

## چکیده

گرانی و خطر پایان یافتن سوخت های فسیلی و شدت آلودگی هوا امروزه کلان شهرها را به شدت تهدید می کند و از این رو توجه به انرژی های تجدید پذیر امری اجتناب ناپذیر است. در این مقاله یک زنجیره تأمین سه سطحی تولید اتانول زیستی با سه هدف ماکزیم کردن سود، کاهش اثرات زیست محیطی و ماکزیم کردن اثرات اجتماعی ارائه گردید است که برای حل آن از روش اپسیلون- محدودیت استفاده شده است. در سطح سوم چندین بازار مصرف وجود دارد که به ارضا کردن تقاضای مشتری نهایی می پردازند. نوع خوراک در نظر گرفته شده نیشکر است که می توان از آن ها برای تولید اتانول زیستی استفاده کرد. افق برنامه ریزی چند دوره ای با فرض این که ارتباط سطوح زنجیره با یکدیگر ممکن است دچار اختلال شوند. در نهایت با یک مطالعه موردی در منطقه جنوب شرقی ایران کارکرد مدل نشان داده شده است.

کلید واژه:

زنجیره تأمین؛ زنجیره تأمین پایدار؛ اتانول زیستی؛ برنامه ریزی سناریو محور؛  
اختلال

طراحی پایدار زنجیره تأمین تولید  
اتانول زیستی از نیشکر

هادی صاحبی (نویسنده مسئول)

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

hadi\_sahebi@iust.ac.ir

هانی گیلانی

## مقدمه

در سال های اخیر روند رو به رشد مصرف انرژی موجب بحران انرژی در جهان گردیده است. مصرف روزافزون انرژی حاصل از سوخت های فسیلی اگرچه رشد سریع اقتصادی جوامع مختلف را به همراه داشته است اما به واسطه انتشار آلاینده های حاصل از احتراق سوخت های فسیلی و افزایش دی اکسید کربن در اتمسفر و پیامدهای ناشی از آن جهان را با تغییرات تهدید آمیزی روبرو کرده است. از سوی دیگر محدودیت منابع فسیلی و فناپذیری این منابع موجب گردیده است تا سیاست گذاران و برنامه ریزان بخش انرژی با انجام مطالعات ساختاری، جایگزینی حامل های انرژی و حرکت به سوی منابع تجدید پذیر انرژی و سوخت های پاک را در راس برنامه های خود قرار دهند. زیست توده یکی از این منابع انرژی جایگزین است که دارای مزایای بسیار همچون گستردگی منابع اولیه، هزینه تولید پایین و... است. طراحی، اجرا و مدیریت زنجیره های تأمین انرژی های تجدید پذیر طی سال های اخیر اهمیت روبه رشدی داشته اند. همه ی فعالیت های شبکه زنجیره تأمین تبدیل زیست توده به انرژی باید به گونه ای طراحی شوند که بهره وری جریان مواد، اطلاعات و جریان مالی در شبکه تضمین شود. در این مقاله به اتانول زیستی به عنوان یک جایگزین برای سوخت های فسیلی اشاره شده است. بیواتانول یا به عبارت دیگر اتانول زیستی؛ الکلی است دو کربنیه فرمول شیمیایی  $C_2H_5OH$  که برخلاف اکثر الکل های دیگر عمدتاً از مواد اولیه زیستی با منشاء قندی و نشاسته ای و یا سلولزی تولید می گردد. تولید بیواتانول از مواد اولیه پتروشیمیایی (اتیلن و یا گاز سنتز) هم امکان پذیر است (اتانول سنتتیک) اما امروزه درصد بسیار کمی از تولید جهانی اتانول (کمتر از ۵ درصد) از مواد اولیه غیر زیستی صورت می پذیرد که همین درصد اندک هم با روندی کاهشی همراه می باشد.



سه نسل بیواتانول قابل تعریف است: نسل اول بیواتانول تولیدی از مواد اولیه قندی نظیر ملاس چغندر و نیشکر یا مواد اولیه نشاسته ای نظیر غلات، سیب زمینی و کاساوا می باشد. بیواتانول تولیدی از گیاهان و یا زائدات گیاهی لیگنوسلولزی را بیواتانول نسل دوم و بیواتانول تولیدی از گیاهان و یا زائدات و ضایعات زباله ها و پسماندهای گیاهی و صنعتی و شهری مرکب از مواد قندی و نشاسته ای و سلولزی را بیواتانول نسل سوم می نامند. در حال حاضر بیش از ۹۷ درصد بیواتانول تولیدی جهان بیواتانول نسل اول می باشد.

تولید بیواتانول از منابع زیستی عمدتاً به روش بیوشیمیایی صورت می پذیرد که این فرآیند از تخمیر الکی شربت قند، فرآیند تقطیر جزء به جزء و در صورت لزوم فرآیند آبیگری از بیواتانول تقطیر شده به کمک غربال های مولکولی تشکیل شده است. مواد اولیه نشاسته ای و سلولزی، باید ابتدا هیدرولیز و تبدیل به قندهای ساده شوند تا قابلیت تخمیر و تبدیل به بیواتانول را پیدا کنند. روش کمتر متداول تولید بیواتانول که هنوز مراحل توسعه ای خود را طی می کند روش ترموشیمیایی است که طی آن ابتدا مواد اولیه با منشأ زیستی تحت حرارت و فشار به گاز سنتز (*syngas*) تبدیل و سپس گاز سنتز به یکی از روش های شیمیایی و یا بیوشیمیایی به بیواتانول تبدیل می گردد.

بیواتانول کاربردهای متعدد و متنوعی دارد که کاربرد آن به عنوان مکمل، بهبود دهنده و یا جایگزین سوخت های فسیلی (بیواتانول سوختی) تنها یکی از کاربردها به حساب می آید و همچنین در حوزه بهداشت و درمان (ضد عفونی کننده ها) و صنعت (صنایع دارویی و آرایشی) نیز کاربرد دارد.

