

مدل تحلیل مکانی برای تصمیم‌گیری استراتژیک

برای تولید زیست انرژی 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

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۲/۱۱.

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۴/۳۰.

کلمات کلیدی:

زیست توده، مدل‌سازی،
حمل و نقل، مکان‌یابی،
بهینه‌سازی، سوخت زیستی

بخش عمده زیست توده حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در عرصه یا رها شده و یا سوزانده می‌شود. نتیجه این عمل، برجای گذاشتن تأثیرات نامطلوب بر روی محیط زیست است، اما جمع‌آوری هدفمند آن می‌تواند هم اثرات نامطلوب محیطی را کاهش داده و هم بخشی از نیاز کشور به استفاده از انرژی‌های فسیلی را مرتفع سازد. هدف تحقیق حاضر، پتانسیل یابی منابع زیست توده حاصل از فعالیت‌های کشاورزی به عنوان یک منبع پایدار جهت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و محاسبه هزینه حمل و نقل آن در استان گلستان است. بدین منظور، ابتدا نقشه کاربری اراضی و توزیع پراکنش مکانی منابع عرضه زیست توده از ۴ کشت عمده (گندم، سویا، 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 بهینه‌سازی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین زیست توده-انرژی توسعه داده شد. صحت کلی و ضریب کاپا برای طبقه‌بندی نقشه محصول گندم و کلزا معادل ۸۲٪ و ۷۴٪ و برای محصول سویا و برنج معادل ۷۶٪ و ۶۳٪ بوده است. نتایج برآورد مساحت تعداد ۸۴۱۰۴ مزرعه (بالای ۲ هکتار) با مساحت ۴۶۸ هزار هکتار را شناسایی نمود که با آمار ارائه شده توسط جهاد کشاورزی آریبی ۱۱٪ را نشان می‌دهد. مقدار زیست توده قابل برداشت از این مزارع معادل ۳/۸ میلیون کیلووات انرژی در سناریو خوش بینانه بوده است. نتایج مدل بهینه‌سازی، احداث ۳ پالایشگاه زیستی برای فرآوری زیست توده با مجموع هزینه معادل ۱۸۲۱ میلیون دلار را پیشنهاد داد.

۱. مقدمه

سلولز و لیگنین جزو غنی ترین پلیمرهای زیستی بر روی زمین هستند. زیست توده حاصل از مواد لیگنوسلولزی به عنوان یکی از گزینه های نوید بخش برای تولید سوخت های 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 خارج می شود. بنابراین بازیافت و درعین حال مدیریت هدفمند این ضایعات و پسماند ها بایستی به منظور 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. به این ترتیب، می توان گفت با اجرای طرح هایی نظیر تبدیل و فراوری پسماندهای لیگنوسلولزی به سوخت های زیستی و یا انرژی های پاک، نه تنها بخشی از این زبان هایی که هر سال رخ می دهد جبران می شود، بلکه به رفع آلودگی محیط زیست و اشتغال زایی نیز کمک شایانی می نماید. برای سالیان متوالی و در حال حاضر، مواد لیگنوسلولزی به عنوان 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 محیط زیست نظیر آذین رفتن موجودات خاکی لایه سطحی خاک است. جمع آوری و سازمان دهی مواد لیگنوسلولزی و تخمین اینکه چه حجمی از منابع زیست توده در یک مقیاس وسیع وجود دارد، یک فعالیت پیچیده و هزینه بر است. به لحاظ اینکه معمولاً مبادی عرضه کننده زیست توده به صورت پراکنده و به دور از منبع مصرف کننده/پالایشگاه های زیستی قرار دارند، که این امر هزینه حمل و نقل و جابجایی آن را تقریباً ناممکن می سازد [۴]. علاوه بر این، بسته به منطقه عرضه کننده، تیپ زیست توده و فصل برداشت، مواد لیگنوسلولزی دارای سطح رطوبت ۶۰-۳۵ هستند، که می تواند بر هزینه حمل و نقل و تحویل نهایی آن به یارد پالایشگاه زیستی تأثیر بگذارد (ساهو و همکاران، ۲۰۱۸).

