

## مدل‌سازی ریاضی شبکه تامین زیست‌توده‌های نسل دوم و سوم با در نظر گرفتن رابطه‌ی متقابل آب-انرژی

هادی صاحبی

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول)

hadi\_sahebi@iust.ac.ir

نیلوفر محجوب

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

n\_mahjoub@ind.iust.ac.ir

اشکان تیموری

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

ashkan\_Teymouri@iust.ac.ir

امروزه بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز از سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید اما محدودیت این منابع و اثرات مخرب آن‌ها بر محیط‌زیست موجب روی آوردن جوامع به منابع تجدیدپذیر انرژی شده است. در این بین انرژی حاصل از زیست‌توده (بیوانرژی) با توجه به گستردگی منابع و سایر مزایا جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص داده است. در این پژوهش مدلی چندهدفه برای طراحی شبکه تامین بیوانرژی از انواع مختلف زیست‌توده‌های نسل دوم (جاتروفا، پسماند کشاورزی و فضولات حیوانی) و سوم (ریز جلبک‌ها) با در نظر گرفتن مفاهیم رابطه آب-انرژی و انتشار کربن ارائه شده است. به منظور یافتن مکان‌های مناسب جهت کاشت جاتروفا در کشور ایران و کاهش فضای جواب مدل ریاضی از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است. مدل ارائه شده با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی MINMAX برای استان‌های کشور ایران به عنوان مطالعه موردی برای یک افق زمانی ده‌ساله حل شده است. طبق نتایج، تولید انرژی از منابع ریز جلبک و جاتروفا نسبت به پسماند در اولویت است.

**واژگان کلیدی:** طراحی شبکه تامین، زیست‌توده نسل دوم و سوم، رابطه آب-انرژی، GIS،

بهینه‌سازی چندهدفه.

## ۱. مقدمه

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و اثرات زیستی آن‌ها از دلایل اصلی توجه و استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی است. در این میان انرژی حاصل از زیست‌توده به دلیل تنوع زیاد منابع از جذابیت بالایی برخوردار است (Mafakheri & Nasiri, 2014). بیوانرژی به‌عنوان یک منبع جایگزین قابل توجه که موجب کاهش وابستگی ملت‌ها به نفت می‌شود و اثرات مثبتی بر روی اقتصاد، محیط‌زیست و جامعه دارد، شناخته شده است (Ekşioğlu et al., 2009). انواع زیست‌توده در سه نسل طبقه‌بندی شده است. زیست‌توده نسل اول شامل موادی مانند دانه ذرت، نیشکر، دانه سویا و دانه‌های روغنی است که اغلب کاربرد خوراکی نیز دارند (Banerjee et al., 2010). از آنجاکه استفاده از زیست‌توده نسل یک موجب به خطر افتادن امنیت تأمین غذا می‌شود این روند به‌سوی استفاده از زیست‌توده نسل دوم که کاربرد خوراکی ندارند تغییر کرده است. موادی همچون پسماندهای محصولات کشاورزی مانند غلاف ذرت، پسماندهای بعد از قطع درختان و یا محصولات گیاهی دارای انرژی بدون کاربرد خوراکی مانند سویچ‌گرس، جاتروفا و غیره از زیست‌توده‌های نسل دوم هستند (Sharma et al., 2013). ریزجلبک‌ها به دلیل تفاوت ماهیت تولید انرژی از آن‌ها به‌عنوان نسل سوم نام‌گذاری شده‌اند (محسنی و پیشوایی، ۱۳۹۷). در نظر گرفتن ترکیبی از انواع مختلف زیست‌توده از نسل‌های مختلف در یک مدل به‌عنوان منبع تولید انرژی موجب انعطاف‌پذیری بیشتر مدل می‌شود و این امکان را ایجاد می‌کند که متناسب با شرایط جغرافیایی و سایر امکانات بهترین زیست‌توده برای هر منطقه انتخاب شود در این پژوهش به طراحی مدل شبکه تأمین بیوانرژی از زیست‌توده‌های نسل دوم شامل جاتروفا، پسماند کشاورزی و فضولات حیوانی و زیست‌توده نسل سوم یعنی ریزجلبک پرداخته شده است.

آب و انرژی دو منبع حیاتی برای بهبود زندگی و پیشرفت جوامع است که افزایش تقاضا برای هر دوی این منابع موجب جلب توجه همه جهان شده است (Liu et al., 2017). پیش‌بینی

شده است که تا سال ۲۰۳۰ تقریباً نیمی از جمعیت جهان در مناطق تحت فشار از نظر تأمین آب خواهند بود و این کمبود امنیت تأمین انرژی را به خطر می‌اندازد (Lv et al., 2018). تقاضای انرژی نیز تا سال ۲۰۳۰ نسبت به سال ۲۰۱۰، ۳۶ درصد افزایش خواهد یافت که موجب ایجاد فشار بیشتر روی منابع محدود فعلی می‌شود. از طرفی کمبود آب می‌تواند ثبات سیستم انرژی و قابلیت افزایش ظرفیت را به چالش بکشد و در نتیجه هزینه‌های اضافی را به همراه داشته باشد (Zhang & Vesselinov, 2016). به وابستگی بین دو بخش آب و انرژی رابطه (نکسوس) آب-انرژی گفته می‌شود. با توجه به مشکل کم‌آبی و خشک‌سالی در ایران توجه به رابطه آب-انرژی در سیستم‌های تولید انرژی اهمیت بیشتری نیز پیدا می‌کند. در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سوخت و انرژی زیستی نیز باید به این مسئله توجه شود.

مدل ریاضی به گونه‌ای نوشته شده که با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی و با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی، تولید انرژی، مصرف آب و انتشار CO<sub>2</sub> بهترین گزینه تولید انرژی را انتخاب کند.

برخی سوالات این تحقیق عبارت‌اند از: (۱) کدام نواحی ایران پتانسیل تولید سوخت و انرژی از انواع مختلف زیست توده‌های نسل دوم و سوم را دارند؟ (۲) با در نظر گرفتن اهدافی هم‌چون میزان مصرف آب، هزینه و ملاحظات زیست محیطی کدام یک از انواع مختلف زیست توده‌های نسل دوم و سوم بهترین گزینه برای تولید بیشترین مقدار انرژی است؟ (۳) چگونه می‌توان رابطه آب-انرژی را در مدل به خوبی منعکس کرد؟ (۴) آیا در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی تأثیری در انتخاب نوع زیست توده جهت تولید انرژی دارد؟

به‌طور کلی نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از: (۱) ارائه مدل زنجیره تأمین بیوانرژی از زیست توده نسل دوم و سوم (۲) در نظر گرفتن رابطه آب-انرژی در مدل زنجیره تأمین (۳) استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای مکان‌یابی استان‌های مناسب کاشت جatroفا (۴) انجام مطالعه موردی برای استان‌های کشور ایران.

در ادامه در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه تحقیق، در بخش سوم روش تحقیق شامل مدل GIS، مدل ریاضی و روش حل آن، ارائه شده است. در بخش چهارم داده‌ها و پارامترهای تحقیق، در فصل پنجم نتایج مطالعه موردی و نهایتاً در فصل ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در این پژوهش زیست توده‌های جاتروفا، ریزجلبک، پسماند کشاورزی و فضولات دامی به‌عنوان منبع تولید انرژی انتخاب شده‌اند. در ادامه تحقیقاتی که در زمینه طراحی زنجیره تأمین بیوانرژی از این زیست توده‌ها صورت گرفته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ○ جاتروفا

اولین نوع از زیست توده که به آن می‌پردازیم جاتروفا است. جاتروفا یک محصول گرمسیری از خانواده افریاسه<sup>۱</sup> است که به مقاومتش به خشکی مشهور است و در آمریکای مرکزی و جنوبی، آسیای جنوب شرق و هند و آفریقا کشت می‌شود (Maes et al., 2009). بذرهاي جاتروفا حاوی روغن چسبناکی است که برای اهداف سوختی و روشنایی قابل استفاده است. کیفیت روغن جاتروفا برای مصارف سوختی بسیار عالی است. این روغن پس از فرآوری طی فرآیند تبادل استری<sup>۲</sup> به بیودیزل تبدیل می‌شود. این روش، روش معمول و اقتصادی در این حوزه است که توسط بسیاری از کارخانه‌های بیودیزل استفاده می‌شود (Jongschaap et al., 2007). (Babazadeh et al., 2017a) مدلی جهت تولید بیودیزل از جاتروفا ارائه کردند که برای حل آن از یک روش ترکیبی اپسیلون تقویت شده و روش بهینه‌سازی لغت‌نامه‌ای<sup>۳</sup> استفاده شده است. این مدل همچنین دارای عدم قطعیت که برای مواجهه با آن از برنامه‌ریزی امکانی استفاده شده است. (Babazadeh

1. Euphorbiaceae
2. Transesterification
3. Lexicographic optimization

et al., 2017b) مدلی دیگر برای طراحی زنجیره‌ی تأمین بیودیزل از جاتروفا و روغن آشپزی استفاده شده<sup>۱</sup> ارائه کردند. در این مقاله ابتدا با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۲</sup> و با توجه به شرایط اقلیمی و فاکتورهای اجتماعی به رتبه‌بندی استان‌های کشور برای تعیین نقاط مناسب کاشت جاتروفا پرداخته و از این نقاط کاندید به‌عنوان ورودی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره استفاده کردند (Babazadeh, 2017) همچنین یک مدل ریاضی قطعی برای طراحی زنجیره تأمین تولید بیودیزل و گلیسرین از جاتروفا و روغن آشپزی استفاده شده ارائه داده است.

