

Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: <https://ses.ut.ac.ir>

Research Paper

Water-Energy-Environment Nexus Assessment: Phycoremediation, Biofuel Production, and Carbon Capture Using Microalgae

Sepideh Abedi*, Arezoo Ahmadiania, Sajad Eidipour

Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanic and Energy, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 22 October, 2022

Revised 21 November, 2022

Accepted 20 December, 2022

Keywords:

Water-Energy-Environment Nexus

Biofuel

Microalgae

ENERGYPLAN

LEAP

ABSTRACT

This study analyzes the water-energy-environment nexus by simultaneously evaluating the potential of microalgae for phycoremediation, biofuel production, and carbon capture. The LEAP software was employed to investigate the treatment and biodiesel production capacity. The impact of replacing biofuel in the urban public transportation system, considering different mixing ratios of biodiesel including B5, B10, B20, and B50, was also studied using EnergyPLAN software. The results showed that the produced biodiesel with these ratios could provide 4.25%, 8.58%, 17.43%, and 45.78% of the total annual energy requirement, respectively. These replacement rates correspond to a reduction of 2.9%, 5.9%, 12.7%, and 31.7% in CO₂ emissions. Furthermore, assuming a 5% annual growth rate in the input of the wastewater treatment plant, after 12 years, the proposed model can reduce the annual carbon emission costs by \$414 million while meeting 46% of the annual energy demand using B50 and decrease annual CO₂ emissions by 32%.

Introduction

The growing demand for energy consumption and the scarcity of water resources have highlighted the interconnectedness and impact of water, energy, and the environment, posing significant challenges in today's societies. As a result, the integration of renewable systems has become a priority in development plans. In efforts to reduce carbon emissions, alternative fuels derived from biological resources, known as biofuels, have gained attention as viable substitutes for fossil fuels. Among these alternatives, microorganisms such as microalgae have emerged as a promising source for biodiesel production. Microalgae possess a high reproduction rate and can thrive in harsh conditions, including saltwater environments. Consequently, they offer a suitable and sustainable option for biodiesel production. Biofuel derived from microalgae is advantageous as it is sulfur-free, non-toxic, and biodegradable. Moreover, due to their ability to grow in challenging conditions, microalgae can be cultivated using urban wastewater as a culture medium, thereby utilizing sewage and conserving clean water resources. The aim of this study was to conduct a comprehensive assessment of the water, energy and environment nexus by simultaneously evaluating the potential of microalgae for

phycoremediation, biofuel production, and carbon capture. The analysis is conducted using ENERGYPLAN and LEAP software. In addition to evaluating water recovery and energy source replacement, the study assessed how these scenarios contribute to the reduction of pollutants in the environment.

Methods

The aim of this study was to examine the interconnections between water, energy, and the environment in utilizing microalgae as a third-generation biomass for biodiesel production from urban wastewater. To analyze this, the ENERGYPLAN software was employed. Additionally, the LEAP software was employed to assess the impact of wastewater biological treatment capacity using chlorella sp. on water resource recovery in Tehran, Isfahan, Kerman, and Khorasan Razavi provinces. Furthermore, the study investigated the effects of fuel substitution in the urban public transportation system on CO₂ emissions, considering various blending ratios of diesel and biodiesel (B5, B10, B20, and B50).

Results

The findings of the study revealed that the biodiesel produced at blending ratios of B5, B10, B20, and B50 can contribute to 4.25%, 8.58%, 17.43%, and

* Corresponding Author's Email: s_abedi@sbu.ac.ir

45.78% of the total annual energy requirement, respectively. This substitution rate corresponds to a reduction of 2.9%, 5.9%, 12.7%, and 31.7% in CO₂ emissions, respectively. Moreover, considering a 5% annual increase in the inflow of sewage treatment plants, the proposed model can meet 46% of the annual energy demand using B50 after 12 years. This would result in a 32% reduction in annual carbon dioxide emissions, leading to a cost reduction of \$414 million in carbon emissions. Additionally, the cultivation of algae and the recovery of up to 517 million cubic meters of water

for agricultural purposes would significantly contribute to the food chain.

Conclusion

Nexus analysis of water, energy, and the environment for the production of biofuel, coupled with the biological treatment of wastewater using microalgae, indicated that this model not only contributes to the preservation of water resources through recycling but also enhances the food chain. Additionally, this model aids in carbon fixation and reduces emissions, further promoting environmental sustainability.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست در تصفیه پساب، تولید سوخت زیستی و تثبیت کربن با استفاده از میکرو جلبک‌ها

سپیده عابدی^{*}، آرزو احمدی نیا، سجاد عیدی‌پور

گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۷/۳۰ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۸/۳۰ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۲۹	همبست آب، انرژی، غذا و محیط زیست و ضرورت حفظ این منابع برای ادامه حیات به ایجاد امنیت پایدار در سیستم‌های انرژی می‌انجامد. در این مطالعه به تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست در تولید سوخت‌های زیستی نسل سوم با استفاده از کشت ریزجلبک‌ها در پساب‌های شهری با هدف تصفیه زیستی، تولید سوخت و تثبیت کربن پرداخته شده است. در این زمینه، ضمن بررسی تأثیر ظرفیت تصفیه زیستی پساب با استفاده از گونه جلبکی بر بازیابی منابع آبی در محیط نرم‌افزار LEAP، اثر جایگزینی سوخت تولیدی در سیستم حمل‌ونقل عمومی شهری بر میزان انتشار آلاینده‌ها با لحاظ نسبت‌های اختلاط مختلف گازوئیل با بیودیزل (شامل B5، B10، B20، B50) با استفاده از نرم‌افزار ENERGYPLAN مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد بیودیزل تولیدی در نسبت‌های یادشده به ترتیب ۴/۲۵، ۸/۵۸، ۱۷/۴۳ و ۴۵/۷۸ درصد از کل انرژی مورد نیاز سالانه را تأمین خواهد کرد. این میزان جایگزینی به ترتیب معادل کاهش ۲/۹، ۵/۹، ۱۲/۷ و ۳۱/۷ درصد در میزان انتشار CO ₂ است. همچنین با لحاظ نرخ رشد سالانه ۵ درصد افزایش در ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب، پس از ۱۲ سال می‌توان ضمن تأمین تقاضای ۴۶ درصد انرژی مورد نیاز سالانه از محل B50 و کاهش انتشار سالانه ۳۲ درصد دی‌اکسید کربن، مدل پیشنهادی می‌تواند به کاهش ۴۱۴ میلیون دلاری در هزینه انتشار کربن منجر شود.