مطالعات انجام شده در کشورهای اروپایی و شمال آمریکا نشان می دهد که یافتن هاب های زیست توده جهت فراوری مواد لیگنوسلولزی در شت و تبدیل آن به محصول با ارزش کیفی بالاتر در قالب استقرار یک زنجیره تولید-تامین به صورت مستمر می تواند به اقتصادی بودن این فعالیت کمک نموده و هزینه های حمل و نقل آن را جبران نماید [۶]. ضمن اینکه از این طریق قیمت تمام شده محصول نهایی نیز می تواند به حداقل ممکن کاهش یابد. این شیوه (یعنی جمع آوری هدفمند مواد دور ریز لیگنوسلولزی) نه تنها به کاهش هزینه های احیای 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 بیوپار نیز می تواند 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 آلانده تبدیل می شود) و بالا رفتن هزینه یارانه ای سوخت، سیاست های از قبیل ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، محدودیت برق رسانی و تامین سوخت برای نقاط دورافتاده و همچنین تعهد به اجرای کنوانسیون های بین المللی (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 سازمان های 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 جنگل داری) به صورت سالیانه است. مطالعات متعددی با استفاده از روش های مختلف سنجش از دور به همراه پردازش های مکانی در

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 زیست توده 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 می باشد. به عنوان مثال (نیکپور و همکاران، ۲۰۱۴) به بررسی پتانسیل کشور برای تولید بایواتانول بر مبنای 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 طبقه بندی 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 روش های 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 زیست توده 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 زیست توده بخش کشاورزی (زیست توده لیگنوسلولزی) انجام نشده است و مطالعات اندکی که در زمینه برآورد زیست توده وجود دارد بر اساس آمار منتشر شده از وزارت جهاد و موسسه تحقیقات کشاورزی بوده است و اطلاعات دقیقی بر مبنای پردازش تصاویر ماهواره ای 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 سوخت های زیستی نه تنها در کل کشور شناخته شده نیست، بلکه در مقیاس محلی نیز ناشناخته و نیازمند جمع آوری اطلاعات دقیق می باشد تا انجام محاسبات بعدی در این راستا به واقعیت نزدیک باشد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، پتانسیل یابی منابع لیگنوسلولزی حاصل از فعالیت های کشاورزی به عنوان یک منبع پایدار به منظور تولید انرژی های تجدیدپذیر به عنوان یک طرح پایلوت در استان گلستان می باشد. 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 منطقه ای چگونه است؟

۲. روش تحقیق

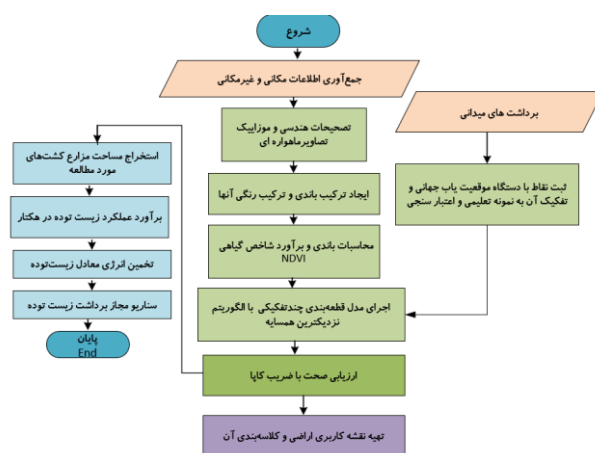
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

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 کاربری های 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 ۴۰۰-۱۳۹۹ 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

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 اخیراً چغندرکند از محصولات اصلی بخش کشاورزی در این استان می باشد.

