NRI-ER-1011-POHPN01-00-F

پژوهشگاه نیرو

بهره‌برداری از دودهای خروجی از یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه



مدیر پروژه: مهدی رضایی

واحد مجری: دفتر ریاست

DOI: 10.30503/nripress.2020.290


بسم الله الرحمن الرحيم

بهره‌برداری از دودهای خروجی از یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه

مدیر پروژه: مهدی رضایی
گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

همکاران پروژه: مهدی رضایی، مالک شریعتی نیاسر، مجید عمیدپور، امیرفرهنگ ستوده، محمد انصاری

واحد مجری: دفتر ریاست

انتشارات پژوهشگاه نیرو
دی‌ماه ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-1011-POHPN01-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. دفتر ریاست

بهره‌برداری از دودهای خروجی از یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه/ مدیر پروژه: رضائی، مهدی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۲۹۸ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. شریعتی نیاسر، مالک؛ عمیدپور، مجید؛ ستوده، امیرفرهنگ؛ انصاری، محمد، همکاران پروژه.
۲. عمیدپور، مجید، مدیر واحد مجری.
۳. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر.
۴. محور پژوهشی انرژی زیست‌توده

انتشارات پژوهشگاه نیرو
دفتر ریاست

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳
تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱
نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶
وبگاه: www.nri.ac.ir
پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

پژوهشگاه نیرو

بسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب مهدی رضایی، مدیر پروژه "بهره‌برداری از دودهای خروجی از یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه" و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. مالک شریعتی نیاسر

۲. مجید عمیدپور

۳. امیرفرهنگ ستوده

۴. محمد انصاری

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

پیشگفتار

این طرح که برای اولین بار در کشور و منطقه خاور میانه اجرا می‌شود به منظور طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه پایلوت دوستدار محیط زیست با قابلیت تولید انرژی و محصولات زیستی و کشاورزی عملیاتی شده است. یکی از اهداف مهم طرح حاضر ادغام مراحل مختلف فرایندی و استفاده از فناوری‌های نوین زیستی جهت کوچک‌سازی فرایندها، افزایش بهره‌وری سیستم، هوشمندسازی آن و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی است که اجرای آن با بهره‌مندی از توان رشته‌های مهندسی برق، الکترونیک، مکانیک و فناوری نوین زیستی میسر شده است. بومی‌سازی فناوری و نوآورانه‌بودن سیستم جذب زیستی دی اکسید کربن از شاخصه‌های مهم این طرح می‌باشد.

اجرای طرح همزمان با هفته پژوهش با امضاء موافقتنامه پژوهشی فیمابین رؤسای محترم پژوهشگاه نیرو و پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران در حضور وزیر محترم نیرو و سایر مقامات وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی در سال ۹۴ آغاز شد. در ساختار اجرایی این طرح، پژوهشگاه نیرو به عنوان کارفرما و پژوهشکده بیوتکنولوژی منطقه شمالغرب و غرب کشور واقع در شهر تبریز به عنوان دستگاه مجری وظیفه اجرای طرح را بر عهده دارد. صندوق پژوهش و فناوری صنعت برق و انرژی (مستقر در پژوهشگاه نیرو) نیز با اعطای تسهیلات به عنوان حامی ایفای نقش نموده است.

در تهیه این گزارش، همکاران زیر از بخش‌های مختلف همکاری داشته‌اند:

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	محل خدمت
۱	مهدی رضایی	مدیر پروژه	پژوهشگاه نیرو
۲	محمد انصاری	همکار پروژه	پژوهشگاه نیرو
۳	مالک شریعتی نیاسر	ناظر داخلی پروژه	پژوهشگاه نیرو
۴	امیرفرهنگ ستوده	همکار پروژه	پژوهشگاه نیرو
۵	رضا عسگری	داور بخش طراحی مبدل حرارتی	مؤسسه آموزشی نوین پارسیان
۶	محمدامین حجازی	مجری بخش پرورش جلبک پروژه	پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز
۷	وحید شکری	مجری بخش گازسوز کردن موتور ژنراتور	گروه نیروگاهی تتاپاور
۸	محمدحسین احمدزاده	ناظر خارجی پروژه	دانشگاه فردوسی مشهد

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... أ
فهرست مطالب ..... ب
فهرست شکل‌ها ..... ک
فهرست جداول ..... ع
مقدمه ..... ص
فرضیه ..... ص
اهمیت مسئله ..... ص
هدف اصلی ..... ق
سایر اهداف ..... ق
نتایج مورد انتظار و دستاوردهای جانبی ..... ق
۱– فصل اول : معرفی طرح ۱
۱–۱– مقدمه ۲
۱–۲– سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP) ۳
۱–۲–۱– مؤلفه‌های هزینه‌ای سرمایه‌گذاری در بخش CHP ۵
۱–۲–۲– مؤلفه‌های درآمدی سرمایه‌گذاری در بخش CHP ۵
۱–۲–۳– سیاست‌های تشویقی دولت ۵
۱–۲–۴– مزیت‌های سرمایه‌گذاری و شاخص‌های اقتصادی ۶
۱–۴–۲–۱– درآمدها ۶
۱–۲–۴–۲– هزینه‌ها: ۷
۱–۲–۵– روند سرمایه‌گذاری ۷
۱–۳– سیستم‌های پرورش جلبک ۸
۱–۳–۱– مواد غذایی ضروری جلبک‌ها ۹
۱–۳–۲– کاربردهای ریزجلبک‌ها ۹
۱–۴– معرفی طرح ۱۰
۱–۴–۱– فرضیه اصلی ۱۰
۱–۴–۲– مراحل طراحی ۱۱
۱–۴–۳– ویژگی‌های طرح ۱۴
۱–۴–۴– مشخصات فنی طرح ۱۴
۱–۴–۵– دستاورهای طرح ۱۵
۱–۴–۶– مزایای اقتصادی ۱۵
۱–۵– بهره‌برداری و افتتاح طرح ۱۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲- فصل اول : طراحی و انتخاب سامانه تولید همزمان برق و حرارت (CHP) ۲۳
۲-۱- مقدمه ۲۴
۲-۱-۱- فرضیات ۲۶
۲-۱-۲- اهمیت مسأله ۲۶
۲-۱-۳- هدف اصلی ۲۷
۲-۱-۴- سایر اهداف ۲۷
۲-۱-۵- نتایج مورد انتظار و دستاوردهای جانبی ۲۷
۲-۲- تبدیل موتور دیزلی به موتور گازسوز ۲۸
۲-۳- راه‌اندازی و تست موتور گازسوز در حالت جزیره‌ای ۳۰
۲-۳-۱- الزامات کار در حالت جزیره‌ای ۳۲
۲-۴- اتصال به شبکه موتور و بهره‌برداری و تست موتور ۳۳
۲-۴-۱- ساختگاه و تأسیسات لازم جهت راه‌اندازی موتور ۳۳
۲-۴-۱-۱- لوله‌کشی گاز ۳۳
۲-۴-۱-۲- کانال‌کشی هوا ۳۴
۲-۴-۱-۳- کابل‌کشی و اتصال موتور ژنراتور به سیستم برق گلخانه ۳۶
۲-۴-۲- سیستم بازیابی حرارت ۳۷
۲-۴-۲-۱- سیستم بازیابی حرارت ۳۷
۲-۴-۲-۲- سیستم استحصال CO_2 ..... ۴۰
مراجع ۴۲
۳- فصل سوم : طراحی و ساخت مبدل حرارتی به منظور تامین آب گرم مصرفی گلخانه براساس نتایج تست عملکردی موتور ۴۳
۳-۱- مقدمه ۴۴
۳-۲- طراحی و ساخت مبدل حرارتی به منظور تامین آب گرم مصرفی گلخانه براساس نتایج تست عملکردی موتور ۴۴
۳-۲-۱- مبدل حرارتی هوا به آب ۴۴
3-2-1-1- مراحل آماده‌سازی مبدل حرارتی هوا به آب ۴۶
۳-۲-۲- اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه ۵۰
۳-۲-۳- سیستم کنترل بازیابی حرارت ۵۲
۳-۲-۴- سیستم استحصال CO_2 ..... ۵۲
۳-۳- تست مبدل حرارتی ۵۶
۴- فصل چهارم : طراحی و ساخت مبدل حرارتی‌ثانویه‌به منظورتأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۵۷
۴-۱- مقدمه ۵۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲-۴- مبانی و کلیات طراحی و ســـاخت مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۵۸
۱-۲-۴- سناریوهای خنک‌کاری در تابستان و تنظیم دما در زمستان ۵۹
۱-۱-۲-۴- سناریوی اول : استفاده از برج خنک‌کن مدار باز ۵۹
۲-۱-۲-۴- سناریوی دوم : استفاده از برج خنک کن مدار بسته ۶۱
۳-۱-۲-۴- سناریوی سوم : استفاده از منبع ذخیره به همراه مبدل هوا خنک ۶۲
۲-۲-۴- اهداف ۶۴
۳-۲-۴- انواع مبدل حرارتی ۶۴
۱-۳-۲-۴- تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی ۶۵
۴-۲-۴- انواع مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله ۶۷
۱-۴-۲-۴- مبدل‌های یک سرثابت ۶۷
۲-۴-۲-۴- مبدل‌های یک سرشناور ۶۸
۳-۴-۲-۴- مبدل با لوله‌های U شکل ۶۸
۴-۴-۲-۴- مبدل‌های دو لوله‌ای ۶۸
۵-۴-۲-۴- کولر یا خنک‌کننده هوایی ۶۸
۵-۲-۴- اجزای مبدل‌های حرارتی ۶۹
۱-۵-۲-۴- لوله‌ها ۷۰
۲-۵-۲-۴- پوسته ۷۰
۳-۵-۲-۴- صفحه لوله ۷۱
۴-۵-۲-۴- کانال ۷۱
۵-۵-۲-۴- تیغه عرضی ۷۱
۶-۵-۲-۴- تیغه‌های طولی ۷۱
۷-۵-۲-۴- سر پوسته ۷۱
۶-۲-۴- طراحی مبدل حرارتی ۷۳
۱-۶-۲-۴- روش‌های انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی ۷۳
۲-۶-۲-۴- محاسبه انتقال حرارت در داخل لوله و پوسته ۷۵
۷-۲-۴- کاربرد مبدل‌های حرارتی ۷۶
۱-۷-۲-۴- مبدل‌های حرارتی سردکننده ۷۶
۲-۷-۲-۴- مبدل‌های حرارتی گرم‌کننده ۷۷
۸-۲-۴- راه‌کارهای افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی ۷۸
۳-۴- طراحی و ساخت مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۷۹
۹-۳-۴- نقشه‌های ساخت ۸۱
۴-۴- انجام اصلاحات سیستم بازیافت حرارتی ۸۳
پیوست ۸۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

پیوست الف ۸۸
مراجع ۹۳
۵- فصل پنجم : کلیات ۹۴
۵-۱- مقدمه ۹۵
۵-۲- جلبک‌ها ۹۶
۵-۲-۱- جلبک‌های میکروسکوپی ۹۶
۵-۲-۲- روش‌های تغذیه‌ای جلبک‌ها ۹۷
۵-۳- عوامل فیزیکی موثر در جذب عناصر غذایی توسط جلبک‌ها ۹۹
۵-۴- کاربرد ریزجلبک‌ها ۱۰۰
۵-۵- ضرورت استفاده از سوخت‌های بیولوژیکی ۱۰۱
۵-۵-۱- سوختهای بیولوژیکی نسل اول و دوم ۱۰۲
۵-۵-۲- سوخت بیودیزل: جایگزینی مطمئن برای پترودیزل ۱۰۳
۵-۶- مزایای بیودیزل ۱۰۴
۵-۶-۱- تولید جهانی بیودیزل ۱۰۵
۵-۷- چالش‌های پیشروی تولید سوختهای بیولوژیکی ۱۰۶
۵-۷-۱- زمین زراعی مورد نیاز برای تولید سوختهای بیولوژیکی ۱۰۶
۵-۷-۲- بالانس خالص انرژی ۱۰۶
۵-۷-۲-۱- بالانس کربن ۱۰۷
۵-۷-۲-۲- حذف CO_2 ..... ۱۰۷
۵-۸- نسل دوم پاسخگوی چالشهای تولید سوخت بیولوژیکی ۱۰۸
۵-۹- پتانسیل تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها ۱۰۹
۵-۹-۱- مزایای ریزجلبک‌ها بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل ۱۱۰
۵-۹-۲- سابقهی تاریخی تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها ۱۱۱
۵-۱۰- رویکرد طلایی به ریزجلبک‌ها ۱۱۱
۵-۱۱- شکاف تحقیقاتی در زمینه تولیدبیودیزل از ریزجلبک‌ها ۱۱۲
۵-۱۱-۱- وضعیت کنونی انرژی‌های بیولوژیکی در ایران ۱۱۲
۵-۱۱-۲- چشمانداز آینده بیودیزل در ایران ۱۱۳
۵-۱۲- بیوسنتز لیپیدها در ریزجلبک‌ها ۱۱۴
۵-۱۲-۱- بیوسنتز لیپید در دونالیلا ۱۱۵
۵-۱۲-۲- اصول حاکم بر استخراج لیپیدها ۱۱۵
۵-۱۲-۳- روشهای استخراج و تعیین لیپید کل ۱۱۶
۵-۱۲-۳-۱- استخراج ناپیوسته با حلال ۱۱۶
۵-۱۲-۳-۲- استخراج نیمهپیوسته با حلال ۱۱۶
۵-۱۲-۳-۳- روش استخراج B&D ۱۱۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۴-۳-۱۲-۵- تبدیل لیپید به بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون ۱۱۷
۱۳-۵- بازار مصرف جلبک‌ها ۱۱۸
۱۴-۵- تولید بتاکاروتن از جلبک دونالیلا ۱۲۸
۱-۱۴-۵- بتاکاروتن ۱۳۱
۱۵-۵- روشهای استخراج بتاکاروتن ۱۳۲
۱۶-۵- روشهای کشت جلبک ۱۳۴
۱-۱۶-۵- سیستمهای باز ۱۳۴
۲-۱۶-۵- سیستمهای بسته ۱۳۵
۱۷-۵- انواع فتوبیوراکتورها ۱۳۶
۱-۱۷-۵- بیوراکتورهای لولهای ۱۳۷
۲-۱۷-۵- بیوراکتور به شکل آلفا ۱۳۸
۳-۱۷-۵- بیوراکتورهایی به شکل فرمانتور ۱۳۸
۴-۱۷-۵- بیوراکتور صفحه تخت ۱۳۹
۱-۴-۱۷-۵- مزیت استفاده از فتوبیوراکتورهای تخت ۱۴۰
۶- فصل ششم : طراحی و ساخت فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۱۴۱
۱-۶- مقدمه ۱۴۲
۲-۶- طراحی ۱۴۲
۳-۶- مصالح و ساخت ۱۴۲
۴-۶- زمان اختلاط (mixing time) ۱۴۳
۵-۶- انباشتگی گاز (gas holdup) ۱۴۳
۷- فصل هفتم : تست عملکرد فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۱۴۴
۱-۷- مقدمه ۱۴۵
۲-۷- نتایج تست عملکرد فتوبیوراکتورهای تولید جلبک ۱۴۵
۱-۲-۷- راندمان تولید در واحد سطح و جذب دی اکسید کربن ۱۴۵
۲-۲-۷- دریافت نور ۱۴۶
۳-۲-۷- مقاومت سازه ۱۴۶
۴-۲-۷- خوردگی و دوام مصالح بکار رفته ۱۴۶
۵-۲-۷- کاهش هزینه‌های استهلاک ۱۴۶
۶-۲-۷- الگوی اختلاط ۱۴۷
۷-۲-۷- زمان اختلاط ۱۴۷
۸-۲-۷- انباشتگی گاز (Holdup) ۱۵۰
۳-۷- نتیجه گیری ۱۵۳
مراجع: ۱۵۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸– فصل هشتم : راه اندازی، ارزیابی و رفع مشکلات احتمالی کارکرد سامانه DG-CHP ۱۵۹
۸–۱– مقدمه ۱۶۰
۸–۲– جلبکها ۱۶۱
۸–۳– جلبکهای میکروسکوپی ۱۶۱
۸–۴– ریزجلبک Dunaliella sp. ۱۶۲
۸–۴–۱– ریخت‌شناسی *Dunaliella* ۱۶۳
۸–۵– روش‌های تغذیه‌ای جلبکها ۱۶۳
۸–۶– مواد غذایی ضروری جلبکها ۱۶۴
۸–۶–۱– کربن ۱۶۴
۸–۶–۲– نیتروژن ۱۶۵
۸–۶–۳– فسفر ۱۶۶
۸–۶–۴– سایر عناصر ماکرو و میکرو، کلات کننده‌ها و آب ۱۶۶
۸–۷– عوامل فیزیکی موثر در جذب عناصر غذایی توسط جلبکها ۱۶۷
۸–۸– اهمیت و بازار مصرف جلبکها ۱۶۷
۸–۸–۱– استفاده از جلبکها به عنوان غذای انسان ۱۶۹
۸–۸–۲– استفاده از جلبکها به عنوان خوراک دام، طیور و آبزیان ۱۷۰
۸–۸–۳– استفاده از جلبکها در کشاورزی ۱۷۱
۸–۸–۴– استفاده از جلبکها در تصفیه فاضلاب و پساب‌ها ۱۷۱
۸–۸–۵– استفاده از جلبکها در تولید رنگدانه‌ها (کاراتنوئیدها) ۱۷۱
۸–۸–۶– استفاده از جلبکها در تولید اسیدهای چرب ۱۷۵
۸–۸–۷– استفاده از جلبکها به عنوان منبع پروتئین‌ها ۱۷۶
۸–۸–۸– استفاده از جلبکها به عنوان منبع ویتامین‌ها (توکوفرول‌ها) ۱۷۶
۸–۸–۹– استفاده از جلبکها برای تولید فنل‌ها و ترکیبات فرار ۱۷۶
۸–۸–۱۰– استفاده از جلبکها برای تولید ترکیبات دارویی ۱۷۷
۸–۸–۱۱– استفاده از جلبکها به عنوان مکمل‌ها ۱۷۸
۸–۹– ضرورت استفاده از سوخت‌های بیولوژیکی ۱۷۹
۸–۱۰– سوختهای بیولوژیکی نسل اول و دوم ۱۸۰
۸–۱۱– سوخت بیودیزل: جایگزینی مطمئن برای پترودیزل ۱۸۱
۸–۱۱–۱– مزایای بیودیزل ۱۸۲
۸–۱۱–۲– تولید جهانی بیودیزل ۱۸۳
۸–۱۲– چالشهای پیشروی تولید سوختهای بیولوژیکی ۱۸۴
۸–۱۳– نسل دوم پاسخگوی چالشهای تولید سوخت بیولوژیکی ۱۸۴
۸–۱۴– بالانس خالص انرژی ۱۸۵
۸–۱۴–۱– حذف CO_2 ۱۸۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-۱۵- پتانسیل تولید بیودیزل از ریزجلبکها ۱۸۹
۸-۱۵-۱- مزایای ریزجلبکها بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل ۱۹۰
۸-۱۵-۲- سابقهی تاریخی تولید بیودیزل از ریزجلبکها ۱۹۰
۸-۱۶- رویکرد طلایی به ریزجلبکها ۱۹۱
۸-۱۶-۱- شکاف تحقیقاتی در زمینه تولیدبیودیزل از ریزجلبکها ۱۹۱
۸-۱۶-۲- وضعیت کنونی انرژیهای بیولوژیکی در ایران ۱۹۲
۸-۱۶-۳- چشمانداز آینده بیودیزل در ایران ۱۹۲
۸-۱۷- بیوسنتز لیپیدها در ریزجلبکها ۱۹۳
۸-۱۸- اصول حاکم بر استخراج لیپیدها ۱۹۴
۸-۱۹- تبدیل لیپید به بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون ۱۹۵
۸-۲۰- روشهای کشت جلبک ۱۹۶
۸-۲۰-۱- سیستمهای باز ۱۹۶
۸-۲۰-۲- سیستمهای بسته ۱۹۷
۸-۲۱- انواع فتوبیوراکتورها ۱۹۸
۸-۲۱-۱- بیوراکتورهای لولهای ۱۹۹
۸-۲۱-۲- بیوراکتور به شکل آلفا ۲۰۰
۸-۲۱-۳- بیوراکتورهایی به شکل فرمانتور ۲۰۰
۸-۲۱-۴- بیوراکتور صفحه تخت ۲۰۱
۸-۲۲- مزیت استفاده از فتوبیوراکتورهای تخت ۲۰۲

۹- فصل نهم : راهاندازی، ارزیابی و رفع مشکلات احتمالی کارکرد سلمانه پرورش و برداشت ریزجلبک‌ها ۲۰۳

۹-۱- مقدمه ۲۰۴
۹-۲- طراحی فتوبیوراکتور ۲۰۴
۹-۳- مصالح و ساخت ۲۰۵
۹-۴- زمان اختلاط (mixing time) ۲۰۶
۹-۵- انباشتگی گاز (gas holdup) ۲۰۶
۹-۶- برداشت میکروجلبک با روش انعقاد الکتریکی ۲۰۷
۹-۷- سویههای دونالیلای مورد استفاده ۲۰۹
۹-۸- واکشت سویه‌ها ۲۱۰
۹-۹- ساخت و راهاندازی Set up کشت و غربالگری سویهها ۲۱۱
۹-۹-۱- حمام آب شیکردار ۲۱۲
۹-۹-۲- لامپ LED ۲۱۲
۹-۹-۳- محفظه ۲۱۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۴-۹-۹- تأمین گاز CO_2 ..... ۲۱۲
۱۰-۹- غربالگری سویههای دونالیلای حساس و مقاوم به CO_2 ..... ۲۱۲
۱۱-۹- اندازهگیری دانسیته نوری (OD) ۲۱۳
۱۲-۹- برآورد AFDW یاختههای ریزجلبک ۲۱۴
۱۳-۹- برآورد وزن تر یاختههای ریزجلبک ۲۱۴
۱۴-۹- اندازهگیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید ۲۱۴
۱۵-۹- نرخ تثبیت زیستی CO_2 ..... ۲۱۵
۱۶-۹- استخراج پروتئین ۲۱۵
۱۷-۹- استخراج لیپید ۲۱۵
۱۸-۹- بررسی GC نیمرخ اسیدهای چرب ۲۱۶

۱۰- فصل دهم : راهاندازی کل سامانه و بررسی کارکرد آن و جمعآوری و تحلیل دادههای مربوطه ۲۱۸

