بسیار مهم بوده و زمینه را برای اتخاذ سیاست‌های درست در آینده نزدیک هموار می‌سازد. بر اساس آمار منتشرشده، هر سال حدود ۱۴۰ میلیارد مترمکعب ضایعات کشاورزی در جهان تولید می‌شود که سهم ایران به‌طور متوسط حدود ۳۳ میلیون تن (۲۳ میلیون تن ضایعات کشاورزی (ضایعات دورریز میوه و پسماندهای لیگنوسلولزی) و ۱۰ میلیون تن پسماند حاصل از فعالیت‌های جنگل‌داری) به‌صورت سالیانه است. در سالیان اخیر به دلیل سهولت در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا و امکان انجام محاسبات دقیق و به‌روز، مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های مختلف سنجش‌ازدور به همراه پردازش‌های مکانی در سامانه اطلاعات جغرافیایی جهت تعیین سطح و ارزیابی تغییرات میزان عملکرد اراضی به‌عنوان یک راه‌حل ارزشمند در داخل و خارج کشور انجام شده است. این در حالی است که استفاده کاربردی از این فناوری در برآورد مقدار زیست‌توده جهت تولید انرژی‌های زیستی با استفاده

از ضایعات لیگنوسلولزی در بخش کشاورزی و جنگلداری داخل کشور کمتر مسوق به سابقه است و بیش‌تر اطلاعات در این زمینه متکی بر اطلاعات توصیفی مستخرج از وزارت جهاد کشاورزی است. به‌عنوان مثال، نیکپور و همکاران به بررسی پتانسیل کشور برای تولید بایواتانول بر مبنای ضایعات کشاورزی پرداختند (۱۱). نتایج آن‌ها که بر مبنای اطلاعات جهاد کشاورزی نشان داد در سال ۲۰۱۰ حدود ۷۴/۵ میلیون تن محصول زراعی برداشت‌شده است که از این مقدار ۲۳ میلیون تن آن ضایعات بوده است که قادر است ۱۰۳۵۰ میلیون مترمکعب بیوگاز را تولید نماید. تولید گاز زیستی با استفاده از ضایعات کشاورزی، پسماندهای کشاورزی و فضولات حیوانات اهلی با استفاده از اطلاعات جهاد کشاورزی در استان گلستان توسط آزادبخت و همکاران انجام شد (۱۲). آن‌ها اعلام کردند که از مجموع منابع ارزیابی‌شده، حدود ۲۰۸۶ میلیون کیلووات الکتریسیته در سال قابل‌تولید است که برای تأمین نیاز ۶۹٪ از جمعیت استان کافی به نظر می‌رسد. مطالعه تفکیک اراضی زیر کشت برنج و سویا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به روش حداکثر احتمال، حداقل فاصله از میانگین و فاصله ماهالانویی نشان داد که طبقه‌بندی با روش حداکثر احتمال منجر به افزایش دقت کلی تا ۹۵/۵ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۲ شده بود که از روش‌های دیگر متمایز بود (۱۳). هم‌چنین مساحت برآورد شده آن‌ها در مقایسه با آمار جهاد کشاورزی اریبی ۱۵ درصد را از خود نشان داد. از دیگر مطالعات می‌توان برآورد سطح زیر کشت گندم و سویا با استفاده از تصاویر لندست ETM+ در استان گلستان اشاره داشت (۱۴). برآورد مقدار زیست‌توده بخش کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ به همراه گوگل ارث برای تولید ترکیبی الکتریسیته و گرما در مرکز ایتالیا نشان داد که میزان تولید

واقع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه و ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی است. طیف متنوعی از کاربری‌های مختلف (جنگل، جنگل‌کاری، کشاورزی (کشت دیم، آبی)، مرتع، منابع آبی و مناطق مسکونی) در سطح استان مشاهده می‌شود. بر اساس نقشه کاربری اراضی مستخرج از پردازش مکانی و آمار منتشرشده از جهاد کشاورزی وسعت اراضی تحت کشاورزی استان در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ معادل ۶۶۱ هزار هکتار است که ۵۴٪ اراضی آبی و ۴۶٪ اراضی دیم است. استان گلستان دارای آب‌وهوای معتدل و از نظر کشاورزی بسیار پربرازده است. به دلیل تنوع آب و هوایی (کوهستانی، معتدل مدیترانه و نیمه‌خشک) در استان ارقام مختلف محصولات زراعی مانند برنج، گندم، جو، پنبه، دانه‌های روغنی (آفتابگردان، ذرت، کلزا، سویا و...) و اخیراً چغندر قند از محصولات اصلی بخش کشاورزی در این استان است.

برآورد زیست‌توده قابل‌دسترس: به‌منظور اطلاع از موقعیت مکانی زمین‌های زیر کشت محصولات پاییزه (کلزا و گندم) و بهاره (برنج و سویا)، ابتدا تقویم زراعی محصولات کشاورزی و نوع محصولات منطقه مورد مطالعه برای سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ از سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان تهیه شد. اطلاع از تاریخ کشت‌های مورد مطالعه به‌منظور تهیه تصاویر سنجنش‌زدور در دو زمان اوج سبزیگی و تاریخ برداشت بوده است (۱۳، ۱۴). بر این اساس، تاریخ کاشت محصولات پاییزه (گندم و کلزا) در آبان- آذر، اوج سبزیگی در اردیبهشت- خرداد و برداشت در خرداد و اردیبهشت به ترتیب بوده است. هم‌چنین برای محصولات بهاره (سویا و برنج) تاریخ کاشت در خرداد- تیر، اوج سبزیگی در مرداد- شهریور و

زیست‌توده سالیانه معادل ۱/۱۲ گرم در هکتار است که زیست‌توده کل معادل ۱۳۲ گیگا گرم تخمین زده شد که به‌طور پراکنده توزیع در سطح ۲۲۷۶ کیلومترمربع توزیع شده است (۱۵).

مرور منابع انجام‌شده در بالا نشان می‌دهد که مطالعات زیادی در ارتباط با تولید انرژی از زیست‌توده بخش کشاورزی (زیست‌توده لیگنوسلولزی) انجام‌نشده است و اطلاعات اندکی که در این زمینه وجود دارد عمدتاً متکی بر آمار منتشرشده توصیفی از وزارت جهاد کشاورزی و مؤسسه تحقیقات کشاورزی بوده است. اطلاعات دقیقی بر مبنای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و برداشت زمینی جهت تخمین پتانسیل واقعی این محصولات در سطح کشور وجود ندارد؛ به‌عبارت‌دیگر، نقطه شروع زنجیره تأمین مواد خام مورد نیاز صنعت تولید سوخت‌های زیستی نه‌تنها در کل کشور شناخته شده نیست، بلکه در مقیاس محلی نیز ناشناخته و نیازمند جمع‌آوری اطلاعات دقیق می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی پتانسیل منابع لیگنوسلولزی حاصل از برداشت نهایی محصولات کشاورزی شامل گندم، برنج، سویا و کلزا به‌عنوان مواد اولیه جهت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی الکتریسته) به‌عنوان یک طرح پایلوت در استان گلستان در شمال ایران می‌باشد. در راستای رسیدن به این هدف سؤالات زیر مطرح است: (۱) پراکنش مکانی و جغرافیایی مکان‌های عرضه‌کننده مواد لیگنوسلولزی در سطح استان گلستان چگونه است؟ (۲) توزیع مکانی مدل استراتژیک لجستیک زنجیره تولید و تأمین زیست‌توده- سوخت‌های زیستی در مقیاس منطقه‌ای چگونه است؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مطالعاتی در این پژوهش، استان گلستان به مساحت ۲۰۰۵۸/۴۲ کیلومترمربع

لبه قرمز و طیف مادون قرمز حرارتی قرار دارند. به منظور تهیه تصاویر چند طیفی و انجام پردازش‌های مکانی، باندهای رنگی در محیط نرم‌افزار eCognition باهم ادغام شدند (۱۷) تصاویر این ماهواره دارای تفکیک زمانی ۱۶ روز و یک فریم آن مساحت ۱۸۵ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. در مقابل، تصاویر ماهواره تصحیح شده سنتینل-۲ از قدرت تفکیک مکانی و طیفی بالاتری برخوردار هستند. تصاویر ماهواره سنتینل-۲ دارای ۱۳ باند در محدوده طیف مرئی و طول موج‌های لبه قرمز است. استفاده از طول موج‌های لبه قرمز آن کمک زیادی در برجسته‌سازی پوشش گیاهی متراکم به رنگ سبز تیره می‌کند. تفکیک زمانی این تصاویر ۵ روز است. به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای، در مرحله اول تصاویر خام، به‌ویژه تصاویر لندسات، برای پردازش‌های اولیه (وجود خطای هندسی و اتمسفریک) مورد بررسی قرار گرفتند (۱۸). تصاویر سنتینل معمولاً همراه با تصحیحات ضروری عرضه می‌شوند. مطالعات یاقوتی و همکاران نشان داد که استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۳ شاخص مناسبی برای تخمین زیست‌توده گندم و کلزا بوده است (۱۹). به همین دلیل در پژوهش حاضر برای تهیه نقشه سطح زیر کشت هر یک از محصولات کشت پاییزه و بهاره، نقشه شاخص NDVI در زمان‌های مورد نظر مطابق با تقویم زراعی در استان گلستان تهیه شد. نمودار جریان‌ی مراحل انجام کار برای پردازش‌های مربوط به سنجش‌ازدور در شکل ۱ ارائه شده است.