۲-۲- برآورد زیست توده قابل دسترس

به منظور 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 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 سبزیگی و تاریخ برداشت بوده است [۱۵]. 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 برداشت در آبان- مهر به ترتیب بوده است. متأسفانه 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 کشت ها بوده و تقریباً غیرقابل استفاده است. بر این اساس در این تحقیق جهت اطمینان از موقعیت مکانی کشت ها 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 سبزیگی 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 مختصات یاب جهانی^۲ و مترلیزری برداشت گردید. برای صحت سنجی سایر نمونه ها (۵۰٪ باقی مانده) فقط به پردازش های 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 (در جاهایی که تصویر دارای پوشش ابر و ... بود)، جهت بهبود عملکرد و افزایش کارایی تشخیص کاربری های مختلف، تصویر مربوط به تاریخ آبان ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ استفاده شد. تصاویر ماهواره ای 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 ماهواره ای، در مرحله اول تصاویر خام برای پردازش های 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 زمان های مورد نظر مطابق با تقویم زراعی در استان گلستان استفاده شد. نمودار جریانی مراحل انجام کار برای پردازش های مربوط به سنجش از دور در شکل (۱) ارائه شده است.

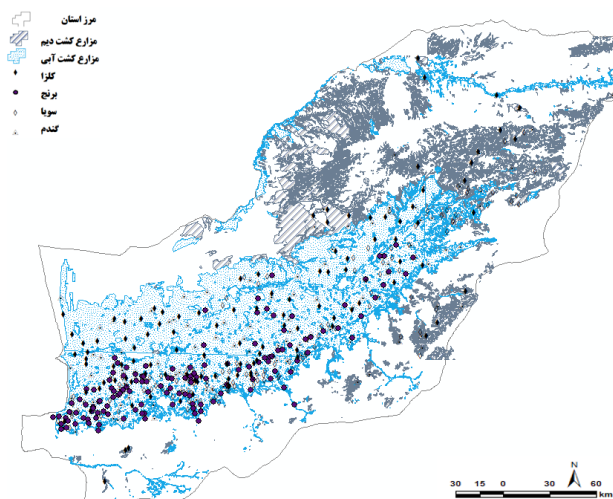


شکل ۱ نمودار پردازش تصاویر ماهواره ای، برآورد سطح زیر کشت و انرژی زیستی حاصل از بقایای زراعی

جهت تهیه نقشه اراضی زیر کشت محصولات پاییزه (گندم و کلزا) و محصولات کشت بهاره (برنج و سویا) مراحل اجرایی زیر دنبال شد. (۱) تهیه تصاویر ماهواره ای 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

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^۴ 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 ماهواره ای، 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 نرم افزار eCognition محدوده نمونه های آموزشی با شیء های تصویری نمونه مشخص شد. برخلاف طبقه بندی پیکسل پایه، الگوریتم نزدیکترین همسایه در روش قطعه بندی شیء گرا نیازمند نمونه آموزشی کمتری است چون هنگامی که یک شیء تصویری به عنوان نمونه آموزشی انتخاب می شود چندین پیکسل را پوشش می دهد. 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 نرم افزار 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 زیست توده از طریق ضرب نمودن مساحت مزرعه در تناژ زیست توده 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 زیست توده در هر کشت برداشت شد. نمونه برداری زیست توده جهت تعیین وزن زیست توده خشک (کاه و کلش) با استفاده از کوادرت های ۲۵/۰ مترمربع (۵/۰×۵/۰) انجام گرفت. نسبت زی توده به محصول^۵ (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 زیست توده 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 کشت های 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 زیست توده 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)