۱-۱۰- مقدمه ۲۱۹
۲-۱۰- راهاندازی سیستم DG-CHP در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۲۱۹
۳-۱۰- طراحی و ساخت فتوبیوراکتور صفحه تخت (فاز اول کار) ۲۱۹
۱-۳-۱۰- راندمان تولید در واحد سطح و جذب دی اکسید کربن ۲۲۰
۲-۳-۱۰- دریافت نور ۲۲۰
۳-۳-۱۰- مقاومت سازه ۲۲۰
۴-۳-۱۰- خوردگی و دوام مصالح بکار رفته ۲۲۱
۵-۳-۱۰- کاهش هزینههای استهلاک ۲۲۱
۶-۳-۱۰- الگوی اختلاط ۲۲۱
۷-۳-۱۰- زمان اختلاط ۲۲۱
۸-۳-۱۰- انباشتگی گاز (Holdup) ۲۲۵
۴-۱۰- موتور ژنراتور دوگازسوز تولید برق و تابلوی برق کنترل ژنراتور ۲۲۷
۵-۱۰- غربالگری سویههای دونالیلای مقاوم و حساس به دیاکسیدکربن ۲۳۴
۶-۱۰- اندازهگیری نرخ تثبیت و مقدار CO_2 تثبیت شده و میزان زیستتوده کل در تیمار با غلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۳۷
۷-۱۰- تغییرات محتوای رنگیزههای فتوسنتزی، پاداکسایندههای چربیدوست، پروتئین و لیپید کل در غلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۳۸
۸-۱۰- میزان محتوای کلروفیل a و b درغلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۴۲
۹-۱۰- مقدار نسبت کلروفیل a/b درغلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۴۲
۱۰-۱۰- اثر غلظتهای مختلف CO_2 بر پروتئین کل ۲۴۳
۱۱-۱۰- اثر غلظتهای مختلف CO_2 بر میزان لیپید کل ۲۴۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰-۱۲- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر کاروتنوئید کل ۲۴۵
۱۰-۱۳- اثر غلظتهای مختلف CO_2 بر میزان آلفاتوکوفرول ۲۴۶
۱۰-۱۴- بهره‌وری لیپید تحت تاثیر غلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۴۷
۱۰-۱۵- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر نیمرخ اسیدهای چرب ۲۴۸
۱۰-۱۶- بررسی شاخصهای بیودیزلی سویههای بومی مورد مطالعه در غلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۵۲
۱۰-۱۷- بررسی میزان تغییرات رشد ریزجلبک در استفاده از منابع و شرایط مختلف CO_2 در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری ۲۵۳
۱۰-۱۸- ساخت دستگاه برداشت جلبک به روش انعقاد الکتریکی ۲۵۶
۱۰-۱۹- اندازهگیری نرخ تثبیت و مقدار CO_2 تثبیت شده و میزان بیومس کل در تیمار با CO_2 و دود خروجی در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری ۲۵۹
۱۰-۲۰- نتیجه‌گیری ۲۶۱
مراجع ۲۶۳
پیوست ۲۷۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) نمایی از یک نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت (CHP) ۴
شکل (۱-۲) تولید همزمان برق، حرارت و سرما (CCHP) ۵
شکل (۱-۳) روند سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های تولید پراکنده ۷
شکل (۱-۴) روش‌های کشت روباز جلبک ۸
شکل (۱-۵) روش‌های کشت جلبک در محیط بسته ۹
شکل (۱-۶) نمای کلی طرح ۱۱
شکل (۱-۷) نمای موتور ژنراتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۱۲
شکل (۱-۸) نمای سیستم بازیابی حرارت ۱۲
شکل (۱-۹) فتوبیوراکتورهای پرورش جلبک ۱۳
شکل (۱-۱۰) سیستم جمع‌آوری جلبک ۱۴
شکل (۱-۱۱) مزایای اجرای طرح ۱۶
شکل (۱-۱۲) محصولات آرایشی و بهداشتی تولیدشده از کشت جلبک ۱۶
شکل (۲-۱) مراحل دمونتاژ موتور ژنراتور دیزلی و خارج کردن از محل قبلی ۲۸
شکل (۲-۲) مراحل مونتاژ موتور ژنراتور دیزلی و قرار دادن آن در محل جدید ۲۹
شکل (۲-۳) نماواره‌ای از یک ریزشبکه با کارکرد در حالت جزیره‌ای و قابل تبدیل به حالت جزیره‌ای ۳۱
شکل (۲-۴) آنالیز گاز شهر تبریز ۳۴
شکل (۲-۵) کنده‌کاری محل اجرای کانال هوای ورودی و خروجی در محل جدید استقرار موتور ژنراتور گازسوز ۳۵
شکل (۲-۶) کانال هوای ورودی و خروجی در محل جدید استقرار موتور ژنراتور گازسوز ۳۶
شکل (۲-۷) کابل کشی و اتصال موتور ژنراتور به سیستم برق گلخانه ۳۷
شکل (۲-۸) مبدل هوا به آب ۳۸
شکل (۲-۹) آماده‌سازی اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه ۳۹
شکل (۲-۱۰) سیستم بازیابی حرارت ۴۰
شکل (۲-۱۱) سیستم استحصال CO_2 ..... ۴۱
شکل (۳-۱) نقشه لوله‌کشی موجود ۴۴
شکل (۳-۲) مبدل هوا به آب ۴۵
شکل (۳-۳) نورد و جوشکاری پوسته مبدل حرارتی ۴۶
شکل (۳-۴) سوراخ‌کاری مجاری ورود و خروج آب و شیر تخلیه ۴۷
شکل (۳-۵) لوله‌های مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی ۴۷
شکل (۳-۶) صفحات انتهایی و میانی مبدل حرارتی ۴۸
شکل (۳-۷) اتصال صفحات انتهایی به پوسته گالوانیزه ۴۹
شکل (۳-۸) اتصال فلنچ‌ها و عدسی‌ها به پوسته مبدل حرارتی ۵۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۳-۹) آماده‌سازی اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه ۵۱
شکل (۳-۱۰) سیستم بازیابی حرارت ۵۲
شکل (۳-۱۱) سیستم استحصال CO_2 ..... ۵۳
شکل (۳-۱۲) حالت قبل از اصلاح مسیر دود ۵۴
شکل (۳-۱۳) میکسر و جداکننده دود ۵۵
شکل (۳-۱۴) وضعیت موتور پیش از راه‌اندازی ۵۶
شکل (۴-۱) میزان انرژی قابل استحصال در تولید همزمان برق و حرارت ۵۸
شکل (۴-۲) شماتیک پروژه DG-CHP تبریز ۶۰
شکل (۴-۳) نمایی از برج خنک‌کن مدار باز ۶۱
شکل (۴-۴) نمایی از برج خنک‌کن مدار بسته ۶۱
شکل (۴-۵) شماتیک مبدل‌های ثانویه ۶۲
شکل (۴-۶) نحوه اجرای سیستم پیشنهادی ۶۴
شکل (۴-۷) نمایی ساده از نحوه عملکرد مبدل‌های حرارتی ۶۵
شکل (۴-۸) نمونه‌ای از مبدل حرارتی از نوع U-Type ۷۰
شکل (۴-۹) یک نمونه مبدل حرارتی پوسته لوله از نوع [6U-Type] ۷۲
شکل (۴-۱۰) انواع هدها و پوسته‌ها در مبدل‌های پوسته–لوله ۷۳
شکل (۴-۱۱) پلاک مربوط به مبدل حرارتی ۷۳
شکل (۴-۱۲) جریان همسو (Co-Current) ۷۵
شکل (۴-۱۳) جریان غیرهمسو (Counter-Current) ۷۵
شکل (۴-۱۴) پارامترهای ورودی به نرم‌افزار طراحی مبدل ۷۹
شکل (۴-۱۵) خلاصه مشخصات مبدل ۸۰
شکل (۴-۱۶) نقشه ساخت مبدل حرارتی ۱۱ لوله‌ای ۸۲
شکل (۴-۱۷) نقشه ساخت مبدل حرارتی ۲۰ لوله‌ای ۸۳
شکل (۴-۱۸) پوسته مبدل ۸۳
شکل (۴-۱۹) حالت مطلوب برای اجرای اصلاح مسیر دود ۸۴
شکل (۴-۲۰) مراحل اجرای اصلاح مسیر دود ۸۵
شکل (۴-۲۱) اصلاح مسیر دود پس از اتمام کار ۸۶
شکل (۵-۱) : فرایند تبدیل فتوسنتزی انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی و تولید انواع سوختهای بیولوژیکی [۱۶] ۱۰۳
شکل (۵-۲) : ساختار کلی تریگلیسرید [۲۰] ۱۰۴
شکل (۵-۳) روند تولید جهانی بیودیزل از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۹ [۲۱] ۱۰۵
شکل (۵-۴) سهم ۲۸ کشور در تولید جهانی بیودیزل در سال ۲۰۰۹ [۲۲] ۱۰۶
شکل (۵-۵) فرایند تبدیل کاتالیستی تریگلیسرید به بیودیزل طی ترانس استریفیکاسیون ۱۱۷
شکل (۵-۶) میزان مصرف محصولات آرایشی در دنیا ۱۲۷

شکل (۵-۷) گزارش سالیانه تولیدات و مصارف گونه‌های برتر جلبک در بازارهای جهانی ۱۲۸
شکل (۵-۸) ساختارهای کاروتنوئیدها ۱۳۰
شکل (۵-۹) تجمع بتاکاروتن در فضای غشای داخلی تیلاکوئید ۱۳۰
شکل (۵-۱۰) نمایی از ساختار بتاکاروتن ۱۳۱
شکل (۵-۱۱) کشت جلبک دونالیلا در سراسر جهان بعنوان منبع تولید بتاکاروتن ۱۳۲
شکل (۵-۱۲) نمونهای از کشت باز دریاچهای ۱۳۵
شکل (۵-۱۳) شمایی از انواع فتوبیوراکتورهای بسته ۱۳۶
شکل (۵-۱۴) بیوراکتور لولهای ۱۳۷
شکل (۵-۱۵) بیوراکتور به شکل آلفا ۱۳۸
شکل (۵-۱۶) راکتور به شکل فرمانتور ۱۳۹
شکل (۵-۱۷) بیوراکتور صفحه صاف ۱۴۰
شکل (۶-۱) جزئیات سازه‌ای فتو بیوراکتور ۱۴۲
شکل (۷-۱) نمایی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی ۱۴۵
شکل (۷-۲) تغییرات زمان اختلاط بر حسب شدت هوادهی ۱۴۸
شکل (۷-۳) زمان اختلاط در شدت‌های هوادهی مختلف و تعبیه متنوع اسپارژرها ۱۵۰
شکل (۷-۴) تغییرات سرعت ظاهری گاز بر حسب شدت هوادهی ۱۵۱
شکل (۷-۵) تغییرات انباشتگی گاز بر حسب سرعت ظاهری ۱۵۲
شکل (۷-۶) تغییرات زمان اختلاط بر حسب سرعت ظاهری ۱۵۲
شکل (۷-۷(تغییرات زمان اختلاط بر حسب انباشتگی گاز ۱۵۳
شکل (۸-۱) نماهایی از ریخت‌شناسی و ساختار یاخته‌ای *Dunaliella* sp. (Wu *et al.* 2016) ۱۶۳
شکل (۸-۲) ساختارهای کاروتنوئیدها ۱۷۲
شکل (۸-۳) تجمع بتاکاروتن در فضای غشای داخلی تیلاکوئید ۱۷۳
شکل (۸-۴) نمایی از ساختار بتاکاروتن ۱۷۳
شکل (۸-۵) تصویر میکروسکوپی از ریزجلبک دونالیلا ۱۷۴
شکل (۸-۶) کشت جلبک دونالیلا در سراسر جهان بعنوان منبع تولید بتاکاروتن ۱۷۵
شکل (۸-۷) فرایند تبدیل فتوسنتزی انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی و تولید انواع سوختهای بیولوژیکی (Schenk, *et al.* 2008). ۱۸۱
شکل (۸-۸) ساختار کلی تریگلیسرید (Xu, 2010) ۱۸۲
شکل (۸-۹) روند تولید جهانی بیودیزل از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۹ (Martinot *et al.* 2009) ۱۸۳
شکل (۸-۱۰) ۲۸ کشور در تولید جهانی بیودیزل در سال ۲۰۰۹ (Martinot *et al.* 2009) ۱۸۳
شکل (۸-۱۱) فرایند تبدیل کاتالیستی تریگلیسرید به بیودیزل طی ترانس استریفیکاسیون ۱۹۶
شکل (۸-۱۲) نمونهای از کشت باز دریاچهای ۱۹۷
شکل (۸-۱۳) شمایی از انواع فتوبیوراکتورهای بسته ۱۹۸
شکل (۸-۱۴) بیوراکتور لولهای ۲۰۰

شکل (۸-۱۵) بیوراکتور به شکل آلفا ۲۰۰
شکل (۸-۱۶) راکتور به شکل فرمانتور ۲۰۱
شکل (۸-۱۷) بیوراکتور صفحه صاف ۲۰۱
شکل (۹-۱) جزئیات سازهای فتوبیوراکتور طراحی شده ۲۰۴
شکل (۹-۲) نمای روبرو از فتوبیوراکتور طراحی‌شده ۲۰۶
شکل (۹-۳) نمای از بالای فتوبیوراکتور ۲۰۶
شکل (۹-۴) نمای کلی از دستگاه طراحی شده هیبرید جداساز میکروجلبک از محیط کشت ۲۰۷
شکل (۹-۵) ابعاد مخزن مکعبی جدید طراحی شده در این پروژه ۲۰۸
شکل (۹-۶) منبع تغذیه DC ۲۰۸
شکل (۹-۷) محل نگهداری سویه‌های جمع‌آوری شده دونالیلا در فیتوترون پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی ۲۰۹
شکل (۹-۸) تصویری از وضعیت ریزجلبک دونالیلا در زیر میکروسکوپ ۲۱۱
شکل (۹-۹) نمای کلی از سیستم کشت راه‌اندازی شده برای غربالگری ایزولههای مقاوم به درصدهای بالای گاز CO_2 ..... ۲۱۲
شکل (۹-۱۰) نمای کلی از دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد استفاده در این پروژه ۲۱۳
شکل (۱۰-۱) نمایی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۲۲۰
شکل (۱۰-۲) تغییرات زمان اختلاط بر حسب شدت هوادهی ۲۲۲
شکل (۱۰-۳) زمان اختلاط در شدت‌های هوادهی مختلف و تعبیه متنوع اسپارژرها ۲۲۴
شکل (۱۰-۴) تغییرات سرعت ظاهری گاز بر حسب شدت هوادهی ۲۲۵
شکل (۱۰-۵) تغییرات انباشتگی گاز بر حسب سرعت ظاهری ۲۲۶
شکل (۱۰-۶) تغییرات زمان اختلاط بر حسب سرعت ظاهری ۲۲۷
شکل (۱۰-۷) تغییرات زمان اختلاط بر حسب انباشتگی گاز ۲۲۷
شکل (۱۰-۸) مراحل خارج سازی و انتقال موتور ژنراتور به محل اصلی ۲۲۸
شکل (۱۰-۹) نمای کلی از موتور ژنراتور راهاندازی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز بمنظور بهره مندی از جریان برق، بازیافت حرارت و استفاده از دود خروجی در کشت میکروجلبک ۲۲۹
شکل (۱۰-۱۰) تابلو برق نصب شده برای بکار اندازی ژنراتور و مدیریت سیستم به منظور استفاده از برق تولیدی ۲۳۰
شکل (۱۰-۱۱) تهیه نقشه و بهترین مکان از لحاظ ایمنی و کاهش هزینه ها برای اتصال ژنراتور به شبکه ۲۳۰
شکل (۱۰-۱۲) محل کندهکاریهای انجام گرفته جهت نصب کانالهای تهویه ۲۳۱
شکل (۱۰-۱۳) مبدل حرارتی ساخته شده برای کاهش دمای دود خروجی حاصل از ژنراتور ۲۳۲
شکل (۱۰-۱۴) طراحی سیستم خنک کننده جانبی به منظور کاهش بیشتر دمای خروجی از ژنراتور ۲۳۳
شکل (۱۰-۱۵) مراحل آمادهسازی اتصال مبدل به سیستم گرمایش موتورخانه ۲۳۳
شکل (۱۰-۱۶) لوله کشی سیستم استحصال CO_2 و نصب کاتالیستهای سفارشی بر روی ژنراتور ۲۳۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۱۰-۱۷) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۱۰ ٪..... ۲۳۵
شکل (۱۰-۱۸) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۲۰ ٪..... ۲۳۵
شکل (۱۰-۱۹) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۳۰٪..... ۲۳۶
شکل (۱۰-۲۰) تغییرات زیست‌توده سویه‌های ریزجلبک بومی در غلظت‌های مختلف CO_2..... ۲۳۸
شکل (۱۰-۲۱) تغییرات محتوای کلروفیل a و کلروفیل b در پاسخ به غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی روز ۱۲ تیمار..... ۲۴۲
شکل (۱۰-۲۲) تغییرات نسبت کلروفیل a/b در غلظت‌های مختلف CO_2 دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار..... ۲۴۳
شکل (۱۰-۲۳) تغییرات محتوای پروتئین در غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار..... ۲۴۴
شکل (۱۰-۲۴) تغییرات محتوای لیپید کل در پاسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی ۲۴۵
شکل (۱۰-۲۵) تغییرات محتوای کاروتنوئید در غلظت‌های متفاوت CO_2 دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار..... ۲۴۶
شکل (۱۰-۲۶) تغییرات محتوای آلفاتوکوفرول در غلظت‌های متفاوت CO_2 بر دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار.. ۲۴۷
شکل (۱۰-۲۷) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH محیط کشت با CO_2 خالص کنترل و اختلاط با هوا صورت گیرد..... ۲۵۴
شکل (۱۰-۲۸) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH محیط با دود خروجی ژنراتور کنترل و اختلاط با هوا صورت گیرد..... ۲۵۵
شکل (۱۰-۲۹) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH و هم اختلاط محیط کشت با دود خروجی ژنراتور صورتگیرد..... ۲۵۶
شکل (۱۰-۳۰) دستگاه برداشت جلبک طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی..... ۲۵۷
شکل (۱۰-۳۱) کیک میکروجلبک حاصل از دستگاه برداشت جلبک ۲۵۸
شکل (۱۰-۳۲) تاثیر هدایت الکتریکی بر توان مصرفی الکترودها در دستگاه برداشت میکروجلبک طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی..... ۲۵۸
شکل (۱۰-۳۳) نمودار بازده برداشت میکروجلبک نسبت به جریان در هدایت الکتریکی ۶۰/۲ m.S/cm..... ۲۵۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

فهرست جداول

جدول (۲-۱) مشخصات موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۲۹
جدول (۲-۲) نتایج تست موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۳۰
جدول (۴-۱) مشخصات ساخت مبدلهای ثانویه ۶۳
جدول (۴-۲) زمان لازم برای کارکرد دستگاه بدون نیاز به آب گرم مصرفی ۶۳
جدول (۴-۳) خلاصه مشخصات مبدل حرارتی ۸۰
جدول (۵-۱) راندمان تولید بیودیزل از روغنهای گیاهی در قیاس با روغن ریزجلبکی [۷] ۱۰۸
جدول (۵-۲) محتوای روغن جنسهای ریزجلبکی مختلف [۵] ۱۱۰
جدول (۵-۳) مقایسه قابلیت منابع مختلف در تولید بیودیزل در ایران [۲۸] ۱۱۳
جدول (۵-۴) مقایسه ویژگیهای ترانساستریفیکاسیون بازی و اسیدی ۱۱۸
جدول (۵-۵) شرح واردات بتا کاروتن ۱۲۲
جدول (۵-۶) بازار مصرف برخی از ترکیبات استخراج شده از ریزجلبک‌ها [۴۷] ۱۲۴
جدول (۵-۷) کاربرد ریزجلبک‌ها در صنایع غذای و دارویی ۱۲۶
جدول (۵-۸) ارزش تقریبی محصولات تولیدشده از گونه‌های مختلف و متداول مورد استفاده در بازارهای جهانی و کاربرد آن‌ها ۱۲۷
جدول (۸-۱) رده‌بندی و جایگاه سرده Dunaliella (Borowitzka and Siva 2007) ۱۶۲
جدول (۸-۲) بازار مصرف برخی از ترکیبات استخراج شده از ریزجلبک‌ها (Singh and Gu, 2010) ۱۷۷
جدول (۸-۳) کاربرد جلبک‌ها در تهیه داروها ۱۷۸
جدول (۸-۴) راندمان تولید بیودیزل از روغنهای گیاهی در قیاس با روغن ریزجلبکی (Chisti, 2007) ۱۸۴
جدول (۸-۵) ظرفیت تحمل CO_2 و دما در ریزجلبک‌های مقاوم ۱۸۷
جدول (۸-۶) جدول ۱-۶ محتوای روغن جنسهای ریزجلبکی مختلف (Ugwu *et al*. 2008) ۱۸۹
جدول (۸-۷) مقایسه قابلیت منابع مختلف در تولید بیودیزل در ایران (Tabatabaei *et al*. 2011) ۱۹۳
جدول (۸-۸) مقایسه ویژگیهای ترانساستریفیکاسیون بازی و اسیدی ۱۹۶
جدول (۹-۱) محیط کشت اصلاح شده جانسون برای کشت دونالیلا ۲۱۰
جدول (۱۰-۱) میزان حداکثری نرخ رشد ویژه، نرخ رشد ویژه، بهره‌وری بیومس، بیومس تولید شده، نرخ تثبیت CO_2 و میزان CO_2 تثبیت شده سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2 ..... ۲۳۷
جدول (۱۰-۲) جدول تجزیه‌ی واریانس (ANOVA) برای بررسی تغییرات ایجاد شده در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2 ..... ۲۳۹
جدول (۱۰-۳) جدول مقایسه میانگین تغییرات ایجاد شده در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2 ..... ۲۴۱
جدول (۱۰-۴) میزان و بهره‌وری لیپید و پاداکساینده‌های چربی‌دوست در غلظت‌های متفاوت CO_2 بر روی دو سویه بومی ۲۴۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۱۰-۵) نیمرخ اسیدهای چرب در پاسخ به غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار ..۲۴۹
جدول (۱۰-۶) ارزیابی خصوصیات اسیدهای چرب در غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار ۲۵۰
جدول (۱۰-۷) مقایسه میانگین اسیدهای چرب اشباع و اشباع نشده در پاسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی..... ۲۵۱
جدول (۱۰-۸) بررسی خواص فیزیکی بیودیزل تولیدی در سویههای دونالیلای بومی در غلظتهای مختلف CO_2 ..... ۲۵۲
جدول (۱۰-۹) خلاصه‌ای از مراحل انجام ازمایش مربوط به رشد ریزجلبک در سیستم ۵۰۰ لیتری فتوبیوراکتور .۲۵۳
جدول (۱۰-۱۰) نرخ رشد ویژه، بهره‌وری زیست‌توده، زیست‌توده تولیدشده، نرخ تثبیت CO_2 و میزان CO_2 تثبیت شده سویه بومی در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری ۲۶۰
جدول (۱۰-۱۱) نتایج حاصل از اندازهگیری غلظت گازهای موجود در خروجی دود ژنراتور و خروجی گاز مازاد از فتوبیوراکتور پس از فیلتر توسط ریزجلبک دونالیلا ۲۶۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مقدمه

فرضیه

۱- دود خروجی از سیستم DG-CHP حاوی بار حرارتی بالایی است که می توان از این توان جهت تولید انرژی گرمایی استفاده نمود.
۲- گازهای آلاینده موجود در دود خروجی سیستم DG-CHP می‌توانند توسط ریزجلبک جذب شوند.
۳- ریزجلبک‌ها دی اکسید کربن موجود در دود خروجی را به عنوان منبع کربن مورد استفاده قرار می‌دهند.
۴- زیست‌توده ریزجلبک تولیدی می‌تواند به عنوان منبع تولید سوخت زیستی و ترکیبات باارزش مورد استفاده قرار گیرد.