ما در این مقاله به تولید اتانول زیستی به وسیله نیشکر که منبع خوبی از آن در جنوب غربی کشور وجود دارد پرداخته ایم تا وابستگی به سوخت های فسیلی را در کشور کمتر کرده و کمکی به کاهش آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی کنیم.

در بخش ۲ مروری بر ادبیات موجود برای تولید اتانول زیستی داریم سپس در بخش ۳ مسئله را بیان نموده در بخش ۴ به ارائه مدلسازی می پردازیم و در نهایت با ارائه یک مطالعه موردی کارایی مدل را نشان می دهیم.

## ۲. مرور ادبیات

پژوهش های متعددی تا به این لحظه روی زیست توده و تبدیل آن به سوخت های زیستی انجام شده است. پژوهشگران ساختارهای مختلف شبکه و تعیین تصمیمات از بلند مدت تا کوتاه مدت و انواع عدم قطعیت ها را مورد بررسی قرار داده اند.

دسته اول ادبیات به بررسی کلی زنجیره تأمین زیست توده پرداخته اند: شبانی و همکاران [۱] مدلی غیرقطعی در خصوص طراحی زنجیره ی تأمین زیست توده با استفاده از پسماندهای جنگلی مانند الوار و چوب برای تولید الکتریسیته ارائه کردند و روی بخش تأمین از حیث عدم قطعیت های مربوط به تأمین مواد تمرکز کرده اند. آندرسن و همکاران [۲] مدل زنجیره تأمین تولید دیزل زیستی با استفاده از زیست توده های نسل دوم را طراحی کردند. هانگ و همکاران [۳] یک مدل زنجیره تأمین سوخت های زیستی که در مقابل عدم قطعیت و فصلی بودن منابع زیست توده کارآمد باشد را طراحی کردند و در نهایت مدل خود را در منطقه کالیفرنیا آمریکا پیاده سازی کردند تا پتانسیل اقتصادی مدل، ساختارهای مورد نیاز و ریسک تولید اتانول زیستی از پسماند را بررسی کنند. شارما و همکاران [۴] یک مدل غیرقطعی با چندین سناریو را برای طراحی زنجیره ی تأمین زیست توده در نظر گرفتند و مدل خود را در منطقه کانزاس پیاده کردند. همچنین مدلی برای تولید سوخت زیستی از دانه های روغنی در مالزی و پیش بینی پتانسیل آن برای مشارکت در بخش زیست توده انرژی های تجدید پذیر در کشور مالزی توسط آن جی و همکاران ارائه شده است [۵]. لدیوس و همکاران [۶] مدلی برای مکان یابی کارخانه ی تولید متانول از زیست توده در شهر نورباتن سوئد طراحی کردند. همچنین دورته و همکاران [۷] یک مدل زنجیره تأمین تولید سوخت زیستی از ساقه بریده شده قهوه ارائه دادند و به عنوان مطالعه موردی منطقه کلمبیا را در نظر گرفتند و نتیجه نشان داد که ساقه بریده شده قهوه یک منبع اقتصادی و دوستدار محیط زیست برای تولید اتانول زیستی است.

دسته بعدی در ادبیات موجود به فرآیندهای تبدیلی زیست توده به سوخت های زیستی اشاره داشته اند: معروف الزمان و همکاران [۸] یک مدل زنجیره تأمین تولید دیزل زیستی از فاضلاب را طراحی کردند. آنها در تابع هدف و محدودیت ها، قوانین مختلف تنظیمی در مورد انتشارات کربن را در نظر گرفتند. شریف زاده و همکاران [۹] یک مدل غیرقطعی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای تبدیل زیست توده چوب به سوخت زیستی با استفاده از فرآیند پیرولیز سریع ارائه کردند. همچنین هانگ و همکاران [۱۰] با استفاده از پسماندهای جنگل یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تبدیل زیست توده به انرژی ویژه فرآیند پیرولیز سریع مطرح کردند. یو و همکاران [۱۱] مدل دو هدفه اقتصادی-زیست محیطی با هدف تولید سوخت زیستی مایع (*BTL*) از مجموعه ای از



زیست‌توده‌های نسل اول و دوم ارائه کردند. معروف الزمان و همکاران [۱۲] نیز یک زنجیره تأمین تبدیل زیست‌توده به انرژی مبتنی بر فرآیند گازی سازی ارائه دادند که در آن به مسئله تجارت کربن و بصورت جریمه ناشی از تولید بیش از حد مجاز کربن دی‌اکسید نیز پرداخت شده است. لی و همکاران [۱۳] یک مدل غیرقطعی برای تبدیل زیست‌توده به روغن زیستی با استفاده از فرآیند پیرولیز سریع طراحی کرده‌اند که سپس روغن زیستی توسط فرآیند گازی سازی به سین‌گان ارتقا یافته و قابل استفاده برای سوخت حمل و نقل است. و دسته آخر مقالات مورد بررسی، تنها به تولید اتانول زیستی به عنوان یکی از جایگزین‌های اصلی سوخت‌های فسیلی اشاره داشتند: الکس ماروین و همکاران [۱۴] یک مدل بهینه سازی از سود خالص زنجیره تأمین زیست‌توده به اتانول در ۹ منطقه آمریکای جنوبی ارائه کردند که یک مدل *MILP* است که در آن چند تکنولوژی مختلف برای تبدیل پنج نوع از باقیمانده‌های کشاورزی در نظر گرفتند و در نهایت آنالیز حساسیت برای عدم قطعیت قیمت انجام دادند. کرسانو و همکاران [۱۵] یک مدل بهینه سازی *MILP* برای تولید اتانول از شکر و تولید خمیر و بازیابی باقیمانده‌ها برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ارائه کردند که یک مدل تک‌هدفی بود. عثمانی و ژانگ [۱۶] یک مدل چند خوراکی برای زنجیره تأمین بیواتانول از خوراک‌های لیکنوسلولزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمین‌های سویچ‌گرس، قیمت خرید باقیمانده‌ها، تقاضا و قیمت فروش بیواتانول ارائه کردند که یک مدل استوک استیک برای ماکزیم کردن سود انتظاری به وسیله بهینه سازی تصمیمات استراتژیک و عملیاتی بود.