#### ○ ریزجلبک

ریزجلبک‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون رشد سریع و درصد بالای روغن می‌توانند به‌عنوان یک منبع مناسب جهت تولید بیودیزل استفاده شوند (Mata et al., 2010). مراحل متداول تولید سوخت از ریزجلبک‌ها عبارت است از: ۱- کشت و تکثیر ریزجلبک‌ها ۲- برداشت ۳- خشک کردن زیست‌توده ۴- استخراج روغن از زیست‌توده خشک‌شده و ۵- تبدیل آن به بیودیزل (Nicolò et al., 2017). (Ahn et al., 2015) مدلی برای طراحی زنجیره تأمین تبدیل ریزجلبک‌ها به بیودیزل در کشور کره ارائه کردند. در این پژوهش، سیستمی یکپارچه جهت عرضه مواد خام ارائه شده است. طبق نتایج این پژوهش قیمت بیودیزل تولیدی ۵.۹۱ دلار به ازای هر گالن خواهد بود. (Mohseni & Pishvae, 2016) به ارائه مدلی برای طراحی شبکه تأمین بیودیزل از ریزجلبک‌ها پرداخته‌اند. در مدل عدم قطعیت‌هایی نظیر هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل را در نظر گرفته است. برای مواجهه با عدم قطعیت از بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. (Mohseni et al., 2016) مدل دیگری ارائه کرده و در آن ابتدا با استفاده از GIS و در نظر گرفتن فاکتورهای نزدیکی به منابع، آب‌وهوا و جغرافیایی به تعیین مکان‌های بالقوه جهت

1. Waste Cooking Oil (WCO)
2. Unified Data Envelopment Analysis (UDEA)

پرورش ریزجلبک پرداختند و سپس یک مدل طراحی شبکه با هدف اقتصادی و تصمیماتی همچون مکان‌یابی، تعیین ظرفیت تسهیلات و جریان بهینه بین آن‌ها ارائه دادند. همچنین با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها و مفهوم رقابت به بحث قیمت‌گذاری این نوع از سوخت‌ها نیز پرداخته‌اند.

○ پسماند کشاورزی و دامی

در برخی منابع از ترکیب پسماند کشاورزی و فضولات حیوانی به‌عنوان منبع تولید انرژی استفاده شده است. برای تولید انرژی از پسماند گیاهی و جانوری از فرآیند هضم بی‌هوازی استفاده می‌شود. هضم بی‌هوازی تجزیه و تخمیر مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها در غیاب اکسیژن است. این فرایند منجر به تولید بیوگاز می‌شود که ترکیبی از متان و دی‌اکسید کربن است (امین صالحی و همکاران، ۱۳۹۷). از بیوگاز تولیدی می‌توان برای تولید برق یا حرارت در واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) استفاده کرد (تیموری حمزه کلایی و همکاران، ۱۳۹۷).

(Balaman & Selim, 2014b) یک مدل طراحی زنجیره تأمین تولید بیوگاز<sup>۱</sup> از فضولات حیوانی و پسماند کشاورزی با استفاده از فرایند هضم بی‌هوازی ارائه دادند. از آنجایی که دام‌پروری و کشاورزی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی در شهر از میر ترکیه است، این ترکیب زیست‌توده را در نظر گرفتند. در مدل آن‌ها بحث لجستیک معکوس نیز مطرح شده است. طبق نتایج دوره بازگشت سرمایه ۴.۹۸ سال است. (Balaman & Selim, 2014a) در ادامه کار قبلی با اضافه کردن تابع هدف زیست‌محیطی به‌صورت کمینه کردن میزان زیست‌توده جمع‌آوری نشده، یک مدل زنجیره تأمین سبز ارائه کردند. این مدل دارای عدم قطعیت در پارامترهای هزینه‌ای بوده در نتیجه از برنامه‌ریزی فازی استفاده شده است. (Balaman & Selim, 2016) سپس با اضافه کردن سیستم‌های گرمایش ناحیه‌ای و در نظر گرفتن تابع هدف سطح سرویس به‌صورت کمینه‌سازی تقاضای برآورده نشده گرما، مدل غیرقطعی فازی قبل را توسعه

---

1. Biogass

دادند. (Balaman, 2016) مدل جدیدی ارائه کردند که در آن از دو فرآیند هضم بی‌هوازی و گازی‌سازی در کنار هم استفاده شده است و بیوگاز تولیدشده توسط این دو فرآیند در نهایت در واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت به الکتریسیته تبدیل می‌شود. ویژگی‌های مدل‌های بررسی‌شده در جدول مرور ادبیات (جدول ۱) جمع‌بندی شده است.

جدول ۱. جدول مرور ادبیات (مأخذ: جمع‌بندی محقق)

نکسوس آب و انرژی	رویکرد مکانیابی		روش حل چندهدفی				تابع هدف			محصول نهایی			نوع زیست‌توده			دوره	مطالعه موردی	نویسنده و سال
	UDEA	GIS	محدودیت اپستولون	برنامه‌ریزی آرمانی	جمع وزنی	مصرف آب	تولید انرژی	زیست‌محیطی	اقتصادی	محصول جانبی	الکتریسیته	بیودیزل	بقایای کشاورزی دامی	ریزجلبک	چایروفک			
					x			x	x	x	x	x	x	x	۳۶ ماه	ترکیه	Balaman & Selim, 2014a	
								x	x	x	x	x	x	x	۲۰ سال	ترکیه	Balaman & Selim, 2014b	
								x	x	x	x	x	x	x	۷ سال	کره	Ahn et al., 2015	
								x	x	x	x	x	x	x	۱۲ ماه	ایران	Mohseni & Pishvae, 2016	
	x							x	x	x	x	x	x	x	۱۲ ماه	ایران	Mohseni et al., 2016	
								x	x	x	x	x	x	x	۱۲ ماه	ترکیه	Balaman & Selim, 2016	
				x				x	x	x	x	x	x	x	۲۰ سال	ترکیه	Balaman, 2016	
	x			x				x	x	x	x	x	x	x	۲۱ سال	ایران	Babazadeh et al., 2017a	
								x	x	x	x	x	x	x	۴۰ فصل	ایران	Babazadeh et al., 2017b	
								x	x	x	x	x	x	x	۴۰ فصل	ایران	Babazadeh, 2017	
x				x			x	x	x	x	x	x	x	x	۱۰ سال	ایران	پژوهش حاضر	

مأخذ: نتایج تحقیق

در مقالات بررسی‌شده از یک نوع زیست‌توده به‌عنوان منبع تولید انرژی در زنجیره استفاده شده است. درحالی‌که ممکن است امکان تولید و بهره‌برداری از یک زیست‌توده خاص در

تمامی مناطق وجود نداشته باشد و یا در صورت مناسب بودن شرایط با توجه به ظرفیت و امکانات موجود مقدار انرژی تولیدی پاسخگوی نیاز موجود نباشد. در طراحی شبکه تأمین بیوانرژی در نظر گرفتن ترکیبی از انواع مختلف زیست‌توده از نسل‌های مختلف با فرآیندهای تولید مختلف موجب انعطاف‌پذیری بیشتر مدل می‌شود و این امکان را ایجاد می‌کند که متناسب با شرایط جغرافیایی و سایر امکانات بهترین زیست‌توده برای هر منطقه انتخاب شود و به این ترتیب هدف اصلی که کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است را بیشتر و بهتر محقق نماید. در این پژوهش از سه نوع زیست‌توده جاتروفا، ریزجلبک، پسماند کشاورزی و فضولات حیوانی به عنوان منبع تولید انرژی استفاده شده است.

مکان‌یابی از تصمیماتی است که در تمامی مدل‌های بررسی شده وجود دارد. با این حال تعداد کمی از مقالات بوده که از رویکردی جهت یافتن مکان‌های بالقوه جهت تولید زیست‌توده مورد نظر و احداث تسهیلات مورد نیاز متناسب با شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی و غیره استفاده کرده باشد. در واقع این مدل‌ها معمولاً چند مکان نامزد از پیش تعیین شده را در نظر می‌گیرند اما به ویژگی‌های جغرافیایی منطقه زنجیره تأمین توجهی ندارد که این ممکن است موجب عدم صلاحیت این مکان‌ها شود. در این مقاله برای حل این مشکل از ابزار مفید سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> (GIS) استفاده می‌شود.

رابطه آب-انرژی که پیش‌تر اهمیت آن در زنجیره‌های تأمین بیوانرژی بیان شد، در هیچ‌یک از مقالات مدل نشده است. البته در مدل برخی مقالات هزینه آب مورد استفاده در تولید انرژی و یا مقدار آن در نظر گرفته شده است اما رابطه آب-انرژی به شکلی که تعریف شد و در واقع نشان‌دهنده رابطه دوطرفه این دو زیرسیستم است، در هیچ‌یک از مقالات منعکس نشده

---

1. Geographic Information System

است. در این پژوهش با تعریف دو تابع هدف تولید انرژی و مصرف آب و همچنین برخی محدودیت‌ها این رابطه آب-انرژی مدل‌سازی شده است.

باتوجه به شکاف‌های تحقیقاتی بیان شده، در این پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه جهت طراحی زنجیره تأمین تولید بیوانرژی از سه نوع مختلف زیست‌توده نسل دوم و سوم ارائه شده که دارای توابع هدف اقتصادی، زیست‌محیطی، مصرف آب و تولید انرژی است. همچنین مفهوم رابطه آب-انرژی در طراحی مدل در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن از نرم‌افزار GIS برای مکان‌یابی نقاط دارای پتانسیل کاشت جاتروفا استفاده شده است. در نهایت مدل ارائه شده برای استان‌های کشور ایران به‌عنوان مطالعه موردی حل شده است.

### ۳. روش تحقیق

در این پژوهش از یک متدولوژی دو مرحله‌ای استفاده شده است (به تصویر پیوست الف مراجعه کنید). در ابتدا با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی مکان‌های مناسب تولید انواع زیست‌توده مشخص شده و سپس نتایج این مرحله به‌عنوان ورودی و پارامتر مرحله دوم که مدل ریاضی شبکه‌ی شبکه تولید بیوانرژی است، استفاده شده است.