مقدمه	اثرگذاری متقابلی وجود دارد، تحلیل و بررسی درهم‌تنیدگی بین این موارد در شرایط موجود و سناریوهای قابل وقوع آن، امری ضروری است. میزان انتشار دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۱۸ در جهان حدود ۳۳/۱ گیگاتن محاسبه شده که این مقدار ۷۰ درصد بیشتر از میانگین افزایش آن از سال ۲۰۱۰ تا کنون است [۲]. با توجه به اهمیت کاهش انتشار کربن و بررسی‌های انجام‌شده روی اثر برخی حامل‌های جایگزین، سوخت‌های مشتق‌شده از منابع زیستی که با نام سوخت‌های زیستی شناخته می‌شوند، جایگزین مناسبی برای سوخت فسیلی
با توجه به رشد روزافزون جمعیت، نیاز به استفاده از منابع آب و انرژی در جهان افزایش چشم‌گیری داشته است [۱]. در این میان، کاهش ذخایر منابع سوخت فسیلی و افزایش تقاضای مصرف انرژی از یک‌سو و افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی منابع آبی از سوی دیگر، به عنوان مهم‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که بین آب، انرژی و محیط زیست	

^{*} نویسنده مسئول

Email: s_abedi@sbu.ac.ir

هستند. دیزل زیستی که با نام بیودیزل شناخته می‌شود، از نظر محیط زیستی آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌کند [۳]. بیودیزل از منابع زیستی پایه روغنی تولید و به عنوان سوخت جایگزین گازوئیل در موتورهای تراکم داخلی استفاده می‌شود. در نسل اول منابع تولید بیودیزل از روغن گیاهانی همچون دانه سویا، آفتابگردان، روغن پالم و ذرت استفاده می‌شد [۴]. این نسل از منابع سوخت زیستی برای تولید بیودیزل به دلیل زیر کشت بردن زمین‌های کشاورزی و مصرف آب، تهدید امنیت غذایی، فرسایش خاک زراعی در بسیاری از کشورها انتخاب مناسبی برای تولید سوخت زیستی نبود و جوامع را برای استفاده از نسل دوم منابع بیودیزل شامل روغن‌های دورریز پخت‌وپز و چربی حیوانات سوق داد [۵]. یکی از عوامل مؤثر بر کیفیت سوخت تولیدشده اسیدهای چرب آزاد هستند که محتوای آن در این نسل از منابع بالا است و باعث تشدید پدیده صابونی شدن محصول تولیدی و افزایش مصرف آب و انرژی جهت انجام فرایند آب‌شویی و خالص‌سازی می‌شود [۶]. سومین نسل از منابع تولید بیودیزل میکروارگانیسم‌هایی نظیر انواع میکرو جلبک‌ها هستند [۷]. میکرو جلبک‌ها نرخ تکثیر بالایی دارند و می‌توانند در شرایط سخت مانند آب شور نیز تکثیر شوند. از این رو میکرو جلبک‌ها می‌توانند منبع جایگزین مناسبی برای تولید بیودیزل باشند [۸]. سوخت زیستی تولیدشده از جلبک بدون سولفور، غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر است. یکی از ویژگی‌های مهم جلبک‌ها قابلیت ذخیره مقدار قابل توجه چربی است که می‌توان در فرایند استری

شدن از آن استفاده کرد. برخی از گونه‌های جلبک با توجه به شرایط، ۵۰-۶۰ درصد وزن خشک زیست‌توده چربی تولید می‌کنند که در میکرو جلبک‌ها این مقدار می‌تواند به بیش از ۸۰ درصد وزن زیست‌توده خشک برسد [۹ و ۱۰]. اولین گام برای تولید بیودیزل از میکرو جلبک‌ها، انتخاب گونه مناسب برای این کار است. گونه انتخابی باید مشخصه‌های سازگار با محیط کشت و محصول مورد نیاز را داشته باشد [۱۱].

برتری نسل سوم زیست‌توده‌ها نسبت به نسل اول بیودیزل که از روغن‌های گیاهی و حیوانی مشتق می‌شوند [۱۲ و ۱۳]، به دلیل عدم نیاز به زمین کشاورزی، تهدید زنجیره غذایی و تخلیه خاک از مواد مغذی است. همچنین این منابع نسبت به نسل دوم بیودیزل شامل روغن‌های دورریز [۱۴-۱۶]، به دلیل کاهش تولید اسیدهای چرب آزاد، صرف هزینه و انرژی برای انجام فرایند آب‌شویی است [۱۷]. جلبک‌ها دارای محتوای انرژی بالایی بوده [۱۸ و ۱۹] که این مقدار با وزن زیست‌توده خشک آن افزایش می‌یابد [۲۰-۲۲]. فرایند تولید بیودیزل میکرو جلبکی مشابه تولید بیودیزل نسل اول است. زیست‌توده پس از تولید، برداشت و سپس استخراج لیپید از طریق ترانس استریفیکاسیون به متیل استر اسید چرب^۱ تبدیل می‌شود. فاضلاب شهری حاوی مقادیر زیادی نیتروژن و فسفر است [۲۳]. از سوی دیگر این مواد برای رشد میکروارگانیسم‌ها ضروری هستند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده روی گونه‌های مختلف جلبکی با هدف تصفیه زیستی انواع پساب ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه ظرفیت تولید زیست‌توده و راندمان حذف زیستی مواد از پساب توسط گونه‌های مختلف

گونه جلبک	نوع پساب	نرخ تولید زیست‌توده	بازدهی	حذف مواد	منبع
<i>Chlorella vulgaris</i> <i>Bacillus licheniformis</i>	شهری	1.53 g. L^{-1}	-	۸۲/۲۵٪ COD	[۳۱]
<i>Chlorella. sp</i>	صنعتی	$0.92 \text{ g. L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$	$0.12 \text{ g}_{\text{fuel}} / \text{g}_{\text{biomass}}$	۹۰/۸٪ COD	[۳۰]
<i>Euglena gracilis</i>	لبنیات	11% lipid content	-	۸۰٪ COD	[۳۳]
<i>Botryococcus braunii</i>	صنعتی	$21.1 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	2839 lit/ha.year	۸۷٪ COD	[۳۴]
<i>Chlorella sp. and Scenedesmus</i>	کشاورزی	100 mg. L^{-1}	-	-	[۳۵]
<i>Chlorella vulgaris</i>	شهری	$25 \times 10^6 \text{ cell. Ml}^{-1}$	-	<۵۰٪ COD	[۲۸]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	صنعتی	1.1 g/L	-	۲۵/۹٪ COD ۲۲/۶٪ BOD	[۳۶]
<i>Chlorella sp.</i>	صنعتی	1.02 g/L	38 mg. L^{-1}	-	[۳۷]

چندین فناوری برای کشت جلبک از جمله استخرهای باز، مخازن دایره‌ای و سیستم‌های لوله‌ای توسعه یافته‌اند [۲۴]. از نظر تولید زیست‌توده، سیستم‌های استخر باز در مقایسه با فتوبایوراکتورهای بسته کارایی کمتری دارند [۲۵]. پس از کشت، میکروجلبک‌ها با استفاده از ته‌نشینی، سانتریفیوژ، لخته‌سازی یا فیلتراسیون غشایی برداشت می‌شوند. روش‌های مختلفی برای استخراج روغن از جلبک مورد استفاده قرار گرفته است که مرسوم‌ترین آن‌ها، پرس روغن، استخراج مایع-مایع (استخراج با حلال)، استخراج مایع فوق بحرانی و تکنیک فراصوت است [۲۶]. در روش پرس روغن با وجود راحتی در استفاده و عدم استفاده از حلال، پروسه به‌کندی انجام می‌شود و نیاز به مقدار زیادی از مواد برای انجام فرایند است [۲۷]. در روش استخراج با استفاده از حلال، ماده حلال ارزان بوده، اما در عین حال به‌شدت قابل اشتعال و یا سمی است و بازیابی حلال استفاده‌شده گران‌قیمت است [۲۸]. روش استخراج سیال فوق بحرانی مزایایی همچون سمی نبودن، سهولت انجام کار و قابل اشتعال نبودن دارد؛ در حالی که احتمال وقوع برهم‌کنش ناکافی بین دی‌اکسید کربن فوق بحرانی و نمونه‌ها وجود دارد. در روش فراصوت زمان استخراج نسبت به دیگر روش‌ها کمتر است؛ در عین حال نیاز به مصرف انرژی بالایی دارد و برای استفاده در ابعاد بزرگ مناسب نیست [۲۹]. در فرایند ترانس‌استریفیکاسیون بیودیزل در خلال استری شدن روغن جلبک با متانول در حضور یک کاتالیست تولید می‌شود. محصولات این واکنش فاقد سولفور و شامل گلیسرین و متیل استر اسید چرب است [۳۰].

