نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۱۸-۳۰

مدل تحلیل مکانی برای تصمیم گیری استراتژیک برای تولید زیست انرژِی از منابع لیگنوسلولزی بخش کشاورزی

ستار عزتی
استادیار، گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران (نویسنده مسئول)
sattar.ezzati@gau.ac.ir

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۲/۱۱.

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۴/۳۰

کلمات کلیدی:
زیست توده، مدل‌سازی، حمل ونقل، مکان یابی، بهینه‌سازی، سوخت زیستی

چکیده

بخش عمده زیست توده حاصل از فعالیت های کشاورزی در عرصه یا رها شـده و یا سـوزانده می شـود. نتیجه این عمل، برجای گذاشـتن تأثیرات نامطلوب بر روی محیط زیسـت اسـت، اما جمع آوری هدفمند آن می‌تواند هم اثرات نامطلوب محیطی را کاهش داده و هم بخشـی از نیاز کشـور به استفاده از انرژی های فسیلی را مرتفع سازد. هدف تحقیق حاضر، پتانسیل یابی منابع زیست توده حاصل از فعالیت های کشاورزی به عنوان یک منبع پایدار جهت تولید انرژی های تجدید پذیر و محاسـبه هزینه حمل ونقل آن در استان گلستان است. بدین منظور، ابتدا نقشه کاربری اراضی و توزیع پراکنش مکانی منابع عرضـه زیسـت توده از ۴ کشـت عمده (گندم، سـویا، برنج و کلزا) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد. حجم زیست توده قابل عرضه به واحد انرژی (کیلووات ساعت) برآورد گردید. سپس یک مدل بهینه‌سـازی جهت طراحی شـبکه زنجیره تامین زیسـت‌توده-انرژی توسعه داده شد. صحت کلی و ضریب کاپا برای طبقه بندی نقشه محصول گندم و کلزا معادل ۸۲٪ و ۰/۷۴ و برای محصول سویا و برنج معادل ۷۶٪ و ۰/۶۳ بوده اسـت. نتایج برآورد مسـاحت تعداد ۸۴۱۰۴ مزرعه (بالای ۲ هکتار) با مساحت ۴۶۸ هزار هکتار را شناسایی نمود که با آمار ارائه شده توسط جهاد کشاورزی اریبی ۱۱٪ را نشان می دهد. مقدار زیست توده قابل برداشـت از این مزارع معادل ۳/۸ میلیون کیلووات انرژی در سـناریو خوش بینانه بوده است. نتایج مدل بهینه سازی، احداث ۳ پالایشگاه زیستی برای فرآوری زیست توده با مجموع هزینه معادل ۱۸۲۱ میلیون دلار را پیشنهاد داد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

۱. مقدمه

سلولز و لیگنین جزو غنی ترین پلیمرهای زیستی بر روی زمین هستند. زیست توده حاصل از مواد لیگنو سلولزی به عنوان یکی از گزینه های نوید بخش برای تولید سوخت‌های زیستی و سایر تولیدات صنعتی تجدیدپذیر در سطح گسترده در دنیا مطرح است (رنتیزال و همکاران، ۲۰۰۸). حجم عظیمی از پسماندهای زیستی در بخش کشاورزی شامل باگاس نیشکر، الیاف ساقه کلزا، غلات و ...، بعد از تولید محصول نهایی از چرخه تولید مجدد[1] خارج می‌شود. بنابراین بازیافت و درعین‌حال مدیریت هدفمند این ضایعات و پسماند ها بایستی به‌منظور تولید محصولات با ارزش افزوده بالا نظیر انرژی حرارتی و الکتریسیته (کامبرو و همکاران، ۲۰۱۵) و یا بیودیزل (گراسیا و همکاران، ۲۰۱۴) به صورت بومی تعریف شده و مورد بهره برداری قرار گیرد. به‌این‌ترتیب، می‌توان گفت با اجرای طرح هایی نظیر تبدیل و فرآوری پسماندهای لیگنوسلولزی به سوخت‌های زیستی و یا انرژی های پاک، نه‌تنها بخشی از این زیان‌هایی که هر سال رخ می دهد جبران می شود، بلکه به رفع آلودگی محیط‌زیست و اشتغال‌زایی نیز کمک شایانی می نماید. برای سالیان متوالی و در حال حاضر، مواد لیگنوسلولزی به‌عنوان پسماند تلقی شده و مورد بازیافت قرار نمی گیرد. به همین دلیل در خیلی از موارد این منابع سلولزی در عرصه یا رها شده و یا به منظور آماده کردن عرصه برای کشت مجدد سوزانده می شود. نتیجه این عمل، برجای گذاشتن تأثیرات نامطلوب بر روی محیط‌زیست نظیر ازبین رفتن موجودات خاکزی لایه سطحی خاک است. جمع آوری و سازمان‌دهی مواد لیگنوسلولزی و تخمین اینکه چه حجمی از منابع زیست‌توده در یک مقیاس و سیع وجود دارد، یک فعالیت پیچیده و هزینه بر است. به لحاظ اینکه معمولاً مبادی عرضه‌کننده زیست توده به‌صورت پراکنده و به دور از منبع مصرف‌کننده/پالایشگاه‌های زیستی قرار دارند، که این امر هزینه حمل‌ونقل و جابجایی آن را تقریباً ناممکن می‌سازد [۴]. علاوه بر این، بسته به منطقه عرضه‌کننده، تیپ زیست‌توده و فصل برداشت، مواد لیگنوسلولزی دارای سطح رطوبت ٪۶۰-۳۵ هستند، که می‌تواند بر هزینه حمل ونقل و تحویل نهایی آن به یارد پالایشگاه زیستی تاثیر بگذارد (ساهو و همکاران، ۲۰۱۸).

مطالعات انجام شده در کشورهای اروپایی و شمال آمریکا نشان می‌دهد که یافتن هاب‌های زیست توده جهت فراوری مواد لیگنو سلولزی در شت و تبدیل آن به محصول با ارزش کیفی بالاتر در قالب استقرار یک زنجیره تولید-تامین به‌صورت مستمر می‌تواند به اقتصادی بودن این فعالیت کمک نموده و هزینه‌های حمل ونقل آن را جبران نمایید [۶]. ضمن اینکه از این طریق قیمت تمام شده محصول نهایی نیز می‌تواند به حداقل ممکن کاهش یابد. این شیوه (یعنی جمع‌آوری هدفمند مواد دور ریز لیگنوسلولزی) نه تنها به کاهش هزینه های احیایی و پاک نمودن عرصه قابل فعالیت (کشاورزی و جنگل) بعد از برداشت محصول نهایی، کاهش ریسک حریق ناشی از سوزاندن این مقطوعات و افزایش حاصلخیزی خاک کمک نموده، بلکه با برداشت و هدایت آنها به منظور تولید محصولات با ارزش افزوده بالا، بهبود اقتصاد کلان کشور و رهایی از وابستگی به منابع فسیلی را به دنبال دارد (کندال و چانگ، ۲۰۰۹). مواد فرعی حاصل از این فرایند نظیر بیوچار نیز می‌تواند به عنوان محافظت کننده خاک و به خصوص در مناطق خشک، به منظور تثبیت خاک و تقویت پوشش گیاهی بکار گرفته شود (سشن و همکاران، ۲۰۱۹). در کشور ما نیز همانند سایر کشورهای دنیا، با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی، مشکلات ناشی از مصرف سوخت های هیدروکربنی (حدود ٪۶۰ سوخت خودروها به آلاینده تبدیل می شود) و بالا رفتن هزینه یارانه‌ای سوخت، سیاست‌های از قبیل ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، محدودیت برق‌رسانی و تامین سوخت برای نقاط دورافتاده و همچنین تعهد به اجرای کنوانسیون های بین‌المللی (از جمله توافقنامه پاریس)، استفاده از منابع جایگزین مناسب برای تولید سوخت های فسیلی همواره در کانون توجه بسیاری از محققان و مدیران ارشد در سازمان‌های دخیل در انرژی های تجدیدپذیر بوده است. انجام چنین مطالعاتی در داخل کشور بسیار مهم بوده و زمینه را برای اتخاذ سیاست های درست در آینده نزدیک هموار می سازد. بر اساس آمار منتشر شده، هر سال حدود ۱۴۰ میلیارد مترمکعب ضایعات کشاورزی در جهان تولید می شود که سهم ایران به طور متوسط حدود ۳۳ میلیون تن (۲۳ میلیون تن ضایعات کشاورزی (ضایعات دور ریز میوه و پسماندهای لیگنوسلولزی) و ۱۰ میلیون تن پسماند حاصل از فعالیت های جنگل‌داری) به صورت سالیانه است. مطالعات متعددی با استفاده از روش های مختلف سنجش از دور به همراه پردازش های مکانی در