#### ۳-۱. مدل GIS

یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش روی طراحی شبکه زنجیره تأمین انتخاب مکان‌های کاندید برای اجزای مختلف زنجیره می‌باشد. اهمیت این موضوع برای زنجیره تأمین زیست‌توده‌ها که به‌شدت درگیر عوامل و فاکتورهای جغرافیایی می‌باشند دوچندان می‌شود. هدف استفاده از GIS در این مطالعه یک غربال‌گری اولیه و کمک به شناسایی استان‌های کاندید مناسب برای کاشت جاتروفا است که بعداً در مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین به کار گرفته خواهند شد است.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده، معیارهای تأثیرگذار برای انتخاب استان‌های مناسب جهت کاشت جاتروفا عبارت‌اند از: بارندگی سالانه، میانگین سالانه متوسط دمای روزانه، نزدیکی به منابع آب، وسعت مناطق خشک و نیمه‌خشک، مساحت باغ‌های کاشته شده، شاخص توسعه

انسانی و جمعیت (Babazadeh et al., 2017a). برای توسعه مدل GIS براساس معیارهای ذکر شده لازم است در ابتدا لایه جغرافیایی هر یک از این معیارها در محیط GIS تهیه شود. سپس برای ترکیب این لایه‌ها می‌توان از روش‌های همپوشانی بولین<sup>۱</sup> یا روش وزن دهی<sup>۲</sup> استفاده کرد که دو دسته عملیات همپوشانی نقشه‌ای هستند که در GIS بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Malczewski, 2004). روش وزن‌دهی به دلیل استفاده از قوانین ترکیبی جبرانی انعطاف‌پذیری بیشتری در تعیین مکان‌ها دارد. در این پژوهش از این روش برای ترکیب لایه‌ها روی یک نقشه پایه و تهیه نقشه نهایی شایستگی مناطق مختلف استفاده شده است (Mohseni et al., 2016).

### ۳-۲. مدل ریاضی طراحی زنجیره تأمین

در این بخش مدل ریاضی و روش حل آن ارائه شده است. نمادهای مدل ریاضی در پیوست ب ارائه شده است.

#### - فرمول‌بندی مدل

○ توابع هدف

$$\text{Max } \text{ENG} = \sum_p \sum_t eq_{pt}^R + \theta \sum_p \sum_t eq_{pt}^A + \theta' \sum_p \sum_t eq_{pt}^J - \text{ENG}^W \quad (1)$$

$$\text{ENG}^W = \sum_r \sum_t ew^J . W_{rt}^J + \sum_p \sum_t ew^R . eq_{pt}^R + \sum_p \sum_c ew^A . \delta_c . Z_{pc}^A \quad (2)$$

$$\text{Min Total cost} = \text{TIC} + \sum_t \frac{1}{(1 + \alpha)^{t-1}} (\text{TPC}_t + \text{THC}_t + \text{TSC}_t + \text{TTC}_t + \text{TFC}_t \quad (3)$$

- 
1. Boolean overlay
  2. Weighted overlay

$$TIC = \sum_p \sum_c (IC_{pc}^R \cdot Z_{pc}^R + IC_{pc}^A \cdot Z_{pc}^A + IC_{pc}^J \cdot Z_{pc}^J) + \sum_i \sum_w \sum_b ICH_{iwb}^R \cdot Y_{iwb}^R \quad (4)$$

$$+ \sum_j \sum_r \sum_p \sum_b ICP_{jrpd} \cdot W_{jrpd} + \sum_r ICJ_r^J \cdot AJ_r + \sum_w \sum_b ICH_{wb}^J \cdot Y_{wb}^J$$

$$TPC_t = \sum_p (PC_{pt}^R \cdot eq_{pt}^R + PC_{pt}^A \cdot eq_{pt}^A + PC_{pt}^J \cdot eq_{pt}^J) + \sum_r \sum_w \sum_t PCJ_{rt}^J \cdot q_{rwt}^J \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$THC_t = \sum_i \sum_w HC_{iwt}^R \cdot qh_{iwt}^R + \sum_w HC_{wt}^J \cdot qh_{wt}^J \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$TSC_t = \sum_i \sum_r \sum_w SC_{irt}^R \cdot q_{irwt}^R + \sum_p (p_{pt}^n \cdot q_{pt}^n + p_{pt}^p \cdot q_{pt}^p) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$TTC_t = \sum_i \sum_r \sum_w TC_{irwt}^R \cdot q_{irwt}^R + \sum_r \sum_w TC_{rwt}^J \cdot q_{rwt}^J + \sum_i \sum_w \sum_p TCH_{iwp}^R \cdot q_{iwp}^R \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$+ \sum_w \sum_p TCH_{wpt}^J \cdot q_{wpt}^J + \sum_j \sum_r \sum_p TC_{jrpt}^A \cdot q_{jrpt}^A$$

$$TFC_t = \kappa_t \cdot TIC \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\min totalwater = \sum_r \sum_t W_{rt}^J + \sum_p \sum_t (W_{pt}^R + W_{pt}^A) \quad (10)$$

$$\min CO2 = \sum_r ce^J \cdot AJ_r + \sum_p \sum_t ce^A \cdot eq_{pt}^A + \sum_p \sum_t ce^R \cdot eq_{pt}^R + \sum_i \sum_r \sum_w \sum_t ce_{rw}^T \cdot q_{irwt}^R +$$

$$\sum_i \sum_w \sum_p \sum_t ce_{wp}^T \cdot q_{iwp}^R + \sum_r \sum_w \sum_t ce_{rw}^T \cdot q_{rwt}^J + \sum_w \sum_p \sum_t ce_{wp}^T \cdot q_{wpt}^J \quad (11)$$

تابع هدف اول (۱) بیشینه سازی مجموع کل خالص انرژی تولید شده در تمامی دوره ها است که به صورت مقدار کل انرژی تولیدی منهای انرژی مصرف شده در رابطه با آب ( $ENG^W$ ) تعریف شده است. اولین عبارت مقدار برق تولیدی، عبارت دوم مقدار انرژی معادل با بیودیزل تولید شده از ریز جلبک و عبارت سوم مقدار انرژی معادل با بیودیزل تولید شده از جاتروفا می باشد. طبق رابطه (۲) کل انرژی مصرف شده در رابطه با آب ( $ENG^W$ ) شامل انرژی مصرف شده جهت آبیاری زمین های جاتروفا، انرژی لازم جهت مخلوط کردن و هم زدن مداوم آب و زیست توده داخل هاضم بی هوازی و انرژی لازم جهت انتقال آب به استخرهای پرورش ریز جلبک و چرخش آب استخرها می باشد.

تابع هدف دوم (۳) کمینه‌سازی ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها در تمامی دوره‌ها می‌باشد.

برای محاسبه ارزش فعلی هزینه از فرمول  $\frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}}$  استفاده شده است (Cambero & Sowlati, 2016) که در آن  $\alpha$  نرخ تنزیل و  $t$  دوره را نشان می‌دهد. در ادامه هر یک از

عبارت‌های هزینه‌ای توضیح داده شده است.

$TIC$  هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری است که مستقل از زمان بوده و شامل هزینه‌ی احداث

سایت‌های تولید، احداث انبارها، احداث خطوط لوله انتقال منابع پرورش جلبک و هزینه

سرمایه‌گذاری کاشت جاتروفا می‌باشد (۴).  $TPC_t$  هزینه تولید محصولات نهایی (برق و

بیودیزل) و هزینه تولید جاتروفا در هر دوره را نشان می‌دهد (۵).  $THC_t$  هزینه نگهداری مواد

اولیه در انبار در دوره  $t$  است و به موادی تعلق می‌گیرد که در انتهای دوره در انبار باقی مانده

باشند (۶).  $TSC_t$  هزینه تأمین مواد اولیه در هر دوره می‌باشد (۷).  $TTC_t$  هزینه انتقال مواد اولیه از

منابع به انبار و از انبار به سایت‌های تولید با کامیون و یا انتقال برخی از مواد اولیه از طریق خط

لوله به سایت‌های تولید است (۸).  $TFC_t$  هزینه ثابت سالیانه است که به‌صورت درصدی از

سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته شده است (۹).

تابع هدف سوم تابع هدف کمینه‌سازی مصرف آب است که به‌صورت عبارت (۱۰)

می‌باشد و نشان‌دهنده کمینه‌سازی آب مصرف‌شده جهت آبیاری زمین‌های کاشت جاتروفا،

تنظیم غلظت محلول زیست‌توده در هاضم بی‌هوازی و پرورش ریزجلبک می‌باشد.

تابع هدف چهارم طبق عبارت (۱۱) کمینه‌سازی انتشار  $CO_2$  را نمایش می‌دهد. قسمت اول

مقدار  $CO_2$  منتشرشده حین کاشت جاتروفا و تبدیل آن به بیودیزل را نشان می‌دهد. قسمت دوم

مقدار  $CO_2$  منتشرشده حین پرورش ریزجلبک و تبدیل آن به بیودیزل و قسمت سوم نیز  $CO_2$

منتشرشده به‌ازای تولید برق از پسماند در نیروگاه بی‌هوازی را نشان می‌دهد. چهار بخش بعدی

تابع هدف نیز نشان‌دهنده  $CO_2$  منتشرشده حین حمل مواد اولیه از منابع به انبارها و سپس از انبارها

به سایت‌های تولید با استفاده از کامیون می‌باشد.