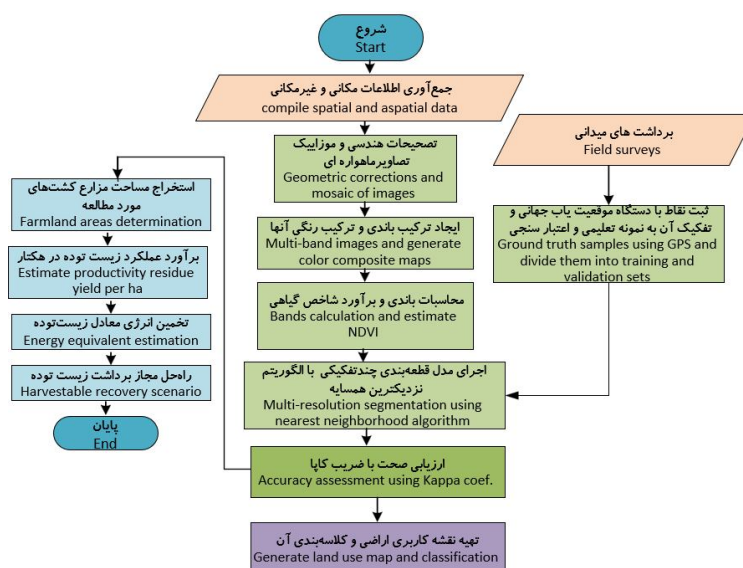
برداشت در آبان-مهر به ترتیب بوده است. متأسفانه بخش وسیعی از اطلاعات و آمار منتشر شده توسط جهاد کشاورزی مربوط به کشت‌های استان یا در دسترس نیست و یا در صورت وجود هم اطلاعات تشریحی بدون دسترسی به موقعیت مکانی کشت‌ها بوده و تقریباً غیرقابل استفاده است. بر این اساس در این پژوهش جهت اطمینان از موقعیت مکانی کشت‌های غالب در سال زراعی مورد مطالعه، ابتدا موقعیت مکانی و مساحت آن‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی و به‌طور تصادفی حدود ۴۰-۵۰٪ از این مناطق هم در اوج سبزیگی و هم در زمان برداشت مورد بازدید میدانی واقع شد. در هر مزرعه نوع کشت، موقعیت و مساحت آن با استفاده از دستگاه مختصات یاب جهانی^۱ و متر لیزری برداشت گردید (۱۶). برای صحت‌سنجی سایر نمونه‌ها (۵۰٪ باقی‌مانده) فقط به پردازش‌های مکانی در سامانه اطلاعات جغرافیایی، تصاویر گوگل ارث با انجام تغییرات زمانی و آخرین نقشه کاربری اراضی مربوط به سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اکتفا گردید.

در پژوهش حاضر، تصویر تصحیح شده سنتینل 2B به‌عنوان تصویر پایه مورد استفاده واقع شد، جاهایی که دارای پوشش اتمسفری (ابر و مه) بود به‌صورت ترکیبی لندست ۸ و سنتینل 2A به‌عنوان داده کمکی استفاده شد. تصاویر دریافت شده مربوط به تاریخ آبان ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ بود. تصاویر ماهواره‌ای از وب‌سایت کاوشگر سطح زمین، سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۲ تهیه گردید. تصاویر لندست دارای ۸ باند با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، باند پانکروماتیک ۱۵ متر و دو باند حرارتی ۱۰۰ متر است که در محدوده نور مرئی، طول موج‌های

1- Global Positioning System (GPS)

2- United States Geological Survey

3- NDVI



شکل ۱- نمودار پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برآورد سطح زیر کشت و انرژی زیستی حاصل از بقایای زراعی.

Figure 1. Flowchart illustrating the image processing, estimation of cultivated area and calculation of energy content from crop residue biomass.

استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه (۱۹)، جهت تشخیص مرز عوارض و طبقه‌بندی تصاویر و اعتبارسنجی نقشه‌های تولیدشده با استفاده از ضریب کاپا و صحت کلی نقشه پایه NDVI در خردادماه در دو کلاس اراضی تحت کشت گندم با کد ۱ و سایر اراضی با کد صفر تفکیک شد (۱۴). با تفریق نقشه NDVI پوشش گیاهی در خردادماه از نقشه NDVI در فروردین برای محصول (کلزا و گندم)، نقشه اراضی تحت کشت کلزا استخراج گردید. لازم به توضیح است که قطعه‌بندی اولین و مهم‌ترین مرحله در ریز طبقه‌بندی تصویر به واحدهای تصویر مجزا است. روش قطعه‌بندی چند تفکیکی یک فرایند پایین به بالا است که با شیء‌های یک پیکسل آغازشده و در مراحل بعدی، شیء‌های تصویری کوچک در داخل شیء‌های بزرگ‌تر در همسایگی آنها ادغام می‌شود. در هر مرحله که زوجی از شیء‌های تصویر ادغام می‌شوند به‌صورت رشد‌های کوچک در ناهمگنی‌های معین نشان داده می‌شوند. اگر این رشد‌های کوچک اشیاء از آستانه تعریف‌شده تجاوز

جهت تهیه نقشه اراضی زیر کشت محصولات پاییزه (گندم و کلزا) و محصولات کشت بهاره (برنج و سویا) مراحل اجرایی زیر دنبال شد. ۱) تهیه تصاویر ماهواره‌ای در تاریخ‌های موردنظر و اعمال تصحیحات لازم و موزاییک باندهای مختلف، ۲) استفاده از شاخص پوشش گیاهی یا NDVI بر اساس باندهای قرمز و مادون‌قرمز و درنهایت ایجاد ترکیب چند طیفی از تصاویر باندهای اصلی جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی و شناسایی بهتر مناطق با پوشش گیاهی غیرپوشش گیاهی، ۳) طبقه‌بندی نقشه NDVI. لازم به توضیح است که حد آستانه پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI مربوط به گندم و کلزا برای ماه فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب معادل ۰/۳۷، ۰/۳۵ و ۰/۳۰ و برای محصولات برنج و سویا برای ماه مرداد، شهریور و آبان به ترتیب معادل ۰/۳۱، ۰/۳۳ و ۰/۳۰ تعیین شد (۱۴). بر این اساس نقشه پایه محصولات پاییزه و بهاره در استان گلستان تولید شد. ۴) اجرای الگوریتم قطعه‌بندی چند تفکیکی^۱ با

1- Multiresolution segmentation algorithm

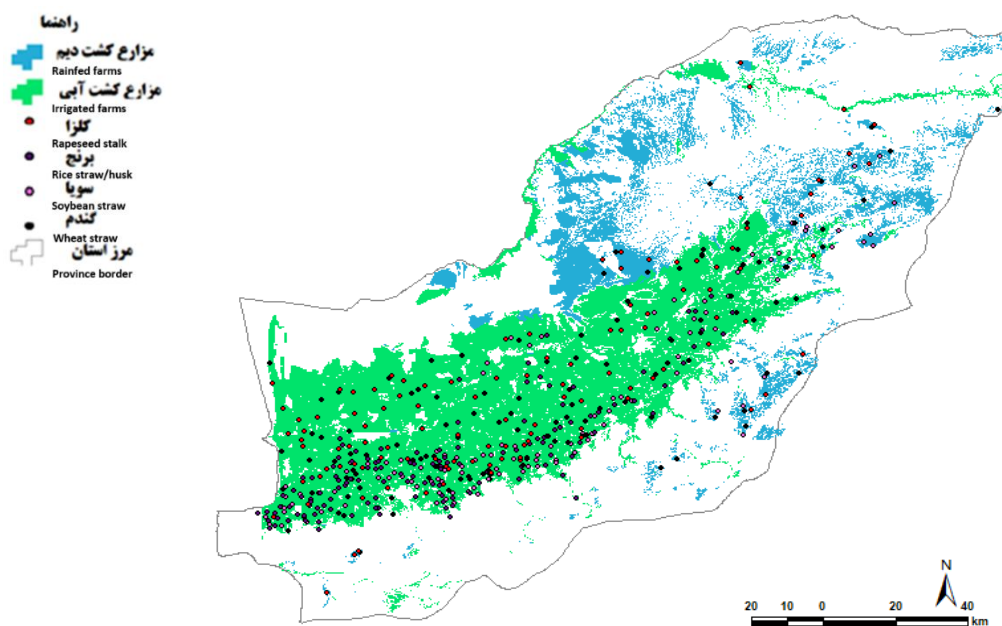
نماید فرایند قطعه‌بندی متوقف خواهد شد (۲۰). براساس تقویم زراعی در استان گلستان تاریخ اوج سبزی‌نگی محصولات برنج، مردادماه و برای سویا شهریورماه و زمان برداشت آن‌ها به ترتیب در نیمه دوم شهریور و اوایل آبان در نظر گرفته شد. برای تهیه نقشه اراضی برنج و سویا، ابتدا نقشه NDVI در مردادماه در دو کلاس برنج و سویا با کد ۱ و سایر کشت‌های موجود در منطقه با کد صفر تفکیک شد. در آبان ماه برنج کاملاً برداشت شده است بنابراین نقشه NDVI در آبان ماه در دو کلاس سویا با کد ۱ و سایر کشت‌ها با کد صفر طبقه‌بندی شد. استخراج نقشه اراضی تحت کشت برنج با استفاده از تفریق نقشه NDVI آبان ماه (سویا) از نقشه ترکیبی مردادماه (برنج و سویا) استخراج شد. جهت اعتبارسنجی نقشه‌های تولیدشده طی پردازش تصاویر ماهواره‌ای، بازدیدهای میدانی به منظور شناسایی مزارع زیر کشت محصولات موردنظر (گندم، کلزا، برنج و سویا) انجام و موقعیت آن‌ها توسط دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۱ برداشت شد. در محیط نرم‌افزار eCognition محدوده نمونه‌های آموزشی با شیء‌های تصویری نمونه مشخص شد. برخلاف طبقه‌بندی پیکسل پایه، الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه در روش قطعه‌بندی شیء‌گرا نیازمند نمونه آموزشی کم‌تری است چون هنگامی که یک شیء تصویری به‌عنوان نمونه آموزشی انتخاب می‌شود چندین پیکسل را پوشش می‌دهد. باین‌حال در پژوهش حاضر، در مناطقی که احتمال تداخل کشت‌ها در مرحله پردازش تصویر وجود داشت، تعداد نمونه زمینی بیش‌تری گرفته شد تا خطای ناشی از اشیاء متفاوت با اطلاعات طیفی مشابه در مرحله قطعه‌بندی به حداقل ممکن برسد. در مجموع تعداد ۴۷۴ نمونه مرجع زمینی (گندم=۱۱۱، برنج=۱۳۳، سویا=۱۱۸، کلزا=۱۱۲) در هر یک از

کشت‌های موردبررسی به‌عنوان نمونه‌های تعلیمی ثبت مختصات گردید و جهت ارزیابی عملکرد نقشه‌های تولیدشده حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌کار گرفته شد. موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده زمینی در شکل ۲ ارائه شده است.