اهمیت مسئله

تولید روزافزون گازهای گلخانه‌ای و سایر گازهای آلاینده در کنار افزایش دمای کره زمین از معضلات اساسی است که تداوم حیات در کره زمین را با خطر مواجه کرده است. همچنین پاسخگویی به نیازهای رو به تزلید انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن محدودیت منابع فسیلی و آلودگی‌های محیط زیستی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها، از اولویت‌های اصلی به شمار می‌آید. از این رو، پروژه‌ها و برنامه‌های کلانی در سطح بین‌المللی توسط دولت‌ها و حتی سازمان‌های جهانی در این راستا و تحت عنوان "توسعه فرآیندهای دوست‌دار محیط زیست" در حال انجام است.
هدف اصلی این برنامه‌ها عبارتست از:
۱- افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات انرژی
۲- کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای
۳- توسعه فناوری‌های نوین جهت جذب و کاهش گازهای گلخانه‌ای
۴- کاهش اتکا به منابع سوخت‌های فسیلی
۵- تولید اقتصادی انرژی از منابع تجدیدپذیر

آلودگی‌های محیط زیستی و نیز تأمین انرژی، یکی از دغدغه‌های کشورمان محسوب می‌شود. همچنین، با توجه به وسعت زیاد کشور و پراکنش جمعیت و مراکز تولید فراورده‌های کشاورزی، تأمین انرژی در مراکز دوردست با هزینه‌های بالایی همراه است. بنابراین، توسعه نیروگاه‌های کوچک در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته است. توسعه این نیروگاه‌ها می‌تولند هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی را کاهش دهد. اما در صورتی که بتوان از توان حرارتی موجود در گازهای خروجی جهت تولید انرژی گرمایشی نیز استفاده کرد، می‌توان راندمان تولید انرژی را بیش از پیش

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

افزایش داد که این مسئله نیز در دستور کار وزارت نیرو قرار دارد. اما نکته اساسی دیگر گازهای آلاینده‌ای است که در دود خروجی وجود دارد. تولید این گازها در صورت عدم جذب، بر بار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های محیط‌زیستی می‌افزاید. بنابراین، روش‌های مختلفی برای حذف این آلاینده‌ها پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها، استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی است. در روش‌های بیولوژیکی بر پایه جلبک‌ها، این موجودات می‌توانند گازهای آلاینده را حذف و از دی اکسید کربن (مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای) به عنوان منبع کربن جهت رشد خود استفاده نمایند. بنابراین، در این شیوه نه تنها آلاینده‌ها حذف می‌شود، بلکه گاز دی اکسید کربن به ترکیبات آلی باارزش که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل می‌شود. سوخت‌های زیستی از فراورده‌هایی هستند که از جلبک‌ها قابل استحصال هستند. در صورتی که بتوان جلبک‌های تولیدکننده سوخت‌های زیستی را در این سامانه کشت نمود، می‌توان سامانه موجود را به صورت یک سیکل بسته تعریف کرد که می‌تواند نهایتاً بخشی یا تمام انرژی لازم برای چرخش سیستم را نیز تأمین نماید. همچنین، بخشی از دی اکسید کربن نیز می‌تواند جهت پروش گیاهان گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

هدف اصلی

ارائه یک فرآیند جدید دوستدار محیط زیست جهت تولید و تأمین انرژی از طریق:

- طراحی، ساخت و ارزیابی کارکرد "سامانه دوستدار محیط زیست تولید انرژی و محصولات زیستی-کشاورزی"

سایر اهداف

۱- افزایش بهره‌وری انرژی
۲- حذف بیولوژیکی گازهای آلاینده
۳- استفاده از دی اکسید کربن تولیدی جهت پرورش جلبک‌های تولیدکننده سوخت‌های زیستی و پرورش گیاه

نتایج مورد انتظار و دستاوردهای جانبی

نتیجه و دستاورد اصلی عبارت است از: راه‌اندازی "سامانه دوستدار محیط زیست تولید انرژی و محصولات زیستی-کشاورزی"
سایر دستاوردهای جانبی عبارت است از:

- تولید انرژی گرمایی مورد نیاز گلخانه
- حذف بیولوژیکی گازهای آلاینده توسط سامانه فتوبیوراکتور
- پرورش ریزجلبک‌های تولیدکننده سوخت زیستی و تولید محصولات گلخانه‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- تولید فراورده‌های با ارزش از ریزجلبک‌ها

در فصـــل اول گزارش، کلیات طرح بهره‌برداری از حرارت و دودهای خروجی از یک ســـیســـتم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سـوخت زیسـتی و پرورش گیاه در گلخانه معرفی می‌گردد. در فصـل دوم، طراحی و انتخاب سامانه تولید همزمان برق و حرارت (CHP) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱- فصل اول : معرفی طرح

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱-۱- مقدمه

تولید روزافزون گازهای گلخانه‌ای و سایر گازهای آلاینده در کنار افزایش دمای کره زمین از معضلات اساسی است که تداوم حیات در کره زمین را با خطر مواجه کرده است. همچنین پاسخگویی به نیازهای رو به تزلید انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن محدودیت منابع فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها از اولویت‌های اصلی به شمار می آید. از اینرو پروژه‌ها و برنامه‌های کلانی در سطح بین‌المللی توسط دولت‌ها و حتی سازمان‌های جهانی در این راستا و تحت عنوان "توسعه فرآیندهای دوستدار محیط زیست" در حال انجام است. هدف اصلی این برنامه‌ها عبارتست از:

۱- افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات انرژی
۲- کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای
۳- توسعه فناوری‌های نوین جهت جذب و کاهش گازهای گلخانه‌ای
۴- کاهش اتکا به منابع سوخت‌های فسیلی
۵- تولید اقتصادی انرژی از منابع تجدیدپذیر

آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیز تأمین انرژی یکی از دغدغه‌های کشورمان محسوب می‌شود. همچنین با توجه به وسعت زیاد کشور و پراکنش جمعیت و مراکز تولید فراورده‌های کشاورزی، تامین انرژی در مراکز دوردست با هزینه‌های بالایی همراه است. بنابراین توسعه نیروگاه‌های کوچک در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته است. توسعه این نیروگاه‌ها می‌تولند هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی را کاهش دهد. اما در صورتی که بتوان از توان حرارتی موجود در گازهای خروجی جهت تولید انرژی گرمایشی نیز استفاده کرد، می‌توان راندمان تولید انرژی را بیش از پیش افزایش داد که این مسئله نیز در دستور کار وزارت نیرو قرار دارد. اما نکته اساسی دیگر گازهای آلاینده‌ای است که در دود خروجی وجود دارد. تولید این گازها در صورت عدم جذب بر بار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌افزاید. بنابراین روش‌های مختلفی برای حذف این آلاینده‌ها پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی است. در روش‌های بیولوژیکی برپایه جلبک‌ها، این موجودات می‌توانند گازهای آلاینده را حذف و از دی اکسید کربن (مهمترین گاز گلخانه ای) به عنوان منبع کربن جهت رشد خود استفاده نمایند. بنابراین در این شیوه نه تنها آلاینده‌ها حذف می‌شود، بلکه گاز دی اکسید کربن به ترکیبات آلی با ارزش که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل می‌شود. سوخت‌های زیستی از فراورده‌هایی هستند که از جلبک‌ها قابل استحصال است. در صورتی که بتوان جلبک‌های تولیدکننده سوخت‌های زیستی را در این سامانه کشت نمود، می‌توان سامانه موجود را به صورت یک سیکل بسته تعریف کرد که می‌تواند نهایتاً بخشی یا تمام انرژی لازم برای چرخش سیستم را نیز تأمین نماید. همچنین بخشی از دی اکسید کربن نیز می‌تواند جهت پروش گیاهان گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

تولید پراکنده برق مزایای فنی و اقتصادی فراوانی برای وزارت نیرو به عنوان متولی تامین برق کشور به ارمغان دارد. از این رو سیاست‌گذاری برای تامین برق در محل مصرف به منظور تمرکززدایی از واحدهای نیروگاهی، بهبود قابلیت اطمینان شبکه و افزایش بهره‌وری، تحت عنوان "طرح توسعه تولید پراکنده" طرح‌ریزی شده است. رسالت این طرح،

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

ارائه تسهیلات و مشوق‌هایی برای افزایش تولید برق در شبکه‌های توزیع و توسط بخش خصوصی است. در میان انواع فناوری‌های تولید برق، نصب و بهره‌برداری از منابع تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، با توجه به بهره‌وری بالاتر، شاخص‌های اقتصادی مناسب‌تری داشته و با اقبال بخش خصوصی روبرو شده است.

در این راستا پژوهشگاه نیرو به منظور آگاه‌سازی سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و تحقق اهداف طرح یادشده، علاوه بر معرفی کلیات طرح، فرصت‌های سرمایه‌گذاری و مشوق‌های دولتی طرح تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، در تاریخ ۱۳۹۴/۰۹/۲۹ همزمان با مراسم جشنواره پژوهش و فناوری وزارت نیرو که در محل سالن خلیج فارس پژوهشگاه نیرو برگزار شد برای اولین بار در ایران قراردادی را با پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران منعقد نمود که بر اساس آن «بهره‌برداری از حرارت و دودهای خروجی از یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه» در دستور کار قرار گرفت.

این قرارداد را آقای دکتر مجید عمیدپور رئیس پژوهشکده انرژی و محیط زیست پژوهشگاه نیرو و خانم دکتر نیراعظم خوش خلق سیما رئیس پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران امضا کردند که در زمان امضای قرارداد، آقای مهندس مهاجری معاون پژوهشی وزیر نیرو، آقای دکتر زند معاون وزیر جهاد کشاورزی و همچنین آقای دکتر قاضی‌زاده رئیس پژوهشگاه نیرو حضور داشتند.

با اجرایی شدن این طرح ضمن تولید محصولات زیستی با ارزش، راندمان کلی سیستم CHP را می‌توان به ارقامی بالاتر از ۸۰٪ رساند. همچنین با استفاده از دی اکسید کربن خروجی از موتور CHP برای پرورش جلبک‌های بومی باارزش، عملاً جذب کربن مازاد و کاهش میزان آلاینده‌های کربنی در جو نیز حاصل می‌شود که خود دستاورد بزرگی به حساب می‌آید.

این طرح آغاز عملیاتی نمودن یک نقشه راه کلی در پژوهشگاه نیرو برای استفاده همزمان از فناوری‌های زیستی- کشاورزی، تولید توان و حرارت، تولید آب شیرین، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با سوخت پاک و سبز است که می‌تواند زمینه و بستر لازم را برای راه‌اندازی کسب و کارهای روستایی کوچک به منظور ایجاد اشتغال برای روستاهای کم جمعیت نیز فراهم نماید.

۱-۲- سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP)

در روش تولید پراکنده به جای تولید متمرکز و توزیع، از نیروگاه‌های کوچک که در نزدیکی و یا در مجاورت محل مصرف تأسیس می‌شوند استفاده می‌شود. لذا از میزان تلفات انرژی برق در نیروگاه‌های بزرگ شامل ۴٪ مصرف داخلی نیروگاه‌ها، ۴/۵٪ تلفات شبکه‌های انتقال و ۱۷/۵٪ تلفات شبکه توزیع که در روش تولید و انتقال و توزیع سنتی هدر می‌رفت جلوگیری می‌شود.

در روش تولید پراکنده، به علت نزدیکی به محل مصرف، امکان تولید حرارت همزمان با برق فراهم است. معمولاً تولید همزمان (DG) به تولید همزمان برق و حرارت (CHP) اطلاق می‌شود. تولید همزمان برق و حرارت یا CHP نیز عبارتست از تولید همزمان چند نوع انرژی قابل استفاده (معمولاً مکانیکی و گرمایی) در یک سیستم واحد و یکپارچه.

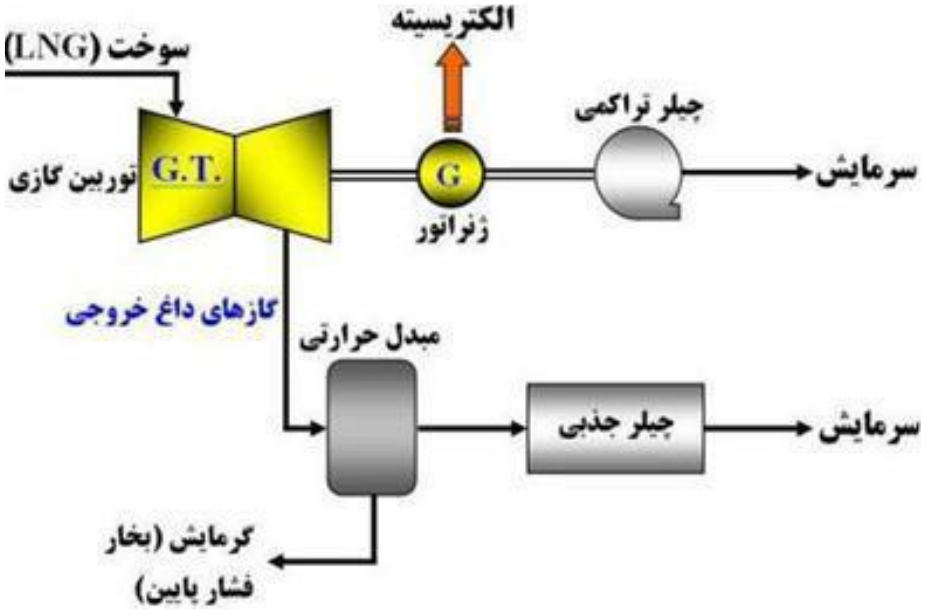
DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۱) نمایی از یک نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت (CHP)

در فناوری CHP به صورت همزمان حرارت قابل استفاده و انرژی الکتریکی در پروسه‌ای واحد و با بازدهی بالا تولید می‌شود. در حالی که در روش‌های معمول ۶۰ درصد انرژی تولید شده به شکل بخار بر فراز برج خنک‌کننده هدر می‌رود، در سیستم CHP این حرارت همزمان با پروسه تولید انرژی الکتریکی جذب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد و این امر باعث افزایش بازدهی سیستم تا ۸۰ درصد در محل استفاده می‌گردد.
یک سیستم CHP از اجزاء مختلفی تشکیل شده است: مولد قدرت اولیه (Prime Mover)، مبدل‌های حرارتی بازیافت گرما، ژنراتور، لوله‌ها و اتصالات و سایر تجهیزات جانبی از قبیل پمپ‌ها، عایق‌بندی‌ها و .... همچنین در سیستم‌هایی که از گرمای بازیافت شده جهت مصارف سرمایشی استفاده می‌شود از یک چیلر تراکمی یا جاذبی نیز در کنار سایر تجهیزات استفاده می‌شود. در شکل زیر شماتیک یک سیستم تولید همزمان توربین گاز که برای مصارف سرمایشی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان داده شده است. به این قبیل سیستم‌ها که در آن به طور همزمان برق، گرما و سرما تولید می‌شود اصطلاحاً Trigeneration یا CCHP گفته می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۲) تولید همزمان برق، حرارت و سرما (CCHP)

۱-۲-۱- مؤلفه‌های هزینه‌ای سرمایه‌گذاری در بخش CHP

- هزینه‌های اولیه نصب سیستم
- هزینه‌های بهره‌برداری (شامل هزینه پرسنل/ فیلتر و روغن/ نگهداری و تعمیر/ استهلاک تجهیزات)

۱-۲-۲- مؤلفه‌های درآمدی سرمایه‌گذاری در بخش CHP

- فروش برق مولدها به شبکه سراسری با قرارداد خرید تضمینی ۵ ساله
- فروش برق به مشترکین خصوصی و تجاری برق
- استفاده از حرارت سرسیلندر و اگزوز مولد به صورت‌های مختلف (از جمله تولید گازکربنیک/آب مقطر/سردخانه/گلخانه/استخر/سرمایش و گرمایش)
- فروش حق انتشار آلاینده (Emission Right) برابر ضوابط پیمان کیوتو

۱-۲-۳- سیاست‌های تشویقی دولت

- خرید تضمینی برق تا ۵ سال
- سوخت رایگان تا ۵ سال

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- افزایش ۳ برابری نرخ خرید تضمینی
- احتساب پرداخت‌ها در طبقه دیون ممتاز
- پیش‌پرداخت تولید برق ۳ ماه
- زمین رایگان در شهرک‌های صنعتی
- پرداخت صورتحساب برق در صورت عدم تولید به دلیل قطع گاز
- تسهیل شرایط فروش برق به مشترکین تجاری
- امکان فروش مستقیم به مشترکین و صادرات بـرق

۱-۲-٤- مزیت‌های سرمایه‌گذاری و شاخص‌های اقتصادی

حمایت‌های دولت در تامین رایگان سوخت و خرید تضمینی برق، به همراه امکان کسب درآمد از حرارت مولدها از مهم‌ترین مزیت‌های سرمایه‌گذاری در حوزه تولید انرژی به شمار می‌آیند. مولفه‌های درآمدی و هزینه‌ای سرمایه‌گذاری در احداث مولدهای CHP به شرح ذیل می‌باشد:

۱-۲-٤-۱- درآمدها

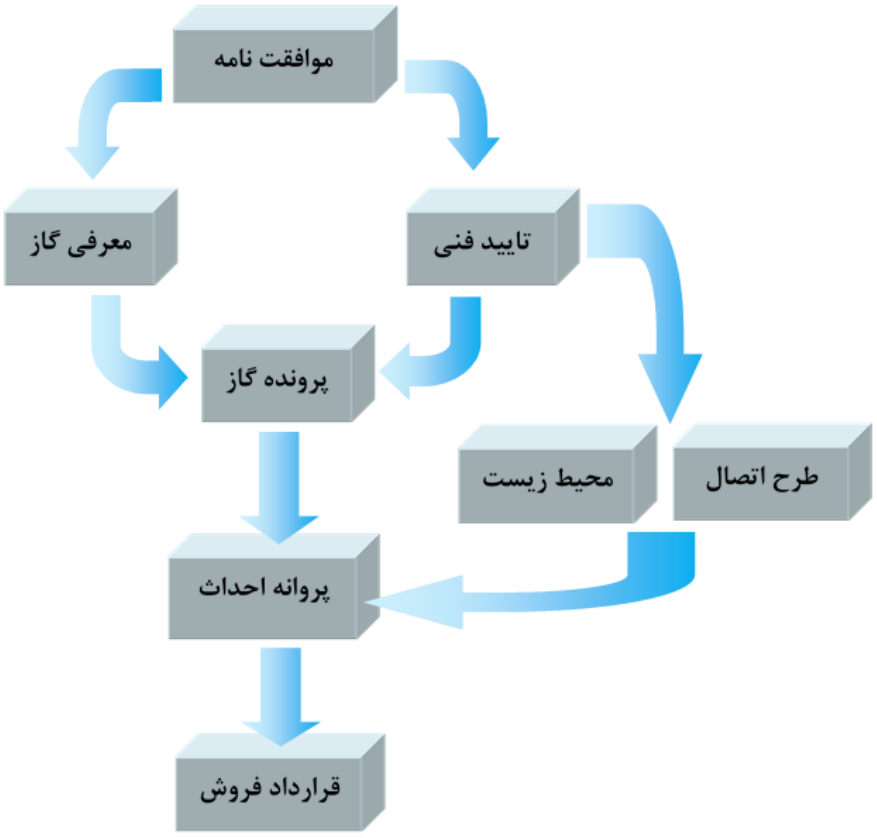
- فروش برق به شبکه (تعدیل سالانه: ۱۵ تا ۲۵٪) : انرژی الکتریکی تولیدی مولدها بسته به راندمان کاری بین ۹۰ تا ۱۱۰ تومان به ازای هر کیلووات‌ساعت خریداری شده و قرارداد خرید تضمینی تا ۵ سال منعقد خواهد شد. صورت‌وضعیت برق تولیدی در طبقه دیون ممتاز بوده و در پایان هر ماه به شرکت توانیر ارسال و در کمتر از ۱۵ روز توسط این شرکت پرداخت می‌شود. درآمد ناخالص ماهانه فروش برق مولد ۱مگاواتی حدود ۷۰ میلیون تومان در ماه می‌باشد.
- استفاده از حرارت مولد در فرآیندهای تولید محصول یا کاهش مصرف سوخت : استفاده از حرارت مولد با توجه به پتانسیل‌های منطقه برای بهره‌گیری از حرارت برآورد می‌شود. معمولاً از حرارت مولدها در فرآیندهای زیر استفاده می‌شود:
  - تولید گازکربنیک از دود مولد (۲۰۰ کیلوگرم در ساعت به ازای ۱ مگاوات- قیمت هر تن ۴ میلیون ریال)
  - تولید آب مقطر
  - تولید برودت در چیلر جذبی و تزریق به سردخانه (۳۰۰ تن تبرید به ازای هر ۱ مگاوات)
  - تزریق گرما و گازکربنیک به گلخانه‌ها برای تسریع روند رشد
  - تولید آب گرم برای استخرها و مصرف ساختمان (۷۰ مترمکعب در ساعت به ازای هر ۱ مگاوات)
- فروش Emission Right : با توجه به رلندمان کاری مولدهای تولید همزمان برق و حرارت، به ازای هر ۱ مگاوات ظرفیت نصب شده سالانه از انتشار ۳۰۰۰ تن گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌شود. برابر مفاد پیمان کیوتو، با ثبت پروژه به عنوان یک پروژه دوستدار محیطزیست، گواهی حق انتشار آلاینده به صاحب مولد اعطا و برابر قیمت روز Emission Right در بورس‌های جهانی (متوسط قیمت ۲ دلار در سال ۲۰۱۴ و با پیش‌بینی قیمت بین ۵ تا ۱۰ دلار در سال ۲۰۱۵)، باعث درآمدزایی تا ۱۰ سال خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱-۲-٤-۲- هزینه‌ها:

- ❑ هزینه اولیه
  - ▪ مولد و تاسیسات اتصال به شبکه به ازای هر ۱ مگاوات حدود ۱.۷ میلیارد تومان
  - ▪ هزینه تاسیسات بازیافت حرارت
  - ▪ هزینه‌های تملک/اجاره زمین
  - ▪ هزینه ثبت پروژه به عنوان پروژه دوستدار محیط‌زیست
- ❑ هزینه ماهانه (افزایش سالانه حدود ۲۰٪)
  - ▪ هزینه سوخت حدود ۱۸ میلیون تومان (این هزینه ماهانه صورت‌وضعیت و توسط توانیر پرداخت می‌شود)
  - ▪ هزینه روغن و فیلتر حدود ۵ میلیون تومان
  - ▪ هزینه پرسنل (برای کل سایت) حدود ۱۰ میلیون تومان

۱-۲-۵- روند سرمایه‌گذاری



شکل (۱-۳) روند سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های تولید پراکنده

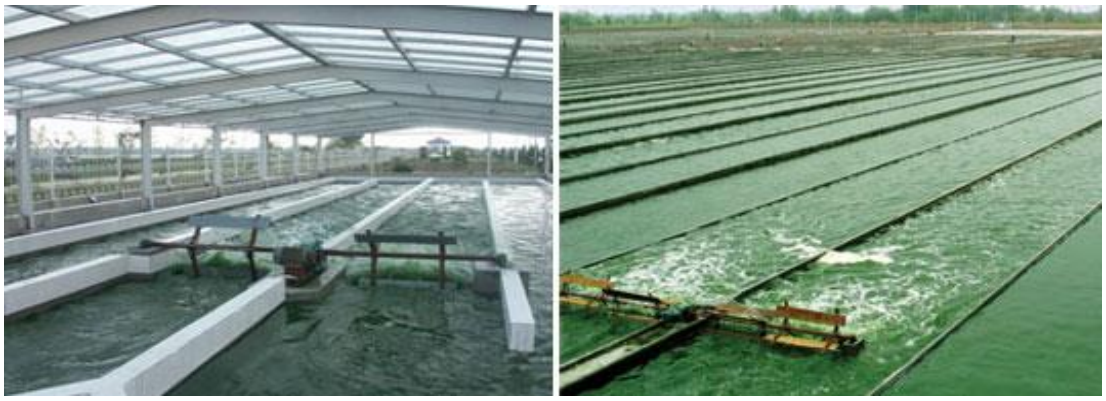
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱-۳- سیستم‌های پرورش جلبک

جلبک‌ها به دو گروه طبقه‌بندی می‌شـــوند: میکروجلبک‌ها (ریزجلبک‌ها) و ماکروجلبک‌ها (درشـــت‌جلبک‌ها). ماکروجلبک‌ها اندازه بزرگی (در حدود یک اینچ و بزرگتر) داشـته، پر سـلولی بوده و اغلب در برکه‌ها و تالاب‌ها دیده می‌شـــوند. در مقابل ریزجلبک‌ها اندازه بســـیار ریزی (در حد میکرومتر) داشـــته و تک‌ســـلولی بوده و به صـــورت سوسپانسیون در آب رشد می‌کنند. ریزجلبک‌ها اغلب همان کدورت ایجادشده در آب تالاب‌ها و حتی در آکواریوم‌ها هستند که سرعت رشد هر دو نوع جلبک بسیار بالاست. ریزجلبک‌ها قادرند در هر چند ساعت در طی رشد لگاریتمی دو برابر شوند. این رشد سریع باعث شده که محصولاتی آینده‌دار بشمار روند.

به طورکلی ماکروجلبک‌ها حاوی لیپید نیستند و بیشتر حاوی قندهای طبیعی و سایر کربوهیدرات‌ها هستند که قابلیت تخمیر به بیوگاز یا سوخت‌های پایه الکلی دارند. اما ریزجلبک‌ها به علت داشتن راندمان فتوسنتزی بالا و قابلیت تولید لیپید جهت تولید بیودیزل به طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته‌اند.

ریزجلبک‌ها به صورت وسیعی در سیستم‌های کشت باز و بسته رشد می‌کنند. سیستم‌های باز اغلب در مقیاس وسیع و در سـطح تجاری مورد اسـتفاده قرار می‌گیرند و در این سـیسـتم‌ها ریز جلبک‌ها به طور مسـتقیم با محیط بیرون در ارتباط هستند.