○ محدودیت‌ها

$$\sum_w q_{irwt}^R \leq cap_{irt}^R \quad \forall t \in T, r \in R, i \in I \quad (12)$$

$$\sum_p q_{jrpt}^A \leq cap_{jrt}^A \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J \quad (13)$$

$$AJ_r \leq UAJ_r \quad \forall r \in R \quad (14)$$

$$\sum_r q_{irwt}^R + qh_{iw,t-1}^R \leq \sum_b caph_{iwb}^R \cdot Y_{iwb}^R \quad \forall t \in T, w \in W, i \in I \quad (15)$$

$$\sum_r q_{irwt}^J + qh_{w,t-1}^J \leq \sum_b caph_{iwb}^J \cdot Y_{iwb}^J \quad \forall t \in T, w \in W \quad (16)$$

$$qh_{iw,t}^R = 0 \quad \forall t \in T, w \in W, i \neq 1 \quad (17)$$

$$\sum_r q_{irwt}^R + qh_{iw,t-1}^R \leq \sum_b caph_{iwb}^R \cdot Y_{iwb}^R \quad \forall t \in T, w \in W, i \in I \quad (18)$$

$$\sum_r q_{irwt}^R + qh_{iw,t-1}^R \leq \sum_b caph_{iwb}^R \cdot Y_{iwb}^R \quad \forall t \in T, w \in W \quad (19)$$

$$q_{jrpt}^A \leq \sum_d cappl_{jrpd} \cdot W_{jrpd} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J, p \in P \quad (20)$$

$$\sum_i \sum_w qo_{iwpt}^R \leq \sum_c capp_{pc}^R \cdot Z_{pc}^R \quad \forall t \in T, p \in P \quad (21)$$

$$eq_{pt}^R \leq \sum_c cape_{pc} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (22)$$

$$\sum_w qo_{wpt}^J \leq \sum_c capp_{pc}^J \cdot Z_{pc}^J \quad \forall t \in T, p \in P \quad (23)$$

$$\omega \sum_w qo_{i-1,wpt}^R = \sum_w qo_{iwpt}^R \quad \forall t \in T, p \in P, i = 2 \quad (24)$$

$$\varpi \sum_w qo_{i+1,wpt}^R = \sum_w qo_{iwpt}^R \quad \forall t \in T, p \in P, i = 2 \quad (25)$$

$$ts^{\min} \leq \frac{\sum_i \sum_w ts_i \cdot qo_{iwpt}^R}{W_{pt}^R + \sum_i \sum_w qo_{iwpt}^R} \leq ts^{\max} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (26)$$

$$\gamma \sum_i \sum_w qo_{iwpt}^R = eq_{pt}^R \quad \forall t \in T, p \in P \quad (27)$$

$$\sum_{j=3,4} \sum_r \sum_d W_{jrpd} \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (28)$$

$$W_{pt}^A = \sum_r q_{1rpt}^A \quad \forall t \in T, p \in P \quad (29)$$

$$\sum_c \beta w_c \delta_c \nu_{pt} Z_{pc}^A \leq \sum_{j \neq 4} \sum_r q_{jrpt}^A \quad \forall t \in T, p \in P \quad (30)$$

$$\sum_c \beta n_c \delta_c \nu_{pt} Z_{pc}^A \leq (\varphi n_c \sum_r q_{3rpt}^A) + q_{pt}^n \quad \forall t \in T, p \in P \quad (31)$$

$$\sum_c \beta p_c \delta_c \nu_{pt} Z_{pc}^A \leq (\varphi p_c \sum_r q_{3rpt}^A) + q_{pt}^p \quad \forall t \in T, p \in P \quad (32)$$

$$\sum_c \beta c_c \delta_c \nu_{pt} Z_{pc}^A \leq \sum_r q_{4rpt}^A \quad \forall t \in T, p \in P \quad (33)$$

$$\lambda \sum_c \delta_c \nu_{pt} Z_{pc}^A = eq_{pt}^A \quad \forall t \in T, p \in P \quad (34)$$

$$\sum_w q_{rwt}^J = \mu_{rt} \cdot Aj_r \quad \forall t \in T, p \in P \quad (35)$$

$$a \sum_w qo_{wpt}^J = eq_{pt}^J \quad \forall t \in T, p \in P, r \in R \quad (36)$$

$$W_{rt}^J \geq (rf_{rt} - rf'_{rt}) Aj_r \quad \forall t \in T, p \in P \quad (37)$$

$$\sum_c Z_{pc}^R \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (38)$$

$$\sum_b Y_{iwb}^R \leq 1 \quad \forall w \in W, i \in I \quad (39)$$

$$\sum_c Z_{pc}^A \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (40)$$

$$\sum_b W_{jrb} \leq 1 \quad \forall p \in P, r \in R, j \in J \quad (41)$$

$$\sum_c Z_{pc}^J \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (42)$$

$$\sum_b Y_{wb}^J \leq 1 \quad \forall w \in W \quad (43)$$

محدودیت‌های (۱۲)–(۱۴) مربوط به ظرفیت منابع تأمین مواد اولیه است. محدودیت (۱۲) در رابطه با زیست‌توده پسماند می‌باشد که شامل مقدار فضولات گاو، فضولات مرغ و کاه حاصل از گندم در محل‌های تأمین مواد در هر دوره است. محدودیت (۱۳) مربوط به ظرفیت منابع پرورش زیست‌توده جلبک است که شامل مقدار آب‌شور، آب شیرین، فاضلاب و کربن‌دی‌اکسید حاصل از نیروگاه‌ها در هر دوره است. محدودیت (۱۴) نیز در رابطه با زیست‌توده جاتروفا و نشان‌دهنده مساحت زمین‌های موجود جهت کشت جاتروفا می‌باشد.

محدودیت (۱۵) ظرفیت انبارها برای نگهداری منابع پسماند و محدودیت (۱۶) ظرفیت انبارهای جاتروفا را نشان می‌دهد به این گونه که مجموع جریان ورودی به انبار در هر دوره و موجودی باقی مانده از دوره قبل باید کمتر یا مساوی ظرفیت انبار باشد. محدودیت (۱۷) نیز بیان می‌کند که از بین منابع فضولات گاو، فضولات مرغ و گاه امکان نگهداری بیش از یک دوره تنها برای گاه وجود دارد و دو ماده دیگر به دلیل فساد باید در همان دوره استفاده شوند. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) محدودیت‌های نگهداری موجودی هستند و تساوی جریان خروجی و ورودی انبارها را نشان می‌دهد. به این صورت که در هر دوره مجموع جریان ورودی به انبار و موجودی باقی مانده از دوره قبل باید برابر با مجموع جریان خروجی و موجودی باقی مانده در انتهای دوره باشد. محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۳) مربوط به ظرفیت تسهیلات مختلف است. محدودیت شماره (۲۰) ظرفیت خطوط لوله انتقال مواد اولیه پرورش جلبک را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۱) ظرفیت بارگیری هاضم در نیروگاه بیوگازسوز و (۲۲) ظرفیت نیروگاه جهت تولید برق از بیوگاز را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۳) مربوط به ظرفیت سایت تولید بیودیزل از جاتروفا است. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) نسبت ترکیب مواد اولیه در هاضم بی‌هوازی را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۶) غلظت مناسب مخلوط مواد در هاضم بی‌هوازی را نشان می‌دهد که باید در بازه مشخصی قرار گیرد و همچنین میزان آب موردنیاز ( $W_{pt}^R$ ) جهت دستیابی به غلظت مناسب را نشان می‌دهد (Balaman & Selim, 2014a). محدودیت (۲۷) میزان برق تولیدی در نیروگاه بیوگازسوز را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۸) نشان می‌دهد که در استخرهای پرورش جلبک تنها امکان استفاده از یکی از دو نوع آب شیرین یا شور وجود دارد (Mohseni & Pishvae, 2016). محدودیت (۲۹) بیان‌کننده مقدار آب شیرین مصرف‌شده در پرورش ریزجلبک‌ها است. از آنجایی که مجموع آب مصرف‌شده در مراحل مختلف در تابع هدف مصرف آب کمینه می‌شود در این محدودیت فقط آب شیرین را به‌عنوان آب مصرف‌شده برای پرورش جلبک در نظر گرفتیم. به این ترتیب مدل سعی می‌کند با در نظر گرفتن سایر شرایط و محدودیت‌ها استفاده از آب شور و فاضلاب را برای پرورش ریزجلبک در اولویت قرار دهد. محدودیت (۳۰) مربوط به

تأمین آب موردنیاز جهت پرورش جلبک است که می‌تواند از منابع آب شیرین، آب‌شور و یا فاضلاب تأمین شود. عبارت  $\delta_c \cdot V_{pt} \cdot Z_{pc}^A$  مقدار ریزجلبک تولیدی در سایت تولید p با ظرفیت c در دوره t را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) به ترتیب تأمین نیتروژن و فسفر موردنیاز جهت پرورش جلبک را نشان می‌دهند که می‌توانند از فاضلاب گرفته شوند و یا در صورت نیاز از بازار آزاد تهیه گردند. محدودیت (۳۳) نیز به‌طور مشابه به تأمین کربن‌دی‌اکسید موردنیاز اشاره دارد که از نیروگاه‌های برق تهیه می‌شود. محدودیت (۳۴) مقدار بیودیزل تولیدی از جلبک را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۵) مقدار جاتروفا کشت‌شده در هر دوره و محدودیت (۳۶) مقدار بیودیزل تولیدی از جاتروفا را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۷) بیان‌کننده مقدار آب موردنیاز جهت آبیاری زمین‌های جاتروفا است که به‌صورت اختلاف بین آب موردنیاز زمین و مقدار آب مهیا شده به‌وسیله بارش باران تعریف شده است. محدودیت‌های (۳۸) تا (۴۳) بیان می‌کنند که هر تسهیل حداکثر یک سطح ظرفیت می‌تواند اتخاذ کند.

### - روش حل برنامه‌ریزی آرمانی

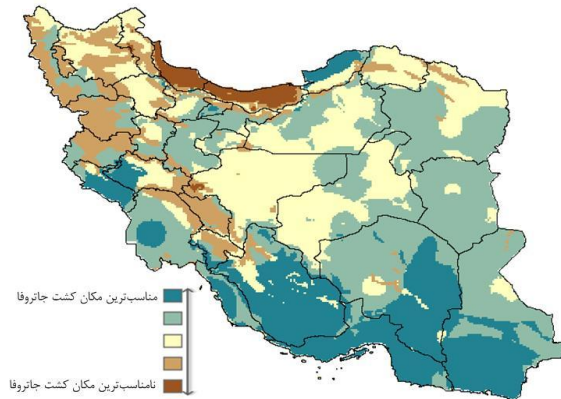
برنامه‌ریزی آرمانی که یکی از دسته‌های پیشین است که برای اولین بار در کاربردی از مسئله برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفی ارائه شد (Charnes et al., 1955). به‌طور کلی در روش‌های پیشین تصمیم‌گیرنده آرا، انتظارات و ترجیحات خود را پیشاپیش تعیین می‌کند. ایده اصلی برنامه‌ریزی آرمانی نیز یافتن جواب‌هایی است که آرمان‌هایی از پیش تعیین‌شده برای یک یا چند هدف را برآورده نماید. در صورتی که هیچ جوابی با این شرایط وجود نداشته باشد باید به یافتن جواب‌هایی پرداخت که انحراف از اهداف را کمینه نماید (Tamiz et al., 1998). در این پژوهش از مدل برنامه‌ریزی آرمانی MINMAX یا چیشف<sup>۱</sup> استفاده شده است (برای آشنایی بیشتر با این مدل به (Tamiz et al., 1998) مراجعه شود).