پس از اتمام پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار eCognition، نتیجه با فرمت Shp ذخیره شده و به محیط نرم‌افزار ArcGis10.3 انتقال یافت و سپس مساحت هریک از کاربری‌های مطالعه شده استخراج شد. در مرحله بعد عملکرد زیست‌توده و تخمین آن در هکتار انجام شد. عملکرد زیست‌توده از طریق ضرب نمودن مساحت مزرعه در تناژ زیست‌توده در هکتار به‌دست آمد (۱۶). به‌منظور ارزیابی و تعیین مقدار زیست‌توده موجود در هریک از مزارع هدف (پس از کسر مقداری که باید در طبیعت برای اهداف اکولوژیک باقی بماند (۵٪)) در انتهای فصل رویش (هنگام رویش کامل محصول) و پس از برداشت محصول، بازدیدهای مکرر میدانی انجام شد. در هر مزرعه بسته به مساحت آن به‌صورت تصادفی و تعداد ۳ نمونه زیست‌توده در هر کشت برداشت شد. نمونه‌برداری زیست‌توده جهت تعیین وزن زیست‌توده خشک (کاه و کلش) با استفاده از کوادرت‌های ۰/۲۵ مترمربع (۰/۵×۰/۵) انجام گرفت. نسبت زی‌توده به محصول^۲ (پارامتر ضروری در تعیین مقدار بقایای گیاهی) با استفاده از قطعات بزرگ‌تر، یعنی کوادرت‌های ۲۵ مترمربع (۵×۵) برای در هریک از مزارع هدف انجام شد. در مجموع تعداد ۱۵۰ نمونه جهت تعیین وزن زیست‌توده خشک و ۱۵۰ نمونه جهت تعیین نسبت زی‌توده به محصول برداشت شد.

2- Residue-to product ratio (RPR)

1- Global Positioning System (GPS)



شکل ۲- موقعیت نقاط مرجع برداشت‌شده زمینی در هر یک از کشت‌های بررسی‌شده.

Figure 2. Ground truth samples within each crop type.

بدور آن است با داشتن این اطلاعات، مقدار زیست‌توده قابل‌دسترس برای هر محصول محاسبه شد. در پژوهش حاضر، با توجه به اطلاعات حاصل از نمونه‌برداری میدانی مقدار زیست‌توده برحسب تن در هکتار برای محصول گندم ۳/۳۷، برنج ۴/۱۰، سویا ۴/۴۰ و کلزا ۴/۶۰ تن محاسبه گردید. پس از شناسایی محدوده مزارع و تفکیک آن برای کشت‌های مورد مطالعه (گندم، برنج، سویا و کلزا) و مساحت هریک از آنها، مقدار انرژی الکتریسته معادل حجم زیست‌توده به کیلووات در دو راه‌حل برداشت ۱۰ درصد و ۴۵ درصد برآورد شد (۲۰). پس از تخمین مقدار زیست‌توده در هر یک از مزارع، نقشه میزان زیست‌توده هر یک از محصولات مورد مطالعه در محیط GIS نقشه‌سازی شد. به‌منظور محاسبه انرژی حاصل از مقدار زیست‌توده قابل‌دسترس (کیلووات ساعت)، مقدار زیست‌توده برآورد شده، پس از کسر مقدار غیرقابل‌دسترس برای اهداف اکولوژیک، در ضریب تبدیل مگاژول به کیلووات ساعت (۰/۲۷۸) و

پارامتر نسبت زی‌توده به محصول برای گندم در پژوهش حاضر معادل ۱/۲۴، برنج، ۰/۹، سویا ۲ و کلزا معادل ۲/۴۳ تن در هکتار محاسبه گردید. با توجه به وسیع بودن منطقه مورد مطالعه، نمونه‌های زیست‌توده به‌صورت تصادفی و با توجه به مساحت هر مزرعه توزیع شد تا بیانگر کل جامعه باشد. نمونه‌های زیست‌توده جمع‌آوری شده در هر نوبت پس از خرد کردن به ابعاد ۱-۰/۵ سانتی‌متر به آزمایشگاه منتقل شد و وزن‌تر آن‌ها بلافاصله ثبت گردید. وزن خشک نمونه‌ها با قرار دادن در داخل آون در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت و توزین مجدد آن‌ها به دست آمد. نسبت زیست‌توده به محصول از رابطه ۱ به ازای واحد سطح (مترمربع) محاسبه گردید.

$$\lambda = \frac{W_r}{W_p} \quad (1)$$

در این رابطه W_r بیانگر وزن بقایای گیاهی (کاه و کلش) و W_p بیانگر وزن کل کاه و کلش به همراه

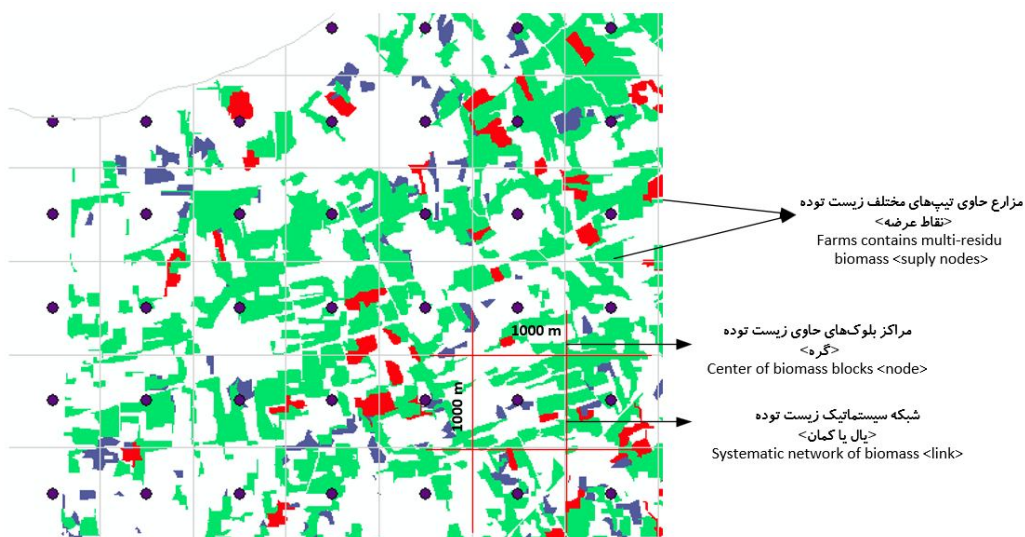
ساخت گراف اولیه، داده‌های پایه مانند، موقعیت مکانی نقاط عرضه و تقاضا در سامانه اطلاعات جغرافیایی ثبت گردید. بدیهی است که هر یک از نقاط عرضه‌کننده زیست‌توده، در یک فاصله مشخص از سایت پالایشگاه زیستی قرار گرفته‌اند. تعیین فاصله دقیق بین این نقاط سهم بزرگی در هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه کلی شبکه و در نهایت قیمت تحویل یک‌تن زیست‌توده به یارد پالایشگاه دارد. برای دستیابی به این مهم، پژوهش حاضر فاصله حمل‌ونقل بین نقاط شبکه لجستیک را به روش الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر (الگوریتم هاورسین) محاسبه شد.

الگوریتم هاورسین (الگوریتم ۱)، برعکس روش‌های قبلی مانند فاصله اقلیدسی، فاصله منهن و مینکوفسکی که فاصله مستقیم^۱ بین دو نقطه را بدون در نظر گرفتن توپوگرافی مسیر، پیچ و قوس و انحنای مسیر اندازه‌گیری می‌کنند، از دقت بالاتری (خطا ۱٪) برخوردار است (۲۱). به عبارت دیگر، الگوریتم هاورسین^۲، فاصله بین دو نقطه بر روی یک کره است که با در نظر گرفتن طول و عرض جغرافیایی نقاط و در نظر گرفتن پستی و بلندی، ناهمواری و قوس و پیچ‌های موجود در طول مسیر، فاصله واقعی^۳ را محاسبه می‌نماید.

مقدار آستانه گرمایی برای تیپ‌های مختلف زیست‌توده (مگا گرم/کیلوگرم) ضرب شد و محاسبات بر این اساس تکمیل شد (۲۲). لازم به توضیح است که مزارع با مساحت کم‌تر از ۲ هکتار از محاسبات کنار گذاشته شد. به منظور انجام محاسبات دقیق‌تر، یک شبکه منظم ۱۰۰۰×۱۰۰۰ مترمربع بر روی منطقه توزیع شد و مزارع محصور در هر یک از این مساحت‌ها تحت عنوان "بلوک" جمع و کدگذاری شد.