1 Recycling

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به منظور تعیین سطح و تغییرات میزان عملکرد اراضی به عنوان یک راه حل ارزشمند در داخل و خارج کشور انجام شده است (کامکار و همکاران، ۱۴۰۰). این در حالی است که استفاده کاربردی از این فناوری برای برآورد مقدار زیست‌توده جهت تولید انرژی های زیستی با استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی در بخش کشاورزی داخل کشور کمتر مسبوق به سابقه است و بیشتر اطلاعات در این زمینه متکی بر اطلاعات مستخرج از وزارت جهاد کشاورزی می‌باشد. به عنوان مثال (نیکپور و همکاران، ۲۰۱۴) به بررسی پتانسیل کشور برای تولید بایواتانول برمبنای ضایعات کشاورزی پرداختند. نتایج آنها که در سال ۲۰۱۰ حدود ۷۴/۵ میلیون تن محصول زراعی برداشت شده است که از این مقدار ۲۳ میلیون تن آن ضایعات بوده است که می تواند برای تولید ۱۰۳۵۰ میلیون مترمکعب بیوگاز بکار گرفته شود. 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، ۲۰۲۱) انجام شد. آنها اعلام کردند که از مجموع منابع ارزیابی شده، حدود ۲۰۸۶ میلیون کیلووات الکتریسیته در سال قابل تولید است که برای تامین نیاز ۶۹٪ از جمعیت استان کافی است. مطالعه تفکیک اراضی زیرکشت برنج و سویا با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ به روش حداکثر احتمال، حداقل فاصله از میانگین و فاصله ماهالانویی از زیر مجموعه روش های طبقه‌بندی نظارت شده نشان داد که طبقه بندی با روش حداکثر احتمال منجر به افزایش دقت کلی تا ۹۵/۵ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۲ شده بود که از روش‌های دیگر متمایز بود (کامکار و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین سطح برآورد شده آنها در مقایسه با آمار جهاد کشاورزی اریبی ۱۵ درصد را از خود نشان داد. از دیگر مطالعات می توان برآورد سطح زیرکشت گندم و سویا با استفاده از تصاویر لندست +ETM در استان گلستان اشاره داشت (سادات و همکاران، ۲۰۱۱). 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 زیست توده سالیانه معادل ۱/۱۲ گرم در هکتار است که زیست توده کل معادل ۱۳۲ گیگاگرم تخمین زده شد که بطور پراکنده توزیع در سطح ۲۲۷۶ کیلومترمربع توزیع شده است (باسیتو و همکاران، ۲۰۲۰). مرور منابع انجام شده نشان می دهد که مطالعات زیادی در ارتباط با تولید انرژی از زیست‌توده بخش کشاورزی (زیست توده لیگنوسلولزی) انجام نشده است و مطالعات اندکی که در زمینه برآورد زیست‌توده وجود دارد بر اساس آمار منتشر شده از وزارت جهاد و موسسه تحقیقات کشاورزی بوده است و اطلاعات دقیقی بر مبنای پردازش تصاویرماهواره‌ای و برداشت زمینی جهت تخمین پتانسیل واقعی این محصولات در سطح کشور وجود ندارد. به عبارت دیگر، نقطه شروع زنجیره تامین مواد خام مورد نیاز صنعت تولید سوخت‌های زیستی نه تنها در کل کشور شناخته شده نیست، بلکه در مقیاس محلی نیز ناشناخته و نیازمند جمع‌آوری اطلاعات دقیق می‌باشد تا انجام محاسبات بعدی در این راستا به واقعیت نزدیک باشد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، پتانسیل‌یابی منابع لیگنوسلولزی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی به عنوان یک منبع پایدار به منظور تولید انرژی های تجدیدپذیر به عنوان یک طرح پایلوت در استان‌گلستان می‌باشد. در راستای رسیدن به این هدف سوالات زیر مطرح است: ۱) پراکنش مکانی و جغرافیایی مکان های عرضه کننده مواد لیگنوسلولزی در سطح استان گلستان چگونه است؟ ۲) توزیع مکانی مدل استراتژیک لجستیک زنجیره تولید و تامین زیست توده-سوخت های زیستی در مقیاس منطقه‌ای چگونه است؟

۲. روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

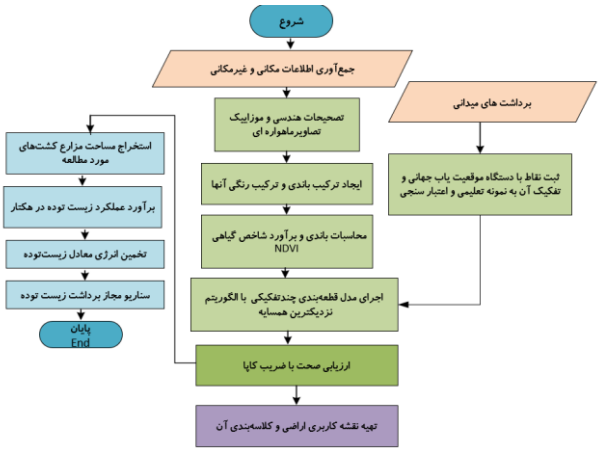
منطقه مطالعاتی در این تحقیق، استان گلستان به مساحت ۲۰۰۵۸/۴۲ کیلومترمربع واقع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه و ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی است. طیف متنوعی از کاربری‌های مختلف (جنگل، جنگلکاری، کشاورزی (کشت دیم، آبی)، مرتع، منابع آبی و مناطق مسکونی) در سطح استان مشاهده می شود. براساس نقشه کاربری اراضی مستخرج از پردازش مکانی و آمار منتشر شده از جهاد کشاورزی وسعت اراضی تحت کشاورزی استان در سال زراعی ۱۳۹۹-۴۰۰ معادل ۶۶۱ هزار هکتار است که ۵۴٪ اراضی آبی و ۴۶٪ اراضی دیم می باشد. استان گلستان دارای آب و هوای معتدل و از نظر کشاورزی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بسیار پر بازده است. به دلیل تنوع آب و هوایی (کوهستانی، معتدل مدیترانه و نیمه خشک) در استان ارقام مختلف محصولات زراعی نظیر برنج، گندم، جو، پنبه، دانه‌های روغنی (آفتابگردان، ذرت، کلزا، سویا و...) و اخیرا چغندرقند از محصولات اصلی بخش کشاورزی در این استان می باشد.