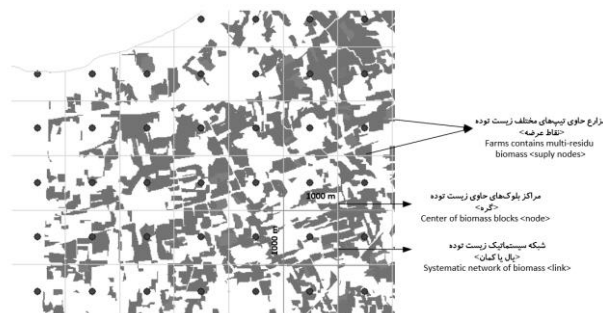
وزن تر آنها بلافاصله ثبت گردید. وزن خشک نمونه ها با قرار دادن در داخل آون در دمای ۱۰۳ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت و توزین مجدد آنها بدست آمد. نسبت زی توده به محصول از رابطه ۱ به ازای واحد سطح (مترمربع) محاسبه گردید.

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

در این رابطه W_r بیانگر وزن بقایای گیاهی (کاه و کلش) و W_p بیانگر وزن کل کاه و کلش به همراه بذور آن می باشد 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 زیست توده 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 زیست توده 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 تیپ های مختلف زیست توده (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 و نقل بین سایت های قابل برداشت/یا بلوک های زیست توده و سایت های مصرف کننده/یا پالایشگاه زیست انرژی به منظور محاسبه هزینه و فاصله حمل و نقل 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 و نقل را نشان می دهد. 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 می خوردند. وزن آرک معرف هزینه واحد حمل و نقل توسط کامیون و نود بیانگر سایت های قابل برداشت حاوی زیست توده می باشد. 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 زیست توده، در یک فاصله مشخص از سایت پالایشگاه زیستی قرار گرفته اند. تعیین فاصله دقیق بین این نقاط سهم بزرگی در هزینه های حمل و نقل و هزینه کلی شبکه و نهایتاً قیمت تحویل یک تن زیست توده به یارد پالایشگاه دارد. برای دستیابی به این مهم، تحقیق حاضر فاصله حمل و نقل 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 زنجیره تامین-توزیع زیست توده. نقاط سیاه، نقاط حاوی زیست توده قابل برداشت در مرکز هریک از بلوک ها می باشد

الگوریتم هاورسین، برعکس روش های قبلی نظیر فاصله اقلیدوسی، فاصله همینگ، منهتن و مینکوفسکی که فاصله مستقیم^۶ بین دو نقطه را بدون در نظر گرفتن توپوگرافی مسیر، پیچ و قوس و انحنای مسیر اندازه گیری 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 و نقل، از یک نوع ماشین (کامیون) با ظرفیت ۱۰ چرخ با حداقل و حداکثر ظرفیت بار ۱۲ و ۲۲ به ترتیب استفاده شد. هزینه حمل و نقل به ازای فاصله متفاوت است، بر این اساس مقدار هزینه حمل ۱ تن بار در کیلومتر ۰/۴۷ دلار برای فاصله حمل و نقل ۱۰۰-۲۰۰ کیلومتر در نظر شد (نرخ ارز دولتی ۲۵۰۰ تومان 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.

$$FC_{ik} = \sum_{k \in K} (c^b + c^h) H v_{ik} p_{ik} \quad (2)$$

در این رابطه، FC_{ik} هزینه خرید زیست توده نوع k در مزرعه i (دلار)، $H v_i$ مقدار زیست توده قابل بهره برداری از نوع k در مزرعه i (کیلوات 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) می باشد. زیست توده برجای مانده پس از برداشت محصول اصلی توسط کمباین می تواند بصورت پراکنده^۷، بسته های فشرده شده^۸ و یا کاه چپس^۹ 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 بسته های ۲۰-۲۵ کیلوگرم توسط ماشین بیلر بسته بندی شده و از آنجا توسط کامیون روباز به محل پالایشگاه بایوانرژی منتقل می شود. 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 ۲۵۰۰ 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 استان های 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 (معمولاً پهن برگ) معادل ۰/۵۵ گرم بر سانتیمتر مکعب می توان یک ظرفیت اسمی/بالحقه 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 (بهی فر 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 بهینه سازی جهت شناسایی سایت (های) بالقوه بایوانرژی و محاسبه مجموع هزینه انتقال (دلار بر مترمکعب) زیست توده از سایت های عرضه کننده به پالایشگاه های کاندیدا طراحی گردید. از دیدگاه تحقیق در عملیات، مدل ریاضی ارائه شده از نوع برنامه ریزی خطی باینری^{۱۰} و مدل سازی مکان- تخصیص^{۱۱} است که با شناسایی مناطق عرضه کننده زیست توده در یک فاصله مشخص (با توجه به محدودیت حداکثر فاصله حمل و نقل) 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 programming
11 Location-allocation problem