شکل (۱-۴) روش‌های کشت روباز جلبک

در سیستم‌های بسته، ریزجلبک با محیط تماس مستقیم ندارد. سیستم‌های بسته با عنوان فتوبیوراکتور نیز شناخته می‌شـــوند. فتوبیوراکتورهای بســـته در انواع راکتورهای ســـتونی عمودی، راکتورهای همزن‌دار (اغلب با نور داخلی)، راکتورهای لوله‌ای و راکتورهای صـــفحه تخت موجود می‌باشـــند. راکتورهای صـــفحه تخت معمولاً از یک محفظه مستطیل شکل با عمق ۱-۱۰ سانتی متر و ارتفاع و عرضی که عملاً بیش از ۱ متر نمی‌باشد تشکیل می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290




شکل (۱-۵) روش‌های کشت جلبک در محیط بسته

استفاده از فتوبیوراکتور در مقایسه با سیستم‌های باز دارای مزیت نیاز به فضای کمتر و هزینه برداشت پایین است. از دیگر مزایای عمده فتوبیوراکتورها می‌توان به جلوگیری از آلودگی محیط کشت، کنترل بهتر شرایط کشت مانند دما و pH، ممانعت از تبخیر آب محیط و اتلاف گاز دی اکسید کربن و حصول غلظت بالای سلولی اشاره کرد.
ورودی‌های اصلی سیستم‌های بسته شامل جلبک، نور، آب، دی اکسید کربن و منابع نیتروژن و فسفر می‌باشد. اختلاط مناسب در سیستم‌های بسته باعث جلوگیری از ته‌نشینی سلول‌ها در فتوبیوراکتور، توزیع مناسب مواد مغذی، حذف اکسیژن تولیدی از فتوسنتز، تامین و توزیع مناسب دی اکسید کربن و افزایش نوررسانی در فتوبیوراکتور خواهد شد.

۱-۳-۱- مواد غذایی ضروری جلبک‌ها

به طور خلاصه عناصر مورد نیاز جهت تغذیه جلبک‌ها به شرح ذیل می‌باشند:
۱- نمک کل که با توجه به محل زندگی اصلی جلبک تعیین می‌شود.
۲- ترکیبات یونی اصلی که در ترکیب سلولی وجود دارد مثل Na^{+}، Mg^{2+}، K^{+}، Ca^{2+}، $SO4^{2-}$ و Cl^{-}
۳- منبع نیتروژن به ویژه نیترات، آمونیوم و اوره
۴- منبع کربن مثل CO_2 یا HCO_3^{-}
۵- عناصر کم‌مصرف و برخی کلات‌کننده‌ها مثل اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA)
۶- ویتامین‌ها

۱-۳-۲- کاربردهای ریزجلبک‌ها

- کاربرد ریزجلبک به عنوان غذا
- کاربرد ریزجلبک به عنوان خوراک دام، طیور و آبزیان
- کاربرد ریزجلبک در کشاورزی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- کاربرد ریزجلبک در صنایع دارویی
- کاربرد ریزجلبک در مسافرت‌های فضایی
- کاربرد ریزجلبک در تصفیه فاضلاب و پساب‌ها
- کاربرد ریزجلبک در تولید سوخت‌های بیولوژیکی

۱-٤- معرفی طرح

این طرح که برای اولین بار در کشور و منطقه خاور میانه اجرا می‌شود به منظور طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه پایلوت دوستدار محیط زیست با قابلیت تولید انرژی و محصولات زیستی و کشاورزی عملیاتی شده است. یکی از اهداف مهم طرح حاضر ادغام مراحل مختلف فرایندی و استفاده از فناوری‌های نوین زیستی جهت کوچک‌سازی فرایندها، افزایش بهره‌وری سیستم، هوشمندسازی آن و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی است که اجرای آن با بهره‌مندی از توان رشته‌های مهندسی برق، الکترونیک، مکانیک و فناوری نوین زیستی میسر شده است. بومی‌سازی فناوری و نوآورانه‌بودن سیستم جذب زیستی دی اکسید کربن از شاخصه‌های مهم این طرح می‌باشد.
اجرای طرح همزمان با هفته پژوهش با امضاء موافقتنامه پژوهشی فیمابین رؤسای محترم پژوهشگاه نیرو و پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران در حضور وزیر محترم نیرو و سایر مقامات وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی در سال ۹۴ آغاز شد. در ساختار اجرایی این طرح، پژوهشگاه نیرو به عنوان کارفرما و پژوهشکده بیوتکنولوژی منطقه شمالغرب و غرب کشور واقع در شهر تبریز به عنوان دستگاه مجری وظیفه اجرای طرح را بر عهده دارد. صندوق پژوهش و فناوری صنعت برق و انرژی (مستقر در پژوهشگاه نیرو) نیز با اعطای تسهیلات به عنوان حامی ایفای نقش نموده است.

۱-٤-۱- فرضیه اصلی

۱- دود خروجی از سیستم DG-CHP حاوی بار حرارتی بالایی است که می‌توان از این توان جهت تولید انرژی گرمایی استفاده نمود.
۲- گازهای آلاینده موجود در دود خروجی سیستم DG-CHP می‌توانند توسط ریزجلبک جذب شوند.
۳- ریزجلبک‌ها دی اکسید کربن موجود در دود خروجی را به عنوان منبع کربن مورد استفاده قرار می‌دهند.
۴- زیست‌توده ریزجلبک تولیدی می‌تواند به عنوان منبع تولید سوخت زیستی و ترکیبات باارزش مورد استفاده قرار گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۶) نمای کلی طرح

۱-٤-۲- مراحل طراحی

- ارتقاء مولد تولید همزمان برق و حرارت (CHP) و گازسوز کردن آن

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۷) نمای موتور ژنراتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز

❑ طراحی و ساخت سیستم‌های بازیافت حرارت





شکل (۱-۸) نمای سیستم بازیابی حرارت

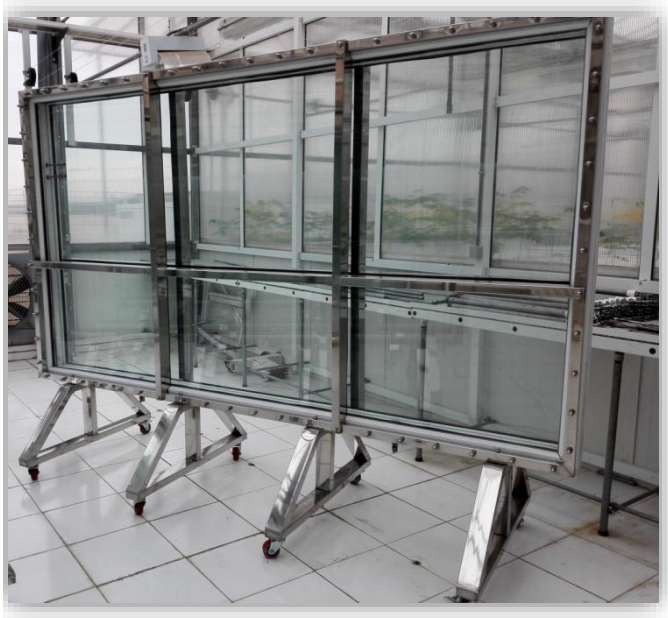
- مشخصات فنی
  - مخزن گالوانیزه به ظرفیت ۴۰۰ لیتر
  - پمپ با قدرت حداقل ۰/۵ اسب و اداوات برقی و کنترلی
  - رادیاتور آلومینیومی با سطح ۱ متر مربع

❑ طراحی و ساخت فتوبیوراکتور

- مشخصات فنی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- فتوبیوراکتور صفحه تخت مسطح با ابعاد ۱/۷ × ۳ متر
- ارتفاع کاری : ۱/۵ متر
- ظرفیت : ۳۰۰ لیتر
- تعداد : ۵ عدد
- مجهز به سیستم کنترلی پیشرفته (کنترل دما، pH، کنترل کف، کنترل ارتفاع مایع و تنظیم دوره‌های روشنایی- تاریکی)





شکل (۱-۹) فتوبیوراکتورهای پرورش جلبک

❑ طراحی و ساخت سیستم جمع‌آوری جلبک

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۱۰) سیستم جمع‌آوری جلبک

۱-٤-۳- ویژگی‌های طرح

- همراستا با اهداف اولویت‌دار وزارت نیرو در بخش توسعه تولید پراکنده برق و حرارت (CHP)
- همراستا با اهداف وزارت جهاد کشاورزی در توسعه روستایی و استفاده از آب‌های غیرمتعارف
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های تولید برق کشور
- جذب دی اکسید کربن (CO_2 Capturing)
- اجرای طرح برای نخستین بار در کشور و منطقه خاورمیانه

۱-٤-٤- مشخصات فنی طرح

- مولد تولید همزمان برق و حرارت (CHP) به ظرفیت (kW) ۲۵۰
- بازیابی حرارت تولیدشده توسط این مولد CHP و بهره‌گیری از آن برای گرمایش فضای گلخانه‌ای و تأمین آب گرم مصرفی
- جذب دود خروجی اگزوز موتور مولد CHP به عنوان یکی از عناصر مورد نیاز برای پرورش ریزجلبک‌های استحصال شده
- پتانسیل بالای پرورش جلبک با استفاده از روش سیستم بسته (فتوبیوراکتور)
- بهره‌گیری از ۵ فتوبیوراکتور با ظرفیت ۲۵۰ لیتر

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- پرورش جلبک شورپسند با نام "دونالیلا" که قابلیت پرورش در آب شور از مزایای آن می‌باشد
- امکان تولید ترکیبات با ارزش دارویی و بهداشتی و مکمل‌های غذایی از بیومس (زیست‌توده) جلبک
- امکان روغن‌گیری از بیومس (زیست‌توده) جلبک و تولید بیودیزل

۱-٤-٥- دستاورهای طرح

- طراحی، ساخت و راه‌اندازی سامانه دوستدار محیط زیست DG-CHP برای تولید انرژی و محصولات زیستی کشاورزی
- تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز گلخانه با استفاده از توان حرارتی دودهای خروجی
- حذف بیولوژیکی دودهای خروجی توسط سامانه فتوبیوراکتور
- استفاده از دی اکسید کربن تولیدی جهت پرورش ریزجلبک‌های مولد سوخت زیستی و تولید محصولات گلخانه‌ای
- تولید فراورده‌های فراسودمند آرایشی و بهداشتی از ریزجلبک‌ها با همکاری بخش خصوصی

۱-٤-٦- مزایای اقتصادی

- امکان حذف تا ۱۰۰۰ تن دی‌اکسید کربن در سال
- تولید بیومس جلبک به ارزش (حداقل) ۳۰۰ میلیارد ریال در سال
- در صورت تولید روغن حاوی امگا ۳، ارزش روغن استحصالی در حدود ۳۵ میلیارد تومان در سال
- ارزش بتاکاروتن تولیدی به صورت دارویی و مکمل غذایی در حدود ۴۶ میلیارد تومان در سال
- در آمد حاصل از جذب دی اکسید کربن حداقل در حدود ۲ میلیارد تومان در سال
- افزایش بهره‌وری و کاهش اتلاف انرژی
- کاهش تولید گازهای آلاینده و ارتقاء سلامت مردم
- کاهش هزینه‌های مربوط به حذف این گازها از طریق تولید محصولات با ارزش نسبت به فرایندهای مشابه دیگر
- ایجاد اشتغال از طریق تشکیل شرکت‌های دانش بنیان

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱-۱۱) مزایای اجرای طرح



شکل (۱-۱۲) محصولات آرایشی و بهداشتی تولیدشده از کشت جلبک

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱-۵- بهره‌برداری و افتتاح طرح

در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۲۱ و همزمان با سفر وزیر محترم نیرو به استان آذربایجان شرقی به مناسبت فرا رسیدن سی و نهمین بهار انقلاب، طرح ملی "بهره‌برداری از دودهای خروجی یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه" افتتاح و مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

وزیر نیرو در مراسم افتتاح این طرح ملی گفت: این پروژه به منظور ساخت و ارزیابی یک سامانه دوستدار محیط زیست با قابلیت تولید انرژی و محصولات زیستی و کشاورزی اجرا می‌شود.

وی افزود: از اهداف دیگر اجرای این پروژه استفاده از دی اکسید کربن و حرارت تولیدی جهت پرورش جلبک‌های تولیدکننده سوخت‌های زیستی و تولید محصولات گلخانه‌ای و توسعه فناوری جذب و حذف گازهای بیولوژیکی گازهای آلاینده است.

مهندس چیت‌چیان با اشاره به دستاوردهای این سامانه گفت: از دستاوردهای این پروژه تولید انرژی گرمایی موردنیاز گلخانه، تولید فرآورده‌های با ارزش از زیرجلبک‌ها و حذف بیولوژیکی گازهای آلاینده توسط سامانه فتوبیوراکتور است. در ادامه این فصل، تصاویری از افتتاح طرح ملی "بهره‌برداری از دودهای خروجی یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی و پرورش گیاه در گلخانه" با حضور وزیر محترم نیرو، جناب آقای مهندس چیت‌چیان ارائه شده است.

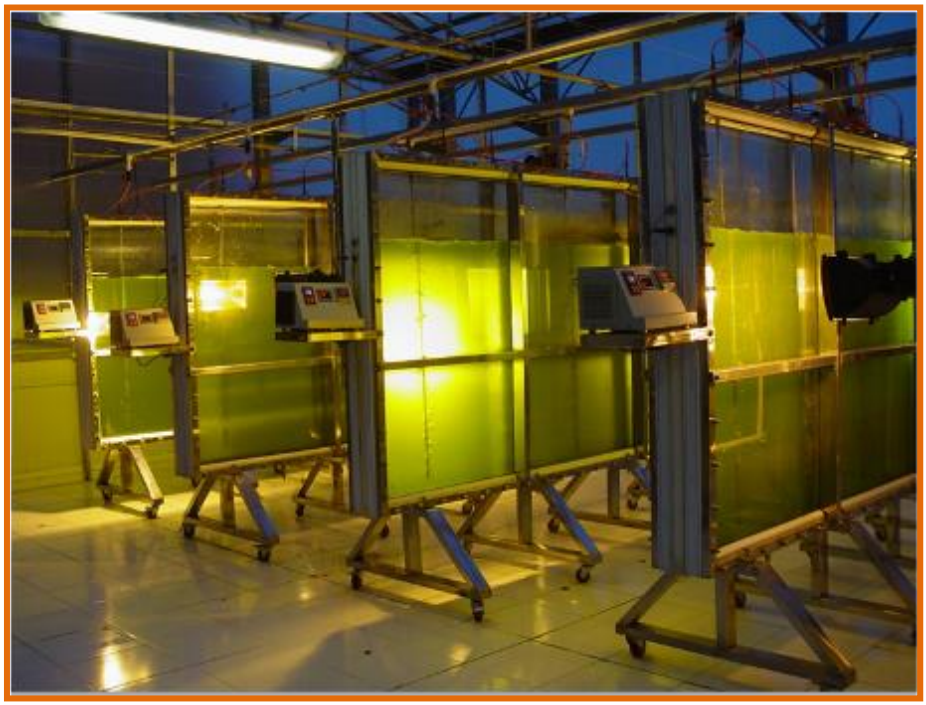


DOI: 10.30503/nripress.2020.290





DOI: 10.30503/nripress.2020.290



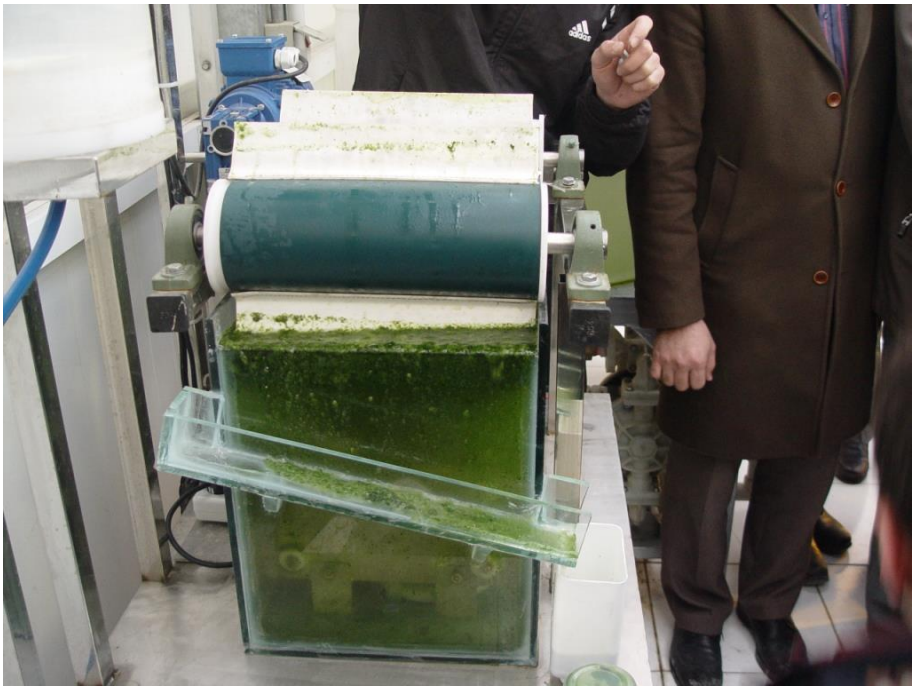


DOI: 10.30503/nripress.2020.290





DOI: 10.30503/nripress.2020.290





DOI: 10.30503/nripress.2020.290



DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲- فصل اول : طراحی و انتخاب سامانه تولید همزمان برق و حرارت (CHP)

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲-۱- مقدمه

تولید پراکنده برق مزایای فنی و اقتصادی فراوانی برای وزارت نیرو به عنوان متولی تأمین برق کشور به ارمغان دارد. از این رو سیاست‌گذاری برای تأمین برق در محل مصرف به منظور تمرکززدایی از واحدهای نیروگاهی، بهبود قابلیت اطمینان شبکه و افزایش بهره‌وری، تحت عنوان "طرح توسعه تولید پراکنده" طرح‌ریزی شده است. رسالت این طرح، ارائه تسهیلات و مشوق‌هایی برای افزایش تولید برق در شبکه‌های توزیع و توسط بخش خصوصی است.
در میان انواع فناوری‌های تولید برق، نصب و بهره‌برداری از منابع تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، با توجه به بهره‌وری بالاتر، شاخص‌های اقتصادی مناسب‌تری داشته و با اقبال بخش خصوصی روبرو شده است.
رشد سریع فناوری با راندمان بالا از یک طرف و وجود آلودگی هوا و محیط زیست ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در فناوری‌هایی که راندمان پایین و آلودگی زیادی تولید می‌کنند از طرف دیگر سبب شده تا جهان به مولدهای تولید پراکنده (DG) برق و حرارت توجه بیشتری داشته باشد. امروزه لزوم سرمایه‌گذاری در امر توسعه بخش عرضه انرژی و کاهش تلفات در شبکه توزیع و انتقال انرژی از دغدغه‌های عمده کشور محسوب می‌شود که توسعه تولید پراکنده در صنایع، پالایشگاه‌ها، شهرک‌های صنعتی و مسکونی می‌تواند از جمله روش‌های رفع این نگرانی‌ها باشد. در فناوری CHP بصورت همزمان حرارت قابل استفاده و انرژی الکتریکی در پروسه‌ای واحد و با بازدهی بالا تولید می‌شود. در حالی که در روش‌های معمول ۶۰ درصد انرژی تولید شده به شکل بخار بر فراز برج خنک‌کننده هدر می‌رود، در سیستم CHP این حرارت همزمان با پروسه تولید انرژی الکتریکی جذب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد و این امر باعث افزایش بازدهی سیستم تا ۸۰ درصد در محل مصرف می‌شود. با توجه به استقرار مولدهای تولید پراکنده در محل‌های مصرف، تلفات توزیع و انتقال کاهش یافته و همچنین کیفیت توانی که در اختیار مصرف کننده نهایی قرار می‌گیرد در مقایسه با واحدهای بزرگ نیروگاهی بهتر خواهد بود. احداث این واحدها حجم سرمایه‌گذاری بالایی را در بر نخواهد داشت و لذا، توسعه مشارکت بخش خصوصی را فراهم می‌سازد. زمان کوتاه ساخت و احداث واحدها از دیگر مزایای این مجموعه‌هاست. از مزایای بارز احداث واحدهای تولید پراکنده می‌توان به فرهنگ‌سازی و ایجاد فضای اشتغال آنها اشاره نمود. در روش تولید پراکنده، به جای تولید متمرکز و توزیع، از نیروگاه‌های کوچک که در نزدیکی و یا در مجاورت محل مصرف تأسیس می‌شوند، استفاده می‌شود. لذا، از میزان تلفات انرژی برق در نیروگاه‌های بزرگ شامل ۴٪ مصرف داخلی نیروگاه‌ها، ۴/۵٪ تلفات شبکه‌های انتقال و ۱۷/۵٪ تلفات شبکه توزیع که در روش تولید و انتقال و توزیع سنتی هدر می‌رفت، جلوگیری می‌شود. در تحقیقی در کالیفرنیا از سیستم DG-CHP در یک واحد بیمارستانی به منظور تأمین انرژی استفاده شد که این سیستم بازده بالایی از خود نشان داد، به طوری که ضریب بازگشت گرما ۰/۸۵ بود و صرفه جویی ۸۶۰۰۰۰ دلاری را در پی داشت. نزدیک به ۸۰٪ صنایع شیمیایی، پالایش، مواد غذایی و کاغذ و خمیر کاغذ در اتحادیه اروپا از سیستم CHP استفاده می‌کنند.
در دنیای امروز، افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه افزایش آلودگی هوا در سراسر دنیا و به ویژه بسیاری از کلان‌شهرها به یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی ساکنان زمین تبدیل شده است. افزایش نگرانی‌ها در این زمینه موجب شده در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های نوین مبتنی بر استفاده از منابع طبیعی به منظور کاهش آلودگی هوا بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

یکی از این روش‌های نوین، استفاده از جلبک‌هاست که با توجه به برخورداری از ویژگی‌هایی مانند قدرت بالای آنها در جذب دی اکسیدکربن و تولید اکسیژن و همچنین توانایی رشد سریع، به عنوان یکی از روش‌های جدید در مبارزه با آلودگی هوا مطرح شده است. این طرح در بسیاری از کشورها مرحله اولیه را با موفقیت پشت سر گذاشته و وارد مرحله اجرایی شده است. جلبک‌ها با توجه به داشتن پتانسیل بالای جذب دی اکسیدکربن و خواص منحصر به فردی که در جذب دی اکسیدکربن دارند و اکسیژن بیشتری نسبت به سایر گیاهان تولید می‌کنند، در سطح دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. محققان در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که ریزجلبک کلرلا قابلیت حذف ۶۰٪ از دی اکسید کربن با غلظت ۲۵٪ در هوای آلوده را دارا می‌باشد. ریزجلبک‌ها قابلیت بالایی در تحمل مقادیر بالای آلاینده دی اکسید کربن و همچنین پتانسیل بالا در حذف این آلاینده را دارند. جلبک‌ها شامل انواع مختلف از جلبک‌های تک سلولی تا گونه‌های بزرگ دریایی هستندکه بیش از نیمی از اکسیژن موجود در سطح زمین از طریق همین جلبک‌ها تأمین می‌شود. توده زیستی این جلبک‌ها در مدت زمان ۲۴ تا ۴۸ ساعت تکثیر شده و به میزان دو برابر افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، از بیومس یا زیست‌توده‌ای که از این جلبک‌ها باقی می‌ماند می‌توان فرآورده‌های مختلفی مانند سوخت‌های زیستی، کود گیاهی، محصولات غذایی، فرآورده‌های دارویی، بهداشتی و آرایشی و پلاستیک‌های زیستی تولید کرد که ارزش اقتصادی بالایی دارند. این جلبک‌ها می‌توانند حجم قابل توجهی از دی اکسیدکربن را به دام اندازند و در عین حال می‌توان فرآورده‌های جانبی با ارزشی را نیز از آنها تهیه کرد. میزان فتوسنتز جلبک‌ها در مقایسه با دیگر گیاهان به مراتب بیشتر است. تخمین زده شده است برای تولید یک تن زیست‌توده جلبکی حدود دو تن دی اکسیدکربن مورد نیاز است. تثبیت و حذف دی اکسیدکربن در جلبک‌ها برخلاف دیگر گیاهان و درختان به فصل خاصی محدود نیست و حتی در فصل پاییز و زمستان هم انجام می‌شود. در دوران مدرن و زندگی صنعتی در بسیاری از شهرهای بزرگ با پدیده وارونگی هوا مواجه هستیم. در فصل‌های پاییز و زمستان که درختان برگ ندارند این پدیده و پیامدهای ناشی از آن تشدید می‌شود؛ اما در صورتی که شرایط مساعد باشد جلبک‌ها حتی در این فصول نیز قادر به انجام فتوسنتز هستند. بنابراین، می‌توانند دی اکسیدکربن موجود در هوا را به دام اندازند و در کاهش پیامدهای ناشی از وارونگی نیز تاثیرگذار باشد. براساس بررسی‌های آماری، هر درخت به طور متوسط می‌تواند سالانه ۵۰۰ کیلوگرم دی اکسیدکربن جذب کند. در این صورت در صورتی که در زمین به ازای هر نفر یک درخت وجود داشته باشد. به این ترتیب تقریبا ۳/۵ میلیارد تن دی اکسیدکربن در سال جذب می‌شود؛ اما تولید سالانه دی اکسیدکربن در سطح دنیا حدود ۳۲ میلیارد تن است؛ یعنی میزان دی اکسیدکربن تولید شده تقریباً ده برابر مقدار دی اکسیدکربنی است که درختان می‌توانند به دام اندازند. پس فقط با کاشت درخت نمی‌توان با اثر گلخانه‌ای مبارزه کرد. به همین دلیل در سطح دنیا استفاده از جلبک‌ها به عنوان راهکاری برای کاهش پیامدهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته و برنامه‌ریزی‌هایی برای استفاده هر چه بیشتر از جلبک‌ها انجام شده است.