۲-۲- برآورد زیست‌توده قابل دسترس

به منظور اطلاع از موقعیت مکانی زمین‌های زیرکشت محصولات پاییزه (کلزا و گندم) و بهاره (برنج و سویا)، ابتدا تقویم زراعی محصولات کشاورزی و نوع محصولات منطقه مورد مطالعه برای سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ از سازمان جهاد کشاورزی استان تهیه شد. اطلاع از تاریخ کشت های مورد مطالعه به منظور تهیه تصاویر سنجش از دور در دو زمان اوج سبزینگی و تاریخ برداشت بوده است [۱۵]. بر این اساس، تاریخ کاشت محصولات پاییزه (گندم و کلزا) در آبان- آذر، اوج سبزینگی 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 سبزینگی در مرداد-شهریور و برداشت در آبان-مهر به ترتیب بوده است. متاسفانه بخش وسیعی از اطلاعات و آمار منتشر شده توسط جهاد کشاورزی مربوط به کشت های استان یا در دسترس نیست و یا در صورت وجود هم اطلاعات تشریحی بدون دسترسی به موقعیت مکانی کشت‌ها بوده و تقریبا غیرقابل استفاده است. بر این اساس در این تحقیق جهت اطمینان از موقعیت مکانی کشت‌ها در سال زراعی مورد مطالعه، ابتدا موقعیت و مساحت آنها بر روی تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ شناسایی و بطور تصادفی حدود ۴۰-۵۰٪ از این مناطق هم در اوج سبزینگی و هم در زمان برداشت کشت های مورد مطالعه مورد بازدید میدانی واقع شد. در هر مزرعه نوع کشت، موقعیت و مساحت آن با استفاده از دستگاه مختصات‌یاب جهانی[۲] و مترلیزری برداشت گردید. برای صحت سنجی سایر نمونه‌ها (۵۰٪ باقی‌مانده) فقط به پردازش‌های مکانی در سامانه اطلاعات جغرافیایی و آخرین نقشه کاربری اراضی مربوط به سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ اکتفا گردید. در تحقیق حاضر، تصاویر سنتینل-۲ به عنوان تصویر پایه و تصاویر لندست ۸ به عنوان داده کمکی (درجاهایی که تصویر دارای پوشش ابر و ...بود)، جهت بهبود عملکرد و افزایش کارایی تشخیص کاربری‌های مختلف، تصویر مربوط به تاریخ آبان ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای از وب‌سایت کاوشگر سطح زمین، سازمان زمین شناسی ایالات متحده[۳] تهیه گردید. به منظور تهیه تصاویر چندطیفی و انجام پردازش های مکانی در محیط نرم افزار eCognition باهم ادغام شدند. به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای، در مرحله اول تصاویر خام برای پردازش‌های اولیه (وجود خطای هندسی و آتمسفریک) مورد بررسی قرار گرفتند (سیال و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات یاقوتی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) شاخص مناسبی برای تخمین زیست توده گندم و کلزا بوده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر برای تهیه نقشه سطح زیر کشت هریک از محصولات کشت پاییزه و بهاره، از این شاخص در زمان‌های مورد نظر مطابق با تقویم زراعی در استان گلستان استفاده شد. نمودار جریانی مراحل انجام کار برای پردازش‌های مربوط به سنجش ازدور در شکل (۱) ارائه شده است.



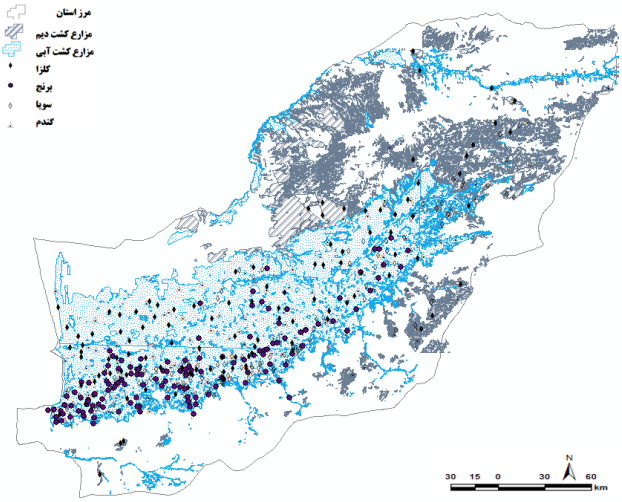
شکل ۱ نمودار پردازش تصاویر ماهواره ای، برآورد سطح زیر کشت و انرژی زیستی حاصل از بقایای زراعی

جهت تهیه نقشه اراضی زیرکشت محصولات پاییزه (گندم و کلزا) و محصولات کشت بهاره (برنج و سویا) مراحل اجرایی زیر دنبال شد. ۱) تهیه تصاویر ماهواره‌ای در تاریخ های مورد نظر و اعمال تصحیحات لازم (حذف اثرات آتمسفری (ناشی از اخذ تصاویر در زمان های مختلف)

2 Global positioning system (GPS)
3 United states geological survey

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

و تصحیح اثرات توپوگرافی (جهت کاهش اثرات پستی و بلندی با کمک مدل رقومی ارتفاع)) در صورت نیاز و موزاییک باندهای مختلف، ۲) استفاده از شاخص پوشش گیاهی بر اساس باندهای قرمز و مادون قرمز و در نهایت ایجاد ترکیب چندطیفی از تصاویر باند های اصلی جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی، ۳) طبقه بندی نقشه حاصل با روش الگوریتم قطعه بندی چند تفکیکی[4] با استفاده از الگوریتم نزدیکترین همسایه، ۵) در نهایت اعتبار سنجی نقشه های تولید شده با استفاده از ضریب کاپا و صحت کلی. نقشه پایه NDVI انجام شد (فیضی زاده و همکاران، ۱۳۸۹). جهت اعتبارسنجی نقشه های تولید شده طی پردازش تصاویر ماهواره‌ای، بازدید های میدانی به منظور شناسایی مزارع زیر کشت محصولات مورد نظر (گندم، کلزا، برنج و سویا) انجام و موقعیت آنها توسط دستگاه GPS دستی برداشت شد. در محیط نرم‌افزار eCognition محدوده نمونه های آموزشی با شیءهای تصویری نمونه مشخص شد. برخلاف طبقه بندی پیکسل پایه، الگوریتم نزدیکترین همسایه در روش قطعه بندی شیءگرا نیازمند نمونه آموزشی کمتری است چون هنگامی که یک شیء تصویری به عنوان نمونه آموزشی انتخاب می‌شود چندین پیکسل را پوشش می‌دهد. با این حال در تحقیق حاضر، در مناطقی که احتمال تداخل کشت ها در مرحله پردازش تصویر وجود داشت، تعداد نمونه زمینی بیشتری گرفته شد تا خطای ناشی از اشیاء متفاوت با اطلاعات طیفی مشابه در مرحله قطعه بندی به حداقل ممکن برسد. در مجموع تعداد ۴۷۴ نمونه مرجع در هر یک از کشت های مورد بررسی به عنوان نمونه تعلیمی ثبت مختصات شد و جهت ارزیابی عملکرد نقشه های تولید شده حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ای بکار گرفته شد. موقعیت نمونه های برداشت شده زمینی در شکل (۲) ارائه شده است. پس از اتمام پردازش تصاویر ماهواره ای در محیط نرم افزار eCognition، نتیجه با فرمت Shp ذخیره شده و به محیط نرم‌افزار ArcGis10.3 انتقال یافت و سپس مساحت هریک از کاربری های مطالعه شده استخراج شد. در مرحله بعد عملکرد زیست توده و تخمین آن در هکتار انجام شد. عملکرد زیست‌توده از طریق ضرب نمودن مساحت مزرعه در تناژ زیست‌توده در هکتار بدست آمد. به منظور ارزیابی و تعیین مقدار زیست توده 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، بازدید های مکرر میدانی انجام شد. در هر مزرعه بسته به مساحت آن به صورت تصادفی و تعداد ۳ نمونه زیست‌توده در هرکشت برداشت شد. نمونه برداری زیست‌توده جهت تعیین وزن زیست توده خشک (کاه و کلش) با استفاده از کوادرت های ۰/۲۵مترمربع (۰/۵×۰/۵) انجام گرفت. نسبت زی توده به محصول[5] (پارامتر ضروری در تعیین مقدار بقایای گیاهی) با استفاده از قطعات بزرگتر، یعنی کوادرت های 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 زیست توده به محصول برداشت شد (آیگاما و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۲ موقعیت نقاط مرجع برداشت شده زمینی در هر یک از کشت‌های بررسی شده