با توجه به امکان رشد جلبک در شرایط سخت، می‌توان از پساب فاضلاب به عنوان محیط کشت جلبک با هدف تصفیه پساب و کاهش استفاده از منابع آبی سالم استفاده کرد. به طور کلی پساب را می‌توان به زیرمجموعه‌های شهری، کشاورزی-صنعتی، فاضلاب هضم بی‌هوازی، فاضلاب حاوی فلز نساجی و دارویی تقسیم‌بندی کرد. فاضلاب شهری حاوی مقادیر زیادی از نیتروژن و فسفر است. تصفیه فاضلاب شهری شامل رسوب مواد جامد، حذف مواد محلول و معلق و تصفیه مواد غیرآلی و غیرمحلول مانند نیتروژن و فسفر است. میکروجلبک‌ها این خاصیت را دارند تا در فاز سوم تصفیه، عمل حذف فسفر و نیتروژن را انجام دهند. از آنجا که با پیشرفت زندگی

شهری و افزایش جمعیت شهرها مقدار تولید فاضلاب‌های شهری افزایش داشته است، کشت جلبک در این نوع پساب در کنار تولید محتوی چربی مورد نیاز به فرایند تصفیه نیز کمک می‌کند.

گونه‌های متنوعی از جلبک‌ها به‌خصوص گونه‌های *Chlorella* و *Scenedesmus* *Desmodesmus* این قابلیت را دارند که در پساب به‌خوبی رشد کنند. هو و همکاران به بررسی انواع این گونه‌ها پرداختند. در این مطالعه گزارش شد که گونه *Chlorella* به‌خوبی در پساب رشد می‌کند. همچنین، برخی از انواع این دو گونه می‌توانند تا بالای ۸۰ درصد آمونیاک، نیترات و فسفر موجود در آب را حذف کنند [۳۱]. ژانگ و همکاران توانایی میکروجلبک *Scenedesmus* را در تصفیه پساب شهری مورد بررسی قرار دادند [۳۲]. اربیب و همکاران در بررسی خود روی دو گونه *Chlorella* *stigmatophora* و *S. obliquus* نتیجه گرفتند در صورتی که نسبت نیتروژن به فسفر مقداری بین ۹ تا ۱۳ باشد، بهترین شرایط رشد برای جلبک ایجاد خواهد شد [۳۳]. مارتین و همکاران حذف نیتروژن و فسفر از پساب شهری را با استفاده از دو میکروجلبک *Scenedesmus* و *Chlorella* بررسی کردند [۳۴]. مطالعه دیگر نشان داد بیش از ۹۰ درصد محتوای نیتروژن و ۸۰ درصد فسفر بر اثر کشت گونه *Chlorella vulgaris* حذف شد [۳۵]. همچنین، قابلیت تولید سوخت از این گونه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد محتوای روغن تولیدشده در این میکروجلبک بیشتر از ماکروجلبک‌ها است [۳۶]. لی و همکاران نشان قابلیت پاکسازی آمونیوم، نیتروژن، فسفر و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی^۱ به‌ترتیب به میزان ۹۳/۹، ۸۹/۱، ۸۰/۹ و ۹۰/۸ درصد با استفاده از کلرلا را نشان دادند [۳۷]. ونگ و همکاران نیز از کشت همین گونه در پساب شهری به عنوان بستر تولید جلبک استفاده کردند و موفق به کاهش فسفر و نیتروژن به‌ترتیب برابر ۹۰ و ۸۳ درصد شدند [۱۹].

از سوی دیگر، این زیست‌توده قابلیت تثبیت کربن و همچنین، برداشت جهت تولید سوخت زیستی را دارد و به این ترتیب نقش قابل توجهی در پیوند میان آب، انرژی و محیط زیست ایفا خواهد کرد. ویکاکسونو و کانگ به بررسی

1. Chemical Oxygen Demand (COD)

همبست غذا، انرژی و آب با استفاده از ابزار شبیه‌ساز محاسباتی پرداختند [۳۷]. ونگ و همکاران در تحقیق خود با استفاده از پنج سناریو به بررسی تغییرات اقلیمی و اجتماعی-اقتصادی ناشی از کشت، تولید انرژی و مصرف منابع آب در چین پرداختند [۳۸]. رولی و همکاران در تحقیق خود به ارزیابی تأثیر تولید بیودیزل زیستی نسل اول و دوم پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد تولید سوخت زیستی از زیست‌توده نسل اول، ۲ تا ۳ درصد از منابع آب و زمین مورد استفاده برای کشاورزی و در نتیجه، تغذیه ۳۰ درصد از جمعیت را تحت شعاع قرار می‌دهد [۳۹]. ملیکوگلو و سینل به تحلیل پیوند آب و انرژی در استفاده از دورریز روغن آفتابگردان در کشور ترکیه و بررسی تولید بیودیزل از این منبع پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد تولید سوخت از ضایعات روغن آفتابگردان در ترکیه تا سال ۲۰۳۰ می‌تواند از آلودگی ۷/۴ میلیارد متر مربع آب شیرین این کشور جلوگیری کند [۴۰].

تا کنون نرم‌افزارهای مختلفی از جمله نرم‌افزار EnergyPLAN، LEAP، NEXSYM، WEFSIM در حوزه بررسی پیوند آب و انرژی توسعه یافته‌اند. نرم‌افزار شبیه‌سازی مهندسی WEVFSIM درهم‌تنیدگی منابع مختلف را بررسی می‌کند و از قابلیت‌های این نرم‌افزار، تحلیل شرایط آینده منابع و امنیت آن‌ها است. این مدل قابلیت تشخیص فاکتورهای اصلی تأثیرگذار به شرایط را دارد [۳۷]. یکی دیگر از مدل‌های شبیه‌سازی برای تحلیل همبست آب، انرژی و غذا، NEXSYM است. این نرم‌افزار با در نظر گرفتن سه حوزه اصلی فنی، محیط زیستی و مصرف به بررسی پیوند می‌پردازد [۳۸]. نرم‌افزار LEAP نیز این قابلیت را دارد که طی سناریوهای مختلف میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و تأثیر آن بر شرایط مختلف منطقه را بررسی کند. نیوس و همکاران در پژوهش خود با استفاده از نرم‌افزار LEAP سناریوهای مختلف مربوط به رشد اقتصادی را بررسی کردند. آن‌ها به آینده‌نگری نیاز انرژی و تأثیر در تغییر تکنولوژی و همچنین تغییر انتشارات گازهای گلخانه‌ای در کشور کلمبیا پرداختند [۴۱]. نایار و همکاران در بررسی خود با استفاده از نرم‌افزار LEAP شرایط کشور پاکستان را تا سال ۲۰۵۰ با تعریف سناریوهای مختلف مربوط به سوخت‌های جایگزین بررسی کردند [۴۲]. نامکا و همکاران با استفاده از این نرم‌افزار به بررسی تأثیر