گُنا و همکاران [۱۷] یک مدل جدید استوک استیک *MILP* تحت استاندارد‌های پایداری ارائه کردند که شامل یک مطالعه موردی در شمال داکوتا بود و در نهایت با یک آنالیز حساسیت نشان دادند فاکتورهای ممکن است پایداری مدل را تغییر دهد. مدل سناریو محور که عدم قطعیت آن روی قیمت، تقاضا و زمین‌های زیست‌توده و هدف ماکزیم کردن سود تحت محدودیت‌های سبز بود. کاستین و همکاران [۱۸] یک برنامه ریزی یکپارچه زنجیره تأمین بیواتانول از شکر تحت عدم قطعیت تقاضا نشان دادند. یک مدل *MILP* سناریو محور که روی توسعه‌ی ظرفیت تولید و نگهداری تسهیلات شبکه در طی اضافه کاری تصمیم‌گیری می‌کند که علاوه بر این‌ها به ریسک‌های مالی نیز توجه می‌کند، این مدل یک مدل دو مرحله‌ای است که با روش *SAA* با مطالعه موردی در آرژانتین حل شده است. ژانگ و همکاران [۱۹] یک مدل یکپارچه در تعیین تصمیمات بهینه زنجیره تأمین تولید بیواتانول و حداقل کردن هزینه‌ها با توجه به محدودیت‌ها از خوراک‌های لیکنوسلولزی از جمله سویچ‌گرس ارائه کردند. مدل *MILP* با هدف استفاده از زمین‌های مرزی با در نظر گرفتن چند روش برای برداشت سویچ‌گرس و تأثیر آب و هوا بر روش کشت و همچنین استفاده از کامیون و تانکر برای حمل و نقل و تقاضای قطعی در نظر گرفته شده است.

آن و همکاران [۲۰] در مقاله خود به جای استفاده از محصولات کشاورزی (به علت مشکلات غذایی) و خوراک‌های لیکنوسلولزی (به علت دسترسی کمتر) از جلبک‌های دریایی به عنوان خوراک برای تولید سوخت استفاده کردند. در این مقاله یک مدل قطعی برای طراحی زنجیره تأمین جلبک دریایی به بیودیزل توسعه داده شده است. هدف تعیین تصمیمات استراتژیک برای کاهش هزینه‌های کل است و در نهایت برای اثبات شدنی بودن مدل یک مطالعه موردی در کره جنوبی انجام شده است. دال ماس و همکاران [۲۱] در مقاله خود یک مدل چند سطحی *MILP* برای کمک به تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد اقتصادی و ریسک در زنجیره تأمین بیواتانول ارائه شده است. یک مطالعه موردی روی تبدیل ذرت به بیواتانول در شمال ایتالیا انجام شد که کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌داد. آن‌ها یک مدل با دوره زمانی ۱۰ ساله و عدم قطعیت روی هزینه‌های تولید زیست‌توده و قیمت فروش محصول ارائه کردند. چن و فان [۲۲] یک مدل برنامه ریزی احتمالی عدد صحیح را برای برنامه ریزی استراتژیک زنجیره تأمین سوخت زیستی و تخصیص منابع خوراک‌ها در یک محیط عدم قطعیت ارائه کردند. مدل احتمالی با رویکرد دو مرحله‌ای همراه با الگوریتم آزاد سازی لاگرانژ در یک مطالعه موردی واقعی در کالیفرنیا برای تولید زباله‌های زیستی به بیواتانول اجرا شد.

قادری و همکاران [۲۳] یک مدل *MILP* برای طراحی زنجیره تأمین تولید بیواتانول از سویچ‌گرس استفاده کردند که در آن تقاضا از روش سری‌های زمانی از نوع میانگین متحرک استفاده می‌شود. مطالعه موردی در منطقه شمالی داکوتا کاربرد مدل را نشان می‌دهد و مدل برای افق زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شده است و هدف آن حداقل کردن هزینه‌های کل سیستم می‌باشد. اکگل و همکاران [۲۴] در مقاله خود یک مدل *MILP* برای طراحی زنجیره تأمین بیواتانول با هدف حداقل سازی هزینه‌های کل زنجیره ارائه کردند. هدف این مدل تعیین مکان بهینه و مقدار بهینه تولید کارخانجات است و جریان بهینه زیست‌توده و سوخت زیستی بین مناطق مختلف و تعیین



تعداد بهینه وسیله مورد نیاز برای حمل محصولات بین مناطق و همچنین تعیین مقدار بهینه تولید و کشت زیست توده می باشد و در نهایت برای نشان دادن کاربردی بودن مدل یک مطالعه موردی در منطقه شمالی ایتالیا انجام شده است.

بای و همکاران [۲۵] در مقاله خود روی برنامه ریزی مکان کارخانجات هزینه های کل سیستم را که شامل سرمایه گذاری برای کارخانجات، خوراک ها و حمل محصولات و... می شود را به حداقل می رسانند. همچنین مسیریابی برای حمل خوراک ها و محصولات را برای جلوگیری از متراکم شدن مسیرها با ارائه مدل خود بهینه کردند و بر اساس آزادسازی لاگرانژ و استفاده از روش ابتکاری یک جواب شدنی و نزدیک به بهینه را بدست آوردند و در نهایت با استفاده از روش شاخه و کران این جواب را بهبود و با حل چند مثال کارایی مدل را نشان داده اند.