پارامتر نسبت زی توده به محصول برای گندم در تحقیق 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، نمونه های زیست توده بصورت تصادفی و با توجه به سطح هر عرصه توزیع شد تا بیانگر کل جامعه باشد. نمونه های زیست‌توده جمع آوری شده در هر نوبت پس از خرد کردن به ابعاد ۱-۰/۵ سانتیمتر به آزمایشگاه منتقل شد و

4 Multiresolution segmentation algorithm
5 Residue-to product ratio (RPR)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

وزن تر آنها بلافاصله ثبت گردید. وزن خشک نمونه ها با قرار دادن در داخل آون در دمای ۱۰۳ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت و توزین مجدد آنها بدست آمد. نسبت زی توده به محصول از رابطه ۱ به ازای واحد سطح (مترمربع) محاسبه گردید.

$$\lambda = \frac{w_r}{w_p} \qquad (۱)$$

در این رابطه w_r بیانگر وزن بقایای گیاهی (کاه و کلش) و w_p بیانگر وزن کل کاه و کلش به همراه بذور آن می‌باشد با داشتن این اطلاعات، مقدار زیست توده قابل دسترس برای هر محصول محاسبه شد. در تحقیق حاضر، با توجه به اطلاعات حاصل از نمونه برداری میدانی مقدار زیست توده بر حسب 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 کشت های مورد مطالعه (گندم، برنج، سویا و کلزا) و مساحت هریک از آنها، مقدار انرژی معادل حجم زیست‌توده به کیلووات در دو سناریو برداشت (۱۰ و ۴۵٪) محاسبه شد (زیمنس و همکاران، ۲۰۰۸). در مرحله بعد، پس از تخمین مقدار زیست توده در هر یک از مزارع، نقشه میزان زیست توده هر یک از محصولات مورد مطالعه در محیط GIS نقشه سازی شد. به منظور محاسبه انرژی حاصل از مقدار زیست‌توده قابل دسترس (کیلووات ساعت)، مقدار زیست توده برآورد شده، پس از کسر مقدار غیرقابل دسترس برای اهداف اکولوژیک، در ضریب تبدیل مگاژول به کیلووات ساعت (۰/۲۷۸) و مقدار آستانه گرمایی برای تیپ‌های مختلف زیست‌توده (مگاگرم/کیلوگرم) ضرب شد و محاسبات بر این اساس تکمیل شد (لو و همکاران، ۲۰۲۱). لازم به توضیح است که مزارع با مساحت کمتر از ۲ هکتار از محاسبات کنار گذاشته شد. به منظور انجام محاسبات با دقت بیشتر، یک شبکه منظم ۱۰۰۰×۱۰۰۰ مترمربع بر روی منطقه توزیع شد و مزارع محصور در هر یک از این مساحت ها تحت عنوان "بلوک" کدگذاری شد.

۲-۳- شبکه لجستیک زنجیره زیست توده

پس از تخمین مقدار زیست توده قابل برداشت، شبکه حمل ونقل بین سایت های قابل برداشت/ یا بلوک های زیست‌توده و سایت‌های مصرف کننده/ یا پالایشگاه زیست انرژی به منظور محاسبه هزینه و فاصله حمل ونقل تشکیل گردید. بدین منظور، یک گراف اولیه که مرکب از اجزای لجستیک زنجیره تامین و توزیع زیست توده بود در محیط GIS تولید شد. سپس اطلاعات این گراف به محیط اکسل جهت انجام محاسبات بهینه سازی انتقال داده شد. شکل ۳، بخشی از منطقه مورد مطالعه، بلوک های زیست توده و شبکه گراف حمل ونقل 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 زیست توده در سطح استان گلستان) توزیع شد. گراف ارائه شده در این تحقیق از طریق آرک/کمان های با وزن مشخص اختصاص یافته به آنها، تحت عنوان وزن به هم گره می‌خورند. وزن آرک معرف هزینه واحد حمل ونقل توسط کامیون و نود بیانگر سایت های قابل برداشت حاوی زیست‌توده می‌باشد. پس از ساخت گراف اولیه، داده های پایه نظیر، موقعیت مکانی نقاط عرضه و تقاضا در سامانه اطلاعات جغرافیایی ثبت گردید. بدیهی است که هریک از نقاط عرضه کننده زیست‌توده، در یک فاصله مشخص از سایت پالایشگاه زیستی قرار گرفته‌اند. تعیین فاصله دقیق بین این نقاط سهم بزرگی در هزینه‌های حمل ونقل و هزینه کلی شبکه و نهایتاً قیمت تحویل یک تن زیست‌توده به یارد پالایشگاه دارد. برای دستیابی به این مهم، تحقیق حاضر فاصله حمل ونقل بین نقاط شبکه لجستیک را به روش الگوریتم کوتاهترین مسیر به روش الگوریتم هاورسین: فایل اضافی (۱) محاسبه شد (نوردین و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۳ گراف طراحی شده برای انجام محاسبات مربوط به بخش زنجیر تامین-توزیع زیست توده. نقاط سیاه، نقاط حاوی زیست توده قابل برداشت در مرکز هریک از بلوک‌ها می‌باشد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

الگوریتم هاورسین، برعکس روش های قبلی نظیر فاصله اقلیدوسی، فاصله همینگ، منهتن و مینکوفسکی که فاصله مستقیم[6] بین دو نقطه را بدون در نظر گرفتن توپوگرافی مسیر، پیچ و قوس و انحنای مسیر اندازه‌گیری می کنند، از دقت بالاتری (خطا ۱٪±) برخوردار است (ژان و همکاران، ۲۰۲۰) تنوعی از ماشین آلات شامل انواع کامیون و تریلر با ظرفیت های متفاوت بارگیری برای جابجایی زیست توده در مزارع شناسایی شده در دسترس هستند. در مطالعه حاضر به منظور پرهیز از پیچیده شدن شبکه حمل ونقل، از یک نوع ماشین (کامیون اطاقدار ۱۰ چرخ با حداقل و حداکثر ظرفیت بار ۱۲ و ۲۲ به ترتیب) استفاده شد. هزینه حمل ونقل به ازای فاصله متفاوت است، بر این اساس مقدار هزینه حمل ۱ تن بار در کیلومتر ۰/۴۷ دلار برای فاصله حمل ونقل ۱۰۰-۲۰۰ کیلومتر در نظر شد (نرخ ارز دولتی ۲۵۰۰۰تومان در نظر گرفته شد، برای اینکه قیمت ریال دارای نوسان است از معادل دلاری آن استفاده شد). قیمت خرید و جمع کردن و بسته بندی زیست توده در هریک از مزارع مورد بررسی از طریق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$Fc_{ik} = \sum_{k \in K} (c^b + c^h) Hv_{ik}\, p_{ik} \qquad (۲)$$