نزدیک‌تر به پالایشگاه زیست انرژی قرار داشته باشند، هزینه واحد حمل و نهایتاً 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 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 و نقل زیست توده) از نودهای همسایه به این مناطق کاندیدا در حداقل باشد. مدل ریاضی در ادامه تشریح می‌گردد. 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 می‌کند.

$$\min = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{ik}^{pur} x_{ij} + (c_{ik}^{trsp} q_{ik} d_{ij}) x_{ij} + \sum_{j \in N} f_j y_j \quad (3)$$

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 بایوانرژی از یک فاصله معین بیشتر باشد.

$$d_{ij} x_{ij} \leq \bar{D} \quad \forall ij \in N \quad (4)$$

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

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (5)$$

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

$$\sum_{j \in N} y_j = W \quad (6)$$

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

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall ij \in N \quad (7)$$

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

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} q_{ik} x_{ij} \leq Q_j y_j \quad \forall j \in N \quad (8)$$

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

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in N \quad (9)$$

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

۳- نتایج و بحث

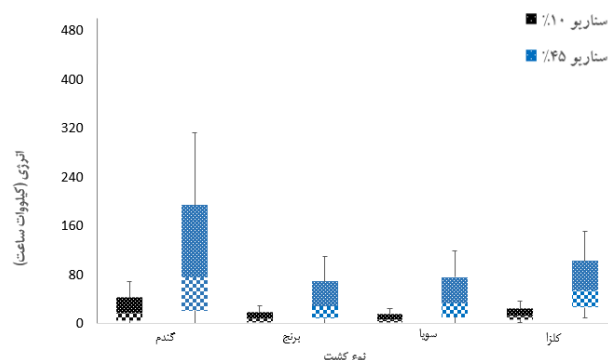
پس از آماده سازی و انجام پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تلفیق آن با داده های حاصل از بازدیدهای میدانی، نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. ارزیابی صحت نقشه های تولید شده با استفاده از نمونه‌های اعتبارسنجی (۳۰٪) مورد آزمون واقع شد. صحت کلی طبقه‌بندی برای محصول گندم و کلزا با استفاده از تصاویر 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 ۷۴٪ و ۶۳٪ بوده 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 ۱۳۹۹-۴۰۰ را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، مساحت های برآورد شده برای هریک از کشت های مورد مطالعه تفاوت معنی دار 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 می باشد. بطور میانگین مساحت های برآورد شده به اندازه ۳٪ کمتر از مساحت ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی است. این تفاوت ها 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 ماهواره ای و مساحت ارائه شده توسط جهاد کشاورزی

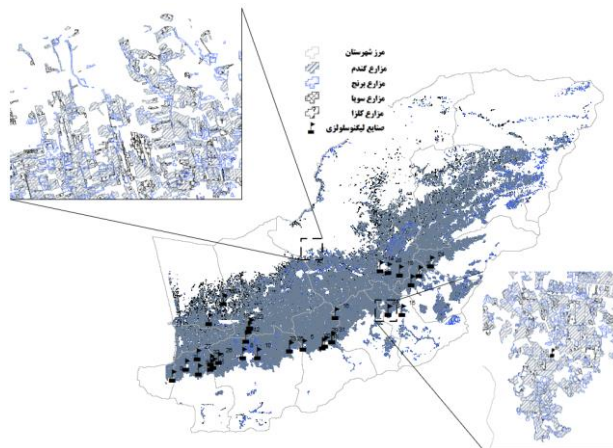
نوع کشت	مساحت برآورد شده (پردازش تصاویر ماهواره ای: هکتار)	مساحت زیر کشت (آمار جهاد کشاورزی، هکتار)	میزان تولید محصول (تن)
گندم	237340	299905	1260000
کلزا	74411	83720	168000
برنج	133904	118754	682819
سویا	22308	21050	36100