1. Chebyshev

#### ۴. داده‌های تحقیق (مطالعه موردی)

- مکان‌های کاندید جهت تسهیلات

بعد از تکمیل لایه‌های جغرافیایی معیارهای ذکر شده در محیط GIS، لازم است لایه‌ها روی یک نقشه پایه برای تهیه نقشه نهایی شایستگی مناطق مختلف قرار بگیرند. در این پژوهش از روش وزن‌دهی برای ترکیب نقشه‌ها استفاده شده است. وزن‌های معیارها با توجه به ادبیات و مشورت با خبرگان به دست آمده است.



شکل ۱. نقشه شایستگی استان‌های ایران برای کاشت جاتروفا (ماخذ: یافته‌های پژوهش)

طبق شکل ۱ یازده استان البرز، ایلام، بوشهر، خوزستان، سیستان و بلوچستان، فارس، کرمان، کهگیلویه و بویراحمد، گلستان، لرستان و هرمزگان به عنوان استان‌های کاندید جهت کاشت جاتروفا در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج حاصل از مدل GIS که در بخش قبل شرح داده شد در این مرحله به عنوان ورودی مدل استفاده می‌شود. بنابراین یازده استان به دست آمده به عنوان مکان‌های بالقوه جهت کاشت جاتروفا و به تبع آن همین یازده استان به عنوان مکان‌های کاندید جهت احداث انبارهای جاتروفا و سایت‌های تولید بیودیزل از جاتروفا در نظر گرفته شده‌اند. (محسنی و همکاران، ۲۰۱۶) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و با در نظر گرفتن

فاکتورهای کاربری اراضی زمین، نزدیکی به منابع، راه‌های ارتباطی و شرایط اقلیمی مکان‌های مناسب ایران جهت پرورش ریزجلبک‌ها را ارائه کردند. با توجه به نتایج حاصل ۲۰ استان جهت احداث سایت‌های پرورش جلبک و تولید بیودیزل از آن در نظر گرفته شده است. از آنجایی که در تمامی استان‌های ایران کشت گندم و پرورش گاو و مرغ صورت می‌گیرد، تمامی ۳۱ استان ایران به‌عنوان مکان‌های بالقوه جهت احداث نیروگاه بیوگازسوز و تولید برق از پسماند کشاورزی و دامی در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های مربوط به میزان کشت سالیانه گندم و همچنین تعداد مرغ و گاو پرورش داده شده در استان‌ها از سایت سازمان وزارت جهاد کشاورزی دریافت شده است. در شکل ۲ استان‌های مناسب پرورش ریزجلبک و جاتروفا نمایش داده شده است.



شکل ۲. استان‌های مناسب پرورش ریزجلبک و جاتروفا (ماخذ: یافته‌های پژوهش)

لازم به ذکر است افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده ده دوره (سال) می‌باشد و تمامی هزینه‌های دوره‌ای با در نظر گرفتن متوسط نرخ تورم پنج سال اخیر در ایران یعنی ۱۲ درصد محاسبه و در مدل در نظر گرفته شده‌اند.

○ پارامترهای مربوط به شرایط تولید

برخی پارامترهای فنی در جدول ۲ بیان شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای تولید

پارامترهای مربوط به تهیه انرژی از ریزجلبک (Mohseni & Pishvae, 2016)	پارامترهای مربوط به تهیه انرژی از جاتروفا (Babazadeh et al., 2017b)
۱۵۰ آب موردنیاز به ازای هر واحد ریزجلبک	۷ ton/Ha نرخ بازدهی زمین برای کشت جاتروفا
۰/۰۸ نیتروژن موردنیاز به ازای هر واحد ریزجلبک	۰/۳۵ نرخ تبدیل جاتروفا به روغن جاتروفا
۰/۰۱۱ فسفر موردنیاز به ازای هر واحد ریزجلبک	۰/۹۳ نرخ تبدیل روغن جاتروفا به بیودیزل
۲ CO <sub>2</sub> موردنیاز به ازای هر واحد ریزجلبک	پارامترهای مربوط به تهیه انرژی از پسماند
۰/۰۰۰۰۴۲ نیتروژن موجود در فاضلاب	۳۰۸ m <sup>3</sup> /ton نرخ تبدیل کاه به بیوگاز
۰/۰۰۰۰۶۹ فسفر موجود در فاضلاب	۷۰/۸۳ m <sup>3</sup> /ton نرخ تبدیل فضولات گاو به بیوگاز
۰/۲۵ نرخ تبدیل جلبک به روغن	۲۱۰ m <sup>3</sup> /ton نرخ تبدیل فضولات مرغ به بیوگاز
۰/۹۸ نرخ تبدیل روغن به بیودیزل	۵/۵ kwh/m <sup>3</sup> نرخ تبدیل بیوگاز به انرژی
	۴۱% راندمان الکتریکی واحدهای CHP
	۰/۱۰-۰/۱۲ بازه مناسب غلظت مواد در هاضم

مأخذ: نتایج تحقیق

برای نیروگاه‌های تولید بیودیزل از جاتروفا سه سطح ظرفیت، برای سایت تولید بیودیزل از ریزجلبک چهار سطح ظرفیت و برای هاضم بی‌هوایی و نیروگاه‌های بیوگازسوز (CHP) نیز چهار سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است.

○ داده‌های مربوط به رابطه آب-انرژی

حداقل بارندگی موردنیاز جهت باردهی جاتروفا ۶۰۰ میلی‌متر در سال است (Brittaine & Litaladio, 2010). مقدار بارندگی سالانه هر استان نیز از سایت سازمان هواشناسی دریافت شده است. در جدول ۳ انرژی مصرف شده برای فعالیت‌های مربوط به آب ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر انرژی مصرف شده در زیرسیستم آب

مقدار انرژی صرف شده (GJ)	فعالیت مربوط به زیرسیستم آب
۰/۰۰۲۶۴ (Pacetti et al., 2015)	آبیاری زمین‌های جاتروفا (به ازای هر مترمکعب آب)
۶۲۷ (Murphy & Allen, 2011)	انتقال آب به استخرهای پرورش ریزجلبک و چرخش آب استخرها (به ازای هر هکتار استخر)
۰/۳۶ (Pacetti et al., 2015)	مخلوط کردن مداوم آب و زیست توده داخل هاضم بی‌هوایی (به ازای هر گیگا ژول برق تولیدی)

مأخذ: نتایج تحقیق

○ داده‌های مربوط به انتشار CO<sub>2</sub>

جدول ۴: داده‌های مربوط به انتشار CO<sub>2</sub> در بخش‌های مختلف زنجیره تأمین

انتشار CO <sub>2</sub> در بخش‌های مختلف زنجیره	CO <sub>2</sub> (تن)
انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر هکتار زمین جاتروفا	-۰/۴۰۷ (Deng et al., 2012)
انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر تن بیودیزل تولیدشده از ریزجلیک‌ها	-۳/۹۹۸ (Zhao et al., 2010)
انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر مگاوات ساعت برق تولیدی در نیروگاه بیوگازسوز	۰/۰۶۷ (Gerin et al., 2008)
انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای حمل هر تن زیست‌توده در هر کیلومتر با کامیون	۰/۰۰۰۱۴ (Gerin et al., 2008)

۵. نتایج مطالعه موردی

مدل ارائه‌شده با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی و به‌وسیله نرم‌افزار سیپلکس حل شد. آرمان‌ها و وزن‌های انحرافات در نظر گرفته‌شده مربوط به توابع هدف و نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۵ خلاصه شده است.

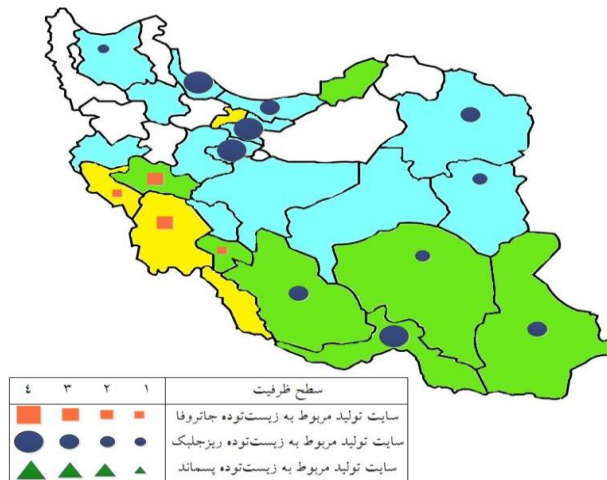
جدول ۵. نتایج حاصل از حل مدل (مأخذ: یافته‌های پژوهش)

هدف	وزن انحراف	مقدار آرمان	مقدار به‌دست‌آمده	مقدار انحراف	درصد انحراف
هزینه (میلیون تومان)	۰/۳۵	۳e+۷	۳/۳۷e+۷	۳/۶۸e+۶	۱۲/۲۷
انرژی (Gj)	۰/۲۵	۳e+۸	۲/۶۸e+۸	۳/۲۴e+۷	۱۰/۸۱
انتشار CO <sub>2</sub> (تن)	۰/۱۵	-۱e+۷	-۸/۱۰e+۶	۱/۹۰e+۶	۱۹/۰۴۷
مصرف آب (تن)	۰/۲۵	۲e+۹	۲/۶۸e+۹	۶/۸۱e+۸	۳۴/۰۴

مأخذ: نتایج تحقیق

با توجه به اهمیت مسائل اقتصادی و بحث سرمایه‌گذاری در طراحی شبکه تأمین، در نظر گرفته شده است که تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها بیشترین اهمیت را دارد. هم‌چنین فرض شده مقدار تولید انرژی و مصرف آب با وزن یکسان در اولویت دوم قرار گرفته و تابع هدف زیست‌محیطی کم‌ترین وزن را به خود اختصاص دهد. البته لازم به ذکر است که ملاحظات زیست‌محیطی و بحث انتشار کربن مسئله بسیار بااهمیتی است اما نتایج حاصل از حل مدل ارائه‌شده حاکی بر این است که مقدار انتشار CO<sub>2</sub> منفی است و در واقع میزان جذب CO<sub>2</sub> از انتشار آن در زنجیره بیشتر است. به همین دلیل این تابع هدف در وزن‌دهی به انحراف از آرمان