سیاست‌های کاهش انتشارات بر شرایط اقلیمی پرداختند [۴۳]. هو و همکاران با استفاده از این نرم‌افزار و با در نظر گرفتن برنامه انرژی پایدار و تحلیل اقتصادی، یک برنامه‌ریزی پایدار انرژی با هدف کاهش مصرف انرژی توسعه دادند [۴۴]. نرم‌افزار EnergyPLAN، برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های انرژی در زمان حال و پیش‌بینی شرایط آن‌ها به کار برده می‌شود [۴۵]. این نرم‌افزار به کاربر اجازه می‌دهد تا از منابع مختلف انرژی (تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر) در شبیه‌سازی استفاده کند [۴۶]. مدل استفاده‌شده در این نرم‌افزار انعطاف‌پذیری بالایی دارد، چرا که بخش‌های منطق ای، صنعتی، حمل‌ونقل و مصارف مربوط به سرمایش و گرمایش را پوشش می‌دهد [۴۷].

در این مقاله به تحلیل پیوند بین آب، انرژی، غذا و محیط زیست در تولید سوخت زیستی با استفاده از کشت میکرو جلبک در پساب‌های شهری با استفاده از نرم‌افزار EnergyPLAN و LEAP پرداخته شده است. به این ترتیب ضمن ارزیابی میزان بازیابی آب و جایگزینی منابع انرژی، اثر سناریوهای پیشنهادی بر تثبیت زیستی کربن و کاهش انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار

معرفی منطقه مطالعه شده

با توجه به اینکه چهار مصرف‌کننده بزرگ گازوئیل در ایران، استان‌های تهران، اصفهان، کرمان و خراسان رضوی هستند، در این مطالعه این چهار استان به عنوان مناطق مورد مطالعه مد نظر قرار گرفتند. در شکل ۱ اطلاعات جمعیتی و تولید فاضلاب در این چهار استان نشان داده شده است. طبق ترازنامه انرژی ایران، به طور متوسط تا ۵۸ درصد از مصرف گازوئیل ایران در سیستم حمل‌ونقل استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن میانگین انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن از سوختن گازوئیل ۲/۷ کیلوگرم در لیتر، میانگین میزان انتشار دی‌اکسید کربن از سوختن گازوئیل معادل ۲۸/۸۷ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال است [۴۷].

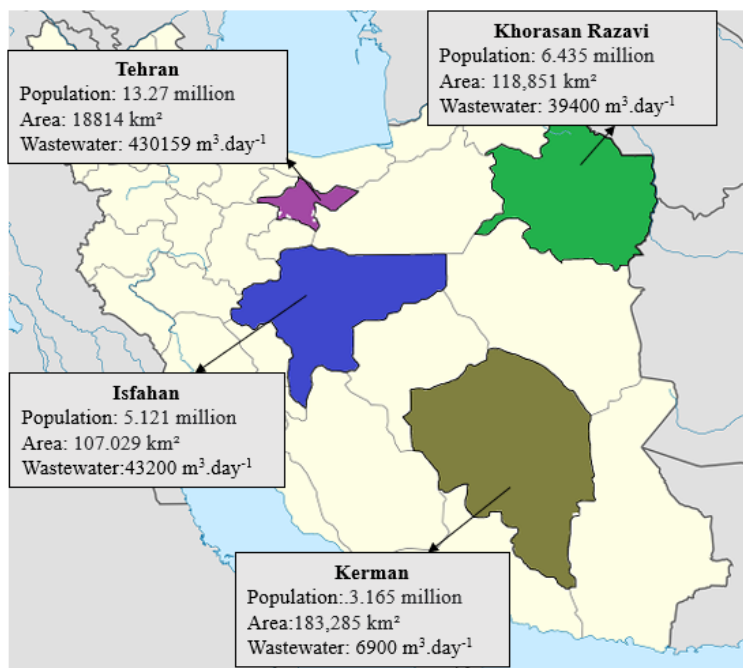
زیست توده مصرفی برای تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست

از آنجا که تولید بیودیزل جلبکی کیفیت سوخت متفاوتی دارد، با توجه به تنوع در ترکیب اسیدهای چرب، انتخاب

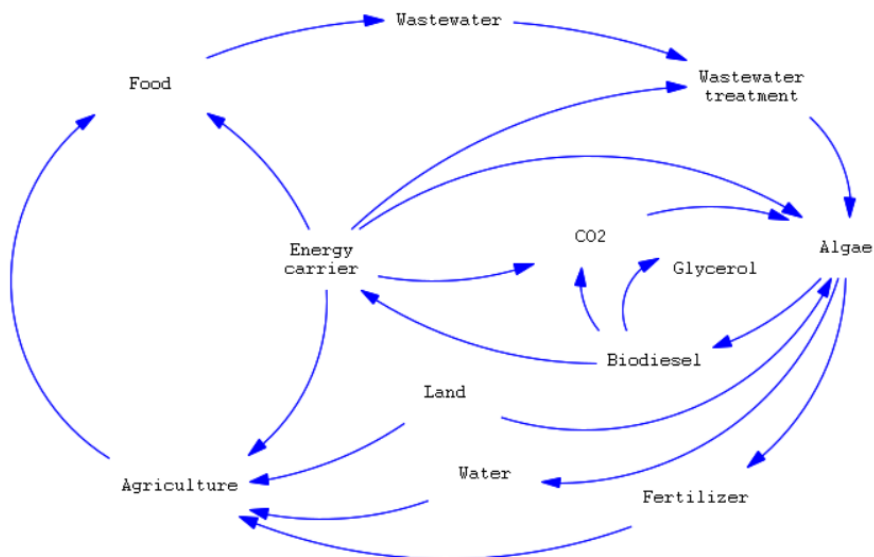
عابدی و همکاران: تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست در تصفیه پساب، تولید سوخت زیستی و تثبیت کربن ...

Chlorella.sp برای تحلیل همبست آب و انرژی انتخاب شد. شکل ۲ زنجیره ارتباطی پیوند بین آب، انرژی، غذا و محیط زیست در تولید سوخت زیستی با استفاده از پساب شهری را نمایش می‌دهد.