در این رابطه، Fc_{ik} هزینه خرید زیست توده نوع k در مزرعه i (دلار)، Hv_i مقدار زیست توده قابل بهره برداری از نوع k در مزرعه i (کیلووات ساعت)، c^b هزینه ساعتی ماشین بیلر جهت بسته بندی زیست توده (دلار)، c^h هزینه جمع کردن و کپه کردن) و p_{ik} قیمت خرید زیست توده قابل عرضه از نوع k در مزرعه i (دلار به ازای کیلووات ساعت) می‌باشد. زیست توده برجای مانده پس از برداشت محصول اصلی توسط کمباین می‌تواند بصورت پراکنده۷، بسته های فشرده شده[8] و یا کاه چیپس[9] هم بصورت روباز و یا در داخل کیسه های پلاستیکی انتقال یابد. در این مطالعه فرض بر این شد که کل زیست توده قابل برداشت در بسته‌های ۲۰-۲۵ کیلوگرم توسط ماشین بیلر بسته بندی شده و از آنجا توسط کامیون روباز به محل پالایشگاه بایوانرژی منتقل می‌شود. وزن هر بسته ضایعات لیگنوسلولزی ۲۵ کیلوگرم، هزینه بسته بندی 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 بطور متوسط در یک هکتار ۶۷ بسته ۲۵ کیلویی ضایعات تولید می شود، 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 کاندیدا، دستورالعمل های متعددی در کشورهای صاحب این تکنولوژی وجود دارد. چنانچه در برخی کشورها، پالایشگاه زیست انرژی از قبل جانمایی شده است و دیگر لازم به شناسایی پالایشگاه کاندیدا وجود ندارد. متوسط فاصله اقتصادی برای ارسال مواد خام (زیست توده قابل دسترس از مزارع) در اطراف هر سایت از ۳۰ تا ۷۵ کیلومتر متغیر است. از آنجایی که هیچ پالایشگاه یا واحد تولیدی برای فرآوری و تولید محصولات زیست انرژی از ضایعات لیگنوسلولزی در هیچ یک از استان‌های کشور خصوصاً استان گلستان وجود ندارد با قاطعیت نمی توان در مورد ظرفیت تولید آنها اظهار نظر نمود، اما با داشتن ظرفیت تولید آنها برای مصرف چوب آلات باغی و جنگلی، ظرفیت یارد و یا انبار کارخانه و در نظر گرفتن دانسیته متوسط برای چوب آلات (معمولا پهن برگ) معادل ۰/۵۵ گرم بر سانتیمترمکعب می‌توان یک ظرفیت اسمی/بالقوه برای هر سایت تعریف کرد که در صورت اختصاص آن به پالایشگاه زیست انرژی از این ظرفیت استفاده شود (ERIA، ۲۰۱۹). برای ساخت هر پالایشگاه کاندیدا با ظرفیت ۸۰٪ و طول عمر ۲۵ سال، هزینه ثابت (خرید تجهیزات، ماشین آلات، فاز اجرایی و عملیاتی سایت و ...) معادل ۳۳۹۶/۶۰ دلار بر کیلووات ساعت در سال در مدلسازی فوق لحاظ شد. هزینه ساخت پالایشگاه زیست انرژی براساس اطلاعات جمع آوری شده از مرور منابع (بهی‌فر و همکاران، ۲۰۲۳) و سایت پالایشگاه زیست انرژی آمریکا استخراج گردید. لازم به ذکر است که هزینه خرید و یا اجاره زمین در این محاسبات لحاظ نشده است.

۲-۴- مدل بهینه سازی

مدل بهینه‌سازی جهت شناسایی سایت (های) بالقوه بایوانرژی و محاسبه مجموع هزینه انتقال (دلار بر مترمکعب) زیست‌توده از سایت های عرضه کننده به پالایشگاه‌های کاندیدا طراحی گردید. از دیدگاه تحقیق در عملیات، مدل ریاضی ارائه‌شده از نوع برنامه‌ریزی خطی باینری[10] و مدل‌سازی مکان- تخصیص[11] است که با شناسایی مناطق عرضه کننده زیست توده در یک فاصله مشخص (با توجه به محدودیت حداکثر فاصله حمل ونقل) و مقدار تقاضای اسمی سایت به محاسبه هزینه واحد و تعداد سایت بهینه جهت احداث پالایشگاه زیست انرژی می پردازد. در مطالعه حاضر با توجه به اینکه زیست توده قابل برداشت در نقاط دور از دسترس نسبت به مناطق جمع آوری کننده و شبکه جاده قرار دارد، لازم است که حجم قابل دسترس زیست توده در شعاع دسترسی هر سایت مشخص گردد. قطعاً هرچه زیست توده در فواصل

6 Straight/and or crow-fly distance
7 Loose residues
8 Baled residues
9 Chipped residues
10 Binary programing
11 Location-allocation problem

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نزدیک‌تر به پالایشگاه زیست انرژی قرار داشته باشند، هزینه واحد حمل و نهایتاً هزینه کل زنجیره پایین تر 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 زیست انرژی می‌باشد. لازم به توضیح است در این بخش از تحقیق، پیش فرض ما این است که تمام کارخانه‌های متوسط تا بزرگ مقیاس با تغییر کاربری قابلیت و داشتن تجهیزات لازم بطور بالقوه قابلیت تبدیل شدن به پالایشگاه زیست انرژی را دارند به شرطی که فاصله وزنی (هزینه حمل ونقل زیست توده) از نودهای همسایه به این مناطق کاندیدا در حداقل باشد. مدل ریاضی در ادامه تشریح می گردد. تعریف مجموعه، شاخص و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی ارائه خواهد شد.

تابع هدف معادله (۳) به حداقل نمودن هزینه خرید و جمع نمودن زیست توده از سطح مزارع شناسایی شده (بخش اول) و تحویل زیست توده به یارد پالایشگاه زیست انرژی توسط کامیون (بخش دوم) در صورت تخصیص سایت حاوی زیست توده زیست‌توده به پالایشگاه زیست انرژی می‌پردازد. بخش سوم هزینه ثابت مربوط به ساخت و ساز برای هریک از نقاط کاندیدا در صورت انتخاب شدن به عنوان پالایشگاه زیست انرژی را محاسبه می کند.

$$\min = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K} c_{ik}^{pur} x_{ij} + (c_{ik}^{trsp} q_{ik} d_{ij}) x_{ij} + \sum_{j\in N} f_j y_j \qquad (۳)$$

نامعادله اول (۴) فاصله اقتصادی برای انتقال زیست‌توده از نودهای عرضه کننده به سمت پالایشگاه (های) زیست انرژی را کنترل می‌نماید، که نباید فاصله جمع‌آوری زیست توده در اطراف سایت بایوانرژِی از یک فاصله معین بیشتر باشد.

$$d_{ij} x_{ij} \le \bar{D} \qquad \forall ij \in N \qquad (۴)$$

معادله دوم (۵) زیست توده قابل انتقال در طول شبکه لجستیک را محدود به یک سایت می نماید.

$$\sum_{j\in N} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in N \qquad (۵)$$

معادله سوم (۶) بیانگر حداکثر تعداد پالایشگاه های زیست انرژی است که مدل مجبور به باز کردن آنها در شبکه لجستیک می‌باشد.

$$\sum_{j\in N} y_j = w \qquad (۶)$$

نامعادله چهارم (۷) ارتباط منطقی دو متغیر باینری را در زنجیره تأمین بیان می کند به این صورت که زیست توده قابل انتقال فقط در صورت باز بودن پالایشگاه زیست انرژی در طول شبکه زنجیره تأمین می تواند تخصیص یابد.

$$x_{ij} - y_j \le 0 \qquad \forall ij \in N \qquad (۷)$$

نامعادله پنجم (۸) بیانگر ظرفیت پالایشگاه زیست انرژی برای دریافت زیست توده قابل انتقال می باشد. به این‌صورت که حجم زیست توده انتقال یافته به پالایشگاه از مزارع شناسایی شده بایستی کمتر از ظرفیت پالایشگاه باشد.