در اولویت آخر قرار داده شده است. طبق نتایج هزینه تولید هر گیگا ژول انرژی ۰/۱۳۸ میلیون تومان است و به ازای تولید هر گیگا ژول انرژی ۰/۰۳۰ تن  $CO_2$  جذب و ۰/۱ تن آب مصرف می‌شود. در شکل ۳ مشخص شده است که در هر مکان چه نوع سایت تولیدی و با چه ظرفیتی باید احداث شود. طبق نتایج در یازده استان سایت تولید انرژی از ریزجلبک و در چهار استان سایت تولید انرژی از جاتروفا احداث می‌شود. هم‌چنین در هیچ استانی نیروگاه بیوگازسوز (مربوط به زیست‌توده پسماند) احداث نشده است. عدم احداث این نوع سایت دو دلیل می‌تواند داشته باشد. محصول نهایی حاصل از زیست‌توده پسماند، الکتریسیته و محصول نهایی دو زیست‌توده دیگر بیودیزل است و انرژی معادل هر تن بیودیزل تقریباً ۱۰ برابر هر مگاوات-ساعت برق است، با توجه به مقدار تولید انرژی (بدون توجه به نوع محصول) زیست‌توده‌های ریزجلبک و جاتروفا صرفه اقتصادی بیشتری دارند. از طرفی طبق دیتاهای مربوط به جدول ۸ در تولید انرژی از ریزجلبک و جاتروفا جذب  $CO_2$  و در تولید انرژی از پسماند کشاورزی و فضولات حیوانی انتشار  $CO_2$  داریم. بنابراین فارغ از بحث اقتصادی از لحاظ زیست‌محیطی نیز تولید انرژی از جاتروفا و ریزجلبک نسبت به پسماند در اولویت است.

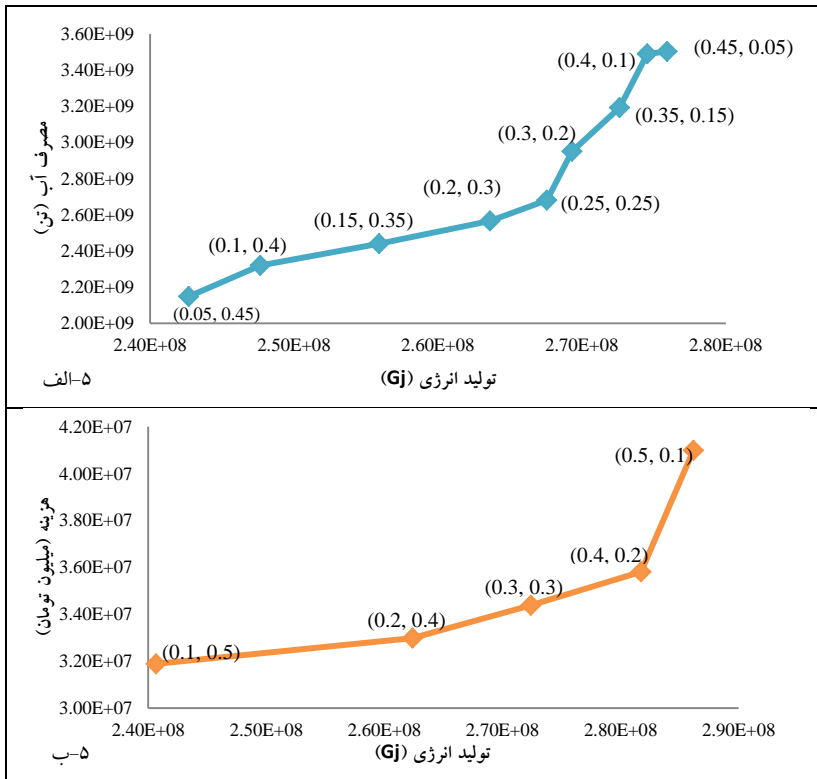


شکل ۳. نوع و ظرفیت سایت‌های تولید احداث‌شده در استان‌های مختلف (ماخذ: یافته‌های پژوهش)

### - آنالیز حساسیت

برای بررسی رابطه دو تابع هدف تولید انرژی و مصرف آب ضرایب مربوط به انحراف از آرمان دو تابع هدف دیگر (هزینه و انتشار کربن) را ثابت در نظر گرفتیم. مجموع ضرایب مربوط به این دو تابع هدف ۰/۵ است. سپس ضرایب مربوط به توابع تولید انرژی و مصرف آب را بین ۰/۰۵ تا ۰/۴۵ با فواصل ۰/۰۵ تغییر داده و مقادیر این دو تابع هدف را محاسبه کردیم. طبق شکل ۴-الف با افزایش وزن تابع هدف تولید انرژی و کاهش وزن تابع مصرف آب، هردوی آن‌ها افزایش می‌یابد. در واقع نمودار تقابل بین این دو تابع هدف را نشان می‌دهد چراکه با افزایش مقدار تولید انرژی مصرف آب نیز بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است زوج مرتب‌های متناظر با هر نقطه وزن‌های مربوط به توابع را نشان می‌دهد که مقدار اول وزن مربوط به تابع انرژی و مقدار دوم وزن مربوط به تابع مصرف آب است.

به‌طور مشابه به بررسی رابطه بین دو تابع هدف تولید انرژی و هزینه پرداخته‌ایم. مجدداً وزن‌های مربوط به دو هدف دیگر ثابت مانده و وزن توابع تولید انرژی و هزینه بین ۰/۱ تا ۰/۵ با فواصل ۰/۱ تغییر می‌کند (از آنجایی که مجموع وزن دو تابع دیگر ۰/۴ است مجموع وزن این دو تابع باید ۰/۶ باشد). طبق شکل ۴-ب با افزایش وزن تابع هدف تولید انرژی و کاهش وزن تابع هزینه هردوی آن‌ها افزایش می‌یابد. در واقع نمودار تقابل بین این دو تابع هدف را نشان می‌دهد چراکه با افزایش مقدار تولید انرژی، مقدار هزینه نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۱. الف) تقابل توابع تولید انرژی و مصرف آب

ب) تقابل توابع تولید انرژی و هزینه ( تغییر وزن انحراف از آرمان توابع). (ماخذ: یافته‌های پژوهش)

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش ارائه یک مدل چندهدفی جهت طراحی شبکه تأمین تولید بیوانرژی از انواع مختلفی از زیست توده نسل دوم و سوم است. استفاده از چند نوع زیست توده موجب می‌شود انعطاف‌پذیری مدل در تعیین منبعی مناسب جهت تولید انرژی، متناسب با شرایط جغرافیایی و امکانات موجود افزایش یابد. با توجه به اهمیت رابط آب-انرژی و وابستگی این دو منبع به هم، این مفهوم در مدل‌سازی مسئله مورد توجه قرار گرفته است. هم‌چنین به منظور افزایش کارایی مکان‌یابی انجام شده توسط مدل و کاهش فضای جواب، با استفاده از GIS یک غربالگری اولیه

صورت گرفته و مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه به‌عنوان مکان‌های کاندید احداث تسهیلات مختلف به مدل داده شده است.

مدل ریاضی چندهدفه (اقتصادی، تولید انرژی، مصرف آب و انتشار  $CO_2$ ) ارائه شده توسط روش حل برنامه‌ریزی آرمانی MINMAX حل شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج در یازده استان سایت تولید بیودیزل از ریزجلبک و در چهار استان سایت تولید بیودیزل از جاتروفا احداث می‌شود. با انجام تحلیل حساسیت، عملکرد صحیح مدل و رابطه بین توابع هدف مشخص شد.

برخی پیشنهادها برای تحقیقات آینده در این زمینه عبارت‌اند از: ۱. در نظر گرفتن بحث عدم قطعیت در پارامترهایی همچون هزینه‌های خرید زیست‌توده، نرخ تبدیل زیست‌توده به انرژی و غیره ۲. بازگرداندن برخی از محصولات جانبی تولیدشده به منابع اولیه‌ی تهیه‌ی زیست‌توده و انرژی و در واقع پرداختن به مفهوم بحث لجستیک معکوس و یا زنجیره تأمین حلقه بسته ۳. در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی در کنار توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی و ارائه مدل زنجیره تأمین پایدار ۴. در نظر گرفتن نکسوس آب-غذا و انرژی و یا پرداختن بیشتر به مفهوم آب-انرژی با استفاده از رویکردهایی همچون پویایی‌شناسی سیستم‌ها. ۵. در نظر گرفتن مباحث واردات تجهیزات و مواد اولیه و صادرات محصولات و یا به‌عبارتی مفاهیم مربوط به لجستیک بین‌الملل.

## منابع

امین صالحی، ف.؛ نوروز، ع. و کامبیز رضاپور (۱۳۹۷). اولویت بندی فناوری‌های تبدیل پسماند شهری به سوخت زیستی در ایران. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. دوره ۴، شماره ۱۳، صص ۱۵۹-۱۲۳.

تیموری حمزه کلایی، ف.؛ امجدی، ن. و مصطفی جزایری (۱۳۹۷). "تحلیل مالی استفاده از یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت بیوگازسوز در یک دامداری نمونه در ایران"، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. دوره ۴، شماره ۱۲، صص ۱۴۷-۱۸۰.

محسنی، ش. و م. پیشوایی (۱۳۹۷). "طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از پسماندهای فاضلاب شهری در کشور با استفاده از یک روش فرا ابتکاری ترکیبی"، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۴، شماره ۱۲، صص ۱۴۵-۱۱۳.

Ahn, Y.-C., Lee, I.-B., Lee, K.-H., & Han, J.-H. (2015). "Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain network: Multi-period deterministic model". *Applied Energy*, No. 154, pp. 528-542.

Babazadeh, R. (2017). "Optimal design and planning of biodiesel supply chain considering non-edible feedstock". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 75, pp. 1089-1100.

Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M. S., & Rabbani, M. (2017a). "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk". *Omega*, No. 66, pp. 258-277.

Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., & Pishvae, M. S. (2017b). "An Integrated data Envelopment Analysis-mathematical Programming Approach to Strategic Biodiesel Supply Chain Network Design Problem". *Journal of Cleaner Production*, No. 147, pp. 694-707.