شبکه لجستیک زنجیره تأمین: پس از تخمین مقدار زیست‌توده قابل برداشت، شبکه حمل‌ونقل بین سایت‌های قابل برداشت/ یا بلوک‌های زیست‌توده و سایت‌های مصرف‌کننده/ یا پالایشگاه زیست‌انرژی به منظور محاسبه هزینه و فاصله حمل‌ونقل تشکیل گردید. بدین منظور، یک گراف اولیه که مرکب از اجزای لجستیک زنجیره تأمین-توزیع زیست‌توده بود در محیط GIS تولید شد. سپس اطلاعات این گراف به محیط اکسل جهت انجام محاسبات بهینه‌سازی انتقال داده شد. شکل ۳، بخشی از منطقه مورد مطالعه، بلوک‌های زیست‌توده و شبکه گراف حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. شبکه گراف اولیه، به صورت سیستماتیک، در قالب یک ماتریس ($m \times n$) است که بر روی منطقه مورد مطالعه (مناطق با قابلیت تولید زیست‌توده در سطح استان گلستان) توزیع شد. گراف ارائه‌شده در این پژوهش از نوع گراف مسطح متوالی، وزن‌دار غیر جهت‌دار به صورت مجموعه‌ای از نودها تعریف شد که از طریق آرک/کمان‌های با وزن مشخص اختصاص یافته به آن‌ها، تحت عنوان وزن به هم گره می‌خورند. وزن آرک معرف هزینه واحد حمل‌ونقل توسط کامیون و نود بیانگر سایت‌های قابل برداشت حاوی زیست‌توده می‌باشد. پس از

1- Straight/and or crow-fly distance
2- Haversine distance
3- Real-travel distance



شکل ۳- شبکه گراف طراحی شده برای انجام محاسبات مربوط به بخش زنجیره تأمین-توزیع زیست توده. نقاط سیاه، نقاط حاوی زیست توده قابل برداشت در مرکز هر یک از بلوک‌ها است.

Figure 3. Generated graph illustrating calculations related to biomass supply chain. Block dots represent the harvestable biomass at the centroid of each block.

الگوریتم ۱- شبه کد کامپیوتری برای محاسبه فاصله واقعی بین نقاط موجود در شبکه لجستیک

//Algorithm shortest path distance based on haversine distance algorithm

begins

input data

set s, d & r //read the spatial position of nodes from files (s : source node, d : end node, r : earth's radius)

calc. Geographic coordinates ($\varphi_1, \mu_1, \varphi_2, \mu_2$) for each node in radian

if $\varphi_1 \neq \text{null}$ && $\varphi_2 \neq \text{null}$;

for each node in coord_list;

do

find Δlon_{ij} between_nodes //longitude of start and end node

Calc. $\delta = \sin^2(\Delta \text{lat}_i/2) + \cos(\text{lat}_i) \cos(\text{lat}_j) \sin^2(\Delta \text{lon}_{ij}/2)$ //square of straight-lie distance between pairs

Calc. $\beta = 2 \cdot \tan^{-2}(\sqrt{\delta}), \sqrt{1-\delta}$ //great circle distance in radians

Calc. $\lambda = r \cdot \beta$ //calculate real distance

end for

end if

return λ for each pair; //return real distance in km

End

$$Fc_{ik} = \sum_{k \in K} (c^b + c^h) H v_{ik} P_{ik} \quad (3)$$

در این رابطه، Fc_{ik} هزینه خرید زیست‌توده نوع k در مزرعه i (دلار)، $H v_i$ مقدار زیست‌توده قابل بهره‌برداری از نوع k در مزرعه i (کیلووات ساعت)، c^b هزینه ساعتی ماشین بیلر جهت بسته‌بندی زیست‌توده (دلار)، c^h هزینه جمع‌کردن و کپه کردن و P_{ik} قیمت خرید زیست‌توده قابل‌عرضه از نوع k در مزرعه i (دلار به ازای کیلووات ساعت) می‌باشد. زیست‌توده برجای‌مانده پس از برداشت محصول اصلی توسط کمباین می‌تواند به‌صورت پراکنده^۱، بسته‌های فشرده‌شده^۲ و یا کاه چپس^۳ هم به‌صورت روباز و یا در داخل کیسه‌های پلاستیکی انتقال یابد. در این مطالعه فرض بر این شد که کل زیست‌توده قابل‌برداشت در بسته‌های ۲۰-۲۵ کیلوگرم توسط ماشین بیلر بسته‌بندی شده و از آن‌جا توسط کامیون روباز به محل پالایشگاه بایوانرژی منتقل می‌شود. وزن هر بسته ضایعات لیگنوسلولزی ۲۵ کیلوگرم، هزینه بسته‌بندی ۸۰۰۰ تومان به ازای هر بسته توسط ماشین بیلر و قیمت خرید هر بسته ضایعات در مزرعه معادل ۲۵۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که به‌طور متوسط در یک هکتار ۶۷ بسته ۲۵ کیلویی ضایعات تولید می‌شود، در این صورت مجموع هزینه خرید معادل ۲۲۱۱ هزار تومان یا ۸۸/۴۰ دلار به ازای هر تن در هکتار محاسبه گردید. برای محاسبه تعداد پالایشگاه کانیدیدا، دستورالعمل‌های متعددی در کشورهای صاحب این تکنولوژی وجود دارد. چنان‌چه در برخی کشورها، پالایشگاه زیست‌انرژی از قبل جانمایی شده است و دیگر لازم به شناسایی پالایشگاه کانیدیدا وجود ندارد و بیش‌تر تمرکز

تنوعی از ماشین‌آلات شامل انواع کامیون و تریلر با ظرفیت‌های متفاوت بارگیری برای جابجایی زیست‌توده در مزارع شناسایی شده در دسترس هستند. در مطالعه حاضر به‌منظور پرهیز از پیچیده شدن شبکه حمل‌ونقل، از یک نوع ماشین (کامیون اطاقدار ۱۰ چرخ با حداقل و حداکثر ظرفیت بار ۱۲ و ۲۲ به‌ترتیب) استفاده شد. هزینه حمل‌ونقل به ازای فاصله متفاوت است، بر این اساس مقدار هزینه حمل ۱ تن بار در کیلومتر ۰/۴۷ دلار برای فاصله حمل‌ونقل ۱۰۰-۲۰۰ کیلومتر در نظر شد (نرخ ارز دولتی ۲۵۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد، برای اینکه قیمت ریال دارای نوسان است از معادل دلاری آن استفاده شد). پس از محاسبه فاصله حمل‌ونقل، جهت ارزیابی سایت‌های شناسایی شده با استفاده از مدل بهینه‌سازی، کارایی حمل‌ونقل از طریق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$A = \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} H v_{ik} \left(1 - \frac{d_{ij}}{\bar{D}_{mx}}\right) \quad (2)$$

در این رابطه، A بیانگر شاخص کارایی حمل‌ونقل برای پالایشگاه کانیدیدا، $H v_{ik}$ مقدار زیست‌توده قابل‌برداشت (مگا گرم) در سایت i ، d_{ij} فاصله حمل‌ونقل بین سایت عرضه‌کننده زیست‌توده و پالایشگاه زیست‌انرژی، \bar{D}_{mx} حداکثر فاصله مجاز حمل زیست‌توده به سمت پالایشگاه بایوانرژی، N بیانگر تعداد سایت‌های عرضه‌کننده زیست‌توده است که در یک فاصله معین نسبت به پالایشگاه کانیدیدا قرار دارند. هرچه حاصل عبارت فوق بزرگ‌تر باشد بیانگر این نکته است که حجم زیست‌توده و تعداد نقاط عرضه‌کننده بیش‌تری در یک فاصله کوتاه‌تر نسبت به پالایشگاه کانیدیدا قرار گرفته است. قیمت خرید و جمع‌کردن و بسته‌بندی زیست‌توده در هریک از مزارع موردبررسی از طریق رابطه ۳ محاسبه شد.

- 1- Loose residues
- 2- Baled residues
- 3- Chipped residues

کاندیدای طراحی گردید. از دیدگاه پژوهش در عملیات، مدل ریاضی ارائه‌شده از نوع برنامه‌ریزی خطی باینری^۱ و مدل‌سازی مکان- تخصیص^۲ است که با شناسایی مناطق عرضه‌کننده زیست‌توده در یک فاصله مشخص (با توجه به محدودیت حداکثر فاصله حمل‌ونقل) و مقدار تقاضای اسمی سایت به محاسبه هزینه واحد حمل و تعداد سایت بهینه جهت احداث پالایشگاه زیست‌انرژی می‌پردازد. در مطالعه حاضر با توجه به این‌که زیست‌توده قابل‌برداشت در نقاط دور از دسترس نسبت به مناطق جمع‌آوری‌کننده و شبکه جاده قرار دارد، لازم است که حجم قابل‌دسترس زیست‌توده در شعاع دسترسی هر سایت مشخص گردد. قطعاً هرچه زیست‌توده در فواصل نزدیک‌تر به پالایشگاه زیست‌انرژی قرار داشته باشند، هزینه واحد حمل و در نهایت هزینه کل زنجیره پایین‌تر و به اقتصادی بودن فعالیت کمک می‌نماید. هدف از توسعه مدل ریاضی، حداقل نمودن مجموع فاصله وزنی نود/مزارع حاوی زیست‌توده تا نزدیک‌ترین سایت بالقوه پالایشگاه زیست‌انرژی می‌باشد. لازم به توضیح است در این بخش از پژوهش، پیش‌فرض ما این است که تمام کارخانه‌های متوسط تا بزرگ‌مقیاس با تغییر کاربری و داشتن تجهیزات لازم به‌طور بالقوه قابلیت تبدیل‌شدن به پالایشگاه زیست‌انرژی را دارند به شرطی که فاصله وزنی (هزینه حمل‌ونقل زیست‌توده) از نودهای همسایه به این مناطق کاندیدا حداقل باشد. پس از تعریف مجموعه، شاخص و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی ارائه خواهد شد.