به طور خلاصه نوآوری های این پژوهش عبارتند از:

- در نظر گرفتن مفهوم پایداری در زنجیره تأمین بیواتانول از نیشکر
- مطالعه مدهای متنوع حمل و نقل
- وابستگی هزینه ثابت احداث کارخانجات به ظرفیت کارخانه
- انتخاب تکنولوژی احداث کارخانه های تولید بیواتانول
- اختلال در مسیرهای انتقال نیشکر و سوخت

### ۳. تعریف مسئله

این مقاله زنجیره تأمین موجود در شکل ۲ را مورد مطالعه قرار می دهد که از سه سطح تشکیل شده است: منابع نیشکر، کارخانجات تولیدی سوخت اتانول زیستی و نقاط تقاضا. منابع نیشکر جمع آوری شده به عنوان خوراک به وسیله مدهای حمل و نقل به سمت کارخانجات تبدیلی حمل می شود. اتانول زیستی از نیشکر در کارخانجات بدست می آید و دوباره به سمت مراکز تقاضا (شهرها) حمل می شود. وضعیت موجودی در کارخانجات هم به صورت مواد اولیه (نیشکر) و هم به صورت سوخت های اتانول می باشد. هزینه های نگهداری موجودی، کمبود و فروش از دست رفته به قیمت تولید اضافه می شود. هدف مسئله ماکزیمم کردن سود، حداقل کردن اثرات زیست محیطی و حداکثر سازی اثرات اجتماعی (اشتغال) می باشد و همچنین به تعیین (۱) مکان احداث کارخانجات (۲) ظرفیت کارخانجات احداثی (۳) مقدار شکر تهیه شده در هر دوره (۴) مقدار اتانول زیستی تولید شده در هر دوره (۵) مقدار شکر تحویلی به هر کارخانه در هر دوره (۶) مقدار سوخت تحویلی به هر شهر در هر دوره (۷) مقدار موجودی و کمبود اتانول زیستی در نقاط تقاضا را تعیین می کند. مدل برنامه ریزی خطی است و نیز اختلال در هریک از مسیرها امکان پذیر می باشد.





متغیرهای تصمیم	توضیح	متغیرهای تصمیم	توضیح
$lub_L$	هزینه بارگذاری تخلیه جعبه جامد روی مد $l$	$Z_{frk}$	اگر کارخانه در مکان $k$ با سطح ظرفیت $k$ احداث شود و در غیر این صورت *
$lulq_L$	هزینه بارگذاری تخلیه جعبه مایع روی مد $l$	$X_{jfls}^t$	مقدار نیشکر حمل شده از زمین $j$ به کارخانه $f$ با مد $l$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$
$\alpha_m$	هزینه نگهداری اتانول در شهر $m$	$y_j^t$	مقدار نیشکر تهیه شده از زمین $j$ در زمان $t$
$\beta_m$	هزینه کمبود اتانول در شهر $m$	$Y_{fmls}^t$	مقدار سوخت اتانول حمل شده از کارخانه $f$ به شهر $m$ با مد $l$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$
$capb_L$	ظرفیت جامد (نیشکر) مد $l$	$I_m^t$	مقدار موجودی اتانول در شهر $m$ در زمان $t$
$caplq_L$	ظرفیت مایع (اتانول) مد $l$	$q_m^t$	مقدار کمبود اتانول در شهر $m$ در زمان $t$
$mc$	میزان رطوبت نیشکر کشت شده	$prod_f^t$	مقدار اتانول تولید شده در کارخانه $f$ در زمان $t$
$CC_{jfl}^1$	هزینه حمل نیشکر از زمین $j$ به سمت کارخانه $f$ با مد $l$	$cap_{fr}^t$	ظرفیت طراحی کارخانه $f$ با تکنولوژی $r$ در زمان $t$
$CC_{fml}^2$	هزینه حمل اتانول از کارخانه $f$ به شهر $m$ با مد $l$		

متغیرها همگی پیوسته و نامنفی و متغیر  $Z_{frk}$  تنها متغیر باینری مسئله است و لازم به ذکر است مقادیر  $CC_{jfl}^1$   $CC_{fml}^2$  از روابط زیر قابل دستیابی است:

$$CC_{jfl}^1 = \left( \left( t_{bL}^d + \frac{t_{bL}^t}{v_L} \right) \frac{d_{jf}}{capb_L} + lub_L \right) \frac{1}{(1-mc)} \quad (1)$$

$$CC_{fml}^2 = \left( t_{lqL}^d + \frac{t_{lqL}^t}{v_L} \right) \frac{d_{fm}}{caplq_L} + lulq_L \quad (2)$$

همانطور که پیش تر گفتیم مدل ریاضی ارائه شده دارای سه هدف می باشد که هدف اول آن ماکزیم کردن سود می باشد:

$$\max Z_1 = \sum_t \left\{ \begin{aligned} & \sum_f \sum_m \sum_l \sum_s P_m^t Y_{fmls}^t \cdot prob_s - \sum_f \sum_k \sum_r f_{frk}^f \cdot Z_{frk} - \sum_f \sum_r f_{fr}^v \cdot cap_{fr}^t \\ & - \sum_j pr \cdot y_j^t - \sum_r \sum_f C_r \cdot prod_f^t - \sum_j \sum_f \sum_l \sum_s CC_{jfl}^1 \cdot X_{jfls}^t \cdot prob_s \\ & - \sum_f \sum_m \sum_l \sum_s CC_{fml}^2 \cdot Y_{fmls}^t \cdot prob_s - \sum_m (\alpha_m I_m^t + \beta_m q_m^t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

این تابع از هشت بخش تشکیل شده است که در بخش اول میزان درآمد حاصل از فروش اتانول زیستی تولید شده می باشد. بخش دوم به هزینه های ثابت احداث، بخش سوم هزینه های متغیر احداث، بخش چهارم هزینه های مرتبط با برداشت نیشکر از زمین ها، بخش پنجم هزینه های مرتبط با تولید، بخش ششم هزینه های حمل نیشکر به کارخانجات، بخش هفتم هزینه های حمل اتانول به شهرها و در بخش هشتم هزینه های مرتبط با موجودی و کمبود اشاره شده است.