Balaman, S.Y. (2016). "Investment Planning and Strategic Management of Sustainable Systems for Clean Power Generation: An E-constraint based Multi Objective Modelling Approach". *Journal of Cleaner Production*, No. 137, pp. 1179-1190.

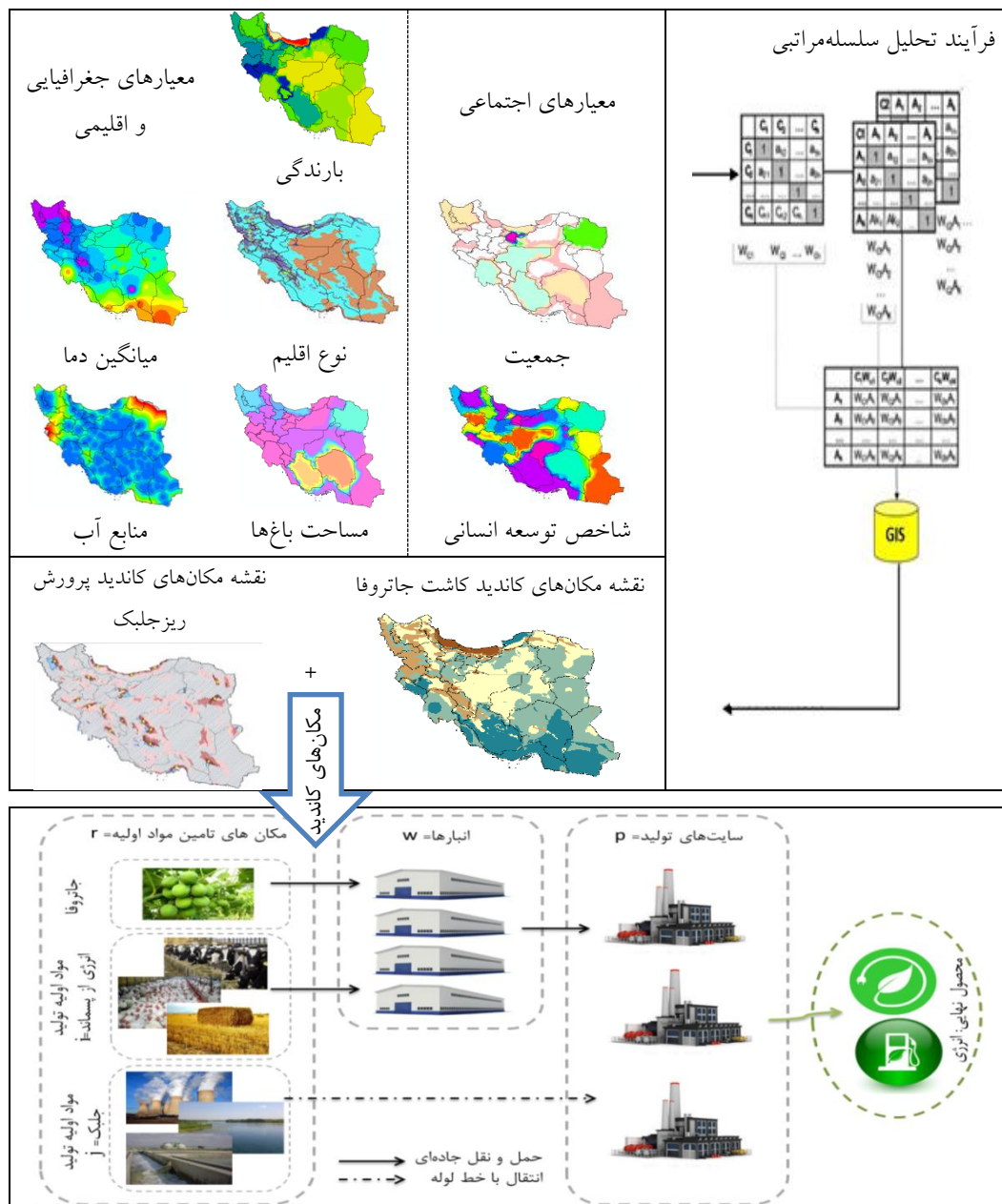
Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2014a). "A Fuzzy Multiobjective linear Programming Model for Design and Management of Anaerobic Digestion based Bioenergy Supply Chains". *Energy*, No.74, pp. 928-940.

Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2014b). "A Network Design Model for Biomass to Energy Supply Chains with Anaerobic Digestion Systems". *Applied Energy*, No.130, pp. 289-304.

- Balaman, Ş. Y., & Selim, H.** (2016). "Sustainable Design of Renewable Energy Supply Chains Integrated with District Heating Systems: A fuzzy Optimization Approach". *Journal of Cleaner Production*, No. 133, pp. 863-885.
- Banerjee, S., Mudliar, S., Sen, R., Giri, B., Satpute, D., Chakrabarti, T., & Pandey, R.** (2010). Commercializing lignocellulosic Bioethanol: Technology Bottlenecks and Possible Remedies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(1), 77-93.
- Brittaine, R. and N. Lutaladio** (2010). "Jatropha: a Smallholder Bionergy Crop". *Integrated crop management*, No. 8.
- Cambero, C. & Sowlati, T.** (2016). "Incorporating Social Benefits in Multi-objective Optimization of Forest-based Bioenergy and Biofuel Supply Chains". *Applied Energy*, No. 178, pp. 721-735.
- Charnes A., Cooper W.W. and R.O. Ferguson** (1955). "Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming". *Management science*, 1(2), pp.138-151.
- Deng X., Han J. and F. Yin** (2012). "Net Energy, CO2 Emission and Land-based Cost-benefit Analyses of Jatropha Biodiesel: a case study of the Panzhuhua Region of Sichuan Province in China". *Energies*, No. 5(7), pp. 2150-2164.
- Ekşioğlu S.D., Acharya A., Leightley L.E. and S. Arora** (2009). "Analyzing the Design and Management of Biomass-to-biorefinery Supply Chain". *Computers & Industrial Engineering*, No. 57(4), pp. 1342-1352.
- Gerin P.A. Vliegen F. and J.M. Jossart** (2008). "Energy and CO2 Balance of Maize and Grass as Energy Crops for Anaerobic Digestion". *Bioresource technology*, 99(7), pp. 2620-2627.
- Jongschaap R., Corré W., Bindran P. and W. Brandenburg** (2007). Claims and Facts on Jatropha Curcas L.: Global Jatropha Curcas Evaluation. Breeding and Propagation Programme.
- Liu J., Mao, G., Hoekstra A.Y., Wang H., Wang J., Zheng, C. and J. Yan** (2017). Managing the Energy-water-food Nexus for Sustainable Development: Elsevier.
- Lv J., Li Y., Shan B. Jin, S. and C. Suo** (2018). "Planning Energy-water Nexus System under multiple Uncertainties—A case study of Hebei province". *Applied Energy*, No. 229, pp. 389-403.
- Maes W.H., Achten W.M., Reubens B., Raes D., Samson R. and B. Muys** (2009). Plant-water Relationships and Growth Strategies of Jatropha Curcas L. Seedlings under Different Levels of Drought stress". *Journal of Arid Environments*, 73(10), pp. 877-884.
- Mafakheri F. and F. Nasiri** (2014). Modeling of Biomass-to-energy Supply Chain Operations: Applications, Challenges and Research Directions". *Energy Policy*, No. 67, pp.116-126.
- Malczewski J.** (2004). "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview". *Progress in planning*, 62(1), pp. 3-65.
- Mata T.M., Martins A.A. and N.S. Caetano** (2010). "Microalgae for Biodiesel Production and other Applications: A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.217-232.
- Mohseni S. and M.S. Pishvae** (2016). "A Robust Programming Approach towards Design and Optimization of Microalgae-based Biofuel Supply Chain". *Computers & Industrial Engineering*, No. 100, pp. 58-71.

- Mohseni S., Pishvae M.S. and H. Sahebi** (2016). "Robust Design and Planning of Microalgae biomass-to-biodiesel Supply Chain: A case Study in Iran". *Energy*, No. 111, pp.736-755.
- Murphy C.F. and D.T. Allen** (2011). "Energy-water Nexus for Mass Cultivation of Algae". *Environmental science & technology*, 45(13), pp. 5861-5868.
- Nicolò M., Guglielmino S., Solinas V. and A. Salis** (2017). "Biodiesel from Microalgae". *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Production of Fuels and Chemicals*, pp. 55-74.
- Pacetti T., Lombardi L. and G. Federici** (2015). "Water–energy Nexus: a case of Biogas Production from Energy Crops Evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods". *Journal of Cleaner Production*, No. 101, pp. 278-291.
- Sharma B., Ingalls R., Jones C. and A. Khanchi** (2013). "Biomass Supply Chain Design and Analysis: basis, overview, modeling, challenges, and future". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 24, pp. 608-627.
- Tamiz M., Jones D. and C. Romero** (1998). "Goal Programming for Decision Making: An Overview of the Current state-of-the-art". *European Journal of Operational Research*, 111(3), pp.569-581.
- Zhang X. and V.V. Vesselinov** (2016). "Energy-water Nexus: Balancing the Tradeoffs between two-level Decision Makers". *Applied Energy*, No. 183, pp. 77-87.
- Zhao T., Liu Z., Zhao C. and C. Mao** (2010). "Energy Consumption and Carbon Calculations of Microalgae Biodiesel". *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 4(5), pp. 865-870.