بهترین گونه جلبک برای کشت مهم است. *Chlorella.sp* می‌تواند آمونیاک، نیتروژن، فسفر و COD را حذف کند و بهره‌وری خالص زیست‌توده آن معادل $galgae \cdot (L \cdot day)^{-1}$ است [۳۰]. بنابراین، در این مطالعه گونه



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه و مشخصات جمعیت و حجم فاضلاب تولیدی^۱



شکل ۲. پیوند بین آب، انرژی، غذا و محیط زیست در تولید سوخت زیستی با استفاده از پساب شهری^۲

۱. یافته تحقیق

۲. یافته تحقیق

دارد، کلیدی‌ترین نکته برای دستیابی به این سطح از تولید سوخت، وجود ماده خام، فاضلاب، به عنوان جایگزین است. نتایج به دست آمده از ارزیابی سناریوهای تولید بیودیزل در نسبت‌های اختلاط مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، با توجه به اینکه حدود ۴۱ درصد از پساب ورودی پس از کشت جلبک باقی می‌ماند، مقدار قابل توجهی آب مناسب برای کشاورزی از این سیکل خارج می‌شود که با توجه به میانگین مصرف ۱۵۰ لیتر آب هر نفر در روز آب تولیدی در سناریو اول معادل مصرف حدود ۳۱۸ میلیون نفر است که در صورت استفاده برای آبیاری و کشت، از تصفیه و دسترس مستقیم مردم خارج خواهد شد. به این ترتیب در سناریوی سوم، چهارم و پنجم این مقدار ۱/۰۲۲، ۳/۱۲۵ و ۹/۸۳۴ برابر می‌شود. با توجه به بحران آب و کم شدن میانگین بارش در کشور، توجه به این مهم بسیار ضروری است. نکته قابل تأمل در این نتایج میزان پساب ورودی برای کشت جلبک است که مقدار ورودی فاضلاب در کل کشور می‌تواند این نیاز را در سناریوی ۲، ۳، ۴ و بخشی از سناریوی ۵ تأمین کند. بنابراین برای رسیدن به این میزان از تولید با استفاده از نرم‌افزار LEAP و فرض افزایش سالانه ۵ درصدی در دسترسی به شبکه فاضلاب بررسی انجام شد. نرخ دسترسی به پساب با در نظر گرفتن رشد جمعیت در شکل ۳ نشان داده شده است. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد با نرخ رشد سالانه ۵ درصدی افزایش ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب در سطح کشور، پس از ۱۲ سال می‌توان به سناریوی ۵ تحقق بخشید. با انجام این کار می‌توان کنترل بیشتری بر بحران‌های آبی باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی داشت.

ارزیابی میزان بازیابی آب در محیط نرم‌افزار LEAP

به منظور بررسی تأثیر ظرفیت تصفیه زیستی پساب با استفاده از گونه جلبکی بر بازیابی منابع آبی از نرم‌افزار LEAP استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار با در نظر گرفتن نرخ رشد ۵ درصدی ظرفیت فاضلاب تصفیه شده، با در نظر گرفتن رشد جمعیت، وضعیت آینده منابع آبی موجود در مناطق مورد مطالعه بررسی شده است.

ارزیابی میزان جذب و انتشار دی‌اکسید کربن در محیط

نرم‌افزار EnergyPLAN

تشبیت و کاهش CO₂ به ترتیب با کشت جلبک و جایگزینی بیودیزل با گازوئیل صورت می‌گیرد. ریزجلبک‌ها با استفاده از CO₂ به عنوان منبع کربن اولیه اکسیژن تولید می‌کنند، در حالی که برخی می‌توانند به صورت اختیاری با استفاده از یک منبع آلی کربن علاوه بر CO₂، یا حتی به صورت هتروتروف، تنها با استفاده از کربن تشبیت شده به عنوان منبع کربن رشد کنند [۸]. ارزیابی عملکرد نشان داد بازده جذب و جداسازی CO₂ توسط ریزجلبک‌ها بین ۴۰ و ۹۳/۷ درصد است [۴۸]. از آنجا که با استفاده از نرم‌افزار ENERGY PLAN می‌توان ویژگی‌های عملکرد سیستم انرژی از جمله تأمین برق، سرمایه‌گذاری، صنعت و بخش حمل‌ونقل را بررسی کرد، در مطالعه حاضر تجزیه و تحلیل CO₂ با استفاده از نرم‌افزار ENERGYPLAN انجام شد.

یافته‌ها

تصفیه زیستی پساب شهری با استفاده از ریزجلبک

با توجه به اینکه تولید بیودیزل از پساب‌ها تأثیر بسزایی بر انتشار دی‌اکسید کربن و در نتیجه، گرم شدن کره زمین

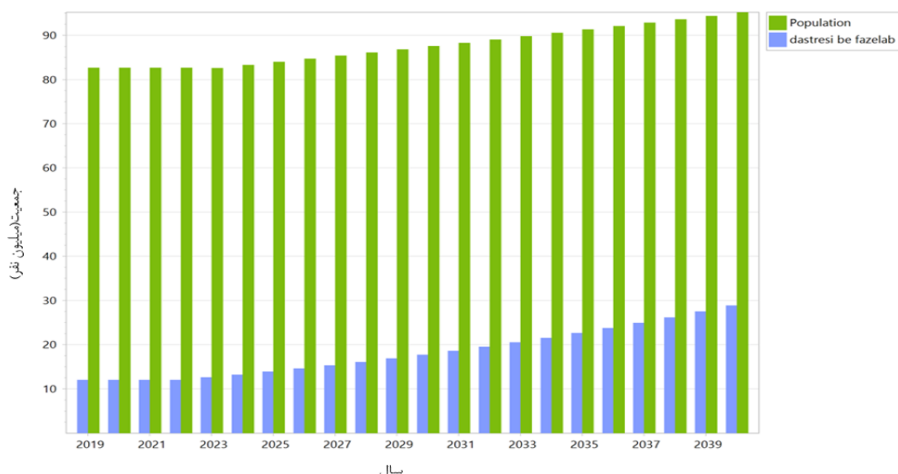
جدول ۲. بیودیزل تولیدی در سناریوهای نسبت اختلاط و تأثیر آن بر بازیابی آب

ترکیب سوخت	مصرف سالیانه بیودیزل (m ^۳ . year ^{-۱})	تولید زیست توده (m ^۳)	پساب سالانه (m ^۳)	زمین (ha)	آب بازیابی شده (m ^۳ . year ^{-۱})
B۵	۵۳۸۸۸۱/۲۹	۳۹۴۸۶/۱۵	۴۳۷۷۹۹/۵۸	۱۱	۴۷۷۵۶۸۰۰
B۱۰	۱۰۸۶۲۷۷/۶۵	۷۹۵۹۶/۲۴	۸۸۲۵۱۷/۰۰	۲۲/۱۷	۹۶۵۷۹۶۰۰
B۲۰	۲۲۰۷۴۳۵/۷۸	۱۶۱۷۴۸/۳۳	۱۷۹۳۳۷۱/۷۰	۴۵/۲۶	۱۹۶۹۹۶۸۰۰
B۵۰	۵۷۹۷۸۴۳/۳۷	۴۲۴۸۳۲/۹۶	۳۸۲۳۸۲/۰۲	۱۱۸/۸۶	۵۱۷۴۳۶۴۰۰