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} q_{ik} x_{ij} \le Q_j y_j \qquad \forall j \in N \qquad (۸)$$

معادله ششم (۹) بیانگر غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم در مسئله برنامه ریزی خطی می‌باشد.

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \qquad \forall ij \in N \qquad (۹)$$

مسئله برنامه ریزی خطی مذکور در محیط برنامه نویسی لینگو کدنویسی و حل شد. مدت زمان ۶۰ دقیقه برای حل مدل درنظر گرفته شد که در تمام سناریوهای اجرا شده مدت زمان در نظر کرفته شده کمتر از این بازه زمانی بوده است.

۳- نتایج و بحث

پس از آماده سازی و انجام پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تلفیق آن با داده های حاصل از بازدیدهای میدانی، نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. ارزیابی صحت نقشه های تولید شده با 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 طبقه بندی این محصولات به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۳بوده است، که خود دلالت بر مقبولیت دقت نقشه‌های تهیه شده دارد. جدول ۱ برآورد سطح زیرکشت محصولات مورد مطالعه در تحقیق حاضر در مقایسه با آمار ارائه شده جهاد کشاورزی در سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ را نشان می‌دهد.

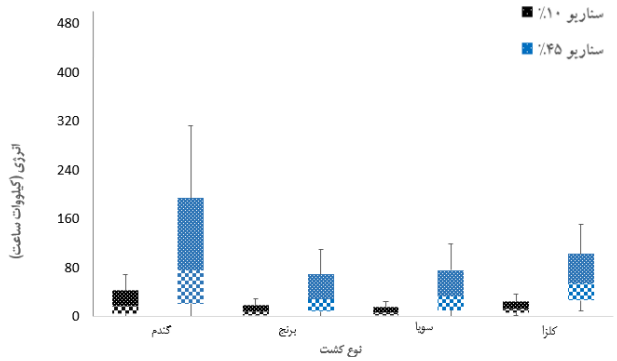
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، مساحت های برآورد شده برای هریک از کشت های مورد مطالعه تفاوت معنی‌دار با مساحت ارائه شده توسط جهاد کشاورزی وجود ندارد. سطح زیر کشت گندم به اندازه ۲۱٪، کلزا به اندازه ۱۱٪ کمتر از سطح ارائه شده توسط آمار منتشر شده توسط جهاد کشاورزی و سطح زیر کشت برنج به اندازه ۱۳٪ و سویا به اندازه ۶٪ بیشتر می‌باشد. بطور میانگین مساحت‌های برآورد شده به اندازه ۳٪ کمتر از مساحت ارائه شده 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.

جدول ۱ مساحت اراضی برآورد شده از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مساحت ارائه شده توسط جهاد کشاورزی

نوع کشت	مساحت برآورد شده (پردازش تصاویر ماهواره‌ای: هکتار)	مساحت زیرکشت (آمار جهادکشاورزی، هکتار)	میزان تولید محصول (تن)
گندم	237340	299905	1260000
کلزا	74411	83720	168000
برنج	133904	118754	682819
سویا	22308	21050	36100

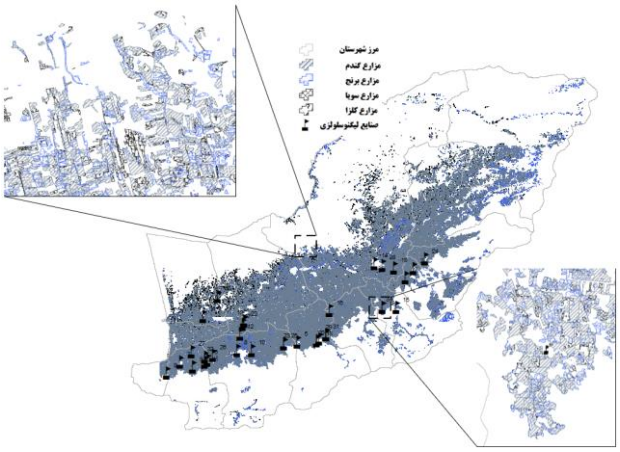
سهم انرژی حاصل از برداشت زیست توده قابل بهره برداری شده برای هرکشت باتوجه به سناریوهای مختلف تولید (۱۰ و ۴۵ درصد) در شکل (۴) ارائه شده است. مقدار میانه انرژی برای زیست توده برآورد شده در سناریو اول بین ۹ و ۲۶ کیلووات ساعت برای محصول سویا و گندم به ترتیب متغیر بوده است. حال آنکه این مقادیر در سناریو دوم دارای دامنه ۴۰ و ۱۱۸ کیلووات ساعت برای محصول برنج و گندم متغیر بوده است. بیشترین مقدار انرژی تولید شده در هر سناریو اول متعلق به بقایای محصول برنج و در سناریو دوم متعلق به گندم بوده است. نتایج همچنین نشان داد که در بدبینانه‌ترین سناریو (۱۰٪ بازیابی) مقدار ۰/۹ میلیون کیلووات انرژی و در خوشبینانه‌ترین سناریو (۴۵٪ بازیابی) مقدار ۳/۸ میلیون کیلووات انرژی در واحد سطح در منطقه مورد مطالعه قابل دسترس است (شکل ۵). انرژی تولید شده از این ضایعات می‌تواند هم وابستگی این استان به مصرف انرژی های فسیلی را به حداقل ممکن برساند، ضمن اینکه منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای و اثرات نامطلوب زیست محیطی ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی بخصوص در انتهای فصل برداشت گردد [۱۲].



شکل ۴ انرژی حاصل از برداشت زیست توده قابل بهره برداری برای کشت های مورد مطالعه در دو سناریو ۱۰ و ۴۵ درصد برداشت زیست‌توده

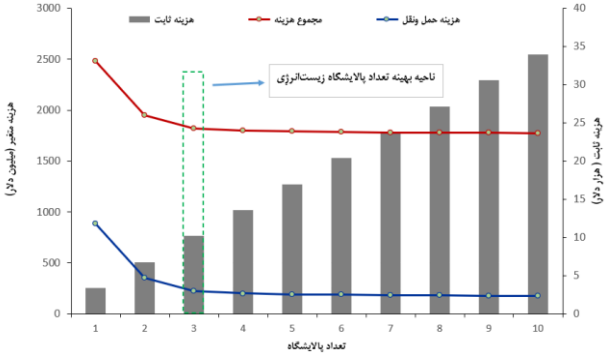
پس از تهیه نقشه پتانسیل زیست‌توده، محاسبات مربوط به شبکه لجستیک با استفاده از مدل بهینه سازی آغاز شد. شکل ۵ شبکه لجستیک منطقه مورد مطالعه را با تمام جزئیات ممکن بر روی نقشه پتانسیل زیست‌توده (تفکیک شده بر اساس کشت های مختلف) را نشان می‌دهد. این شبکه مشتمل بر ۳۴ کارخانه لیگنوسلولزی فعال،۲۱۴۹۷ مزرعه گندم، ۳۵۵۰۸ مزرعه برنج، ۷۷۳۸ مزرعه سویا و ۱۹۳۶۱ مزرعه کلزا بالای ۲ هکتاری در استان گلستان می‌باشد. همانطور که از نقشه پیدا است تمرکز زیست توده (مزارع آبی) بیشتر در بخش غربی و مرکز استان تمرکز پیدا کرده 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۵ شبکه لجستیک زنجیره تأمین زیست توده- زیست انرژی (موقعیت مزارع کشت های بررسی شده به همراه موقعیت صنایع لیگنوسلولزی استان)