تابع هدف دوم به حداقل کردن اثرات زیست محیطی زنجیره تأمین می پردازد:

$$\min Z_2 = \sum_t \left\{ \begin{aligned} & + \sum_j ey \cdot y_j^t + \sum_f \sum_r eu \cdot prod_f^t + \sum_j \sum_f \sum_l \sum_s ET_l \cdot X_{jfls}^t \cdot prob_s \\ & + \sum_f \sum_m \sum_l \sum_s EJ_l \cdot Y_{fmls}^t \cdot prob_s + \sum_m EI \cdot I_m^t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

این هدف از پنج بخش تشکیل شده است که در آن بخش اول اثرات ناشی از برداشت شکر از زمین ها، بخش دوم اثرات ناشی از تولید اتانول، بخش سوم و چهارم اثرات حمل شکر از زمین ها به کارخانجات و حمل اتانول از کارخانجات به شهرها و در بخش پنجم اثرات زیست محیطی نگهداری اتانول در شهرها اشاره شده است.

تابع هدف سوم به بعد اجتماعی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن میزان اشتغال ایجاد شده توجه دارد:

$$\max Z_3 = \sum_t \left\{ \begin{aligned} & \sum_j S \cdot y_j^t + \sum_j \sum_f \sum_l \sum_s ST_L^b \cdot X_{jfls}^t \cdot prob_s + \sum_f \sum_m \sum_l \sum_s ST_L^u \cdot Y_{fmls}^t \cdot prob_s \\ & + \sum_f \sum_r SP_r \cdot prod_f^t + \sum_m SI \cdot I_m^t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

تابع هدف اجتماعی از پنج بخش تشکیل شده است که در بخش اول به اشتغال ایجاد شده ناشی از کشت نیشکر، بخش دوم حمل نیشکر به کارخانجات، بخش سوم حمل اتانول به شهرها، بخش چهارم اشتغال ناشی از تولید و در بخش پنجم به اشتغال ایجاد شده از نگهداری اتانول در شهرها اشاره دارد.

محدودیت های مدل بدین ترتیب می باشد:

$$cap_{fr}^t \leq \sum_k cap_{r_{fjk}} . Z_{fjk} \quad \forall f, r, t \quad (6)$$

$$prod_f^t \leq \sum_r cap_{fr}^t \quad \forall f, t \quad (7)$$

$$I_m^t \leq capi_m \quad \forall m, t \quad (8)$$

$$\sum_r \sum_k Z_{fjk} \leq 1 \quad \forall f \quad (9)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_l X_{jfls}^t . \eta_r = prod_f^t \quad \forall f, s, t \quad (10)$$

$$y_j^t \leq a_j^t \quad \forall j, t \quad (11)$$

$$\sum_l \sum_m Y_{fmls}^t = prod_f^t \quad \forall f, s, t \quad (12)$$

$$y_j^t = \sum_f \sum_l X_{jfls}^t \quad \forall j, s, t \quad (13)$$

$$\sum_f \sum_l Y_{fmls}^t + q_m^t + I_m^{t-1} - I_m^t = D_m^t \quad \forall m, s, t \quad (14)$$

$$\sum_l Y_{fmls}^t \leq W_{fms} . M \quad \forall f, m, s, t \quad (15)$$

$$\sum_l X_{jfls}^t \leq x_{jfs} . M \quad \forall j, f, s, t \quad (16)$$

محدودیت (۶) میزان ظرفیت طراحی را تضمین می کند که از حداکثر ظرفیت کارخانه تجاوز نکند. محدودیت (۷) تضمین می کند تا میزان تولید در کارخانجات از ظرفیت طراحی شده تجاوز نکند. محدودیت (۸) میزان موجودی اتانول در هر شهر را تضمین می کند تا از حداکثر ظرفیت ذخیره سازی آن شهر بیشتر نشود. محدودیت (۹) تضمین می کند تا در هر مکان بالقوه تنها یک کارخانه با یک تکنولوژی تولید احداث شود. محدودیت (۱۰) بالانس میزان نیشکر برداشت شده با میزان تولید اتانول را نشان می دهد. محدودیت (۱۱) تضمین می کند تا نیشکر کشت شده از حداکثر میزان در دسترس تجاوز نکند. محدودیت (۱۲) نشان می دهد میزان اتانول تولیدی در کارخانجات با میزان ارسالی به شهرها برابر است. محدودیت (۱۳) تعادل میزان نیشکر کشت شده با ارسالی به کارخانجات را نشان می دهد. محدودیت (۱۴) تعادل موجودی را نشان می دهد. محدودیت (۱۵) و (۱۶) به عدم وجود جریان در صورت وقوع اختلال اشاره دارد.

### ۳،۲. استفاده از روش اپسیلون- محدودیت برای حل مدل چند هدفه

روش محدودیت اپسیلون یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آن ها در هر مرحله به محدودیت حل این نوع مسائل می پردازد [۲۶]. مرز پارتو می تواند با روش قید  $\epsilon$  ایجاد شود [۲۷]. فرمولاسیون روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر است که هدف اول به عنوان هدف اصلی معرفی شده است.

$$\text{Min fl}(X)$$

$$x \in X$$

$$f_2(X) \leq \epsilon_2$$

...

$$f_n(X) \leq \epsilon_n$$



در مسأله پیشنهادی این پژوهش هدف اول به عنوان هدف اصلی و دو هدف دیگر به عنوان اهداف فرعی مورد بررسی قرار می گیرند. بنا بر روش محدودیت اپسیلون فرمولاسیون اهداف به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned} & \text{Max } Obj1 \\ & Obj2 \leq \varepsilon 2 \\ & Obj3 \leq \varepsilon 3 \end{aligned}$$

*Obj1* بیانگر تابع هدف اصلی مسأله و محدودیت ها به مجموعه محدودیت های مسأله افزوده می شود.