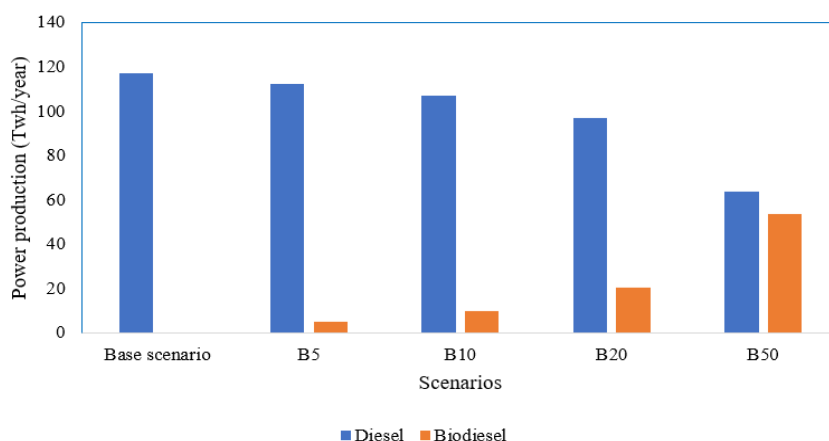
کشت زمین برای محصولات غیر خوراکی زنجیره غذایی افراد منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تولید سوخت زیستی از زیست توده جلبکی در پساب
هدف از بررسی‌های انجام شده در این مقاله، ارزیابی توانایی پوشش انرژی مورد نیاز در بخش مصرف گازوئیل در حمل و نقل است. با توجه به محتوای انرژی متفاوت در سوخت بیودیزل در هر سناریو، حجم بیودیزل مورد نیاز با حجم دیزل متفاوت است. شکل ۴ مقدار انرژی تولید شده در هر یک از نسبت‌های ترکیبی تعریف شده در سناریوها را نشان می‌دهد. با وجود مقدار کمتر انرژی، بیودیزل در سناریوهای ۲ تا ۵ به ترتیب ۴/۲۵، ۸/۵۸، ۱۷/۴۳ و ۴۵/۷۸ درصد از کل انرژی مورد نیاز سالانه را تأمین می‌کند.

برای تهیه هر کیلوگرم غذا بین ۵ تا ۲۰ هزار لیتر آب استفاده می‌شود. با توجه به میزان آب تولید شده برای مصرف کشاورزی در خلال تولید بیودیزل در هم تنیدگی این دو بخش بسیار واضح است. از طرفی با توجه به مقدار میانگین نیاز آب برای غذا، در سناریوهای تعریف شده به ترتیب سالانه می‌توان ۱۵/۹، ۳۲/۱۹، ۶۵/۶۶ و ۱۷۲/۴۷ هزار تن تولید غذا داشت که معادل تغذیه به ترتیب ۲۴/۵، ۱۰۱، ۴۹/۵ و ۲۶۵/۵ هزار نفر در سال است. افزایش این مقدار مواد غذایی به خصوص محصولات مستقیم کشاورزی بر کیفیت تغذیه افراد تأثیر مثبت خواهد داشت. یکی از دلایل اصلی‌ای که استفاده از نسل اول تولید بیودیزل پنهان نمی‌شود، امنیت غذا و زمین کشت است، چراکه



شکل ۳. بررسی نرخ دسترسی به پساب با در نظر گرفتن رشد جمعیت^۱



شکل ۴. میزان انرژی تولیدی ناشی از بیودیزل در هر یک از سناریوهای ترکیبی^۲

۱. یافته تحقیق

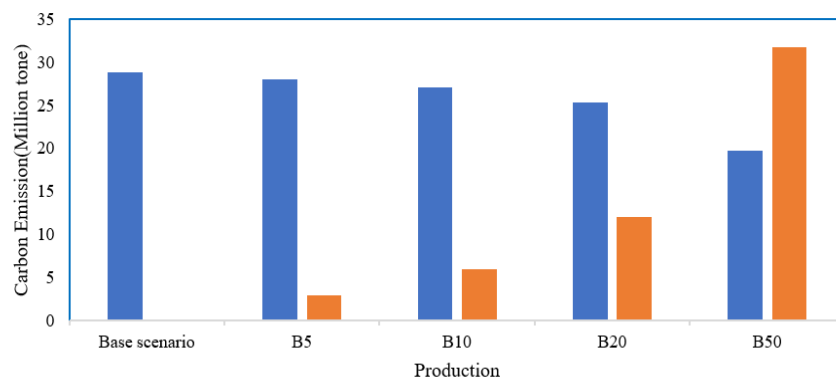
۲. یافته تحقیق

کاهش انتشار کربن از محل جایگزینی سوخت

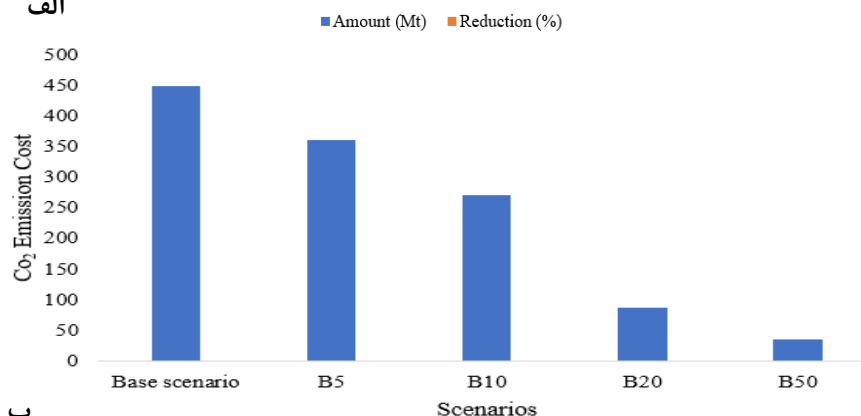
بررسی روند تغییر انتشار CO_2 به عنوان آلاینده اصلی احتراق سوخت از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. همان‌طور که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است، با تحقق سناریوهای دوم، سوم، چهارم و پنجم به‌ترتیب ۲/۹، ۵/۹، ۱۲/۷ و ۳۱/۷ درصد کاهش در میزان انتشار CO_2 حاصل می‌شود. جلوگیری از انتشار این میزان دی‌اکسید کربن در شهرهای صنعتی می‌تواند منجر به جلوگیری از تعطیلی ادارات، مدارس، خسارت‌های مالی پنهان و به‌ویژه سلامت جامعه شود. شکل (۵-ب) میزان هزینه ناشی از انتشار کربن دی‌اکسید نشان داده شده است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی است، میزان هزینه کربن دی‌اکسید انتشار یافته با افزایش سهم بیودیزل در سوخت به‌طور خطی کاهش می‌یابد و شیب کاهشی این خط ارتباط مستقیمی با درصد بیودیزل دارد. با توجه به نتایج این تحلیل با ترکیب ۵ درصد بیودیزل با سوخت گازوئیل فسیلی سالانه هزینه‌های ناشی از انتشار CO_2 به اندازه ۸۹ میلیون دلار کاهش می‌یابد

همچنین در استفاده از نسبت ۱۰، ۲۰، ۵۰ نیز به‌ترتیب ۱۷۹، ۳۶۲ و ۴۱۴ میلیون دلار کاهش هزینه ناشی از انتشار کربن دی‌اکسید وجود خواهد داشت.