مدل‌سازی بر روی ظرفیت و نحوه طراحی کل شبکه با در نظر گرفتن پارامترهای دیگر غیر از شناسایی مکان‌های کاندیدا است. متوسط فاصله اقتصادی برای ارسال مواد خام (زیست‌توده قابل‌دسترس از مزارع) در اطراف هر سایت از ۳۰ تا ۷۵ کیلومتر متغیر است. از آنجایی‌که پالایشگاه یا واحد تولیدی برای فرآوری و تولید محصولات زیست‌انرژی از ضایعات لیگنوسلولزی در هیچ‌یک از استان‌های کشور به‌خصوص استان گلستان وجود ندارد با قاطعیت نمی‌توان در مورد ظرفیت تولید آن‌ها اظهار نظر نمود، اما با داشتن ظرفیت تولید آن‌ها برای مصرف چوب‌آلات باغی و جنگلی، ظرفیت یارد کارخانه و در نظر گرفتن دانسیته متوسط چوب‌آلات (معمولاً پهن‌برگ) معادل ۰/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌توان یک ظرفیت اسمی/بالقوه برای هر سایت تعریف کرد که در صورت اختصاص آن به پالایشگاه زیست‌انرژی از این ظرفیت استفاده شود (۲۲). برای ساخت هر پالایشگاه کاندیدا با ظرفیت ۸۰٪ و طول عمر ۲۵ سال، هزینه ثابت (خرید تجهیزات، ماشین‌آلات، فاز اجرایی و عملیاتی سایت و ...) معادل ۳۳۹۶/۶۰ دلار بر کیلووات ساعت در سال در مدل‌سازی فوق لحاظ شد. هزینه ساخت پالایشگاه زیست‌انرژی بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از مرور منابع (۲۲) و سایت پالایشگاه زیست‌انرژی آمریکا (EIA 2022) استخراج گردید. لازم به ذکر است که هزینه خرید و یا اجاره زمین در این محاسبات لحاظ نشده است.

مدل بهینه‌سازی حمل‌ونقل: پس از تهیه نقشه شایستگی زیست‌توده، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مقدار زیست‌توده قابل‌برداشت، هزینه خرید و هزینه‌های حمل‌ونقل، یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین جهت شناسایی سایت(های) بالقوه بایوانرژی و محاسبه مجموع هزینه انتقال (دلار بر مترمکعب) زیست‌توده از سایت‌های عرضه‌کننده به پالایشگاه‌های

1- Binary programming
2- Location-allocation problem

مجموعه‌ها و شاخص‌ها

N	مجموعه کل نودهای قابل دسترس در شبکه لجستیک زیست‌توده
$i \subset N$	مجموعه از نودهای عرضه‌کننده زیست‌توده
$j \subset N$	مجموعه‌ای از سایت‌های بالقوه پالایشگاه زیست‌انرژی
k	مجموعه از ماشین‌آلات در دسترس برای حمل و نقل

پارامترها

d_{ij}	هزینه متغیر: شامل حاصل ضرب فاصله بین دو رأس (مبداء-مقصد) در هزینه واحد حمل بین نقاط در کل شبکه لجستیک از محل عرضه i تا پالایشگاه زیست‌انرژی j
c_{ij}	هزینه واحد تحویل زیست‌توده بین محل عرضه i تا پالایشگاه زیست‌انرژی j که شامل هزینه برداشت، جمع‌آوری و کپه کردن در کنار جاده دسترسی می‌باشد که معمولاً توسط تراکتور انجام می‌گیرد.
f_j	هزینه ثابت مربوط به خرید تجهیزات و ادوات که نود باید متحمل شود، در صورتی که به‌عنوان سایت بایوانرژی انتخاب شود (هزینه ثابت)
w	تعداد بهینه پالایشگاه(های) زیست‌انرژی که باید جانمایی شوند.

متغیرهای تصمیم

q_{ik}	حجم زیست‌توده انتقال داده‌شده توسط کامیون k از زارع شناسایی شده به سمت یارد پالایشگاه زیست‌انرژی
\bar{D}	حداکثر فاصله انتقال زیست‌توده از نودهای همسایه به نود کاندیدها
Q_j	ظرفیت در دسترس پالایشگاه زیست‌انرژی به واحد انرژی (کیلووات ساعت)
x_{ij}	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ اختیار می‌کند در صورتی که زیست‌توده قابل عرضه در نودهای همسایه به نود کاندیدها تخصیص یابد.
y_j	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ را اختیار می‌کند، اگر پالایشگاه زیست‌انرژی در محل نود مذکور احداث شود، در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود (زیر مسأله مکان‌یابی)

تابع هدف معادله ۴ به حداقل نمودن هزینه خرید و جمع‌نمودن زیست‌توده از سطح مزارع شناسایی شده (بخش اول) و تحویل زیست‌توده به یارد پالایشگاه زیست‌انرژی توسط کامیون (بخش دوم) در صورت تخصیص سایت حاوی زیست‌توده به پالایشگاه

$$\min = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{ik}^{pur} x_{ij} + (c_{ik}^{tsp} q_{ik} d_{ij}) x_{ij} + \sum_{j \in N} f_j y_j \quad (4)$$

نامعادله اول ۵ فاصله اقتصادی برای انتقال زیست‌توده از نودهای عرضه‌کننده به سمت پالایشگاه(های) زیست‌انرژی را کنترل می‌نماید که نباید فاصله

جمع‌آوری زیست‌توده در اطراف سایت بایوانرژی از یک‌فاصله معین بیش‌تر باشد.

$$d_{ij} x_{ij} \leq \bar{D} \quad \forall ij \in N \quad (5)$$

معادله دوم ۶ زیست‌توده قابل‌انتقال در طول شبکه لجستیک را محدود به یک سایت می‌نماید.

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (6)$$

معادله سوم ۷ بیانگر حداکثر تعداد پالایشگاه‌های زیست‌انرژی است که مدل مجبور به باز کردن آنها در شبکه لجستیک می‌باشد.

$$\sum_{j \in N} y_j = w \quad (7)$$

نامعادله چهارم ۸ ارتباط منطقی دو متغیر باینری را در زنجیره تأمین بیان می‌کند به این صورت که زیست‌توده قابل‌انتقال فقط در صورت باز بودن پالایشگاه زیست‌انرژی در طول شبکه زنجیره تأمین می‌تواند تخصیص یابد.

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall ij \in N \quad (8)$$

نامعادله پنجم ۹ بیانگر ظرفیت پالایشگاه زیست‌انرژی برای دریافت زیست‌توده قابل‌انتقال می‌باشد. به این صورت که حجم زیست‌توده انتقال‌یافته به پالایشگاه از مزارع شناسایی شده باید کم‌تر از ظرفیت پالایشگاه باشد.

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} q_{ik} x_{ij} \leq Q_j y_j \quad \forall j \in N \quad (9)$$

معادله ششم ۱۰ بیانگر غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم در مسأله برنامه‌ریزی خطی می‌باشد.

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in N \quad (10)$$

نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی و انجام پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تلفیق آن با داده‌های حاصل از بازدیدهای میدانی، نقشه کاربری اراضی مزارع مورد مطالعه استخراج گردید. ارزیابی صحت نقشه‌های تولیدشده با

مسأله برنامه‌ریزی خطی مذکور در محیط برنامه‌نویسی لینگو کدنویسی و حل شد. مدت زمان ۶۰ دقیقه برای حل مدل در نظر گرفته شد که در تمام راه‌حل‌های اجراشده مدت زمان در نظر گرفته‌شده کم‌تر از این بازه زمانی بوده است.

حاضر، مساحت‌های برآورد شده برای هریک از کشت‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌دار با مساحت ارائه‌شده توسط جهاد کشاورزی وجود ندارد. سطح زیر کشت گندم به‌اندازه ۲۱٪، کلزا به‌اندازه ۱۱٪ کم‌تر از سطح ارائه‌شده توسط آمار منتشرشده توسط جهاد کشاورزی و سطح زیر کشت برنج به‌اندازه ۱۳٪ و سویا به‌اندازه ۶٪ بیش‌تر می‌باشد. به‌طور میانگین مساحت‌های برآورد شده به‌اندازه ۱۱٪ کم‌تر از مساحت ارائه‌شده توسط سازمان جهاد کشاورزی است. این تفاوت‌ها با توجه به بزرگ بوده مساحت مورد مطالعه (۲۰ هزار کیلومتر مربع) قابل اغماض بوده و در محدوده قابل قبول قرار دارد. نتایج این مطالعه با مطالعه (۱۴) در استان گلستان همخوانی دارد. هرچند که مساحت برآورد شده در مطالعه حاضر اریبی کم‌تر به اندازه ۲۷ درصد در برآورد سطح زیر کشت سویا و گندم از خود نشان می‌دهد.