با توجه به این موضوعات و این که کشور ایران یک کشور پهناوری است استفاده از سیستم DG-CHP یقیناً از جهات مختلف می‌تواند مفید باشد. در صورتی که بتوان این فرآیند را با فعالیت‌های کشاورزی و نیز تولید سوخت‌های زیستی پیوند داد اجرای این پروژه برای کشورمان اهمیت مضاعفی پیدا خواهد نمود. چراکه اولاً اکثر فعالیت‌های کشاورزی در کشور در مناطق دورافتاده صورت می‌پذیرد و دیگر این که تولید سوخت‌های زیستی از جلبک‌ها در عین حال که یک فعالیت اقتصادی و اشتغال‌زا محسوب می‌شود، می‌تواند به صورت مستقیم (حذف گازهای آلاینده) و به صورت غیرمستقیم (کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی) در حفظ محیط زیست مؤثر باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

لذا هدف از اجرای پروژه حاضر طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه‌ای است که بتواند با تجمیع چند فناوری و استفاده از مزایای آن‌ها بسته جدیدی از تولید انرژی و محصولات زیستی- کشاورزی را ارائه نماید.

۲-۱-۱- فرضیات

۱- دود خروجی از سیستم DG-CHP حاوی بار حرارتی بالایی است که می‌توان از این توان جهت تولید انرژی گرمایی استفاده نمود.
۲- گازهای آلاینده موجود در دود خروجی سیستم DG-CHP می‌توانند توسط ریزجلبک جذب شوند.
۳- ریزجلبک‌ها دی اکسید کربن موجود در دود خروجی را به عنوان منبع کربن مورد استفاده قرار می‌دهند.
۴- زیست‌توده ریزجلبک تولیدی می‌تواند به عنوان منبع تولید سوخت زیستی و ترکیبات باارزش مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۱-۲- اهمیت مسأله

تولید روزافزون گازهای گلخانه‌ای و سایر گازهای آلاینده در کنار افزایش دمای کره زمین از معضلات اساسی است که تداوم حیات در کره زمین را با خطر مواجه کرده است. همچنین پاسخگویی به نیازهای رو به افزایش انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن محدودیت منابع فسیلی و آلودگی‌های محیط زیستی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها از اولویت‌های اصلی به شمار می‌آید. از اینرو پروژه‌ها و برنامه‌های کلانی در سطح بین‌المللی توسط دولت‌ها و حتی سازمان‌های جهانی در این راستا و تحت عنوان "توسعه فرآیندهای دوستدار محیط زیست" در حال انجام است. هدف اصلی این برنامه‌ها عبارتست از:
۱- افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات انرژی
۲- کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای
۳- توسعه فناوری‌های نوین جهت جذب و کاهش گازهای گلخانه‌ای
۴- کاهش اتکا به منابع سوخت‌های فسیلی
۵- تولید اقتصادی انرژی از منابع تجدیدپذیر

آلودگی‌های محیط زیستی و نیز تأمین انرژی یکی از دغدغه‌های کشورمان محسوب می‌شود. همچنین با توجه به وسعت زیاد کشور و پراکنش جمعیت و مراکز تولید فراورده‌های کشاورزی، تأمین انرژی در مراکز دور دست با هزینه‌های بالایی همراه است. بنابراین توسعه نیروگاه‌های کوچک در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته است. توسعه این نیروگاه‌ها می‌تولند هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی را کاهش دهد. اما در صورتی که بتوان از توان حرارتی موجود در گازهای خروجی جهت تولید انرژی گرمایشی نیز استفاده کرد، می‌توان راندمان تولید انرژی را بیش از پیش افزایش داد که این مسئله نیز در دستور کار وزارت نیرو قرار دارد. اما نکته اساسی دیگر گازهای آلاینده‌ای است که در دود خروجی وجود دارد. تولید این گازها در صورت عدم جذب، بر بار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های محیط

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

زیستی می‌افزاید. بنابراین، روش‌های مختلفی برای حذف این آلاینده‌ها پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها، استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی است. در روش‌های بیولوژیکی برپایه جلبک‌ها، این موجودات می‌توانند گازهای آلاینده را حذف و از دی اکسید کربن (مهمترین گاز گلخانه‌ای) به عنوان منبع کربن جهت رشد خود استفاده نمایند. بنابراین، در این شیوه نه تنها آلاینده‌ها حذف می‌شود بلکه گاز دی اکسید کربن به ترکیبات آلی با ارزش که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل می‌شود. سوخت‌های زیستی از فراورده‌هایی است که از جلبک‌ها قابل استحصال است. در صورتی که بتوان جلبک‌های تولیدکننده سوخت‌های زیستی را در این سامانه کشت نمود، می‌توان سامانه موجود را به صورت یک سیکل بسته تعریف کرد که می‌تواند نهایتاً بخشی یا تمام انرژی لازم برای چرخش سیستم را نیز تأمین نماید. همچنین بخشی از دی اکسید کربن نیز می‌تواند جهت پروش گیاهان گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

این پروژه، علاوه بر بررسی روش‌های مختلف پرورش جلبک و بررسی تأثیرات گازهای مختلف بر روی آنها و استحصال جلبک جهت مصراف گوناگون از قبیل تولید گاز متان، پایلوتی برای بکار بردن نیروگاه‌های برق مقیاس کوچک در گلخانه‌ها و بازیافت حرارت و دود جهت پرورش گیاهان می‌باشد. در این راستا پروژه در گلخانه مرکز بیوتکنولوژی کشاورزی تبریز آغاز و به دو قسمت تقسیم شد.

- قسمت اول: ساخت و اجرای سیستم پرورش و استحصال جلبک و آزمایش بر روی انواع جلبک و تأثیر گازهای مختلف خروجی دود موتور بر روی آن
- قسمت دوم: سیستم تولید برق و بازیافت حرارت موتور جهت تأمین گرمای گلخانه و استفاده از CO_2 دود خروجی جهت تزریق به جلبک‌ها و کمک به پرورش آنها

قسمت اول پروژه توسط مرکز بیوتکنولوژی انجام و اجرای بخش دوم به شرکت آسیا توانیر سهند واگذار گردید که به اختصار مراحل انجام بخش دوم و کارهای انجام‌شده در ادامه گزارش تشریح می‌گردد.

۲-۱-۳- هدف اصلی

ارائه یک فرآیند جدید دوستدار محیط زیست جهت تولید و تأمین انرژی از طریق طراحی، ساخت و ارزیابی کارکرد "سامانه دوستدار محیط زیست تولید انرژی و محصولات زیستی- کشاورزی"

۲-۱-٤- سایر اهداف

۱- افزایش بهره وری انرژی
۲- حذف بیولوژیکی گازهای آلاینده
۳- استفاده از دی اکسید کربن تولیدی جهت پرورش جلبک‌های تولید کننده سوخت‌های زیستی و پرورش گیاه

۲-۱-۵- نتایج مورد انتظار و دستاوردهای جانبی

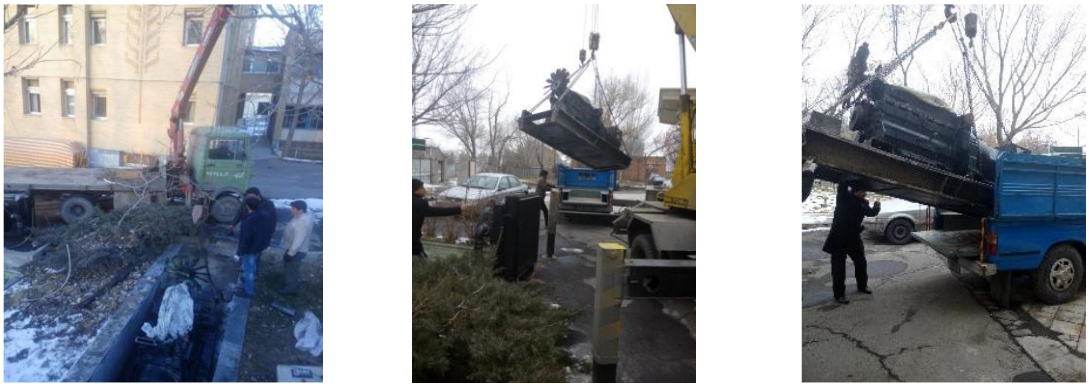
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

نتیجه و دستاورد اصلی عبارت است از: راه‌اندازی "سامانه دوستدار محیط زیست تولید انرژی و محصولات زیستی- کشاورزی" و سایر دستاوردهای جانبی عبارت است از:

- تولید انرژی گرمایی مورد نیاز گلخانه
- حذف بیولوژیکی گازهای آلاینده توسط سامانه فتوبیوراکتور
- پرورش ریزجلبک‌های تولیدکننده سوخت زیستی و تولید محصولات گلخانه‌ای
- تولید فراورده‌های باارزش از ریزجلبک‌ها

۲-۲- تبدیل موتور دیزلی به موتور گازسوز

در بهمن ماه ۱۳۹۴، به منظور تبدیل موتور ژنراتور دیزلی پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز به موتور ژنراتور گازسوز، موتور ژنراتور به صورت کامل در محل نصب قبلی دمونتاژ شده و سر سیلندر و رینگ و پیستون‌ها جهت تغییرات به کارگاه تهران ارسال و یکسری از قطعات که آسیب‌دیده از قبیل یاتاقان‌ها و واشر سرسیلندر تعویض یا تعمیر شدند. موتور از محل قبلی خارج و به محل جدید منتقل گردید و پس از نفت‌شویی قطعات و تعمیرات لازم دوباره مونتاژ گردید. این تغییر در نوع کارکرد موتور ژنراتور توسط شرکت تأمین تجهیزات انرژی پراکنده ارسباران آذربایجان (گروه نیروگاهی تتاپاور) انجام شد. در شکل‌های زیر، مراحل دمونتاژ و مونتاژ موتور ژنراتور نمایش داده شده است.



شکل (۲-۱) مراحل دمونتاژ موتور ژنراتور دیزلی و خارج کردن از محل قبلی

جهت تولید برق از یک دستگاه موتور ژنراتور ۲۵۰ کیلووات موجود در مجموعه پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز استفاده شد. این دستگاه یک موتور ژنراتور دیزلی بود که با توجه به نوع تأمین گاز ساختگاه به مدل گازسوز تبدیل گردید.

جهت تبدیل موتور به موتور گازسوز دو مسئله باید مورد توجه قرار می‌گرفت:

۱- اول، مشخص شدن وضعیت گاز ساختگاه.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲- دوم، با توجه به استفاده از موتور به عنوان برق اضطراری مجموعه و وجود آزمایشگاه‌های حساس، تصمیم بر این شد تا آخرین فرصت ممکن موتور از مدار خارج نشود. لذا پس از مشخص شدن وضعیت گاز و آماده شدن کامل ساختگاه در کمترین زمان تغییرات روی موتور انجام و موتور دوباره به مدار بازگردانده شد.





شکل (۲-۲) مراحل مونتاژ موتور ژنراتور دیزلی و قرار دادن آن در محل جدید

مشخصات موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۲-۱) مشخصات موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز

تعداد و آرایش سیلندرها	۶ سیلندر خطی با توربوشارژ و خنک‌کننده نهایی (After-Cooler)
سیستم کنترل موتور	واحد کنترل الکترونیکی (ECU) سوخت و جرقه
حجم جابجایی (لیتر)	۱۱/۴
قطر سیلندر (mm)	۱۲۷
کورس پیستون (mm)	۱۵۰
نسبت تراکم	۱۲
حداکثر توان دائم کار موتور (kw)	۲۳۰
توان نامی تست‌شده (kw)	۱۷۷
توان احتمالی مورد بهره‌برداری با توجه به شـــرایط خاص گاز قابل تأمین و شبکه ضعیف برق داخلی مجموعه پژوهشکده بیوتکنولوژی	۱۳۰-۱۰۰

نتایج تست موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز در جدول زیر ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۲-۲) نتایج تست موتور گازسوز مورد استفاده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز

ساعت شروع تست	۱۰:۳۸	ساعت پایان تست	۱۰:۵۰	مدت تست	۱۲ دقیقه

زمان نمونه‌برداری	توان شبکه (kw)	جریان فازها (A)			ولتاژ (V)	توان مصرفی در load bank (kw)	کل توان تولیدی ژنراتور (kw)	دما (°C)		
								آب ورودی	آب خروجی	اگزوز
۱۰:۴۷	۳۸	-	-	-	-	۱۳۹/۵	۱۷۷/۵	۷۰	۸۶	۶۲۶/۳

ساعت شروع تست	۱۰:۳۸	ساعت پایان تست	۱۰:۵۰	مدت تست	۱۲ دقیقه

زمان نمونه‌برداری	توان شبکه (kw)	جریان فازها (A)			ولتاژ (V)	توان مصرفی در load bank (kw)	کل توان تولیدی ژنراتور (kw)	دما (°C)		
								آب ورودی	آب خروجی	اگزوز
۱۱:۴۰	۱۷	۲۲۳	۲۲۶	۲۶۰	۲۲۳	۱۵۸/۱۰	۱۷۵/۱۰	۶۸	۸۲	۶۲۳/۸
۱۱:۴۵	۲۱	۲۲۸	۲۲۹	۲۶۳	۲۲۳	۱۶۰/۵۶	۱۸۱/۵۶	۷۰	۸۶	۶۲۵
۱۱:۵۰	۲۰	۲۲۶	۲۳۴	۲۶۶	۲۲۳	۱۶۱/۹۰	۱۸۱/۹۰	۷۶	۹۲	۶۳۲/۶
۱۱:۵۵	۲۰	۲۲۱	۲۳۶	۲۵۴	۲۲۳	۱۵۸/۵۵	۱۷۸/۵۵	۷۴	۹۱	۶۳۶/۵
۱۲:۰۰	۱۸	۲۲۲	۲۳۳	۲۶۰	۲۲۳	۱۵۹/۴۴	۱۷۷/۴۴	۷۳	۹۲	۶۲۶/۷
۱۲:۰۵	۲۱	۲۰۸	۲۲۶	۲۴۶	۲۲۳	۱۵۱/۶۴	۱۷۲/۶۴	۷۵	۹۲	۶۲۷/۱
۱۲:۱۰	۲۰	۲۲۱	۲۳۸	۲۵۵	۲۲۳	۱۵۹/۲۲	۱۷۹/۲۲	۷۴	۹۲	۶۴۰/۴
۱۲:۱۵	۲۰	۲۱۸	۲۳۰	۲۵۸	۲۲۳	۱۵۷/۴۴	۱۷۷/۴۴	۷۷	۹۲	۶۲۹/۶
۱۲:۲۰	۲۱	۲۱۵	۲۳۴	۲۵۰	۲۲۳	۱۵۵/۸۸	۱۷۶/۸۸	۷۷	۹۴	۶۲۹/۷
۱۲:۲۵	۱۸	۲۱۴	۲۲۹	۲۴۵	۲۲۳	۱۵۳/۴۲	۱۷۱/۴۲	۸۰	۹۵	۶۲۷/۷
۱۲:۳۰	۲۰	۲۱۳	۲۳۲	۲۵۱	۲۲۳	۱۵۵/۲۱	۱۷۵/۲۱	۷۹	۹۷	۶۲۷/۵
مقادیر متوسط							**۱۷۷/۰۷**	**۷۴/۴۲**	**۹۰/۹۲**	**۶۲۱/۰۸**

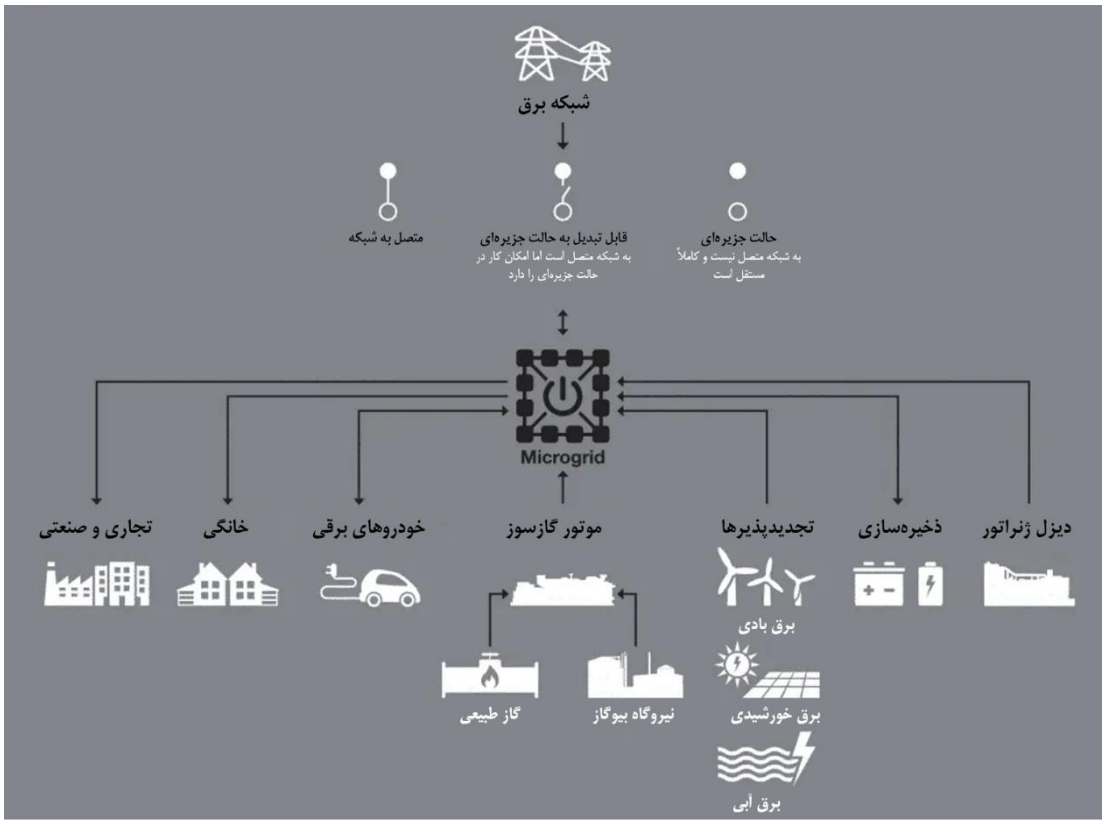
۲-۳- راه‌اندازی و تست موتور گازسوز در حالت جزیره‌ای

موتورهای گازی در حالت جزیره‌ای چه به تنهایی، چه به عنوان بخشی از یک ریزشبکه گسترده‌تر، به عنوان یک نیروگاه با ظرفیت محدود، گزینه بسیار مناسبی برای تاب‌آوری تأسیسات می‌باشند. کارکرد در حالت جزیره‌ای مربوط به آن دسته از نیروگاه‌ها است که جدا از شبکه توزیع برق سراسری یا محلی کار می‌کنند. کارکرد حالت جزیره‌ای می‌تواند دو شکل کلیدی داشته باشد:

- ژنراتورهای مستقل از شبکه که به شبکه سراسری برق متصل نیستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- ژنراتورهایی که به صورت موازی به شبکه سراسری برق متصل هستند و در هنگام خرابی یا قطع شدن شبکه سراسری برق، قادر هستند به صورت مستقل، برق تولید کنند.



شکل (۲–۳) نماواره‌ای از یک ریزشبکه با کارکرد در حالت جزیره‌ای و قابل تبدیل به حالت جزیره‌ای

تعداد زیادی از نیروگاه‌های CHP بدون اتصال به شبکه برق خارجی نصب می‌شوند. این حالت اغلب به دلیل دورافتاده بودن موقعیت مکانی سایت، قابل اطمینان نبودن شبکه برق محلی یا قطعی‌های مکرر در منبع تولید توان رخ می‌دهد.

این سایت‌ها در حالت جزیره‌ای کار می‌کنند. مزیت این سایت‌ها، حذف هزینه‌های اتصال به شبکه بیرونی است، اما باید قادر به مدیریت تولید و مصرف برق خود بدون هیچ منبع شارژ یا پشتیبان باشند. در هنگام مهندسی نیروگاه تولید برق با سوخت گاز، نرخ بار وارد بر ژنراتور از سمت ماشین‌آلات موجود در سایت باید در نظر گرفته شود. برای اطمینان از دسترسی به برق در هر زمانی، معمولاً لازم است ظرفیت نصب‌شده نیروگاه بالا در نظر گرفته شود. با این وجود، بسیاری از سایت‌هایی که در آنها نیروگاه‌های CHP به صورت موازی با شبکه کار می‌کنند، می‌توانند در حالت جزیره‌ای هم کار کنند. این قابلیت به این سایت‌ها این ویژگی را می‌دهد که برق مورد نیاز سایت را در زمانی که شبکه محلی برق دچار مشکل شده، تأمین کنند.

این ملاحظه وجود دارد که با وجود نیروگاه CHP، دیگر نیازی به نصب سیستم‌های پشتیبان برای مواقع اضطراری نیست. اگر برای نیروگاه CHP کار در حالت جزیره‌ای تعریف شده باشد در آن صورت، بر اساس میزان تقاضای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

سـایت به راحتی می‌توان ظرفیت مولد CHP را تعیین کرد. در صـورت رخداد کارکرد جزیره‌ای، اتصـال نیروگاه به شـبکه محلی برق به وسـیله مدارشـکن قطع می‌شـود. در این شـرایط، نیروگاه می‌تواند در حالت جزیره‌ای کار کند و توان خروجی نیروگاه CHP را می‌توان مطابق با تقاضای بار نیروگاه، تنظیم کرد.

تغییر وضعیت اتصال نیروگاه CHP به شبکه برق، از حالت موازی به حالت جزیره‌ای ممکن است همزمان با قطعی شـبکه محلی برق رخ دهد. در این شـرایط، نیروگاه CHP باید بدون وقفه قادر به تأمین تقاضـای بار سـایت باشـد، مشروط بر این که بتوان تقاضای بار سایت را بلافاصله به سطح خروجی نیروگاه CHP کاهش داد. معمولاً این کار با استفاده از تجهیزات پایش و کنترل بار انجام می‌شود که می‌توانند به صورت خودکار، بخشی از تقاضای بار سایت را قطع کنند. اگر امکان محدود کردن تقاضای بار فراهم نباشد، در آن صورت نیروگاه CHP که به صورت موازی با شبکه قرار دارد، زمانی که شبکه محلی برق دچار خرابی شود معمولاً خاموش خواهد شد. در این حالت، سایت تمام منابع تأمین برق خود را از دسـت خواهد داد. با این وجود، مادامی که سـایت مجهز به امکانات قطع مدارهای تغذیه باشد، می‌توان نیروگاه CHP را بلادرنگ برای تولید برق مورد نیاز سایت تا بیشترین سطح ممکن، دوباره راه‌اندازی کرد. این کار مستلزم اقدام فوری کارکنان بخش مهندسی برق مطابق با ضوابط از پیش تعیین‌شده در قطع یا وصل مدارشکن‌ها می‌باشد.

همچنین ضرورت دارد نیروگاه CHP مجهز به یک سیستم پشتیبان برق باشد تا در نبود هر گونه منبع توان خارجی، راه‌اندازی مجدد آن مقدور باشـد. این پشـتیبان معمولاً یک دیزل ژنراتور آماده به کار کوچک اسـت. اگر سـایت دارای تجهیزات تولید برق دیگری است، برای راه‌اندازی دوباره نیروگاه CHP می‌توان از این تجهیزات استفاده کرد.