از آنجایی که تعداد مکان های بهینه پالایشگاه زیست‌انرژی از قبل معلوم نیست، بدین منظور مدل بهینه‌سازی را با حداکثر ده مکان و فاصله مشخص حمل ونقل مشخص اجرا شد. هزینه های حمل ونقل، هزینه ثابت و همچنین مجموع هزینه های زنجیره تامین زیست‌توده حاصل از اجرای مدل بهینه سازی بر روی گراف ترسیم گردید تا از این طریق تعداد پالایشگاه های بهینه با توجه به فواصل حمل ونقل و همچنین مقدار زیست توده قابل عرضه در منطقه مورد مطالعه تعیین گردد. هزینه ثابت، متغیر و هزینه کل (مجموع هزینه حمل ونقل، هزینه خرید و جمع‌آوری و هزینه عملیات اجرایی) برای کل زنجیره تامین در شکل (۶) ارائه شده است. با افزایش هزینه های ثابت که مستقل از هزینه های متغیر می‌باشد، هزینه حمل ونقل بیشترین مقدار کاهش را داشته است. بیشترین کاهش هزینه های حمل ونقل در جایی اتفاق افتاده است که مجموع هزینه‌های ثابت ۱۰۱۹۰ دلار بوده است، افزایش بیشتر هزینه‌های ثابت سیستم معادل باز کردن تعداد سایت‌های بیشتر بوده و لزوما کاهش هزینه‌های حمل ونقل را بطور معنی‌داری در بر نداشته است.



شکل ۶ مجموع هزینه، هزینه متغیر و ثابت مربوط به شبکه تامین زیست توده در منطقه مطالعاتی

از طرف دیگر، بیشترین هزینه حمل ونقل در جایی اتفاق افتاده است که هزینه ثابت در کمترین مقدار خود بوده است. در مطالعه حاضر این نقطه بهینه در جایی که تعداد سه پالایشگاه زیست انرژی در عرصه مورد نظر باز شده است اتفاق افتاد. در این نقطه هزینه‌های حمل ونقل، هزینه ثابت و همچنین هزینه کل در حداقل خود بوده و کمترین هزینه را برای سیستم زنجیره تامین در برداشته است. هزینه حمل ونقل مربوط به انتقال ضایعات در دسترس در منطقه مورد مطالعه بصورت منحنی آبی رنگ نشان داده شده است. با افزایش تعداد سایت‌های بایوانرژی هزینه‌های حمل ونقل بصورت نمایی روند کاهشی را طی نموده است. با افزایش تعداد سایت از ۱ به ۲ هزینه حمل ونقل بطور معنی داری حدود ۶۰٪ کاهش یافته است. درصد کاهش هزینه حمل ونقل از دو سایت به سه سایت به اندازه ۳۷٪ و از سایت سه به چهار به اندازه ۱۰٪ و از سایت چهارم به بعد کمتر از ۵٪ بوده است. به عبارت دیگر با توجه به شکست معنی دار منحنی هزینه حمل ونقل تعداد سه پالایشگاه زیست‌انرژی در عرصه مورد نظر کفایت می‌کند. هزینه های مربوط به احداث و عملیات اجرای پالایشگاه زیست‌انرژی به ازای تولید هر کیلووات ساعت زیست توده بصورت نمودار میله‌ای (خاکستری) نشان داده شده است. با افزایش تعداد پالایشگاه زیست‌انرژی، هزینه ثابت بطور خطی افزایش یافته است. مقدار حداقل این هزینه در سایت یک معادل ۳۳۹۶ هزار دلار و مقدار حداکثر آن در سایت ۱۰ معادل ۳۳۹۶۵ دلار بوده است. نتایج این تحلیل نشان داد که اگر مدیر کارخانه بخواهد هزینه های اولیه ساخت پالایشگاه زیست انرژی را به حداقل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

برساند، منطقی است که هزینه احداث تجهیزات با هزینه ثابت را در حداقل ممکن نگه دارد. این امر منجر به طولانی شدن فاصله و در نهایت بالارفتن هزینه‌های حمل ونقل می‌گردد و بالعکس این امر هم محتمل است. بنابراین لازم است که نقطه/محل بهینه که هزینه های ثابت، حمل ونقل و مجموع هزینه در حداقل خود می‌باشد شناسایی شود. بطور کلی مجموع هزینه ها (هزینه ثابت و متغیر) نیز روند کاهش را طی کرده است، طوری که با افزایش تعداد پالایشگاه زیستی فاصله حمل ونقل کاهش و از طرفی هزینه ثابت افزایش یافته است که در نهایت کاهش مجموع هزینه را به دنبال داشته است. بیشترین مجموع هزینه در جایی اتفاق افتاده است که کمترین تعداد پالایشگاه زیست‌انرژی در منطقه مورد مطالعه باز شده است. تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از اجرای مدل بهینه‌سازی، با سه پالایشگاه، هزینه حمل ونقل معادل ۲۲۲/۲ میلیون دلار، هزینه متغیر ۱۵۹۹ میلیون دلار مربوط به خرید و جمع آوری زیست‌توده است که می‌تواند به عنوان یک جواب مناسب در نظر گرفته شود. بعبارت دیگر، می‌توان دریافت کرد که حداقل هزینه زنجیره تامین در جایی شکل گرفته است که مجموع هزینه‌ها در نقطه بهینه زنجیره تامین (حداقل هزینه ثابت و مجموع هزینه‌های متغیر) معادل ۱۸۲۱ میلیون دلار است. حداکثر زیست توده مورد تقاضا در کل سیستم زنجیره تامین معادل ۱/۵۶۰ میلیون کیلووات ساعت انرژی بوده است.

۴- جمع بندی

فراوانی، در دسترس بودن و مصرف گسترده انرژی حاصل از سوخت های هیدروکربنی (نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ) اگرچه رشد سریع اقتصادی جوامع پیشرفته صنعتی را به دنبال داشته است، لیکن به‌واسطه انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق و انتشار گاز دی‌اکسید کربن، جهان را با تغییرات شگرفی روبه‌رو کرده است. زیست‌توده و یا ضایعات حاصل از فعالیت‌های کشاورزی یک منبع با ارزش برای تولید انرژی‌های تجدید پذیر در دنیا می‌باشد، متاسفانه در کشور ما اهمیت این موضوع هنوز به خوبی درک نشده است و سرمایه گذاری چندانی در این زمینه انجام نشده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که استفاده از تصاویر سنتینل-۲ با صحت کلی بالایی (۷۰٪) قادر به شناسایی مزارع حاوی زیست توده است که با مطالعات (کامکار و همکاران، ۱۴۰۰) در برآورد اراضی زیرکشت برنج، پنبه و سویا با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ مطابقت دارد. مساحت تخمین زده شده با آمار منتشر شده توسط سازمان جهاد کشاورزی برای سال مطالعه شده به اندازه ۳٪ اریبی دارد. نتایج همچنین نشان داد که پتانسیل بالایی از زیست‌توده در سطح استان گلستان وجود دارد که می‌تواند برای تولید سوخت های زیستی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی نشان داد که تعداد ۳ پالایشگاه با مجموع هزینه ۱۸۲۱ میلیون دلار می‌تواند کل زیست‌توده در دسترس را مصرف نماید. در این سناریو، ت متوسط حمل ونقل ۲۷ کیلومتر و حداکثر ۸۴ کیلومتر می‌تواند از مزارع اطراف جمع‌آوری و به سمت پالایشگاه های کاندیدا هدایت گردد. مطالعه حاضر، اولین تحقیق در زمینه استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی بخش کشاورزی به منظور تولید سوخت‌های تجدیدپذیر در استان و احتمالا کل کشور باشد، لازم است چنین مطالعاتی در سایر استان‌های کشور و سایر محصولات زراعی تکرار شود تا با داشتن اطلاعات بیشتر مدیران دولتی و خصوصی به این سمت گرایش پیدا کنند و نیاز کشور به مصرف سوخت‌های فسیلی را به حداقل رسانید.