استفاده از نمونه‌های اعتبارسنجی (۳۰٪) مورد آزمون واقع شد. صحت کلی طبقه‌بندی برای محصول گندم و کلزا با استفاده از تصاویر سنتینل معادل ۸۲٪ و برای محصول سویا و برنج با استفاده از تصاویر لندست معادل ۷۶٪ بوده است. ضریب کاپا برای طبقه‌بندی این محصولات به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۳ بوده است که خود دلالت بر مقبولیت دقت نقشه‌های تهیه‌شده دارد. جدول ۱ برآورد سطح زیر کشت محصولات مورد مطالعه در پژوهش حاضر در مقایسه با آمار ارائه‌شده جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که دلیل پایین بودن صحت کلی برای محصول سویا و برنج، شاید مربوط به عدم استفاده از سری زمانی تصویر و تداخل طیفی مربوط به کشت‌های مختلف بوده است که در مطالعه حاضر استخراج سطح زیر کشت محصولات فقط برای یک دوره انجام شد. بر اساس نتایج پژوهش

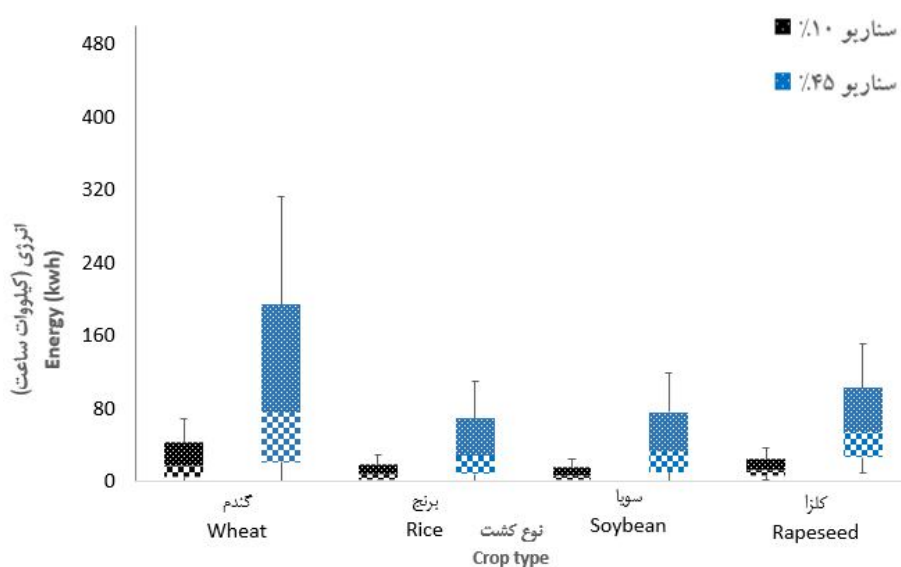
جدول ۱- مساحت اراضی برآورد شده از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مساحت ارائه‌شده توسط جهاد کشاورزی.

Table 1. Estimation of farmland areas using remote-sensing analysis compared with statistics from the Ministry of Agriculture.

میزان تولید محصول (تن) Production level (tn)	مساحت زیر کشت (آمار جهاد کشاورزی، هکتار) Estimated area (Ministry of Agriculture) (ha)	مساحت برآورد شده (پردازش تصاویر ماهواره‌ای: هکتار) Estimated area (remote-sensing analysis) (ha)	نوع کشت Crop type
1260000	299905	237340	گندم Wheat
168000	83720	74411	کلزا Rapeseed
682819	118754	133904	برنج Rince
36100	21050	22308	سویا Soybean

هم‌چنین نشان داد که در بدبینانه‌ترین راه‌حل (۱۰٪ بازیابی) مقدار ۰/۹ میلیون کیلووات انرژی و در خوش‌بینانه‌ترین راه‌حل (۴۵٪ بازیابی) مقدار ۳/۸ میلیون کیلووات انرژی در واحد سطح در منطقه مورد مطالعه قابل دسترس است (شکل ۵). انرژی تولیدشده از این ضایعات می‌تواند هم وابستگی این استان به مصرف انرژی‌های فسیلی را به حداقل ممکن برساند، ضمن این‌که منجر به کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا و تولید دی‌اکسیدکربن ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی بخصوص در انتهای فصل برداشت گردد (۷، ۱۲).

سهم انرژی حاصل از برداشت زیست‌توده قابل بهره‌برداری شده برای هر کشت با توجه به راه‌حل‌های برداشت زیست‌توده (۱۰ و ۴۵ درصد) در شکل ۴ ارائه شده است. مقدار متوسط انرژی برای زیست‌توده برآورد شده در راه‌حل اول بین ۹ و ۲۶ کیلووات ساعت برای محصول سویا و گندم به ترتیب متغیر بوده است. حال آن‌که این مقادیر در راه‌حل دوم دارای دامنه ۴۰ و ۱۱۸ کیلووات ساعت برای محصول برنج و گندم متغیر بوده است. بیش‌ترین مقدار انرژی تولیدشده در راه‌حل اول، متعلق به بقایای محصول برنج و در راه‌حل دوم متعلق به گندم بوده است. نتایج

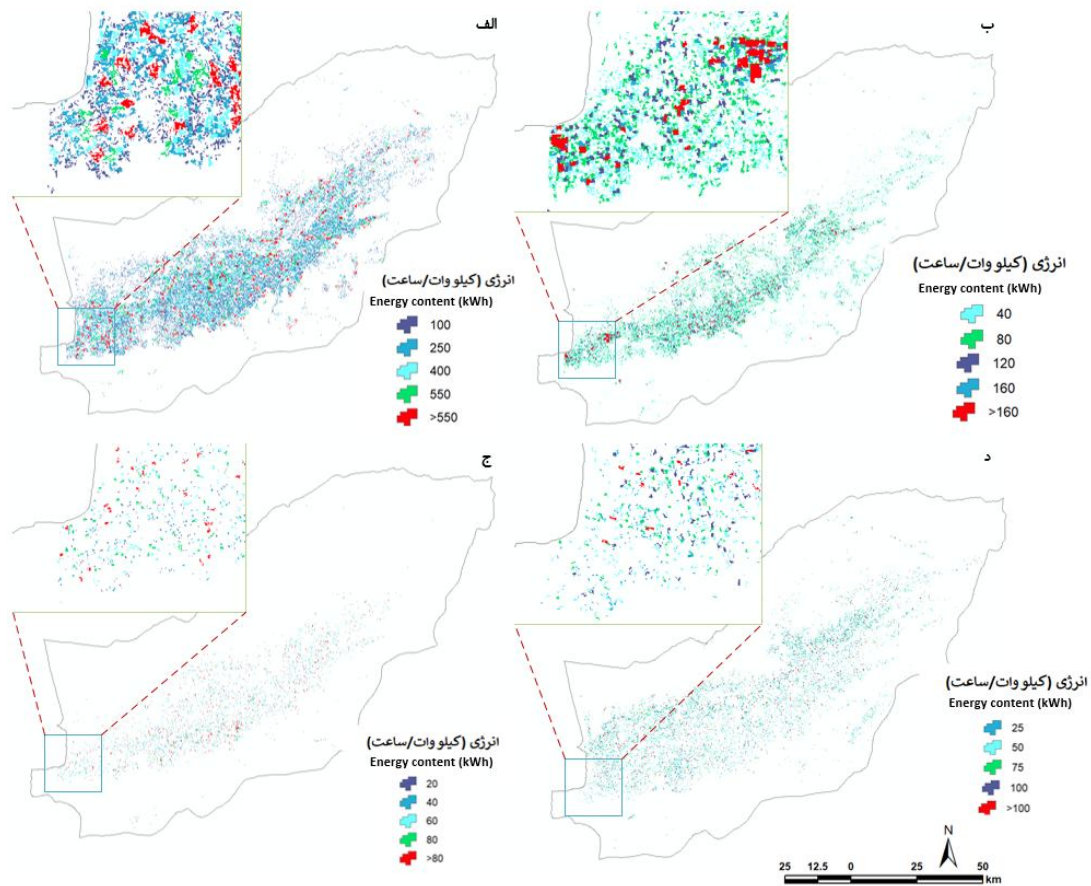


شکل ۴- انرژی حاصل از برداشت زیست‌توده قابل بهره‌برداری برای کشت‌های مورد مطالعه در دو راه‌حل ۱۰ و ۴۵ درصد برداشت زیست‌توده.

Figure 4. Estimate the energy content of crop residue biomass for the studied crops under two recoverable scenarios: 10% and 45%.

مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است.