گامهای روش  *$\varepsilon$ -constraint* به صورت زیر است:

یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید.

هر بار با توجه به یکی از توابع هدف منتخب، مسأله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را بدست آورید.

بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را، به تعداد از قبل مشخص شده تقسیم بندی کنید و یک جدول مقادیر برای  $\varepsilon 1, \dots, \varepsilon n$  بدست آورید.

هر بار مسأله را با تابع هدف اصلی هر یک از مقادیر  $\varepsilon 1, \dots, \varepsilon n$  حل کنید.

جوابهای پارتویی یافته شده را گزارش کنید.

در روش  *$\varepsilon$ -constraint* پیشنهادی همانطور که مطرح شد تابع هدف اول به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می شود و توابع هدف دوم و سوم به عنوان توابع هدف فرعی، سپس تعداد ۵ شکست برای هر هدف در نظر گرفته شده است و در مجموع حداکثر ۱۵ نقطه پارتویی برای هر مسأله تولید می شود. و در نهایت بهترین جواب یافته شده برای توابع هدف در بین نقاط پارتویی روش  *$\varepsilon$ -constraint* ارائه می شود.

#### ۴. مطالعه موردی

این مطالعه در جنوب شرقی ایران، استان خوزستان صورت گرفته است که دو شهر اهواز و شوشتر برای تهیه نیشکر انتخاب شده اند و سه مکان بالقوه برای احداث کارخانه در شهرهای یزد، کلاته سمنان و طبس انتخاب شده است و بازارهای مصرف نیز سه کلان شهر تهران، اصفهان و مشهد می باشد. در کارخانجات از دو تکنولوژی ترموشیمیایی و بیوشیمیایی برای تولید اتانول استفاده می شود و دو مد حمل و نقل کامیون سبک و سنگین نیز قابل استفاده است و ۴ سناریو برای رخ داد اختلال در مسیرها پیش بینی شده است و مدل چند دوره ای با در نظر گرفتن سه دوره زمانی هفتگی مد نظر است.

جدول شماره ۱ تخمین هزینه های اولیه و جدول شماره ۲ و ۳ سناریو های اختلال برای دو پارامتر مربوط به اختلال را نمایش می دهند. میزان تخمین تقاضا نیز در جدول شماره ۴ ذکر شده است.

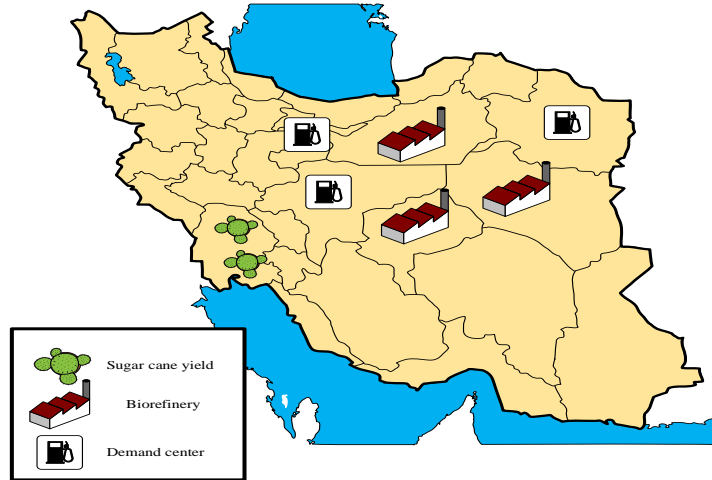
جدول ۱- مقادیر پارامتر های اولیه

$pr$	۲۰۰۰۰۰۰ ریال	$t_{lq}^t$	۱۲۸۰۰۰۰ و ۱۵۲۰۰۰۰ ریال/ساعت/کامیون
$c$	۱۹۶۰۴ و ۲۱۵۰۰ ریال	$\alpha_m$	۸۰۰ ریال/لیتر
$\eta$	۰٫۵ و ۰٫۵	$\beta_m$	۸۰۰ ریال/لیتر
$mc$	۰٫۵	$capb_l$	۲۵ و ۳۵ تن
$t_{bl}^d$	۳۰۰۰۰ و ۳۲۵۰۰ ریال/کیلومتر/کامیون	$caplq_l$	۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ لیتر
$t_{bl}^t$	۱۱۶۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰۰۰ ریال/ساعت/کامیون	$prob_s$	۰٫۲۵
$t_{lq}^d$	۳۲۵۰۰ و ۳۵۰۰۰ ریال/کیلومتر/کامیون	$p$	۸۰۰۰۰۰۰ ریال
$a_j^t$	۵۷۰۰۰ و ۶۰۰۰۰ تن/هفته	$capr_{frk}$	۱۴۰۰۰۰۰ لیتر/هفته





رسم توضیحی ۲ نقشه جئوگرافی سطوح زنجیره



جدول ۲- مقادیر پارامتر های اختلال

$y(f,m,s)$	$S=1$	$S=2$	$S=3$	$S=4$
1,1	1	1	1	1
1,2	0	0	1	1
1,3	1	1	1	1
2,1	0	1	0	1
2,2	1	1	1	0
2,3	1	0	1	0
3,1	1	1	0	1
3,2	1	1	1	0
3,3	1	1	0	1

جدول ۴- مقادیر تقاضا

شهر	تقاضا (لیتر/هفته)
تهران	۳۵۰۰۰۰۰
مشهد	۲۵۰۰۰۰۰
اصفهان	۲۰۰۰۰۰۰

برای تعیین اثرات زیست محیطی از روش *LCA* استفاده شده است و از شاخص *Eco-indicator99* نیز برای محاسبه اثر [۲۸] با توجه به گاز کربن دی اکسید و نیتروژن دی اکسید ایجاد شده نیز استفاده شده است.