در خصوص هزینه-فایده و امکان‌سنجی اقتصادی طرح، مطالعات انجام‌گرفته پیشین نشان داده است در یک سیستم تصفیه پساب جلبکی روباز با طول عمر ۲۰ ساله، نرخ بازده داخلی و بازگشت سرمایه به‌ترتیب برابر ۱۱۸ درصد و ۲ سال برآورد شده است [۴۹]. بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به جداسازی زیست‌توده و مصرف الکتریسیته بوده و منافع سالیانه به ازای ظرفیت تولید ۵۰۰ تن زیست‌توده به ارزش $0.5 \text{ \$} \cdot \text{kg}^{-1}$ ، شامل بازیابی ۲۴۰ هزار مترمکعب آب تصفیه‌شده است [۴۹]. همچنین در مطالعه دیگر ارزیابی اقتصادی تصفیه زیستی پساب در سیستم‌های کشت بسته نشان داده است استفاده از نور طبیعی و فراوری محصول نهایی زیست‌توده جلبکی برای استفاده در مصارف ثانویه به‌ترتیب باعث کاهش هزینه‌های جاری و افزایش منافع حاصل خواهد شد [۵۰].



الف



ب

شکل ۵. انتشار CO_2 در سناریوهای مختلف (الف)، هزینه انتشار CO_2 بر اساس سناریوها (ب)^۱

نتیجه گیری

افزایش تقاضای مصرف انرژی و کمبود منابع آبی موجب شده است تا مسئله آب، انرژی و پیوند بین آنها در تقابل با محیط زیست به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در جوامع امروز مطرح و جایگزینی سیستم‌های تجدیدپذیر در اولویت برنامه‌های توسعه پایدار کلان‌شهرها قرار گیرد. در مطالعه حاضر پیوند آب، انرژی و محیط در استفاده از ریزجلبک‌ها به عنوان نسل سوم زیست‌توده برای تولید بیودیزل از پساب‌های شهری با استفاده از نرم‌افزار ENERGYPLAN مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی تأثیر ظرفیت تصفیه زیستی پساب با استفاده از گونه جلبکی بر بازیابی منابع آبی از نرم‌افزار LEAP استفاده شده است. در این راستا تأثیر جایگزینی سوخت تولیدی در سیستم حمل‌ونقل عمومی شهری بر میزان انتشار آلاینده‌ها با لحاظ نسبت‌های اختلاط مختلف گازوئیل با بیودیزل (شامل B50, B20, B10, B5) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورت جایگزینی بیودیزل B50، ۴۵/۷۸ درصد از کل انرژی مورد نیاز سالانه در منطقه مورد مطالعه تأمین می‌شود. همچنین تحلیل بازیابی پساب نشان داد در صورتی که ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب با نرخ رشد ۵ درصد در سال افزایش یابد، پس از ۱۲ سال می‌توان به این سناریو تحقق بخشید که با ۳۱/۷ درصد کاهش در میزان انتشار CO₂ همراه خواهد بود. این میزان کاهش معادل ۴۱۴ میلیون دلار کاهش در هزینه ناشی از انتشار CO₂ است. همچنین با رسیدن به این چشم‌انداز می‌توان تا ۵۱۷ میلیون مترمکعب آب طی رشد جلبک‌ها بازیافت و در حوزه کشاورزی استفاده کرد که به زنجیره غذایی و محصولات غذایی کمک شایانی خواهد کرد.

منابع

- [3]. A. Wicaksono and D. Kang, "Nationwide simulation of water, energy and food nexus: Case study in South Korea and Indonesia," *J. Hydro-environment Res.*, vol. 22, pp. 70–87, 2019, doi: 10.1016/j.jher.2018.10.003.
- [4]. E. Martinez-Hernandez, M. Leach, and A. Yang, "Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym," *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 1009–1021, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.022.
- [5]. M. C. Rulli, D. Bellomi, A. Cazzoli, G. De Carolis, and P. D. Odorico, "The water-land-food nexus of first-generation biofuels," *Nat. Scientific reports.*, vol. 6, no. 1, p. 22521, 2016, doi: 10.1038/srep22521.
- [6]. M. Melikoglu and A. M. Cinel, "Environmental Technology and Innovation Food waste-water-energy nexus: Scrutinising sustainability of biodiesel production from sunflower oil consumption wastes in Turkey till 2030," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 17, p. 100628, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100628.
- [7]. J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, and D. Tiffany, "Pnas-Biofuels-2006," vol. 103, no. 30, p. 5, 2006.
- [8]. G. B. Leite, A. E. M. Abdelaziz, and P. C. Hallenbeck, "Algal biofuels: Challenges and opportunities," *Bioresour. Technol.*, vol. 145, pp. 134–141, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.02.007.
- [9]. C. Y. Wei, T. C. Huang, and H. H. Chen, "Biodiesel production using supercritical methanol with carbon dioxide and acetic acid," *J. Chem.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/789594.
- [10]. I. M. Atadashi, M. K. Aroua, A. R. Abdul Aziz, and N. M. N. Sulaiman, "High quality biodiesel obtained through membrane technology," *J. Memb. Sci.*, vol. 421–422, pp. 154–164, 2012, doi: 10.1016/j.memsci.2012.07.006.
- [11]. Abedi S, Astaraei FR, Ghobadian B, Tavakoli O, Jalili H, Greenwell HC, et al. "Decoupling a novel *Trichormus variabilis*-*Synechocystis* sp. interaction to boost phycoremediation," *Scientific reports.*, vol. 9, p. 2511, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-38997-7.
- [12]. Hajinezhad A, Abedi S, Ghobadian B, Noorollahi Y. "Biodiesel production from Norouzak (*Salvia lerifolia*) seeds as an indigenous source of bio fuel in Iran using ultrasound," *Energy Conversion and Management.*, vol. 99, pp. 132–40, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.057.
- [1]. Abedi S, Nozarpour A, Tavakoli O. "Evaluation of biogas production rate and leachate treatment in Landfill through a water-energy nexus framework for integrated waste management," *Energy Nexus.*, vol. 11, p. 100218, 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100218.
- [2]. M. Crippa et al., "CO₂ emissions of all world countries: JRC/IEA/PBL 2022 report," Publications Office, LU., 2022.