نقشه زیست‌توده تولیدشده در واحد انرژی (کیلووات ساعت) برای هر یک از کشت‌های

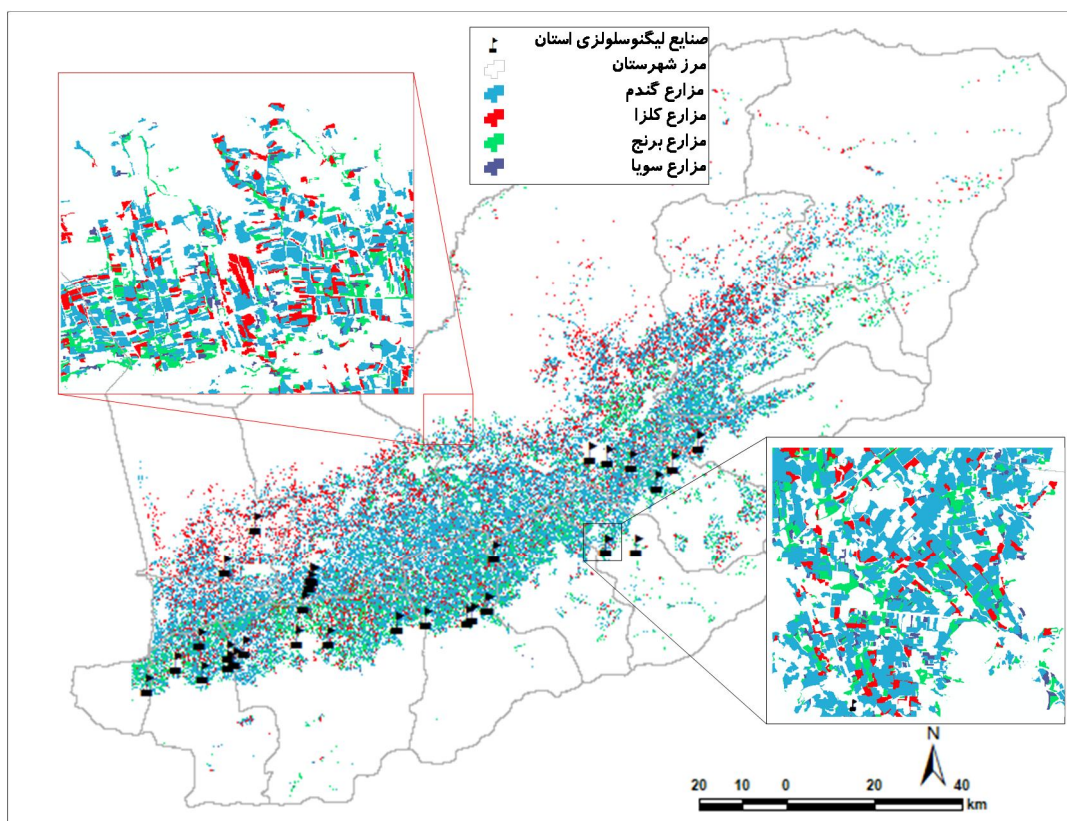


شکل ۵- نقشه زیست‌توده قابل دسترس به انرژی (کیلووات ساعت) در هریک از مزارع مورد مطالعه (الف) گندم، (ب) برنج، (ج) سویا و (د) کلزا.

Figure 5. Energy content map (kWh) for each farm type: A) wheat, B) Rice, C) Soybean, and D) Rapeseed.

مزرعه برنج، ۷۷۳۸ مزرعه سویا و ۱۹۳۶۱ مزرعه کلزا بالای ۲ هکتاری در استان گلستان می‌باشد. همان‌طور که از نقشه پیدا است تمرکز زیست‌توده (مزارع آبی) بیشتر در بخش غربی و مرکز استان است و با حرکت به سمت شرق استان و افزوده شدن بر درجه خشکی هوا از تعداد مزارع و مساحت آن‌ها نیز کاسته شده است.

پس از تهیه نقشه پتانسیل زیست‌توده، محاسبات مربوط به شبکه لجستیک با استفاده از مدل بهینه‌سازی آغاز شد. شکل ۶ شبکه لجستیک منطقه مورد مطالعه را با تمام جزئیات ممکن بر روی نقشه پتانسیل زیست‌توده (تفکیک‌شده بر اساس کشت‌های مختلف) را نشان می‌دهد. این شبکه مشتمل بر ۳۴ کارخانه لیگنوسلولزی فعال، ۲۱۴۹۷ مزرعه گندم، ۳۵۵۰۸

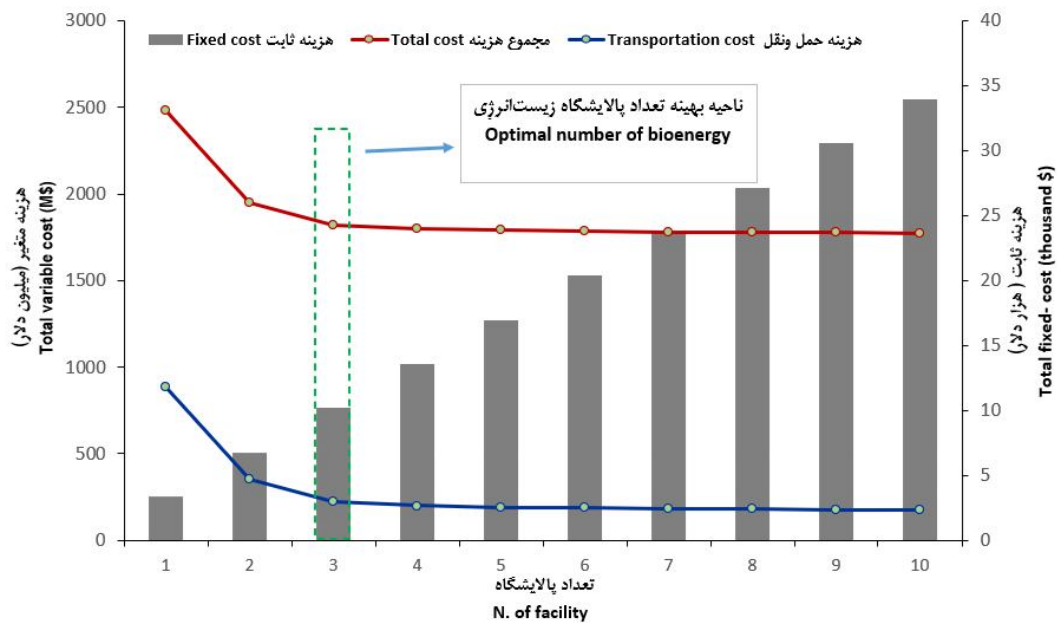


شکل ۶- شبکه لجستیک زنجیره تأمین زیست‌توده- زیست انرژی (موقعیت مزارع کشت‌های بررسی شده به همراه موقعیت صنایع لیگنوسلولزی استان) در منطقه مورد مطالعه.

Figure 6. Logistical configurations of the biomass to bioenergy supply-chain, including farmlands and the locations of industries within the province, across the study area.

جمع‌آوری و هزینه عملیات اجرایی) برای کل زنجیره تأمین در شکل ۷ ارائه شده است. با افزایش هزینه‌های ثابت که مستقل از هزینه‌های متغیر می‌باشد، هزینه حمل‌ونقل بیش‌ترین مقدار کاهش را داشته است. بیش‌ترین کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل درجایی اتفاق افتاده است که مجموع هزینه‌های ثابت ۱۰۱۹۰ دلار بوده است، افزایش بیش‌تر هزینه‌های ثابت سیستم معادل باز کردن تعداد سایت‌های بیش‌تر بوده و لزوماً کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل را به‌طور معنی‌داری در بر نداشته است.

از آنجایی که تعداد مکان‌های بهینه پالایشگاه زیست‌انرژی از قبل معلوم نیست، بدین‌منظور مدل بهینه‌سازی را با حداکثر ده مکان و فاصله مشخص حمل‌ونقل مشخص اجرا شد. هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه ثابت و همچنین مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین زیست‌توده حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی بر روی گراف ترسیم گردید تا از این طریق تعداد پالایشگاه‌های بهینه با توجه به فواصل حمل‌ونقل و همچنین مقدار زیست‌توده قابل‌عرضه در منطقه مورد مطالعه تعیین گردد. هزینه ثابت، متغیر و هزینه کل (مجموع هزینه حمل‌ونقل، هزینه خرید و



شکل ۷- مجموع هزینه، هزینه متغیر و ثابت مربوط به شبکه تأمین زیست‌توده در منطقه مطالعاتی.

Figure 7. Total cost, including variable and fixed-charged costs related to the biomass-to bioenergy supply-chain over the study area.

کافی است. هزینه‌های مربوط به احداث و عملیات اجرای پالایشگاه زیست‌انرژی به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت زیست‌توده به‌صورت نمودار میله‌ای (حاکستری) نشان داده شده است. با افزایش تعداد پالایشگاه زیست‌انرژی، هزینه ثابت به‌طور خطی افزایش یافته است. مقدار حداقل این هزینه در تعداد سایت یک معادل ۳۳۹۶ هزار دلار و مقدار حداکثر آن در تعداد سایت ۱۰ معادل ۳۳۹۶۵ دلار بوده است. نتایج این تحلیل نشان داد که مجموع هزینه‌های ساخت پالایشگاه زمانی در حداقل است که هم هزینه ثابت و هم هزینه متغیر در کم‌ترین مقدار خود قرار دارد؛ بنابراین لازم است که نقطه بهینه یا محل سربه‌سری نمودار که هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و مجموع هزینه در حداقل خود دارد شناسایی شود. مجموع هزینه‌های شبکه تأمین زیست‌توده (منحنی قرمز) حاصل جمع هزینه متغیر (هزینه حمل‌ونقل و هزینه خرید و جمع‌آوری زیست‌توده از مزارع) و هزینه ثابت (هزینه احداث و عملیات اجرای پالایشگاه

بیش‌ترین هزینه حمل‌ونقل درجایی اتفاق افتاده است که هزینه ثابت در حداقل مقدار خود قرار داشته است. در مطالعه حاضر این نقطه بهینه درجایی که تعداد سه پالایشگاه زیست‌انرژی باز شدند شناسایی گردید. در این نقطه هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه ثابت و همچنین هزینه کل حداقل بوده و کم‌ترین هزینه را برای سیستم زنجیره تأمین به دنبال دارد. منحنی هزینه حمل‌ونقل مربوط به انتقال مواد خام در دسترس به رنگ آبی نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سایت‌های بایوانرژی هزینه‌های حمل‌ونقل به‌صورت نمایی کاهش یافته است. طوری که با افزایش تعداد سایت از ۱ به ۲، هزینه حمل‌ونقل به‌طور معنی‌داری حدود ۶۰٪ کاهش یافته است. درصد کاهش هزینه حمل‌ونقل از دو سایت به سه به‌اندازه ۳۷٪ و از سه سایت به چهار به‌اندازه ۱۰٪ و از سایت چهارم به بعد کمتر از ۵٪ بوده است. به‌عبارت‌دیگر با توجه به شکست معنی‌دار منحنی هزینه حمل‌ونقل، تعداد سه پالایشگاه زیست‌انرژی در عرصه موردنظر