پیوست. الف



## پیوست ب. نمادهای مدل ریاضی

	اندیس‌ها
مکان‌های تأمین مواد	$r \in R$
مواد اولیه مربوط به تولید انرژی از پسماند کشاورزی و فضولات دامی	$i \in I$
مواد اولیه مربوط به تولید انرژی از جلبک	$j \in J$
انبارها	$w \in W$
سایت‌های تولید	$p \in P$
ظرفیت انبارها	$b \in B$
ظرفیت سایت‌های تولید	$c \in C$
ظرفیت لوله‌های انتقال	$d \in D$
دوره‌های زمانی	$t \in T$
<b>پارامترهای اقتصادی</b>	
هزینه احداث سایت تولید (مربوط به زیست توده پسماند) با ظرفیت $c$ در ناحیه $p$	$IC_{pc}^R$
هزینه احداث انبار ماده اولیه $i$ با ظرفیت $b$ در ناحیه $w$	$ICH_{iwb}^R$
هزینه تولید هر واحد برق در سایت تولید $p$ در دوره $t$	$PC_{pt}^R$
هزینه نگهداری هر واحد ماده اولیه $i$ در انبار $w$ در دوره $t$	$HC_{iwt}^R$
هزینه خرید هر واحد ماده اولیه $i$ از منبع تأمین $I$ در دوره $t$	$SC_{irt}^R$
هزینه حمل هر واحد ماده اولیه $i$ از منبع $I$ به انبار $w$ در دوره $t$	$TC_{irwt}^R$
هزینه حمل هر واحد ماده اولیه $i$ از انبار $w$ به سایت تولید $p$ در دوره $t$	$TCH_{iwp}^R$
هزینه احداث سایت تولید (مربوط به زیست توده جلبک) با ظرفیت $c$ در ناحیه $p$	$IC_{pc}^A$
هزینه احداث خط لوله انتقال با ظرفیت $d$ برای انتقال ماده $j$ از منبع $J$ به سایت تولید $p$	$ICP_{jrp}^A$
هزینه تولید هر واحد بیودیزل از جلبک در سایت تولید $p$ در دوره $t$	$PC_{pt}^A$
هزینه هر واحد نیتروژن تهیه شده از بازار برای سایت تولید $p$ در دوره $t$	$P_{pt}^n$
هزینه هر واحد فسفر تهیه شده از بازار برای سایت تولید $p$ در دوره $t$	$P_{pt}^p$
هزینه حمل هر واحد ماده اولیه $j$ از منبع $J$ به سایت تولید $p$ در دوره $t$	$TC_{jrp}^A$

هزینه ثابت اولیه کاشت جاتروفا در مکان $\Gamma$ به ازای هر واحد زمین	$ICJ_r$
هزینه احداث انبار جاتروفا با ظرفیت $b$ در ناحیه $w$	$ICH_{wb}^J$
هزینه احداث سایت تولید (مربوط به زیست‌توده جاتروفا) $p$ با ظرفیت $c$	$IC_{pc}^J$
هزینه تولید هر واحد بیودیزل از جاتروفا در سایت تولید $p$ در دوره $t$	$PC_{pt}^J$
هزینه تولید هر واحد جاتروفا در محل $\Gamma$ در دوره $t$	$PCJ_{rt}$
هزینه انبارداری هر واحد جاتروفا در انبار $w$ در دوره $t$	$HC_{wt}^j$
هزینه حمل هر واحد جاتروفا از منبع $\Gamma$ به انبار $w$ در دوره $t$	$TC_{rwt}^J$
هزینه حمل هر واحد جاتروفا از انبار $w$ به سایت تولید $p$ در دوره $t$	$TCH_{wpt}^J$
ضریبی از سرمایه ثابت اولیه برای محاسبه هزینه ثابت سالیانه	$K_t$
نرخ تنزیل <sup>۱</sup>	$\alpha$

**پارامترهای فنی**

ضریب تبدیل بیودیزل تولیدی از جلبک به انرژی	$\theta$
ضریب تبدیل بیودیزل تولیدی از جاتروفا به انرژی	$\theta'$
ظرفیت منبع تأمین $\Gamma$ برای ماده اولیه $i$ در دوره $t$	$cap_{irt}^R$
ظرفیت منبع تأمین $\Gamma$ برای ماده اولیه $j$ در دوره $t$	$cap_{jrt}^A$
مساحت زمین‌های موجود برای کشت جاتروفا در ناحیه $\Gamma$	$UAj_r$
ظرفیت انبار ماده اولیه $i$ در ناحیه $w$ با سطح ظرفیت $b$	$caph_{iwb}^R$
ظرفیت انبار جاتروفا در ناحیه $w$ با سطح ظرفیت $b$	$caph_{wb}^J$
ظرفیت خط لوله انتقال ماده $j$ با سطح ظرفیت $d$ از منبع تأمین $\Gamma$ به سایت تولید $p$	$cappl_{jrpd}$
ظرفیت هاضم در نیروگاه بیوگازسوز $p$ با سطح ظرفیت $c$	$capp_{pc}^R$
ظرفیت نیروگاه $p$ با سطح ظرفیت $c$ برای تولید برق	$cape_{pc}$
ظرفیت سایت تولید $p$ با سطح ظرفیت $c$ برای منبع زیست‌توده جاتروفا	$capp_{pc}^J$

1. Depreciation rate

مساحت حوضچه‌های سایت تولید با ظرفیت c	$\delta_c$
کمینه غلظت محلول زیست توده در هاضم	$ts^{\min}$
بیشینه غلظت محلول زیست توده در هاضم	$ts^{\max}$
محتوای جامدات کل ماده اولیه i	$ts_i$
نسبت مقدار کاه به فضولات گاو در هاضم بی‌هوایی	$\omega$
نسبت مقدار فضولات مرغ به فضولات گاو در هاضم بی‌هوایی	$\bar{\omega}$
نرخ تبدیل زیست توده پسماند به برق	$\gamma$
آب موردنیاز به ازای هر واحد جلبک	$\beta_w$
مقدار جلبک تولیدی به ازای هر واحد سطح در سایت تولید p در دوره t	$v_{pt}$
نیترژن موردنیاز به ازای هر واحد جلبک	$\beta_n$
درصد نیترژن موجود در فاضلاب	$\varphi_n$
فسفر موردنیاز به ازای هر واحد جلبک	$\beta_p$
درصد فسفر موجود در فاضلاب	$\varphi_p$
کربن دی‌اکسید موردنیاز به ازای هر واحد جلبک	$\beta_c$
نرخ تبدیل جلبک به بیودیزل	$\lambda$
نرخ بازدهی زمین در ناحیه r برای کشت جاتروفا در دوره t	$\mu_{rt}$
نرخ تبدیل جاتروفا به بیودیزل	a

#### پارامترهای مربوط به رابطه آب- انرژی

حداقل بارندگی موردنیاز جهت کشت جاتروفا در مکان r در دوره t	$rf_{rt}$
مقدار بارندگی در مکان r در دوره t	$rf'_{rt}$
انرژی لازم برای آبیاری زمین‌های جاتروفا به ازای هر واحد آب	$ew^J$
انرژی لازم جهت انتقال آب به استخرها و چرخش آب به‌ازای واحد مساحت استخرها	$ew^A$
انرژی لازم جهت هم زدن مداوم آب و زیست توده داخل هاضم به ازای هر واحد الکتریسیته تولیدی	$ew^R$

**پارامترهای مربوط به انتشار کربن**

مقدار انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر واحد بیودیزل تولیدشده از ریزجلبک‌ها	$ce^A$
مقدار انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر واحد زمین جاتروفا	$ce^J$
مقدار انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای هر واحد برق تولیدی در نیروگاه بیوگازسوز	$ce^R$
مقدار انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای حمل هر واحد زیست‌توده از منبع Γ به انبار W با کامیون	$ce_{rw}^T$
مقدار انتشار CO <sub>2</sub> به‌ازای حمل هر واحد زیست‌توده از انبار W به سایت تولید p با کامیون	$ce_{wp}^T$
<b>متغیرهای پیوسته</b>	
مقدار برق تولیدشده سایت تولید p در دوره t	$eq_{pt}^R$
ماده i نگه‌داری شده در انبار W در دوره t	$qh_{iwt}^R$
مقدار ماده اولیه i منتقل شده از منبع Γ به انبار W در دوره t	$q_{irwt}^R$
مقدار ماده اولیه i منتقل شده از انبار W به سایت تولید p در دوره t	$qo_{iwpt}^R$
مقدار بیودیزل تولیدشده از ریزجلبک در سایت تولید p در دوره t	$eq_{pt}^A$
مقدار نیتروژن تهیه‌شده از بازار برای سایت تولید p در دوره t	$q_{pt}^n$
مقدار فسفر تهیه‌شده از بازار برای سایت تولید p در دوره t	$q_{pt}^p$
مقدار ماده اولیه j منتقل شده از منبع Γ به سایت تولید p در دوره t	$q_{jrpt}^A$
مقدار بیودیزل تولید شده از جاتروفا در سایت تولید p در دوره t	$eq_{pt}^J$
مساحت زمین اختصاص داده شده برای کشت جاتروفا در ناحیه Γ	$AJ_{\Gamma}$
مقدار جاتروفای نگه‌داری شده در انبار W در دوره t	$qh_{wt}^J$
مقدار جاتروفای منتقل شده از منبع Γ به انبار W در دوره t	$q_{rwt}^J$
مقدار جاتروفای منتقل شده از انبار W به سایت تولید p در دوره t	$qo_{wpt}^J$
آب موردنیاز جهت آبیاری زمین جاتروفا در مکان Γ در دوره t	$W_{rt}^J$
آب شیرین موردنیاز برای پرورش جلبک در سایت تولید p در دوره t	$W_{pt}^A$
مقدار آب موردنیاز برای تنظیم غلظت محلول زیست‌توده در سایت تولید p در دوره t	$W_{pt}^R$
مجموع انرژی مصرفی برای امور مرتبط به آب	$ENG^W$
خالص انرژی تولیدشده	$ENG$

## متغیرهای صفر و یک

در صورت احداث سایت تولید (مربوط به زیست توده پسماند) با ظرفیت c در ناحیه p = ۱	$Z_{pc}^R$
در صورت احداث انبار نگهداری ماده اولیه i با ظرفیت b در ناحیه w = ۱	$Y_{iwb}^R$
در صورت احداث سایت تولید (مربوط به زیست توده جلبک) با ظرفیت c در ناحیه p = ۱	$Z_{pc}^A$
در صورت احداث خط لوله انتقال ماده j با ظرفیت d بین منبع تامین r و سایت تولید p = ۱	$W_{jrp}^d$
در صورت احداث انبار نگهداری جاتروفا با ظرفیت b در ناحیه w = ۱	$Y_{wb}^J$
در صورت احداث سایت تولید (مربوط به زیست توده جاتروفا) با ظرفیت c در ناحیه p = ۱	$Z_{pc}^J$