- [13]. M. Ahmad et al., "Base catalyzed transesterification of sunflower oil biodiesel," *African J. Biotechnol.*, vol. 9, no. 50, pp. 8630–8635, 2010, doi: 10.5897/AJB10.1229.
- [14]. D. M. Kargbo, "Biodiesel production from municipal sewage sludges," *Energy and Fuels.*, vol. 24, no. 5, pp. 2791–2794, 2010, doi: 10.1021/ef1001106.
- [15]. A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.12.023.
- [16]. A. B. M. S. Hossain and A. N. Boyce, "Biodiesel production from waste sunflower cooking oil as an environmental recycling process and renewable energy," *Bulg. J. Agric. Sci.*, vol. 15, no. 4, pp. 312–317, 2009.
- [17]. J. Van Gerpen, "Biodiesel processing and production," vol. 86, pp. 1097–1107, 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
- [18]. G. W. Roberts, M. O. P. Fortier, B. S. M. Sturm, and S. M. Stagg-Williams, "Promising pathway for algal biofuels through wastewater cultivation and hydrothermal conversion," *Energy and Fuels.*, vol. 27, no. 2, pp. 857–867, 2013, doi: 10.1021/ef3020603.
- [19]. Y. Chisti, "Constraints to commercialization of algal fuels," *J. Biotechnol.*, vol. 167, no. 3, pp. 201–214, 2013, doi: 10.1016/j.jbiotec.2013.07.020.
- [20]. J. D. Sheehan, T. Dunahay, J. R. Benemann, and P. Roessler, "A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species," *Eur. Phys. J. C.*, vol. 72, no. 6, p. 14, 2012.
- [21]. B. H. Um and Y. S. Kim, "Review: A chance for Korea to advance algal-biodiesel technology," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–7, 2009, doi: 10.1016/j.jiec.2008.08.002.
- [22]. B. J. Gallagher, "The economics of producing biodiesel from algae," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 158–162, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.016.
- [23]. N. F. Y. Tam and Y. S. Wong, "Wastewater nutrient removal by *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus* sp.," *Environ. Pollut.*, vol. 58, no. 1, pp. 19–34, 1989, doi: 10.1016/0269-7491(89)90234-0.
- [24]. O. Summerton, "The Bernean Grid," *Trans. Anal. Bull.*, vol. 8, no. 1, pp. 27–29, 1978, doi: 10.1177/036215377800800107.
- [25]. A. L. Ahmad, N. H. M. Yasin, C. J. C. Derek, and J. K. Lim, "Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 584–593, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.018.
- [26]. E. Zhang, B. Wang, Q. Wang, S. Zhang, and B. Zhao, "Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 9, pp. 3787–3793, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.07.011.
- [27]. A. Ruiz-Marin, L. G. Mendoza-Espinosa, and T. Stephenson, "Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 1, pp. 58–64, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.02.076.
- [28]. P. S. Lau, N. F. Y. Tam, and Y. S. Wong, "Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater," *Environ. Pollut.*, vol. 89, no. 1, pp. 59–66, 1995, doi: 10.1016/0269-7491(94)00044-E.
- [29]. A. A. Fathi, M. M. Azooz, and M. A. Al-Fredan, "Phycoremediation and the potential of sustainable algal biofuel production using wastewater," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 189–194, 2013, doi: 10.3844/ajassp.2013.189.194.
- [30]. Y. Li et al., "Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 8, pp. 5138–5144, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.091.
- [31]. J. Sharma et al., "Microalgal consortia for municipal wastewater treatment– Lipid augmentation and fatty acid profiling for biodiesel production," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 202, no. p. 111638, 2020, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2019.111638.
- [32]. Ho, Shih-Hsin, et al. "Algal culture and biofuel production using wastewater," *Biofuels from algae.*, Second Edi. pp. 167-198, 2019. doi: 10.1016/b978-0-444-64192-2.00008-1.
- [33]. G. Editorial, "Membrane reactors-Part I," *Technology.*, vol. 7, no. 17, pp. 743–753, 2009, doi: 10.1002/apj.
- [34]. S. Chinnasamy, A. Bhatnagar, R. Claxton, and K. C. Das, "Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium,"

- Bioresour. Technol., vol. 101, no. 17, pp. 6751–6760, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.094.
- [35]. V. Matamoros and Y. Rodríguez, “Batch vs continuous-feeding operational mode for the removal of pesticides from agricultural run-off by microalgae systems: A laboratory scale study,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 309, pp. 126–132, 2016, doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.01.080.
- [36]. G. T. Ding et al., “Phycoremediation of palm oil mill effluent (POME) and CO₂ fixation by locally isolated microalgae: *Chlorella sorokiniana* UKM2, *Coelastrella* sp. UKM4 and *Chlorella pyrenoidosa* UKM7,” *J. Water Process Eng.*, vol. 35, p. 101202, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101202.
- [37]. C. Song, X. Hu, Z. Liu, S. Li, and Y. Kitamura, “Combination of brewery wastewater purification and CO₂ fixation with potential value-added ingredients production via different microalgae strains cultivation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 268, p. 122332, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122332.
- [38]. R. Piloto-Rodríguez, Y. Sánchez-Borroto, E. A. Melo-Espinosa, and S. Verhelst, “Assessment of diesel engine performance when fueled with biodiesel from algae and microalgae: An overview,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 833–842, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.015.
- [39]. Y. Chisti, “Biodiesel from microalgae,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 25, no. 3, pp. 294–306, 2007, doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
- [40]. J. A. Nieves, A. J. Aristizábal, I. Dyner, O. Báez, and D. H. Ospina, “Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application,” *Energy*, vol. 169, pp. 380–397, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.051.
- [41]. N. H. Mirjat, M. A. Uqaili, K. Harijan, G. Das Walasai, M. A. H. Mondal, and H. Sahin, “Long-term electricity demand forecast and supply side scenarios for Pakistan (2015–2050): A LEAP model application for policy analysis,” *Energy*, vol. 165, pp. 512–526, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.10.012.
- [42]. N. V. Emodi, T. Chaiechi, and A. B. M. R. Alam Beg, “Are emission reduction policies effective under climate change conditions: A backcasting and exploratory scenario approach using the LEAP-OSeMOSYS Model,” *Appl. Energy*, vol. 236, pp. 1183–1217, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.045.
- [43]. G. Hu, X. Ma, and J. Ji, “Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model – A case study of a postindustrial city: Shenzhen China,” *Appl. Energy*, vol. 238, pp. 876–886, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.162.
- [44]. P. A. Østergaard, “Reviewing EnergyPLAN simulations and performance indicator applications in EnergyPLAN simulations,” vol. 154, pp. 921–933, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.086.
- [45]. Lund, Henrik, et al. “EnergyPLAN–Advanced analysis of smart energy systems,” *Smart Energy*, vol. 1, p. 100007, 2021, doi: 10.1016/j.segy.2021.100007.
- [46]. M. G. Prina et al., “Multi-objective optimization algorithm coupled to EnergyPLAN software: the EPLANopt model,” *Energy*, vol. 149, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.050.
- [47]. US Energy Information Administration, “How much carbon dioxide is produced by burning gasoline and diesel fuel?,” *US Energy Inf. Adm.*, pp. 2014–2015, 2014.
- [48]. J. O. Ighalo et al., “Progress in Microalgae Application for CO₂ Sequestration,” *Clean. Chem. Eng.*, vol. 3, p. 100044, 2022, doi: 10.1016/j.clce.2022.100044.
- [49]. Kumar, A. K., Sharma, S., Dixit, G., Shah, E., & Patel, A. “Techno-economic analysis of microalgae production with simultaneous dairy effluent treatment using a pilot-scale High Volume V-shape pond system,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1620–1632, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.087.
- [50]. Vázquez-Romero, B., Perales, J. A., de Vree, J. H., Böpple, H., Steinrücken, P., Barbosa, M. J., ... & Ruiz, J. “Techno-economic analysis of microalgae production for aquafeed in Norway,” *Algal Research*, vol. 64, p. 102679, 2022, doi: 10.1016/j.algal.2022.102679.