سهم انرژی حاصل از برداشت زیست توده قابل بهره برداری شده برای هر کشت 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 بدینانه ترین سناریو (۱۰٪ بازیابی) مقدار ۰/۹ میلیون کیلووات انرژی و در خوشبینانه ترین 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 می تواند هم وابستگی این استان به مصرف انرژی های فسیلی را به حداقل ممکن برساند، ضمن اینکه منجر به کاهش گازهای گلخانه ای و اثرات نامطلوب زیست محیطی ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی بخصوص در انتهای فصل برداشت گردد [۱۲].



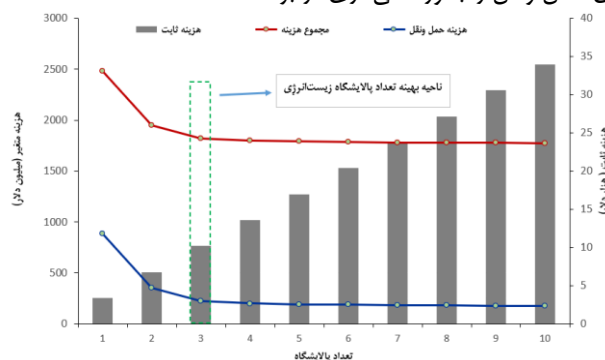
شکل ۴ انرژی حاصل از برداشت زیست توده قابل بهره برداری برای کشت های مورد مطالعه در دو سناریو ۱۰ و ۴۵ درصد برداشت زیست توده

پس از تهیه نقشه پتانسیل زیست توده، 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 زیست توده (تفکیک شده بر اساس کشت های مختلف) را نشان می دهد. 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 می باشد. 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.



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 زیست انرژی از قبل معلوم نیست، بدین منظور مدل بهینه سازی را با حداکثر ده مکان و فاصله مشخص حمل و نقل مشخص اجرا شد. هزینه های حمل و نقل، هزینه ثابت و همچنین مجموع هزینه های زنجیره تأمین زیست توده حاصل از اجرای مدل بهینه سازی بر روی گراف ترسیم گردید تا از این طریق تعداد پالایشگاه های بهینه با توجه به فواصل حمل و نقل و همچنین مقدار زیست توده قابل عرضه در منطقه مورد مطالعه تعیین گردد. هزینه ثابت، متغیر و هزینه کل (مجموع هزینه حمل و نقل، هزینه خرید و جمع آوری و هزینه عملیات اجرایی) برای کل زنجیره تأمین در شکل (۶) ارائه شده است. با افزایش هزینه های ثابت که مستقل از هزینه های متغیر می باشد، هزینه حمل و نقل بیشترین مقدار کاهش را داشته است. بیشترین کاهش هزینه های حمل و نقل در جایی اتفاق افتاده است که مجموع هزینه های ثابت ۱۰۱۹۰ دلار بوده است، افزایش بیشتر هزینه های ثابت سیستم معادل باز کردن تعداد سایت های بیشتر بوده و لزوماً کاهش هزینه های حمل و نقل را بطور معنی داری در بر نداشته است.