۲-۳-۱- الزامات کار در حالت جزیره‌ای

در همه موارد، نیروگاه CHP باید دارای شرایط زیر باشد:

- تجهیزاتی برای دفع گرمای تولیدشده به وسیله CHP، معمولاً یک خنک‌کننده هوا خشک اختصاصی، که از CHP تغذیه و کنترل می‌شود.
- داشتن یک منبع گاز مطمئن، با فشار مورد نیاز، در هر زمان، این اطمینان را ایجاد می‌کند که تمامی شیرهای برقی خودکار آتش‌نشانی با قطع کابل اصلی برق کار نمی‌کنند، در غیر این صورت باید اطمینان حاصل شود که منبع گاز CHP قبل از این شیرهای برقی قرار دارند.
- تجهیزات کنترل بار هم در حالت قطع بار و هم در حالت اعمال بار به صـــورت کنترل‌شـــده به طوری که از محدودیت‌های بار گام سـازندگان موتور تجاوز نکند. محدوده کنترل بار ممکن اسـت از اعمال بار به صـورت دستی تا سیستم تمام خودکار اعمال و قطع بار، تغییر کند.
- سیستم ارت اختصاصی برای ژنراتور CHP

باید به محدودیت‌های نوسـانات ولتاژ و فرکانس بارهای متصـل به سـایت توجه شـود، زیرا این موضـوع می‌تواند گام بارگذاری یا باربرداری CHP را بیش از پیش محدود کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲-٤- اتصال به شبکه موتور و بهره‌برداری و تست موتور

پس از بررسی‌های اولیه مشخص شد برای سنکرون کردن موتور ژنراتور با شبکه لازم است برد AVR موتور ژنراتور تعویض گردد. ولی بعلت گمنام بودن مدل ژنراتور و نبود اطلاعات در مورد سیم‌پیچ تحریک آن، AVR موجود به کارگاهی جهت تست و به دست آوردن مشخصات آن ارسال گردید.

۲-٤-۱- ساختگاه و تأسیسات لازم جهت راه‌اندازی موتور

۲-٤-۱-۱- لوله‌کشی گاز

در صورت امکان گاز ۶۰ پوند و در غیر این صورت، گاز یک چهارم پوند با ظرفیت ۶۰ متر مکعب بر ساعت مورد نیاز است. حداکثر گاز قابل تحویل به موتور در مجموعه ساختمان‌های پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز ۳۰ پوند می‌باشد که با بررسی‌های فنی و ایجات تغییرات در سیستم گاز مجموعه، این موضوع مرتفع و گازکشی ۳۰ پوندی تأمین گردید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

بسمه تعالی

دولت و ملت همدل و همزبان

شرکت ملی گاز ایران

شرکت گاز استان آذربایجان شرقی

تاریخ : ۱۳۹۴/۰۵/۰۵

شماره : ۳۰۲۹۵/۰۰۴/۳۰ ک

شرکت محترم شکوه پیشرو تبریز

موضوع : آنالیز گاز

با سلام

احتراماً عطف به نامه شماره ۲۹۵۵۲مورخه ۹۴/۰۵/۰۳، آخرین آنالیز گاز مصرفی در سطح استان بـه شرح جدول ذیل ارسال می گردد :

ردیف	ترکیبات		درصد مولی
۱	متان		۸۹/۶۳
۲	اتان		۳/۳۴
۳	پروپان		۰/۸۶
۴	بوتان		۰/۴۵
۵	پنتان و هیدروکربنهای بالاتر		۰/۲۱
۶	دی اکسید کربن		۰/۳۵
۷	نیتروژن		۵/۱۵
۸	اکسیژن		۰/۰۱۱
۹	سایر		Trace
۱۰	سولفید هیدروژن	سولفور mg/scm	۰/۳۶۹
۱۱	مرکاپتان سولفور		۶/۶۰۴
۱۲	کل گوگرد		۱۶/۲۹۶
ردیف	ویژگی		Kcal/SCM
۱	ارزش حرارتی ناخالص		۹۰۱۰
۲	ارزش حرارتی خالص		۸۱۲۰

لازم به توضیح است به علت دریافت گاز از منابع مختلف ،شرایط مذکور ثابـت نبـوده و لـیکن منطبـق بـا استاندارد شرکت ملی گاز ایران IGS-CH-033 بوده که جدول مربوطه در پیوست نامه می باشد .

محمد رضا سخندانی

رئیس امور اندازه گیری و توزیع گاز

نشانی: تبریز ـ خیابان آزادی ـ حد فاصل چهارراه لاله و خیابان رسالت
کد پستی: ۵۱۷۳۸-۶۵۹۵۵ ـ شماره ثبت شرکت: ۱۷۹۰۲
www.nigc-eazar.ir
شماره تلفن: ۹-۳۴۴۴۸۰۸۱
شماره دورنگار: ۳۴۴۳۲۳۸۶

ISO 9001:2008 ISO 14001:2004 OHSAS 18001:2007 HSE-MS

N.I.G.C. July 2014 IGS-M-CH-033(1)

ANNEX A
Specification for Natural Gas Components
(Informative)

The chemical composition of natural gas depends on reservoir behavior and generally for some of the belw components there is no specific controlling process in gas refineries. Hence, this chemical composition shall be considered as typical and not exact. But in case of any changes in the below compositions, the higher heating value shall be supplied based on Tables 1, 2 and 3.

TABLE A.1 – Typical Specification for Natural Gas Component

Item	Component	Unit	Minimum	Maximum	Test Methods
1	Methane (CH_4)	mol%	80.00	---	ASTM D 1945 GPA 2286 GPA 2261
2	Ethane (C_2H_6)		---	7.00	
3	Propane (C_3H_8)		---	3.00	
4	Butanes (C_4)		---	1.00	
5	Pentanes and Heavier (C_5^+)		---	0.50	

N.I.G.C. July 2014 IGS-M-CH-033(1)

TABLE 1 – Specification Limits for Natural Gas Component – Outlet of Gas Treating Plants (GTP), Pipeline Networks and Delivery to Customers

Item	Component	Unit	Minimum	Maximum	Test Methods	Remark
1	Hydrogen Sulfide (H_2S)	mg/Sm³	---	5.0	ASTM D 6228 ASTM D 4810 ASTM D 4084	(1)
2	Mercaptan Sulfur (R-SH) not including odorization of natural gas	mg/Sm³	---	15.0	ASTM D 6228 ASTM D 1988 IGM 212	---
3	Total Sulfur (daily average) including H_2S and R-S-I and not including odorization of natural gas	mg/Sm³	---	30.0	ASTM D 6667 ASTM D 1072	(2)
4	Carbon Dioxide (CO_2)	mol%	---	2.0	ASTM D 1945 ASTM D 4984 GPA 2286 GPA 2261	---
5	Total Inert Gas ($CO_2 + N_2$)	mol%	---	7.0	ASTM D 1945 ASTM D 4984 GPA 2286 GPA 2261	---
6	Water Dew Point / Water Content	---	---	-10°C at 6.9 CTP outlet delivery pressure and at any line pressure and, in any case no more than 110 mg/Sm³	ASTM D 5454 ASTM D 1142	---
7	Hydrocarbon Dew Point	(°C)	---	-7°C at any line pressure	ASTM D 1142	(3)
8	Higher Heating Value	MJ/Sm³ (kcal/Sm³)	35.00 (8500)	43.95 (10500)	ASTM D 1826 ASTM D 3588	---
9	Wobbe Index (based on higher heating value)	MJ/Sm³ (kcal/Sm³)	46.05 (11000)	50.34 (12000)	---	---

(1): The H_2S value for Shahid Hashemi-Nejad Gas Treating Plant may be maximum 6.7 mg/ Sm³.
(2): Total sulfur of gas shall have a weekly normal specified level of 20 mg/Sm³. However under unusual circumstances this level may be exceeded up to a maximum of 100 mg/Sm³ provided that the weighted daily average of total sulfur not exceeded the level of 30 mg/Sm³.
(3): The hydrocarbon dew point for outlet of existing gas treating plants shall be conform to the legal amounts specified in Table 5.1 (Equation 5.1) (ANNEX B).

14

شکل (۲-۴) آنالیز گاز شهر تبریز

۲-۴-۱-۲- کانال‌کشی هوا

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با توجه به محل قرار گیری موتور نیاز به سیستم تهویه هوا و کانال خروجی باد رادیاتور لازم است. پس از مشخص شدن مکان نصب موتور، دو کانال برای تهویه هوای محیط و خروج باد گرم رادیاتور طراحی شد. با توجه به مکان جدید استقرار موتور، کنده‌کاری‌های لازم انجام و ساخت کانال‌ها صورت گرفت. به منظور تأمین هوای مورد نیاز و خروج دود خروجی از اگزوز موتور ژنراتور گازسوزشده، اقدام به کانال‌کشی هوای ورودی و خروجی به محل جدید استقرار موتور گردید.



شکل (۲-۵) کنده‌کاری محل اجرای کانال هوای ورودی و خروجی در محل جدید استقرار موتور ژنراتور گازسوز

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۲-۶) کانال هوای ورودی و خروجی در محل جدید استقرار موتور ژنراتور گازسوز

۲-٤-۱-۳- کابل‌کشی و اتصال موتور ژنراتور به سیستم برق گلخانه

با توجه به نقشه تأسیسات الکتریکی مجموعه، باید کوتاه‌ترین و امن‌ترین نقطه جهت اتصال ژنراتور به تأسیسات الکتریکی انتخاب و کابل‌کشی‌های لازم انجام می‌شد. کابل اصلی اتصال موتور ژنراتور به برق شهر کشیده شده و با مشخص شدن مدل AVR، سیم فرمان مدار کنترل کشیده شد. با توجه به عدم وجود نقشه تأسیسات برق مجموعه، این نقشه تهیه و بهترین مکان از لحاظ ایمنی و کاهش هزینه‌ها برای اتصال ژنراتور به شبکه انتخاب شد. همچنین، نقشه تغییر سیستم حفاظت با توجه به شرایط جدید مشخص گردید. با توجه به عدم امکان خاموشی برق مجموعه در طول هفته، تصمیم بر این شد که کار کابل‌کشی در زمان تعطیلی پژوهشکده در اواخر هفته (روزهای پنج‌شنبه و جمعه) انجام شود تا در صورت نیاز به خاموشی، اختلالی در انجام کار آزمایشگاه‌ها بوجود نیاید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۲-۷) کابل کشی و اتصال موتور ژنراتور به سیستم برق گلخانه

۲-٤-۲- سیستم بازیابی حرارت

۲-٤-۲-۱- سیستم بازیابی حرارت

❑ مبدل هوا به آب

برای بازیافت حرارت دود خروجی نیاز به ســـاخت یک مبدل با توجه به نیاز مجموعه بود. بدین منظور، از مبدل‌های تیوپی استفاده شد.





DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۲–۸) مبدل هوا به آب

در شرایط احتراق استوکیومتریک، نسبت جرمی هوا به سوخت برای گاز طبیعی مورد استفاده برابر با ۱۷/۲ می‌باشد. از سوی دیگر، دبی جرمی گازهای اگزوز برابر با مجموع دبی جرمی سوخت و هوا است. به این ترتیب، دبی جرمی گازهای اگزوز به صورت ذیل محاسبه خواهد شد:

$$\dot{m}_e = 18.2 \times \dot{m}_f = 18.2 \times \frac{54.27}{75 \times 60} = 0.2195 \ kg/sec \qquad (۲–۱)$$

مقدار $C_{p\,e}$ برای محصولات احتراق کامل گاز طبیعی با آنالیز گاز برابر است با:

$$C_{p\,e} = 1.168 \ \frac{kj}{kg.°C} \qquad (۲–۲)$$

با توجه به داده‌ها، توان گرمایی تلف‌شده از طریق گازهای اگزوز مطابق ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_e = 0.2195 \times 1.168 \times (621.08 - 25) = 152.81 \ kw \qquad (۲–۳)$$

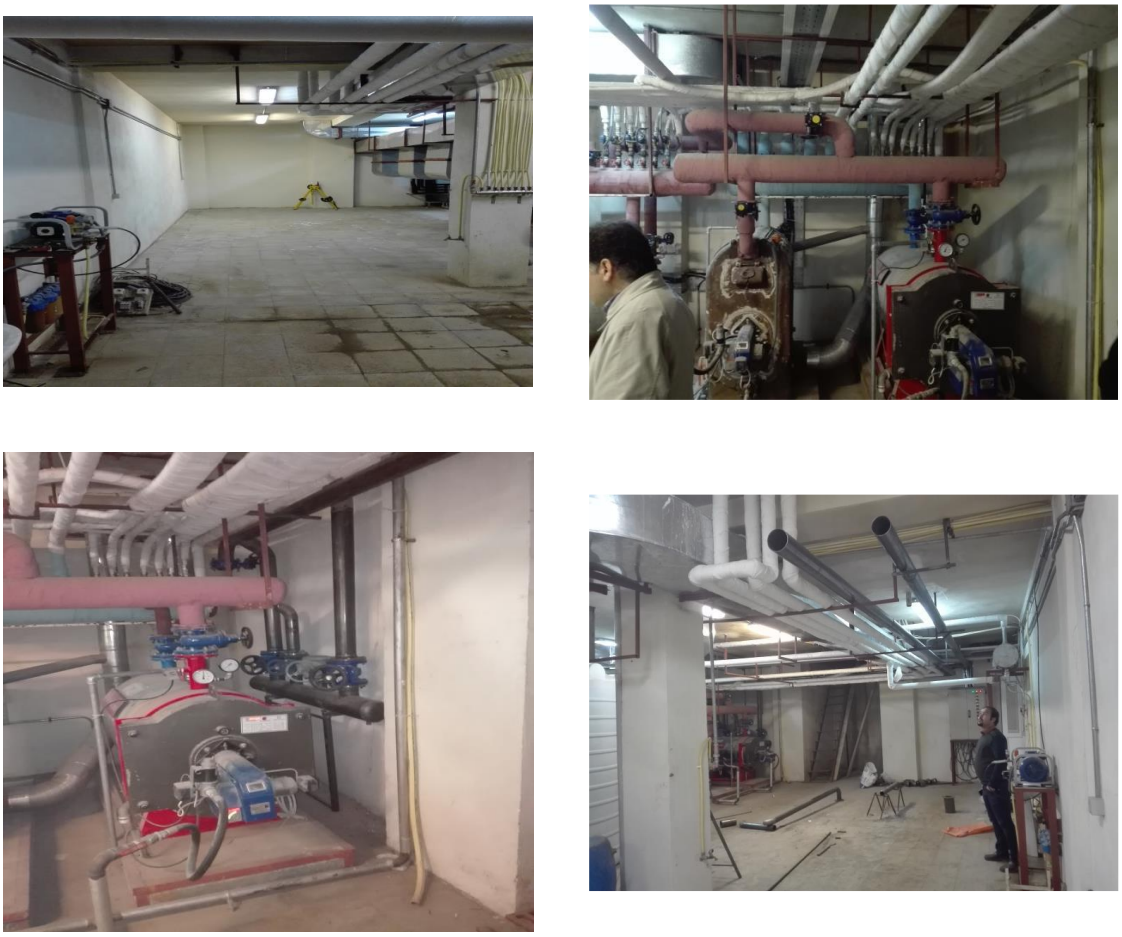
توان گرمایی تلف‌شده از طریق تشعشع مطابق ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_r \approx 0.01 \times \dot{Q}_H = 0.01 \times 526 = 5.26 \ kw \qquad (۲–۴)$$

❑ اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه

با توجه به سیستم گرمایش گلخانه باید لوله‌کشی‌های لازم جهت اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه انجام و تدابیر لازم جهت مواقع اضطراری اندیشیده شود. نقشه اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه آماده و لوله‌کشی‌های لازم انجام شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۲-۹) آماده‌سازی اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه

در نهایت، مبدل حرارتی و شیرهای کنترل دود نصب گردید و به کلکتور آب گرم مجموعه متصل شد و بدین ترتیب، آماده به کار گردید.



DOI: 10.30503/nripress.2020.290




شکل (۲-۱۰) سیستم بازیابی حرارت

❑ سیستم کنترل بازیابی حرارت

با توجه به گرمای لازم در خروجی مبدل حرارتی، ضرورت دارد یک سیستم کنترلی نصب گردد تا دمای خروجی را در حد لازم نگه دارد. با توجه به شرایط پروژه، اقدام به ساخت برد کنترل اختصاصی جهت کنترل سیستم بازیافت حرارت گردید و این برد پس از اتمام ساخت، نصب و راه‌اندازی شد.

۲-٤-۲-۲- سیستم استحصال CO_2

سیستم استحصال CO_2 از پنج بخش اصلی تشکیل می‌شود:

- لوله‌کشی تخلیه دود: ابتدا نقشه سیستم استحصال CO_2 آماده گردید و لوله‌کشی‌های لازم پس از پایان لوله‌کشی تأسیسات مکانیکی و نصب مبدل، آغاز شد.
- کاتالیست دود: کاتالیست انتخاب و سفارش ساخت آن داده شد.
- خنک‌کن دود: حداکثر دمای قابل تحمل توسط جلبک‌ها، ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در نتیجه، دود خروجی موتور قبل از تزریق به داخل فتوبیوراکتورها، باید به میزان لازم خنک شود. خنک‌کن خریداری و به مجموعه منتقل شد.
- میکسر هوا و دود: با توجه به مرحله رشد جلبک، درصدهای متفاوتی از دود مورد نیاز است. از این رو، دود خروجی موتور با حجم مشخصی از هوا ترکیب و سپس، به داخل فتوبیوراکتورها تزریق می‌شود. این میکسر طراحی و ساخته شد.
- کمپرسور هوا و دود: جهت تزریق مخلوط هوا و دود به سیستم، نیازمند حداقل ۲ بار فشار است که تأمین این فشار، توسط یک کمپرسور هوا انجام می‌شود. این کمپرسور خریداری گردید و پس از پایان لوله‌کشی سیستم دود، در محل نصب شد.

سیستم بازیافت دود طراحی و کاتالیست مورد نظر نصب و کمپرسور هوای لازم خریداری و به محل جدید استقرار موتور ژنراتور منتقل گردید. تنها مانع موجود، سیستم خنک‌کاری دود بود که طرح اولیه آزمایش شد و نتوانست به

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

میزان لازم خنک کاری را انجام دهد. در نتیجه، در ادامه پروژه طراحی دیگری انجام و تجهیزات دیگری به مجموعه اضافه گردید که شرح آن در گزارش دوم خواهد آمد.



شکل (۲-۱۱) سیستم استحصال CO_2

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مراجع

[1] Clark Energy, Island Mode Operation Captive Power Plant, Available online: https://www.clarke-energy.com/gas-engines/island-mode-operation, (accessed on 31 October 2021).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۳- فصل سوم : طراحی و ساخت مبدل حرارتی به منظور تامین آب گرم مصرفی گلخانه براساس نتایج تست عملکردی موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۳-۱- مقدمه

در گزارش مرحله اول این پروژه تحت عنوان "طراحی و انتخاب سامانه تولید همزمان برق و حرارت (CHP)" ذکر گردید که سامانه طراحی‌شده برای بازیافت حرارت از دود خروجی اگزور موتور گازسوز موجود در مجموعه پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز قادر به فراهم کردن شرایط مناسب برای پرورش جلبک نیست. دمای خروجی از سامانه بازیافت حرارت حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در حالی که دمای مناسب برای پرورش جلبک در فتوبیوراکتورها باید حداکثر ۳۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

به همین دلیل، یک تیم مهندسی از پژوهشگاه نیرو اقدام به بازطراحی سامانه بازیافت حرارت نمود. در ادامه این گزارش، جزئیات بیشتری از بازطراحی انجام‌شده ارائه می‌گردد.

۳-۲- طراحی و ساخت مبدل حرارتی به منظور تامین آب گرم مصرفی گلخانه براساس نتایج تست عملکردی موتور

سیستم بازیافت حرارت اولیه شامل دو بخش اصلی می‌باشد: ۱) مبدل حرارتی هوا به آب؛ ۲) سیستم کنترل بازیافت حرارت؛ و ۳) سیستم استحصال CO_2. در شکل (۱-۱)، نقشه لوله‌کشی اولیه ارائه شده است.



شکل (۳-۱) نقشه لوله‌کشی موجود

۳-۲-۱- مبدل حرارتی هوا به آب

برای بازیافت حرارت دود خروجی اگزوز موتور، نیاز به ساخت یک مبدل با توجه به نیاز مجموعه است. بدین منظور، از مبدل‌های تیوپی استفاده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290





شکل (۳-۲) مبدل هوا به آب

در شرایط احتراق استوکیومتریک، نسبت جرمی هوا به سوخت برای گاز طبیعی مورد استفاده برابر با ۱۷/۲ می‌باشد. از سوی دیگر، دبی جرمی گازهای اگزوز برابر با مجموع دبی جرمی سوخت و هوا است. به این ترتیب، دبی جرمی گازهای اگزوز به صورت ذیل محاسبه خواهد شد:

$$\dot{m}_e = 18.2 \times \dot{m}_f = 18.2 \times \frac{54.27}{75 \times 60} = 0.2195 \ kg/sec \qquad (۳-۵)$$

مقدار $C_{p\,e}$ برای محصولات احتراق کامل گاز طبیعی با آنالیز گاز برابر است با:

$$C_{p\,e} = 1.168 \ \frac{kj}{kg.°C} \qquad (۳-۶)$$

با توجه به داده‌ها، توان گرمایی تلف‌شده از طریق گازهای اگزوز مطابق ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_e = 0.2195 \times 1.168 \times (621.08 - 25) = 152.81 \ kw \qquad (۳-۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

توان گرمایی تلف‌شده از طریق تشعشع مطابق ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_r \approx 0.01 \times \dot{Q}_H = 0.01 \times 526 = 5.26\, kw \qquad (۳-۸)$$

۳-۲-۱-۱- مراحل آماده‌سازی مبدل حرارتی هوا به آب

ابتدا ورق گالوانیزه به ضخامت ۵ میلیمتر برای نورد به کارگاه فرستاده شد و به قطر ۱۲ اینچ به صورت بیضی به کارگاه ساخت مبدل بازگشت. یک روز کامل عملیات نورد این ورق به طول انجامید. در نوردکاری ۴ نقطه از ورق به وسیله خال‌جوش به هم متصل شدند و سپش در کارگاه ساخت، جوشکاری به طور کامل انجام شد.



شکل (۳-۳) نورد و جوشکاری پوسته مبدل حرارتی

به طور همزمان، عملیات سوراخ‌کاری ورود و خروج آب و شیر تخلیه نیز صورت گرفت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۴) سوراخ‌کاری مجاری ورود و خروج آب و شیر تخلیه

در ساخت این مبدل حرارتی از لوله‌های فولادی نمره ۳۱۶ به قطر ۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر از هر طرف، استفاده شده است.



شکل (۳-۵) لوله‌های مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

در ساخت صفحات انتهایی و نیم‌صفحه میانی از فولاد نمره ۳۰۴ (فولاد نگیر) به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۶) صفحات انتهایی و میانی مبدل حرارتی

قرار دادن لوله‌ها و جوش‌کاری در حدود یک روز به طول انجامید. پس از اتمام مراحل لوله‌گذاری در داخل صفحه‌ها، کلیه لول‌ها در داخل لوله گالوانیزه قرار گرفت و صفحات انتهایی به وسیله جوش CO_2 به صفحه گالوانیزه متصل شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۷) اتصال صفحات انتهایی به پوسته گالوانیزه

بعد از اتمام این مراحل، فلنج‌های ورود و خروج دود و آب و عدسی‌ها و فلنج‌های ۱۲ اینچی فولادی بر روی مبدل با جوشکاری معمولی نصب شد.







DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۸) اتصال فلنج‌ها و عدسی‌ها به پوسته مبدل حرارتی

مشخصات مصالح مصرفی در ساخت مبدل حرارتی به شرح زیر می‌باشد:

- ورق گالوانیزه ۱۲ اینچ، ۵ میلی‌متری
- لوله فولادی ۳۱۶ به قطر ۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر
- صفحه‌های انتهایی و نیم‌صفحه‌های میانی فولادی از جنس فولاد ۳۰۴ (معروف به فولاد نگیر) به ضخامت ۲ میلی‌متر
- فلنج ورودی و خروجی آب : ۲ عدد، ۳ اینچی و فولادی
- فلنج ورودی دود : ۱ عدد، ۴ اینچی و فولادی
- فلنج خروجی دود : ۱ عدد، ۵ اینچی و فولادی
- عدسی : ضخامت ۱۰ میلی‌متر، ۲ عدد و فولادی
- فلنج ۱۲ اینچی فولادی: ۴ عدد

کلیه کارهای فنی این مبدل حرارتی در ۴ روز کاری به طور کامل انجام شد.