همچنین برای تعیین اثرات اجتماعی شاخص های زیادی در ادبیات از جمله آب های زیر زمینی، ایجاد شغل و ... استفاده شده است. ما در این مقاله از تعداد شغل

ایجاد شده برای اثرات اجتماعی و از یک فرم طرح توجیهی تولید بیواتانول نیز برای تخمین مقادیر استفاده کرده ایم.



$x_{(j,f,s)}$	$S=1$	$S=2$	$S=3$	$S=4$
۱,۱	۱	۰	۱	۱
۱,۲	۱	۰	۱	۰
۱,۳	۱	۱	۱	۰
۲,۱	۱	۱	۱	۱
۲,۲	۱	۱	۰	۱
۲,۳	۱	۱	۰	۱

جدول ۳- مقادیر پارامترهای اختلال



### ۴.۱. نتایج عددی

ابتدا با استفاده از روش اپسیلون که جواب های هریک به عنوان تابع هدف باشند به قرار زیر می باشد:

جدول ۵- مقادیر توابع هدف

شماره مسأله	نوع اهداف	f1	f2	f3
1	Max f1	۲۹۲۶۶۹۹۳۲۰۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰	۸۴۲۳۲۰۰۰
	Min f2	-۱۲۰۰۰۰۰۰۰۰	.	.
	Max f3	۵۱۸۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰	۱۲۳۶۶۰۰۰۰

حال مقادیر اپسیلون با در نظر گرفتن پنج نقطه شکست به شرح زیر می باشد:

جدول ۶- مقادیر اپسیلون

شماره مسأله	مقدار اپسیلون (E2)	مقدار اپسیلون (E3)
1	۶۶۷۹۴۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰
	۱۲۹۵۸۸۰۰	۴۹۴۶۴۰۰۰
	۱۹۴۳۸۲۰۰	۷۴۱۹۶۰۰۰
	۲۵۹۱۷۶۰۰	۹۸۹۲۸۰۰۰
	۳۲۳۹۷۰۰۰	۱۲۳۶۶۰۰۰۰

حال مجموعه جواب پارتو نیز به شرح زیر می باشد :

جدول ۷- مقادیر هدف در اپسیلون های مختلف

جواب	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم
1	-۸۷۶۰۳۰۰۰۰	.	۳۲۳۹۷۰۰۰
۲	-۸۰۰۰۰۰۰۰۰	.	۴۰۰۰۰۰۰۰
۳	-۸۰۰۰۰۰۰۰۰	.	۴۰۰۰۰۰۰۰
۴	-۸۰۰۰۰۰۰۰۰	.	۴۰۰۰۰۰۰۰
۵	-۸۰۰۰۰۰۰۰۰	.	۴۰۰۰۰۰۰۰
۶	۸۸۸۲۸۹۶۷۳۴۶	۱۲۹۵۹۰۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰
۷	۸۸۹۹۹۶۱۷۳۴۳	۱۲۹۵۹۰۰۰	۴۹۴۶۴۰۰۰
۸	۸۹۰۸۳۰۴۴۳۸۰	۱۲۹۵۹۰۰۰	۵۷۸۰۷۰۰۰
۹	۸۹۰۸۳۰۴۴۳۸۰	۱۲۹۵۹۰۰۰	۱۷۹۲۱۰۰۰
۱۰	۸۹۰۸۳۰۴۴۳۸۰	۱۲۹۵۹۰۰۰	۱۷۹۲۱۰۰۰
۱۱	۱۹۳۷۵۸۱۲۶۵۷۹	۱۶۱۹۹۰۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰
۱۲	۱۹۳۹۲۸۷۹۶۶۰۸	۱۶۱۹۹۰۰۰	۴۹۴۶۴۰۰۰
۱۳	۱۹۳۹۲۸۷۹۶۶۰۹	۱۶۱۹۹۰۰۰	۴۹۴۶۴۰۰۰
۱۴	۱۹۴۰۵۵۳۱۶۵۷۹	۱۶۱۹۹۰۰۰	۶۲۱۱۶۰۰۰
۱۵	۱۹۴۰۵۵۳۱۶۵۷۹	۱۶۱۹۹۰۰۰	۶۲۱۱۶۰۰۰
۱۶	۱۹۳۷۵۸۱۲۶۶۳۹	۱۶۱۹۹۰۰۰	۳۲۳۹۷۰۰۰
۱۷	۱۹۳۹۲۹۴۲۶۶۱۸	۲۵۹۱۸۰۰۰	۴۹۴۶۴۰۰۰







## نتیجه گیری و مطالعات آتی

در این مقاله یک مدل برای طراحی ساختار شبکه زنجیره تأمین اتانول زیستی- نیشکر که شامل چندین زمین برای تهیه نیشکر و چندین ظرفیت برای احداث کارخانجات و چند نقطه تقاضا است. این مدل پایدار دارای سه هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی است که با استفاده از روش اپسیلون محدودیت در نرم افزارهای تجاری قابل حل است.

آنالیز حساسیت روی قیمت محصول نهایی و نمودار تغییرات تابع اقتصادی در این مقاله نشان دهنده حساسیت زیاد این پارامتر است. مدل پیشنهادی در هر یک از زنجیره های تأمین زیست توده به سوخت های زیستی قابل استفاده است. نتایج هزینه ها و چیدمان سیستماتیک به مشخصه های جغرافیایی و دسترسی به منابع ممکن است وابستگی داشته باشند. در تحقیقات آینده می توان به حل مسئله چند هدفه فازی، توجه به تصمیمات عملیاتی، اعمال عدم قطعیت روی پارامترهای متغیر در طول زمان و طراحی شبکه زنجیره تأمین بین المللی اشاره کرد.