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از تصاویر سنتینل-۲ با صحت کلی بالایی (۷۰٪) قادر به شناسایی مزارع حاوی زیست‌توده است. مساحت تخمینی با آمار منتشرشده توسط سازمان جهاد کشاورزی برای سال مطالعه شده به‌اندازه ۱۱٪ اریبی دارد. در این مطالعه از ضریب کاپا برای اعتبارسنجی نقشه‌های تولیدشده استفاده شد، پیشنهاد می‌شود از ضریب متیوز نیز بهره‌برداری شده و نتایج آن با ضریب کاپا مقایسه گردد. نتایج نشان داد که پتانسیل بالایی از زیست‌توده لیگنوسلولزی در سطح استان گلستان وجود دارد که می‌تواند برای تولید سوخت‌های زیستی مورد استفاده قرار گیرد. تعداد ۲۱۴۹۷ مزرعه گندم، ۳۵۵۰۸ مزرعه برنج، ۷۷۳۸ مزرعه سویا و ۱۹۳۶۱ مزرعه کلزا بالای ۲ هکتاری (جمعاً ۴۶۸ هکتار) در سطح استان شناسایی گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی نشان داد که تعداد ۳ پالایشگاه با مجموع هزینه ۱۸۲۱ میلیون دلار می‌تواند کل زیست‌توده قابل‌دسترس را پردازش نماید. در این راه‌حل پیشنهادی، تعداد ۲۸۲۰ سایت زیست‌توده، در شعاع متوسط حمل‌ونقل ۲۷ کیلومتر و حداکثر ۸۴ کیلومتر می‌تواند از مزارع اطراف جمع‌آوری و به سمت پالایشگاه‌های منتخب هدایت گردد. مطالعه حاضر، اولین پژوهش در زمینه استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی بخش کشاورزی به‌منظور تولید سوخت‌های تجدیدپذیر در استان باشد، لازم است چنین مطالعاتی در سایر استان‌های کشور نیز انجام شود تا با داشتن اطلاعات بیش‌تر مدیران دولتی و خصوصی به این سمت گرایش پیدا کنند و نیاز کشور به مصرف سوخت‌های فسیلی به حداقل رسانیده شود. در پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود که ارتباط برداشت منابع زیست‌توده با راه‌حل‌های مجاز برداشت زیست‌توده غیر از موارد آزمایش‌شده در پژوهش حاضر، بر میزان کربن آلی و سایر عناصر

زیست‌انرژی) می‌باشد. به‌طورکلی مجموع هزینه‌ها روند کاهش را طی کرده است، طوری که با افزایش تعداد سایت‌های بایوانرژی فاصله حمل‌ونقل کاهش و از طرفی هزینه ثابت افزایش‌یافته است که در نهایت منجر به کاهش مجموع هزینه شده است. تجزیه‌وتحلیل نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل بهینه‌سازی، با سه پالایشگاه نشان داد که هزینه حمل‌ونقل معادل ۲۲۲/۲ میلیون دلار، هزینه متغیر ۱۵۹۹ میلیون دلار مربوط به خرید و جمع‌آوری زیست‌توده است که می‌تواند به‌عنوان یک پاسخ بهینه در نظر گرفته شود. به‌عبارت‌دیگر، می‌توان دریافت کرد که حداقل هزینه زنجیره تأمین زیست‌توده درجایی شکل‌گرفته است که مجموع هزینه‌ها در نقطه/محل سربه‌سری نمودار زنجیره تأمین معادل ۱۸۲۱ میلیون دلار است. حداکثر زیست‌توده مورد تقاضا در کل سیستم زنجیره تأمین در این محل معادل ۱/۵۶۰ میلیون کیلووات ساعت انرژی بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

فراوانی، در دسترس بودن و مصرف گسترده انرژی حاصل از سوخت‌های هیدروکربنی (نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ) اگرچه به رشد سریع اقتصادی جوامع پیشرفته کمک کرده است، اما به‌واسطه انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق و انتشار گاز دی‌اکسید کربن، جهان را با تغییرات شگرفی روبه‌رو کرده است. به همین دلیل کشورهای متعددی تصمیم گرفته‌اند تا بخشی از انرژی موردنیاز خود را از منابع تجدیدشونده طبیعی تأمین کنند. زیست‌توده و یا ضایعات حاصل از فعالیت‌های کشاورزی و جنگلداری یک منبع ارزشمند برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا محسوب می‌شوند، متأسفانه در کشور ما اهمیت این موضوع هنوز به‌خوبی درک نشده است و سرمایه‌گذاری چندانی صورت نگرفته است.

ملی نخبگان (طرح دکتر کاظم آشتیانی به شماره ۱۵/۲۸۲۸۴ مصوب خرداد ۱۴۰۳) در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. از سرکار خانم مهندس فاطمه طالبی و آقای دکتر جهانگیر محمدی که در گردآوری اطلاعات اولیه به نویسنده کمک کردند قدردانی می‌شود.

ضروری خاک بررسی گردد تا با دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر، گام‌های مؤثری برداشته شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور (به شماره ۹۹۰۲۲۳۷۲ مصوب اسفند ۱۳۹۹) و همچنین حمایت بنیاد

منابع

- Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (4), 887-894.
- Camero, C., Sowlati, T., & Pavel, M. (2016). Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *J. Chemical Engineering Research and Design*. 107, 218-235.
- Gracia, C., Velázquez-Martí, B., & Estornell, J. (2014). An application of the vehicle routing problem to biomass transportation. *Biosystems Engineering*. 124, 40-52.
- Magazzino, C., Mele, M., Schneider, N., & Shahbaz, M. (2021). Can biomass energy curtail environmental pollution? A quantum model approach to Germany. *J. of Environmental Management*. 287, 112293.
- Sahoo, K., Upadhyay, A., Runge, T., Bergman, R., Puettmann, M., & Bilek, E. (2021). Life-cycle assessment and techno-economic analysis of biochar produced from forest residues using portable systems. *J. Life Cycle Assessment*. 26, 189-213.
- Sahoo, K., Mani, S., Das, L., & Bettinger, P. (2018.) GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants. *Biomass and Bioenergy*. 110, 63-74.
- Van Holsbeeck, S., & Srivastava, S. K. (2020). Feasibility of locating biomass-to-bioenergy conversion facilities using spatial information technologies: A case study on forest biomass in Queensland, Australia. *Biomass and Bioenergy*. 139, 105620.
- IRNA, 2021. "XXXXX-Share of renewables in Iran energy mix rising". IRNA English.
- Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. *Sustainability*. 13 (13), 7328.
- Sessions, J., Smith, D., Trippe, K. M., Fried, J. S., Bailey, J. D., Petitmermet, J. H., & Campbell, J. D. (2019). Can biochar link forest restoration with commercial agriculture? *Biomass and Bioenergy*. 123, 175-185.
- Nickpour, M., Khalili, M., Pazouki, M., Khalili, M., & Pazouki, M. R. (2014). Iran's potential to convert biomass into biofuel. *In CHEMTECH conference*.
- Azadback, M., Safieddin Ardebili, S. M., & Rahmani, M. (2021). Potential for the production of biofuels from agricultural waste, livestock, and slaughterhouse waste in Golestan province, Iran. *Biomass Conversion and Biorefinery*. pp. 1-11.
- Kamkar, B., Alizadeh Dehkordi, P., Aalae Bazkiaee, P., & Abdi, O. (2021). Determination of the compliance of soybean lands with land suitability maps (Case Study: Golestan Province). *Agricultural Engineering*. 44 (1), 121-139.

14. Kamkar, B., Dashti Marvili, M., & Kazemi, H. (2021). Comparison of vegetation indices in estimating the residue biomass of spring and autumn crops (Watersheds in the southwest of Golestan province). *J. Water and Soil Conservation*. 27 (6), 121-136.
15. Bascietto, M., Sperandio, G., & Bajocco, S. (2020). Efficient estimation of biomass from residual agroforestry, *ISPRS J. Geo-Information*. 9 (1), 21.
16. Ezzati, S., & Mohammadi, J. (2024). A decision support model for planning of spatial large-extent biomass to bioenergy procurement network. *Bioresource Technology Reports*. 27, 101886.
17. Saadat, H., Adamowski, J., Bonnell, R., Sharifi, F., Namdar, M., & Ale-Ebrahim, S. (2011). Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single-date analysis of satellite imagery. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 66 (5), 608-619.
18. Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*. 122, 11-21.
19. Yaghouti, H., Pazira, E., Amiri, E., & Masihabadi, M. H. (2018). Application of satellite imagery and remote sensing technology to estimate rice yield. *J. of Water and Soil Resources Conservation*. 7 (3), 55-69.
20. Ayamga, E. A., Kemausuor, F., & Addo, A. (2015). Technical analysis of crop residue biomass energy in an agricultural region of Ghana. *Resources Conservation Research*. 96, 51-60.
21. Nordin, N. A. M., Zaharudin, Z. A., Maasar, M. A., & Nordin, N. A. (2012). Finding the shortest path of the ambulance routing: Interface of Algorithm using C# programming, In 2012 *IEEE symposium on humanities, science and engineering research*. 1569-1573. IEEE.
22. ERIA. (2019). 'Cost analysis of biomass power generation'. In P., Han, Kimura, S. Wongsapai, W., & Achawangku, Y. (eds.). Study on Biomass Supply Chain for Power Generation in Southern Part of Thailand. ERIA Research Project, *Report FY2018 no.9, Jakarta: ERIA*, pp. 50-56.