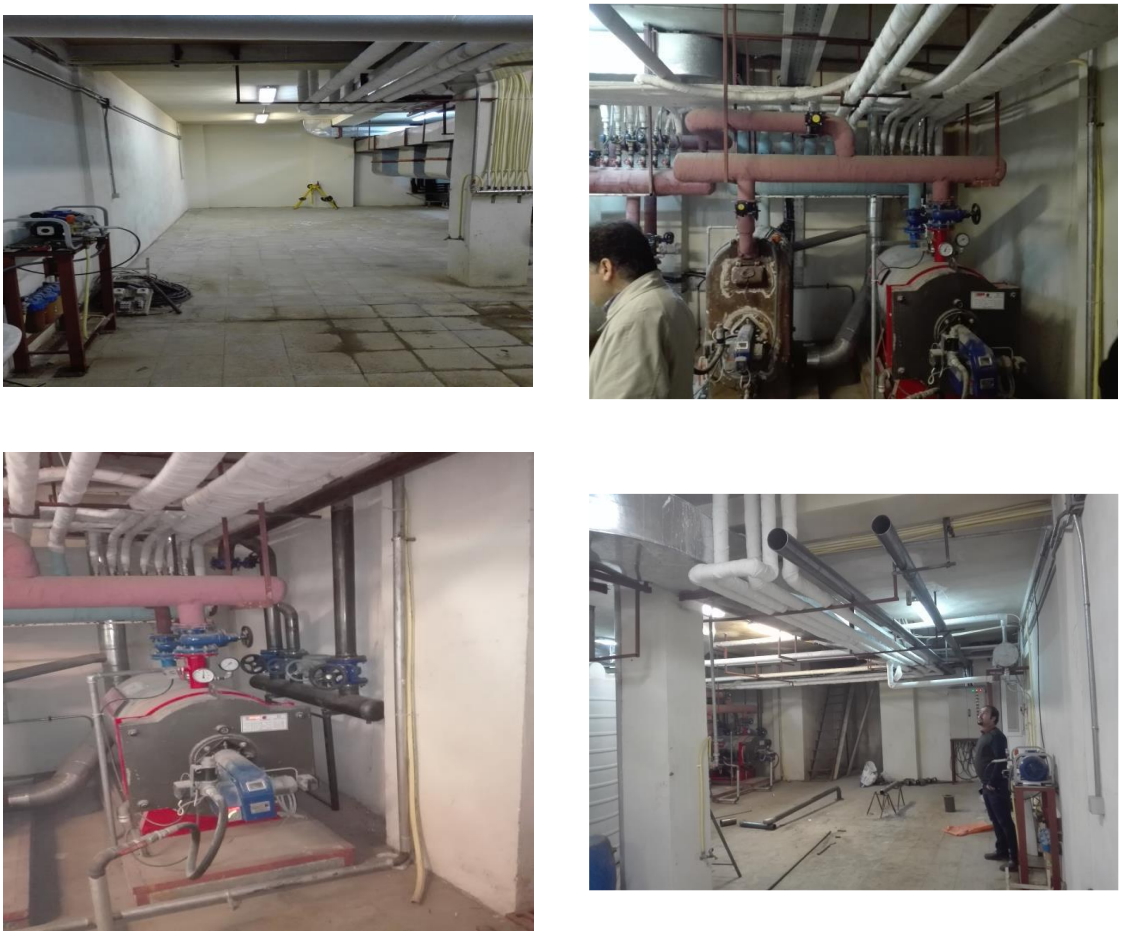
❑ جوشکاری CO_2

جوش CO_2 برای جوشکاری فولاد کربن پایین، فولاد معمولی و فولاد کششی و فولاد ضدزنگ مناسب می‌باشد. دستگاه جوش CO_2 با بهره‌گیری از فناوری کنترل شکل موج توسط راکتور الکترونیکی باعث ایجاد قوس نرم‌تر، افزایش حوضچه مذاب، پاشش کمتر و نمای جوشکاری زیباتر خواهد شد. ظرفیت مقاومتی مناسب این نوع جوش در برابر نوسانات ولتاژ، جریان و اضافه بار گرمایی باعث پایداری، طول عمر و قابلیت اطمینان بالاتر می‌گردد.
سیم جوش CO_2 نسبت به دیگر جوش‌ها از نظر اقتصادی دارای صرفه بهتری می‌باشد؛ اما باید به این نکته توجه داشت که برای مواردی که نیاز به استقامت بالاتر می‌باشد، از نظر استانداردهای بین‌المللی مناسب نمی‌باشند.

۳-۲-۲- اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با توجه به سیستم گرمایش گلخانه باید لوله‌کشی‌های لازم جهت اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه انجام و تدابیر لازم جهت مواقع اضطراری اندیشیده شود. نقشه اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه آماده و لوله‌کشی‌های لازم انجام شد.



شکل (۳-۹) آماده‌سازی اتصال مبدل حرارتی به سیستم گرمایش موتورخانه

در نهایت، مبدل حرارتی و شیرهای کنترل دود نصب گردید و به کلکتور آب گرم مجموعه متصل شد و بدین ترتیب، آماده به کار گردید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۱۰) سیستم بازیابی حرارت

۳-۲-۳- سیستم کنترل بازیابی حرارت

با توجه به گرمای لازم در خروجی مبدل حرارتی، ضرورت دارد یک سیستم کنترلی نصب گردد تا دمای خروجی را در حد لازم نگه دارد. با توجه به شرایط پروژه، اقدام به ساخت برد کنترل اختصاصی جهت کنترل سیستم بازیافت حرارت گردید و این برد پس از اتمام ساخت، نصب و راه‌اندازی شد.

۳-۲-٤- سیستم استحصال CO_2

سیستم استحصال CO_2 از پنج بخش اصلی تشکیل می‌شود:

- لوله‌کشی تخلیه دود: ابتدا نقشه سیستم استحصال CO_2 آماده گردید و لوله‌کشی‌های لازم پس از پایان لوله‌کشی تأسیسات مکانیکی و نصب مبدل، آغاز شد.
- کاتالیست دود: کاتالیست انتخاب و سفارش ساخت آن داده شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- خنک‌کن دود: حداکثر دمای قابل تحمل توسط جلبک‌ها، ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در نتیجه، دود خروجی موتور قبل از تزریق به داخل فتوبیوراکتورها، باید به میزان لازم خنک شود. خنک‌کن خریداری و به مجموعه منتقل شد.
- میکسر هوا و دود: با توجه به مرحله رشد جلبک، درصدهای متفاوتی از دود مورد نیاز است. از این رو، دود خروجی موتور با حجم مشخصی از هوا ترکیب و سپس، به داخل فتوبیوراکتورها تزریق می‌شود. این میکسر طراحی و ساخته شد.
- کمپرسور هوا و دود: جهت تزریق مخلوط هوا و دود به سیستم، نیازمند حداقل ۲ بار فشار است که تأمین این فشار، توسط یک کمپرسور هوا انجام می‌شود. این کمپرسور خریداری گردید و پس از پایان لوله‌کشی سیستم دود، در محل نصب شد.

سیستم بازیافت دود طراحی و کاتالیست مورد نظر نصب و کمپرسور هوای لازم خریداری و به محل جدید استقرار موتور ژنراتور منتقل گردید. تنها مانع موجود، سیستم خنک‌کاری دود بود که طرح اولیه آزمایش شد و نتوانست به میزان لازم خنک کاری را انجام دهد. در نتیجه، در ادامه پروژه طراحی دیگری انجام و تجهیزات دیگری به مجموعه اضافه گردید که شرح آن در گزارش دوم خواهد آمد.



شکل (۳-۱۱) سیستم استحصال CO_2

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

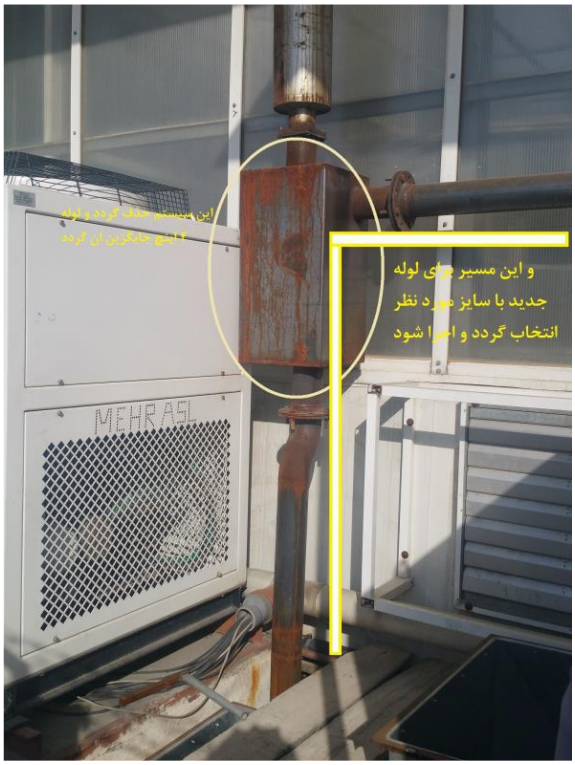
در گزارش مرحله اول این پروژه تحت عنوان "طراحی و انتخاب سامانه تولید همزمان برق و حرارت (CHP)" ذکر گردید که سامانه طراحی‌شده برای بازیافت حرارت از دود خروجی اگزور موتور گازسوز موجود در مجموعه پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز قادر به فراهم کردن شرایط مناسب برای پرورش جلبک نیست. دمای خروجی از سامانه بازیافت حرارت حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در حالی که دمای مناسب برای پرورش جلبک در فتوبیوراکتورها باید حداکثر ۳۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

به همین دلیل، یک تیم مهندسی از پژوهشگاه نیرو اقدام به بازطراحی سامانه بازیافت حرارت نمود. در شکل‌های (۱-۱۲) تا (۱-۱۴)، وضعیت سیستم بازیافت حرارت قبل از اصلاح مسیر نمایش داده شده است.

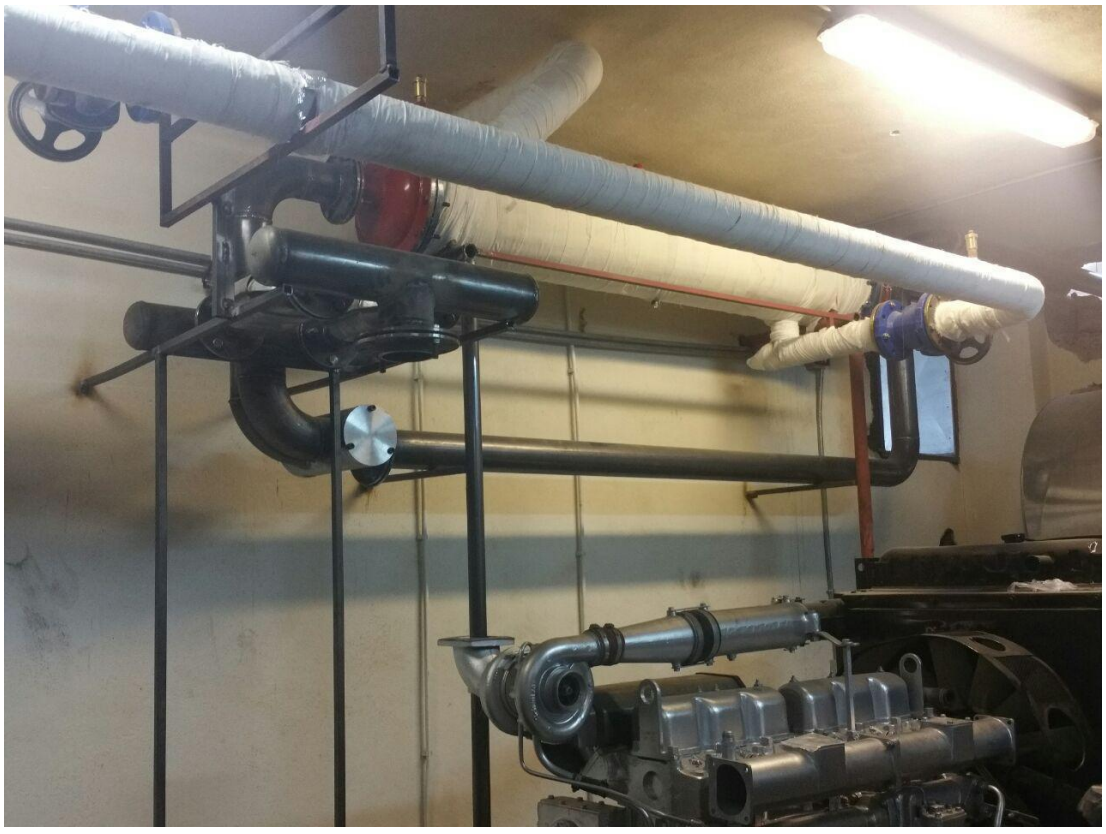


شکل (۳-۱۲) حالت قبل از اصلاح مسیر دود

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۳-۱۳) میکسر و جداکننده دود



DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۳-۱۴) وضعیت موتور پیش از راه‌اندازی

با بررسی‌های انجام‌شده توسط تیم مهندسی پژوهشگاه نیرو مشخص گردید که برای رساندن دمای گاز خروجی اگزوز موتور به دمای مطلوب (کمتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد)، لازم است سیستم بازیافت حرارت موجود اصلاح گردد. این اصلاحات شامل اصلاح مسیر دود و اضافه کردن مبدل حرارتی ثانویه و دیگر تجهیزات مورد نیاز می‌باشد. در ادامه گزارش، به اصلاحات ذکرشده پرداخته می‌شود.

۳-۳- تست مبدل حرارتی

با ساخت مبدل حرارتی هوا به آب و تست آن مشخص شد دمای خروجی از اگزوز موتور (دمای متوسط ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد)، پس از عبور از مبدل حرارتی به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این بدان معناست که مبدل حرارتی ساخته‌شده برای تولید جلبک در فتوراکتورها مناسب نیست. زیرا برای تولید جلبک لازم است دمای دود خروجی از اگزوز به دمای زیر ۳۵ درجه سانتی‌گراد برسد. در حالی که نتایج آزمایشات انجام‌شده روی دمای دود خروجی از مبدل حرارتی، اختلاف متوسط ۱۱۵ درجه سانتی‌گرادی را نشان می‌دهد. بنابراین، تیم مهندسی پژوهشگاه نیرو اقدام به طراحی و ساخت سیستم بازیافت حرارتی جایگزین نمود که شرح آن در ادامه ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۴- فصل چهارم : طراحی و ساخت مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

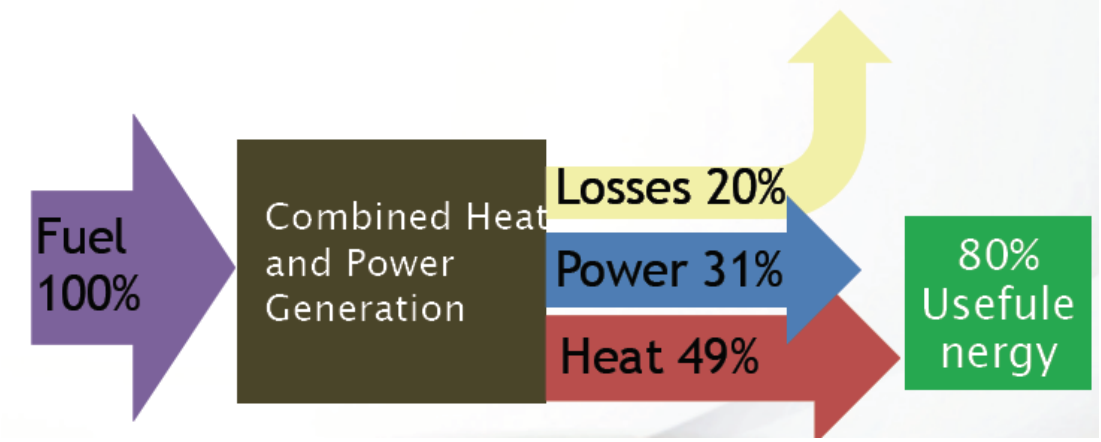
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

٤-١- مقدمه

هدف پروژه حاضر تولید همزمان توان الکتریکی، گرمایش و استحصال دی اکسید کربن می‌باشد. بیوراکتورهای ساخته‌شده در شهر تبریز از دی اکسید کربن موجود در اگزوز موتور-ژنراتور نصب‌شده بهره‌برداری خواهند کرد. طبق توضیحات ارائه‌شده توسط مجری طرح در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز، جهت این کار نیاز بیوراکتورها برابر با ۸۰ لیتر بر دقیقه برای هر بیوراکتور و در مجموع ۴۰۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به نتایج آنالیز گاز می‌توان خروجی موتور را مستقیماً و تنها با کاهش دما به ۵ ± ۳۵ درجه سانتی‌گراد به بیوراکتورها تزریق نمود. از آنجا که خروجی موتور دارای دمای در حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است نیاز به مبدل حرارتی می‌باشد. خود مجموعه دارای مبدل بازیافت گرما است، اما تغییر دما در این مبدل، مناسب کاربرد در بیوراکتورها نبوده و از طرف دیگر، مبدل بازیافت گرما دائم در حال کار نیست. برای حل این مشکل مبدل ثانویه‌ای برای رساندن دبی جرمی ۴۰۰ لیتر بر دقیقه از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به دمای ۵ ± ۳۵ درجه سانتی‌گراد، از نوع استیل ضدزنگ، طراحی شده است. به منظور کاهش آثار تنش حرارتی، مبدل ثانویه دارای دو پوسته به شکل سری است. هر مبدل به منظور مقابله با اثرات انبساط و انقباض به شکل U طراحی شده است.

٤-٢- مبانی و کلیات طراحی و ساخت مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

همزمان با تولید برق، بخش زیادی از انرژی مورد نیاز به شکل حرارت به محیط دفع می‌شود. با بازیافت این حرارت می‌توان بازده کلی انرژی را تا حدود ۸۰٪ افزایش داد. شکل زیر این نسبت را به شکل تقریبی نمایش می‌دهد.



شکل (۴-۱) میزان انرژی قابل استحصال در تولید همزمان برق و حرارت

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

از طرف دیگر در خروجی اگزوز CO_2 وجود دارد که می‌تواند به عنوان منبع تغذیه جلبک استفاده شود. این منبع دی اکسید کربن نه تنها رایگان است، بلکه می‌تواند باعث کاهش آثار گلخانه‌ای در اثر تولید دی اکسید کربن گردد. تنها باید از لحاظ سمی نبودن برای جلبک‌ها مورد بررسی و احتمالاً تصفیه قرار گیرد و دیگر این که، از لحاظ دمایی تا دمای محیط خنک شود.

نمونه‌ای از این طرح در پروژه DG-CHP تبریز در حال انجام است. در این بخش از پروژه هدف، طراحی سیستم خنک‌کاری گاز اگزوز موتور–ژنراتور گازسوز تا رسیدن به محدوده دمای محیط است تا در بیوراکتور جلبک قابل استفاده باشد. لازم به ذکر است که علاوه بر این، در مواقعی از سال که نیاز به گرمایش در فضای گلخانه وجود داشته باشد، می‌توان از مبدل حرارتی جداگانه برای گرمایش فضا بهره گرفت. در حال حاضر، موتور–ژنراتور و مبدل اولیه نصب شده‌اند، اما برای استفاده از گاز اگزوز در بیوراکتور نیاز به مبدل‌های ثانویه و سیستم خنک‌کاری می‌باشد. شکل (۲–۲)، شماتیک تجهیزات این پروژه را نمایش می‌دهد.

مبدل حرارتی نصب‌شده و موجود در این پروژه، برای رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و گرمایش ساختمان طراحی شده است. به همین علت مبدل ثانویه برای رسیدن به دمای هدف مورد نیاز است. به دلیل عدم اطمینان از صحت عملکرد مبدل موجود و تأمین خنک‌کاری در فصل تابستان که نیاز به گرمایش ساختمان وجود ندارد، برای اطمینان بیشتر مبدل ثانویه با ظرفیتی طراحی شده است تا به تنهایی بتواند بار حرارتی مورد نیاز مجموعه را پاسخ دهد. ظرفیت حرارتی مبدل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

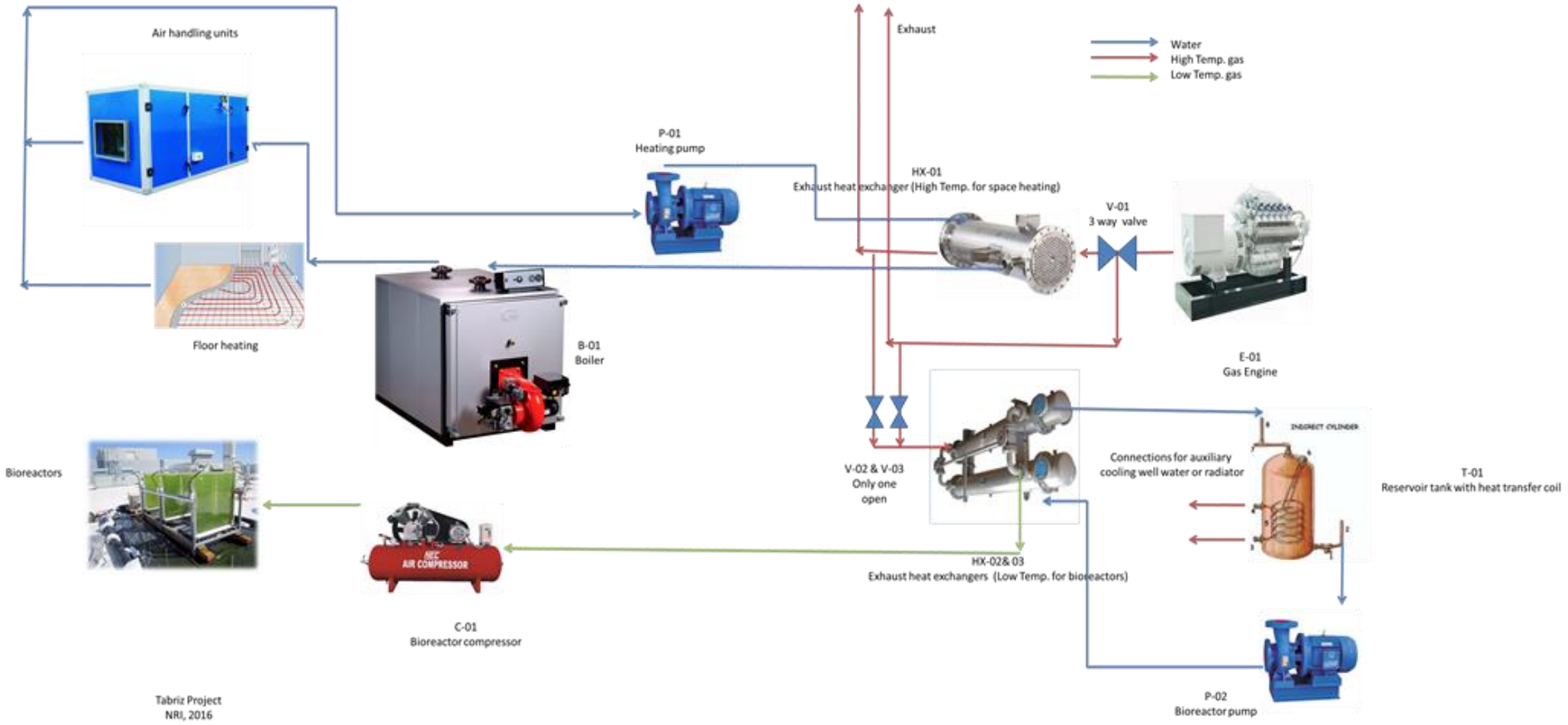
$$\dot{m}c\Delta T = \left(\frac{400}{60 \times 1000}1.2\right)(1100)(670) = 5.9\ kW \qquad (۴–۹)$$

٤-۲-۱- سناریوهای خنک‌کاری در تابستان و تنظیم دما در زمستان

٤-۲-۱-۱- سناریوی اول : استفاده از برج خنک‌کن مدار باز

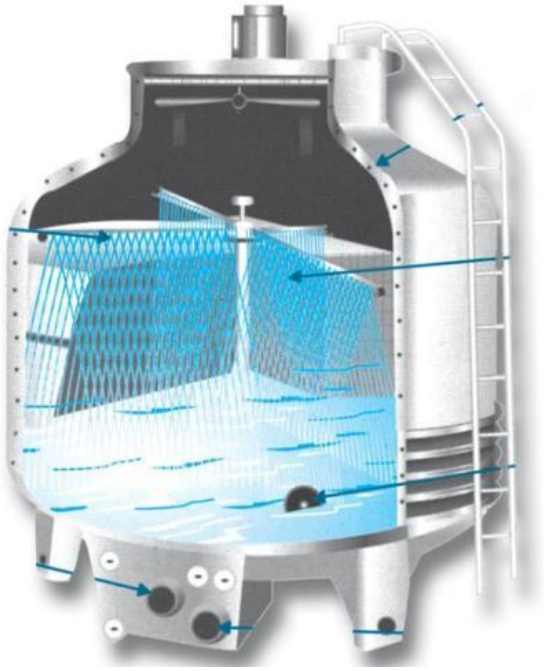
مزایای این سیستم هزینه پایین و راندمان حراراتی بالا است. اما به دلیل نیاز به تعمیرات و تمیزکاری دوره‌ای و نیاز به پرسنل نگهداری، از آن صرفنظر شد. علاوه بر آن، در زمستان نیاز به تخلیه آب وجود دارد. در غیر این صورت، مجموعه آسیب می‌بیند.