## ضمیمه ۱

جدول ۹- مقادیر کمبود سوخت در شهرها

$q(m, t)$ لیتر	۱	۲	۳
۱	۰	۰	۲۵۰۰۰۰۰
۲	۲۴۴۳۰۰۰	۰	۰
۳	۱۹۴۳۰۰۰	۰	۰

میزان کمبود و موجودی ها به شرح زیر می باشد:

جدول ۸- مقادیر موجودی سوخت در شهرها

$I(m, t)$ لیتر	۱	۲	۳
۱	۲۵۰۰۰۰۰	۰	۰
۲	1.913	۲۴۴۳۰۰۰	۰
۳	۰	۱۹۴۳۰۰۰	۰

## منابع

۱. Shabani, N. and T. Sowlati, A hybrid multi-stage stochastic programming-robust optimization model for maximizing the supply chain of a forest-based biomass power plant considering uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 2016. **112**: p. 3285-3293.
۲. Andersen, F., et al., Optimal design and planning of biodiesel supply chain with land competition. *Computers & Chemical Engineering*, 2012. **47**: p. 170-182.
۳. Huang, Y., Y. Fan, and C.-W. Chen, An integrated biofuel supply chain to cope with feedstock seasonality and uncertainty. *Transportation Science*, 2014. **48**(4): p. 540-554.
۴. Sharma, B., et al., Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. *Bioresource technology*, 2013. **150**: p. 163-171.
۵. Ng, W.P.Q., H.L. Lam, and S. Yusup, Supply network synthesis on rubber seed oil utilisation as potential biofuel feedstock. *Energy*, 2013. **55**: p. 82-88.
۶. Leduc, S., et al., Location of a biomass based methanol production plant: a dynamic problem in northern Sweden. *Applied Energy*, 2010. **87**(1): p. 68-75.
۷. Duarte, A., W. Sarache, and Y. Costa, Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy*, 2016. **100**: p. 321-331.



- .<sup>۸</sup> Marufuzzaman, M., S.D. Ekşioğlu, and R. Hernandez, *Environmentally friendly supply chain planning and design for biodiesel production via wastewater sludge*. *Transportation Science*, 2014. **48**(4): p. 555-574.
- .<sup>۹</sup> Sharifzadeh, M., M.C. Garcia, and N. Shah, *Supply chain network design and operation: Systematic decision-making for centralized, distributed, and mobile biofuel production using mixed integer linear programming (MILP) under uncertainty*. *Biomass and Bioenergy*, 2015. **81**: p. 401-414.
- .<sup>۱۰</sup> Zhang, Y. and M.M. Wright, *Product selection and supply chain optimization for fast pyrolysis and biorefinery system*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. **53**(51): p. 19987-19999.
- .<sup>۱۱</sup> You, F. and B. Wang, *Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed-centralized processing networks*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011. **50**(17): p. 10102-10127.
- .<sup>۱۲</sup> Marufuzzaman, M., et al., *Supply chain design and management for syngas production*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016. **4**(3): p. 890-900.
- .<sup>۱۳</sup> Li, Q. and G. Hu, *Supply chain design under uncertainty for advanced biofuel production based on bio-oil gasification*. *Energy*, 2014. **74**: p. 576-584.
- .<sup>۱۴</sup> Marvin, W.A., et al., *Economic optimization of a lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain*. *Chemical Engineering Science*, 2012. **67**(1): p. 68-79.
- .<sup>۱۵</sup> Corsano, G., A.R. Vecchiotti, and J.M. Montagna, *Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model*. *Computers & Chemical Engineering*, 2011. **35**(8): p. 1384-1398.
- .<sup>۱۶</sup> Osmani, A. and J. Zhang, *Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties*. *Energy*, 2013. **59**: p. 157-172.
- .<sup>۱۷</sup> Gonela, V., J. Zhang, and A. Osmani, *Stochastic optimization of sustainable industrial symbiosis based hybrid generation bioethanol supply chains*. *Computers & Industrial Engineering*, 2015. **87**: p. 40-65.
- .<sup>۱۸</sup> Kostin, A., et al., *Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty*. *chemical engineering research and design*, 2012. **90**(3): p. 359-376.
- .<sup>۱۹</sup> Zhang, J., et al., *An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain*. *Applied Energy*, 2013. **102**: p. 1205-1217.
- .<sup>۲۰</sup> Ahn, Y.-C., et al., *Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain network: multi-period deterministic model*. *Applied Energy*, 2015. **154**: p. 528-542.
- .<sup>۲۱</sup> Dal-Mas, M., et al., *Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty*. *Biomass and bioenergy*, 2011. **35**(5): p. 2059-2071.
- .<sup>۲۲</sup> Chen, C.-W. and Y. Fan, *Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012. **48**(1): p. 1. ۱۶۴-۵۰.
- .<sup>۲۳</sup> Ghaderia, H., M. Asadia, and S. Shavvalpour, *A Switchgrass-based Bioethanol Supply Chain Network Design Model under Auto-Regressive Moving Average Demand*.
- .<sup>۲۴</sup> Akgul, O., et al., *Optimization-based approaches for bioethanol supply chains*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010. **50**(9): p. 4927-4938.
- .<sup>۲۵</sup> Bai, Y., et al., *Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011. **45**(1): p. 162-175.



- . ۲۶ Ehrgott, M .and X. Gandibleux, *Multiobjective combinatorial optimization—theory, methodology, and applications*, in *Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys*. 2003, Springer. p. 369-444.
- . ۲۷ Bérubé, J.-F., M. Gendreau, and J.-Y .Potvin, *An exact  $\epsilon$ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits*. *European Journal of Operational Research*, 2009. **194**(1): p. 39-50.
- . ۲۸ Mele, F.D., et al., *Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011. **50**(9): p. 4939-4958.