۵- تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره ۹۹۰۲۲۳۷۲ مصوب اسفند ۱۳۹۹ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. از سرکار خانم فاطمه طالبی که در گردآوری اطلاعات اولیه به نویسنده کمک کردند قدردانی می‌شود.

۶- فهرست علائم

مجموعه‌ها و شاخص‌ها	
N	مجموعه کل نودهای قابل دسترس در شبکه لجستیک زیست توده
$i \subset N$	مجموعه از نودهای عرضه کننده زیست توده
$j \subset N$	مجموعه‌ای از سایت‌های بالقوه پالایشگاه زیست انرژی
k	مجموعه از ماشین آلات در دسترس برای حمل ونقل
پارامترها	
d_{ij}	هزینه متغیر: شامل حاصلضرب فاصله بین دو رأس (مبداء-مقصد) در هزینه واحد حمل بین نقاط در کل شبکه لجستیک از محل عرضه i تا پالایشگاه زیست انرژی j
c_{ij}	هزینه واحد تحویل زیست توده بین محل عرضه i تا پالایشگاه زیست انرژی j: که شامل هزینه برداشت، جمع‌آوری و کپه کردن در کنار جاده دسترسی می‌باشد که معمولاً توسط تراکتور انجام می‌گیرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

f_j	هزینه ثابت مربوط به خرید تجهیزات و ادوات که نود باید متحمل شود، در صورتی‌که به عنوان سایت یایوانرژی انتخاب شود (هزینه ثابت)
w	تعداد بهینه پالایشگاه (های) زیست انرژی که باید جانمایی شوند.
متغیرهای تصمیم	
q_{ik}	حجم زیست توده انتقال داده شده توسط کامیون k از زارع شناسایی شده بسمت یارد پالایشگاه زیست انرژی
$\bar{D}$	حداکثر فاصله انتقال زیست توده از نودهای همسایه به نود کاندیدا
Q_j	ظرفیت دردسترس پالایشگاه زیست انرژی به واحد انرژی (کیلووات ساعت)
x_{ij}	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ اختیار می‌کند در صورتی که زیست توده قابل عرضه در نودهای همسایه به نود کاندیدا تخصیص یابد.
y_j	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ را اختیار می‌کند، اگر پالایشگاه زیست انرژی در محل نود مذکور احداث شود، در غیر اینصورت مقدار آن صفر خواهد بود (زیر مسئله مکان یابی)

منابع

[۱] فیضی زاده، بختیار. هلالی، حسین (۱۳۸۹). "مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شیءگرا و پارامترهای تاثیرگذار در طبقه‌بندی پوشش/کاربری اراضی استان آذربایجان غربی"پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴۲(۷۱): ۷۳-۸۴.

[۲] یاقوتی، حدیث. پذیرا، ابراهیم. امیری، ابراهیم. مسیح آبادی، محمد (۱۳۹۷). "کاربرد تصاویر ماهواره ای و فن آوری سنجش از دور برای تخمین عملکرد برنج"فصلنامه حفاظت منابع آب و خاک، ۳(۵۵): ۱-۱۵.

[۳] بهی‌فر، مائده، عقیقی، حسین. متکان، علی. شهرابی، حمید (۱۳۹۸) " برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت با استفاده از تصاویر ماهوارهٔ سنتینل ۲"سنجش از دور و جی آی اس ایران، ۲، ۱-۱۵

[۴] کامکار، بهنام. دشتی مرویلی، محمد. کاظمی، حسین (۱۳۹۹) " مقایسه شاخصهای گیاهی در تخمین زیتوده بقایای محصولات زراعی بهاره و پاییزه (در حوضه های آبخیز جنوب غرب استان گلستان)". پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۶) ۱۲۱-۱۳۶.

[۵] کامکار، بهنام. دهکردی، علیرضا. علایی، پریسا. عبدی، امید (۱۴۰۰) " تعیین میزان انطباق اراضی زیر کشت محصول سویا با نقشه های تناسب اراضی)مطالعه موردی: استان گلستان)". مهندسی زراعی کشاورزی۴ (۳): ۱۲۲-۱۳۸.

[6] Ayamga, AE., et al. (2015). "Technical analysis of crop residue biomass energy in an agricultural region of Ghana," Resources, Conservation and Recycling, Vol. 96, pp. 51–60.

[7] Azadbakht, S. M., et al. (2021). "Potential for the production of biofuels from agricultural waste, livestock, and slaughterhouse waste in Golestan province, Iran," Biomass Conversion and Biorefinery (Print), Vol. 13, No. 4, pp. 3123–3133.

[8] Bascietto, M., et al. (2020). "Efficient Estimation of Biomass from Residual Agroforestry," ISPRS International Journal of Geo-information, Vol. 9, No. 1, p. 21.

[9] ERIA, 'Cost Analysis of Biomass Power Generation', in Han, P., S. Kimura, W. Wongsapai and Y. Achawangku (eds.), Study on Biomass Supply Chain for Power Generation in Southern Part of Thailand. ERIA Research Project, 2019, Report FY2018 No.9, Jakarta: ERIA, pp.50─56.

[10] Gracia, B., et al.(2014). An application of the vehicle routing problem to biomass transportation,Biosystems Engineering, Vol. 124, pp. 40‑52.

[11] Holsbeeck SV., et al. (2020). "Feasibility of locating biomass-to-bioenergy conversion facilities using spatial information technologies: A case study on forest biomass in Queensland, Australia," Biomass & Bioenergy, Vol. 139, p. 105620.

[12] Kendall, K., et al. (2009). ''Estimating life cycle greenhouse gas emissions from corn–ethanol: a critical review of current US practices. Cleaner Production, 2009, vol. 17 pp. 1175-1182.

[13] Luo, X., et al. (2021) "Integrating multiresolution and multitemporal Sentinel-2 imagery for Land-Cover mapping in the Xiongan New Area, China," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 59, No. 2, pp. 1029–1040.

[14] Nordin, NA., et al. (1012). ''Finding shortest path of the ambulance routing: Interface of Aalgorithm using C# programming'', In 2012 IEEE symposium on humanities, science and engineering research (pp. 1569-1573). IEEE.

[15] Rentizelas, A., et al. (2008). "Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain," Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 4, pp. 887–894.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[16] Saadat, H., et al., (2011). "Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery," Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 66, No. 5, pp. 608–619.
[17] Sahoo, K., et al. (2018). "Life-cycle assessment and techno-economic analysis of biochar produced from forest residues using portable systems. Life Cycle Assessment, 26, 189-213.
[18] Sessions J., et al. (2019). "Can biochar link forest restoration with commercial agriculture?," Biomass & Bioenergy, Vol. 123, pp. 175–185.
[19] Siyal, A., et al. (2015). Rice yield estimation using Landsat ETM + Data," Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 9, No. 1, p. 095986.
[20] Ximenes, F., et al. (2008). "Proportion of above-ground biomass in commercial logs and residues following the harvest of five commercial forest species in Australia," Forest Ecology and Management, Vol. 256, No. 3, pp. 335–346.
[21] Zanne, AE., et al. (2020). ''Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum''. 2020.
[22] Cambero, C., et al. (2015). "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.
[23] Nickpour, M., et al. (2014). Iran's potential to convert biomass into biofuel, In CHEMTECH conference.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]