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

از طرف دیگر، بیشترین هزینه حمل و نقل 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 هزینه های حمل و نقل، هزینه ثابت و همچنین هزینه کل در حداقل خود بوده و کمترین هزینه را برای سیستم زنجیره تأمین در برداشته است. هزینه حمل و نقل مربوط به انتقال ضایعات در دسترس در منطقه مورد مطالعه بصورت منحنی آبی رنگ نشان داده شده است. با افزایش تعداد سایت های بایوانرژی هزینه های حمل و نقل بصورت نمایی روند کاهشی را طی نموده است. با افزایش تعداد سایت از ۱ به ۲ هزینه حمل و نقل بطور معنی داری حدود ۶۰٪ کاهش یافته است. درصد کاهش هزینه حمل و نقل 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 و نقل تعداد سه پالایشگاه زیست انرژی در عرصه مورد نظر کفایت می کند. هزینه های مربوط به احداث و عملیات اجرای پالایشگاه زیست انرژی به ازای تولید هر کیلووات ساعت زیست توده بصورت نمودار میله ای (خاکستری) نشان داده شده است. با افزایش تعداد پالایشگاه زیست انرژی، 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

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 بالا رفتن هزینه‌های حمل و نقل می‌گردد و بالعکس این امر هم محتمل است. بنابراین لازم است که نقطه/محل بهینه که هزینه‌های ثابت، حمل و نقل و مجموع هزینه در حداقل خود می‌باشد شناسایی شود. بطور کلی مجموع هزینه‌ها (هزینه ثابت و متغیر) نیز روند کاهش را طی کرده است، طوری که با افزایش تعداد پالایشگاه زیستی فاصله حمل و نقل 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 و نقل معادل ۲۲۲/۲ میلیون دلار، هزینه متغیر ۱۵۹۹ میلیون دلار مربوط به خرید و جمع‌آوری زیست‌توده است که می‌تواند به عنوان یک جواب مناسب در نظر گرفته شود. عبارت 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 زیست‌توده 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 سوخت‌های هیدروکربنی (نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ) اگرچه رشد سریع اقتصادی جوامع پیشرفته صنعتی را به دنبال داشته است، لیکن به واسطه 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، متأسفانه در کشور ما اهمیت این موضوع هنوز به خوبی درک نشده است و سرمایه‌گذاری‌های 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 زیست‌توده 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 سوخت‌های 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، متوسط حمل و نقل ۲۷ کیلومتر و حداکثر ۸۴ کیلومتر می‌تواند از مزارع اطراف جمع‌آوری و به سمت پالایشگاه‌های کاندیدا هدایت گردد. مطالعه حاضر، اولین تحقیق در زمینه استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی بخش کشاورزی به منظور تولید سوخت‌های تجدیدپذیر در استان و احتمالاً 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 رسانند.

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 زیست‌توده
$i \in N$	مجموعه از نودهای عرضه‌کننده زیست‌توده
$j \in N$	مجموعه‌ای از سایت‌های بالقوه پالایشگاه زیست‌انرژی
k	مجموعه از ماشین‌آلات در دسترس برای حمل و نقل
پارامترها	
d_{ij}	هزینه متغیر: شامل حاصلضرب فاصله بین دو رأس (مبدأ-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 به عنوان سایت پایوانرژی 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 در دسترس پالایشگاه زیست انرژی به واحد انرژی (کیلووات ساعت)
x_{ij}	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ اختیار می کند در صورتی که زیست توده قابل عرضه در نودهای همسایه به نود کاندیدا تخصیص یابد.
y_j	متغیر باینری، مقدار عددی ۱ را اختیار می کند، اگر پالایشگاه زیست انرژی در محل نود مذکور احداث شود، در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود (زیر مسئله مکان یابی)

منابع

- [۱] فیضی زاده، بختیار. هلالی، حسین (۱۳۸۹). "مقایسه روش های پیکسل پایه، شیء گرا و پارامترهای تاثیرگذار در طبقه بندی 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] بهی فر، مانده، عقیقی، حسین. متکان، علی. شهرابی، حمید (۱۳۹۸). "برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت با استفاده از تصاویر ماهواره ستینل 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)". پژوهش های 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 کشاورزی ۴ (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.

- [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.