DOI:



شکل (۴–۲) شماتیک پروژه DG-CHP تبریز

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴-۳) نمایی از برج خنک‌کن مدار باز

٤-۲-۱-۲- سناریوی دوم : استفاده از برج خنک کن مدار بسته

در این روش از بروز رسوبات در مبدل جلوگیری می‌شود. اما به دلیل مشکلات احتمالی در اثر اهمال در نگهداری و بروز یخزدگی از آن صرفنظر شد.



شکل (۴-۴) نمایی از برج خنک‌کن مدار بسته

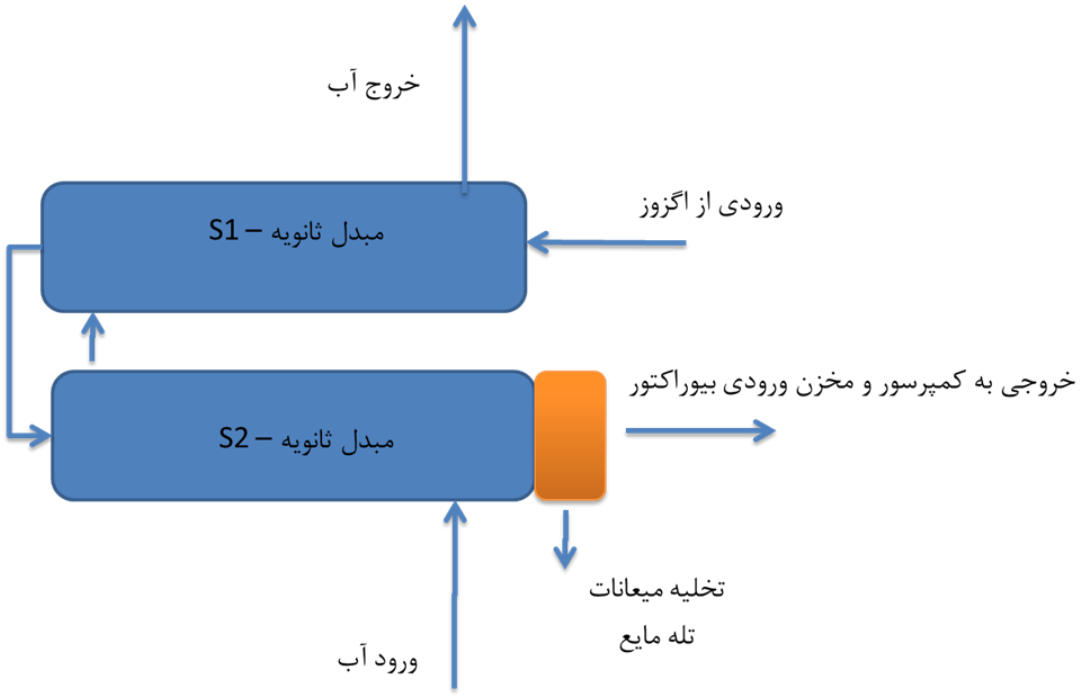
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

٤-٢-١-٣- سناریوی سوم : استفاده از منبع ذخیره به همراه مبدل هوا خنک

با توجه به این که نیاز انتقال حرارت در این مجموعه کم است و مدت زمان کارکرد محدود است، به جای استفاده از تخلیه حرارت به وسیله سیستم برج خنک‌کن، می‌توان از یک مخزن ذخیره استفاده کرد. این مخزن می‌تواند جهت گرمایش آب گرم مصرفی ساختمان به کار گرفته شود. در مواردی که آب گرم مصرفی نتواند گرمای مبدل را پاسخگو باشد، می‌توان از رادیاتور کمکی به شکل انتخابی استفاده کرد.

محاسبات طراحی مبدل صورت گرفت و با اطلاعات موجود سازندگان خارجی مقایسه گردید. اطلاعات در پیوست الف ارائه شده است. برای کاهش اثرات تنش حرارتی، طراحی به شکل دو مبدل جداگانه انجام شده است. دو مبدل به هم متصل می‌شوند. شکل (۲–۵) شماتیک دو مبدل ثانویه و جدول (۲–۱) مشخصات ساخت دو مبدل را نمایش می‌دهد.

در هنگام نصب، مبدل‌های ثانویه با شیب ۱٪ اجرا می‌شوند تا مایعات به سمت تله مایع سرایز شوند. نحوه کنترل باید به نحوی باشد که با بالا رفتن دمای آب از ۸۰ سانتی‌گراد و یا قطع جریان آب، مسیر اگزوز به سمت مبدل قطع شود.



شکل (۴–۵) شماتیک مبدل‌های ثانویه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۴-۱) مشخصات ساخت مبدل‌های ثانویه

	مبدل S1	مبدل S2
جنس پوسته	فولادی یا SS-304	فولادی یا SS-304
جنس تیوب شیت	SS-316	SS-316
جنس لوله‌ها	SS-316	SS-316
نحوه اتصال لوله به تیوب شیت	جوش آرگون	جوش آرگون
طول لوله‌ها	۱/۶ متر	۱/۶ متر
قطر پوسته	۶ "	۶ "
قطر لوله	۵/۸ "	۵/۸ "
تعداد لوله‌ها	۲۰	۰
سایز ورودی گاز	۲ "	–
سایز خروجی گاز	–	۱ ½"
سایز ورود و خروج آب	۱ "	۱ "
تعداد بافل	۷	۷
باز شدگی بافل ٪	۲۵	۲۵

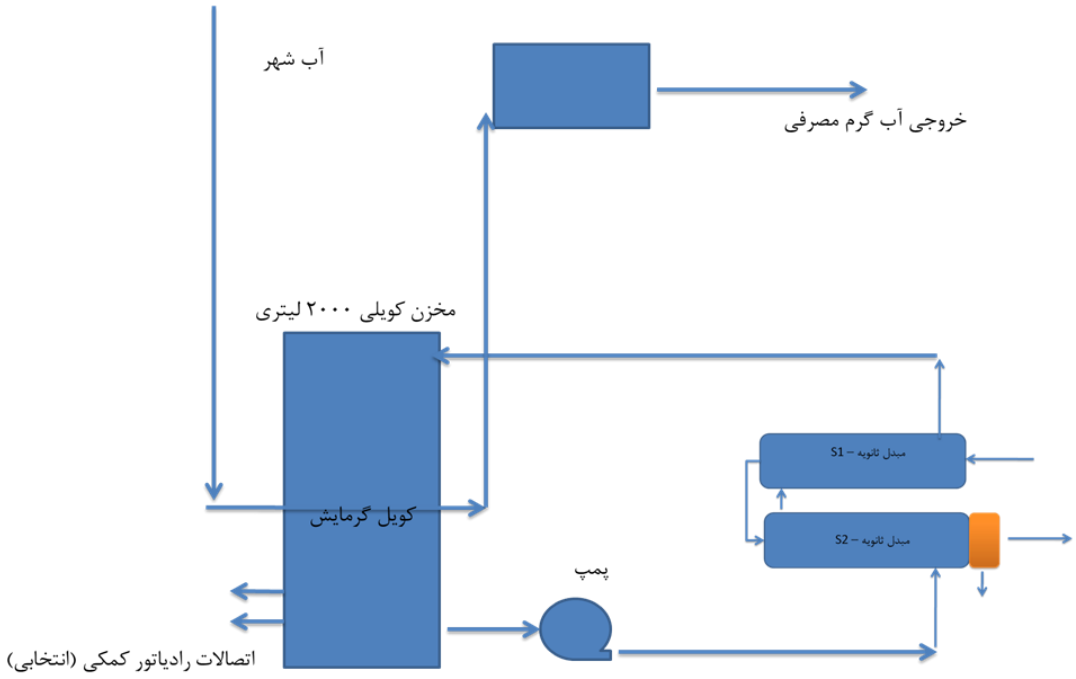
جدول (۲-۲) زمان لازم برای کارکرد دستگاه، بدون این که از آب گرم مصرفی استفاده شود، نشان می‌دهد.

جدول (۴-۲) زمان لازم برای کارکرد دستگاه بدون نیاز به آب گرم مصرفی

حجم مخزن لیتر	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰
زمان کارکرد به ساعت برای افزایش دما به میزان ۱۰ درجه کلوین	۱	۲	۴	۸

با توجه به اطلاعات جدول (۲-۲) از مخزن ۲۰۰۰ لیتری استفاده گردید. اگر زمان کارکرد پیوسته کمتر از ۳ ساعت باشد، نیازی به رادیاتور کمکی نیست. شکل (۲-۶) نحوه اجرای سیستم پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴-۶) نحوه اجرای سیستم پیشنهادی

٤-۲-۲- اهداف

این بخش از پروژه به عنوان گام ضروری جهت تکمیل حلقه فرایند مورد نیاز می‌باشد. در پایان اجرای این مرحله از پروژه می‌توان به اهداف ذیل دست یافت:

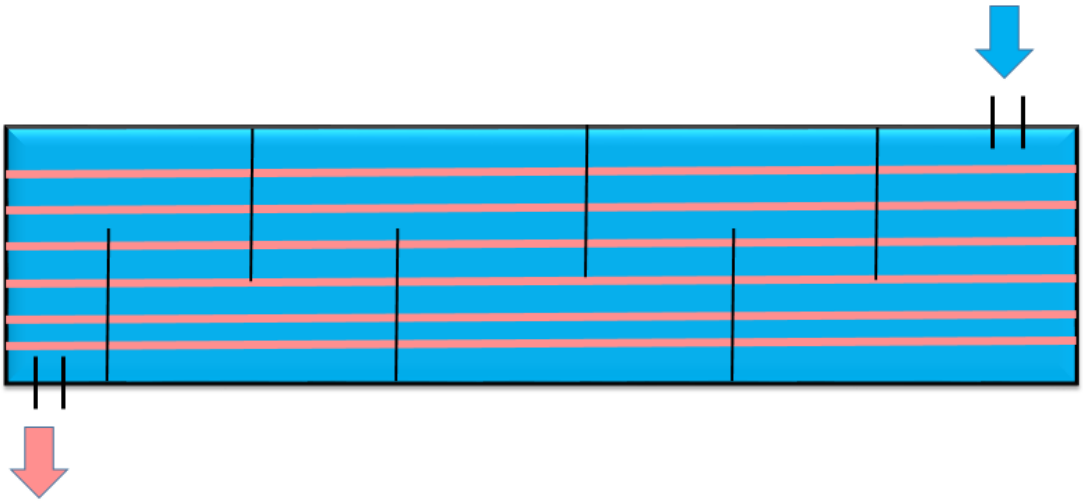
- خنک‌کاری گاز اگزوز تا محدوده دمای محیط
- طراحی و ساخت مبدل بازیافت حرارت اگزوز
- امکان استفاده از گاز اگزوز در تمام طول سال

٤-۲-۳- انواع مبدل حرارتی

در این بخش، مبدل‌های حرارتی و نحوه عملکرد آنها معرفی شده و سپس به بررسی روابط حاکم و انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پرداخته می‌شود.

در یک تعریف کلی، مبدل‌های حرارتی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: به تجهیز فرآیندی گفته می‌شود که سیالی را گرم و یا سرد می‌کند و برای تبادل گرما، از کنار هم قرار دادن دو سیال با دمای متفاوت استفاده می‌شود. در شکل زیر، نحوه عملکرد مبدل حرارتی به شکل ساده نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴-۷) نمایی ساده از نحوه عملکرد مبدل‌های حرارتی

جریان با دمای کم وارد مبدل شـــده و در اثر برخورد با لوله‌هایی که دمای بالایی دارند، گرما می‌گیرد و دمای آن افزایش می‌یابد و از قسـمت خروجی مبدل خارج می‌شـود. بنابراین، سـیال با دمای پایین در اثر جذب گرما در مبدل حرارتی به سیال با دمای بیشتر تبدیل می‌شود. در نظر داشته باشید که این روند می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد و انتقال حرارت به صورت‌های گوناگونی انجام شود.

٤-٢-٣-١- تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی را بر اساس معیارهای گوناگونی تقسیم‌بندی می‌کنند:

١- تقسیم‌بندی بر اساس ساختمان
٢- تقسیم‌بندی بر اساس تعداد سیال
٣- تقسیم‌بندی بر اساس فشردگی
٤- تقسیم‌بندی بر اساس نوع جریان
٥- تقسیم‌بندی بر اساس مکانیزم انتقال حرارت
٦- تقسیم‌بندی بر اساس روش طراحی
٧- تقسیم‌بندی بر اساس معیار عملیاتی (دمایی)

❑ تقسیم‌بندی بر اساس ساختمان

بر اساس ساختمان، مبدل‌ها به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

١- لوله‌ای
٢- صفحه‌ای
٣- سطح گسترش‌یافته

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

٤- بازیاب‌های حرارتی

هر یک از مبدل‌های بالا نیز به انواع مختلفی تقسیم می‌شود:

۱- مبدل‌های لوله‌ای
- دو لوله‌ای
- پوسته–لوله

۲- مبدل‌های صفحه‌ای
- قاب–صفحه
- حلزونی

۳- سطوح گسترش یافته
- لوله‌ای پره‌دار
- صفحه‌ای پره‌دار

٤- بازیاب‌های حرارتی[1] که در صنعت فولاد استفاده می‌شود.

❑ تقسیم‌بندی بر اساس تعداد سیال

تقسیم‌بندی بر اساس تعداد سیالاتی که در مبدل با هم انتقال حرارت انجام می‌دهند به سه گروه تقسیم می‌شود:

۱- دو سیال
۲- سه سیال
۳- بیش از سه سیال

❑ تقسیم‌بندی بر اساس فشردگی

۱- غیرفشرده : نسبت سطح به حجم $\geq$ ۷۰۰ (m^2/m^3)
۲- فشرده : نسبت سطح به حجم $\leq$ ۷۰۰ (m^2/m^3)

❑ تقسیم بندی براساس نوع جریان

تقسیم‌بندی بر اساس جهت برخورد جریان‌های سیال با یکدیگر به سه گروه تقسیم می‌شود:

۱- جریان موازی (هم‌سو)
۲- جریان غیرهم‌سو
۳- جریان عمود بر هم

❑ تقسیم‌بندی بر اساس مکانیزم انتقال حرارت

۱- جابه‌جایی تک فاز در هر دو طرف
۲- جابه‌جایی دو فاز در هر دو طرف
۳- جابه‌جایی تک فاز در یک طرف و دو فاز از طرف دیگر

[1] Recupretor

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

❑ تقسیم‌بندی بر اساس روش طراحی

۱- مبدل‌های حرارتی بدون تغییر فاز
۲- مبدل‌های حرارتی همراه با تغییر فاز

❑ تقسیم‌بندی بر اساس معیار عملیاتی (دما)

۱- $\Delta T_b < 50 \rightarrow Fixed\ tube\ sheet$
۲- $\Delta T_b > 80 \rightarrow floating\ head$
۳- $50 < \Delta T_b < 80 \rightarrow U - type$

در رابطه بالا ΔT_b دمای حجمی (بالک) می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (۴-۱۰)$$

$$\Delta t = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (۴-۱۱)$$

$$\Delta T_b = \Delta T - \Delta t \quad (۴-۱۲)$$

در روابط بالا، T_1، T_2، t_1 و t_2 به ترتیب عبارتند از: دمای سیال ورودی گرم، دمای سیال خروجی گرم، دمای سیال ورودی سرد، دمای سیال خروجی گرم. همچنین، باید در نظر داشت که هر یک از انواع مبدل‌ها، خود به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در ادامه، به دلیل استفاده زیاد از مبدل‌های حرارتی پوسته–لوله در صنایع پتروشیمی و نیروگاهی، به معرفی انواع رایج مبدل‌های پوسته–لوله پرداخته می‌شود.

٤-٢-٤- انواع مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله

٤-٢-٤-١- مبدل‌های یک سرثابت[1]

در مبدل‌های نوع سرثابت، صفحه لوله‌ها به پوسته جوش یا به وسیله پیچ و مهره محکم شده است، لذا، با تغییرات درجه حرارت جایی برای انبساط یا انقباض لوله‌ها و پوسته هر یک به طور جداگانه وجود ندارد. انبساط یا انقباض هر یک از دو جزء فوق به تنهایی ممکن است موجب شکستن و یای خمیدگی لوله‌ها شود. بنابراین، اختلاف درجه حرارت دو سیال که با هم تبادل حرارت می‌کنند نباید زیاد باشد. برای غلبه بر این مشکل معمولاً از اتصالات انبساطی[2] روی پوسته مبدل استفاده می‌شود. وقتی که لوله‌ها داغ‌تر شوند منبسط می‌گردند. در نتیجه، این اتصال به پوسته اجازه انبساط می‌دهد. وقتی که لوله و پوسته سرد شوند اتصال انبساطی و لوله‌ها منقبض می‌شوند و کشش

[1] Fixed Tube Sheet Exchangers
[2] Expansion Joint

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

وارده بر نقاط جوش خورده کاهش می‌یابد. به دلیل مشکلاتی که در بازرسی و تمیزکردن مبدل‌های سرثابت وجود دارد عموماً در جایی استفاده می‌شوند که احتمال کثیف شدن قسمت پوسته محدود باشد.

٤-٢-٤-٢- مبدل‌های یک سرشناور[1]

در این نوع مبدل، یکی از صفحه لوله‌ها بین کانال و پوسته پیچ و مهره شده و در وضعیت ثابتی قرار می‌گیرد، اما صفحه لوله دیگر در داخل پوسته به صورت شناور درآمده، امکان انبساط یا انقباض برای هر یک از دو جزء حامل سیال یعنی لوله و پوسته وجود دارد. از این رو، اختلاف درجه حرارت دو سیالی که با هم تبادل حرارت می‌کنند هر چند که زیاد باشد، اشکالی ایجاد نخواهد کرد. بعد از باز کردن صفحه ثابت، دسته لوله‌ها و سرشناور را می‌توان مانند یک واحد یکپارچه بیرون کشید. بدین طریق، امکان تمیزکردن و بازرسی قسمت خارجی لوله‌ها میسر می‌گردد. ایراد این مبدل‌ها فاصله نسبتاً زیاد بین پوسته و لوله‌ها می‌باشد. این فاصله برای تطبیق دادن صفحه شناور لوله‌ها با پوسته می‌باشد. چون در این فضا نمی‌توان لوله‌ای به کار برد، این فضا بلااستفاده می‌ماند و بازده این مبدل‌ها کاهش می‌یابد.

٤-٢-٤-٣- مبدل با لوله‌های U شکل[2]

این نوع مبدل حرارتی شامل فقط یک کانال و یک صفحه لوله می‌باشد. از این رو ورودی و خروجی لوله‌ها از طریق یک کانال که به دو قسمت تقسیم شده است صورت می‌گیرد. همان طوری که از نام این مبدل حرارتی پیدا است لوله‌ها به شکل حرف لاتین (U) ساخته می‌شوند. با بازکردن پیچ و مهره‌ها، کانال از پوسته جدا می‌شود و صفحه لوله‌ها و دسته لوله‌ها را می‌توان از پوسته خارج نمود، به طوری که امکان تمیزکردن و بازرسی قسمت خارجی لوله‌ها فراهم می‌شود. به هر حال، وجود خم در لوله‌ها مانعی برای تمیزکردن و بازرسی قسمت داخلی لوله‌های می‌باشد. از طرفی نمی‌توان جریان‌های حاوی مواد جامد (کثیف) را به خاطر ایجاد ساییدگی در خم موجود در لوله‌ها استفاده کرد. این مبدل‌ها برای سیالاتی به کار می‌رود که اختلاف درجه حرارت زیادی داشته باشند، زیرا انتهای U شکل لوله‌ها، امکان انبساط و انقباض را تا حد زیادی به وجود می‌آورد.

٤-٢-٤-٤- مبدل‌های دو لوله‌ای[3]

این مبدل حرارتی از دو لوله هم مرکز ساخته شده است که یکی کوچک‌تر از دیگری می‌باشد. یکی از جریانات از داخل لوله کوچک‌تر و دیگری از بین دو لوله عبور می‌کند. گاهی اوقات برای ازدیاد سطح تماس و تبادل حرارتی بهتر، سطح خارجی لوله داخلی با پره‌های طولی پوشده می‌شود. این مبدل‌ها برای بار حرارتی زیاد مناسب نیستند.

٤-٢-٤-٥- کولر یا خنک‌کننده هوایی[4]

[1] Floating Head Heat Exchanger
[2] U-Tube Exchanger
[3] Double Pipe Heat Exchanger
[4] Fin Fan or Air Cooler

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

کولرهای هوایی برای خنک کردن سیالاتی چون گاز، مایعات نفتی، آب و نیز مایع کردن بخارات در صنایع به کار می‌روند. کولرهای هوایی به اشکال مختلف ساخته می‌شوند که در زیر شرح مختصری در مورد هر یک داده خواهد شد:

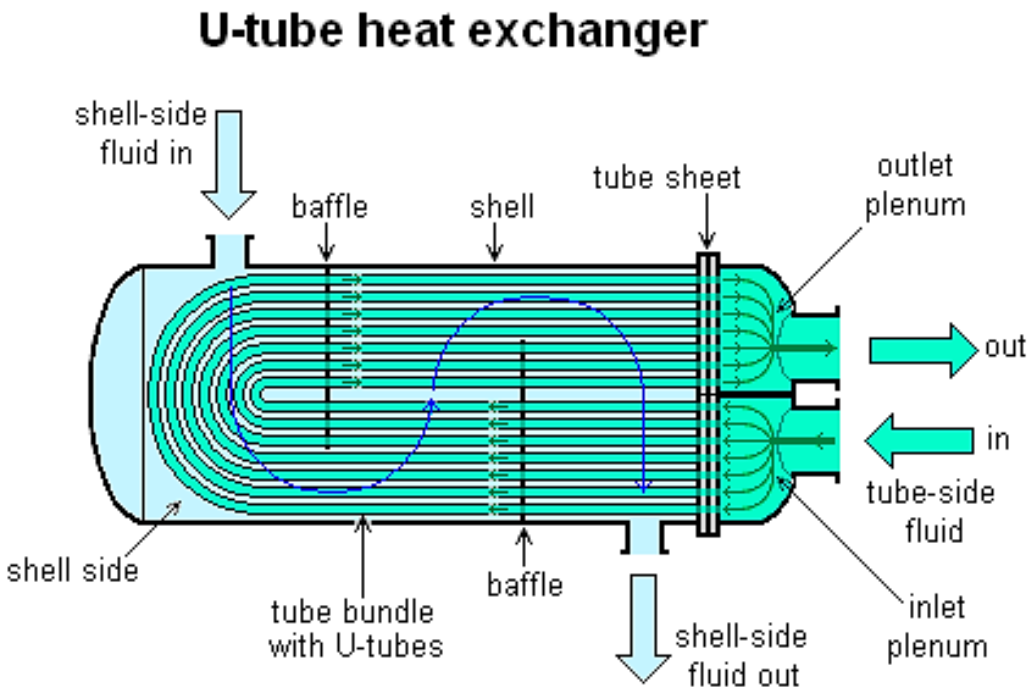
- کولر هوایی با پنکه مکنده[1]: فن بالای کولر قرار می‌گیرد.
- کولر هوایی با پنکه دمنده[2]: فن پایین کولر قرار می‌گیرد.
- کولر هوایی با جریان طبیعی هوا[3]: بدون استفاده از فن، عمل خنک کردن سیالات را توسط جریان طبیعی هوا انجام می‌دهد.
- کولر هوایی با استفاده از هوای مرطوب[4]: علاوه بر داشتن فن، در زیر آن حوضچه‌ای پرآب قرار دارد که هوای مورد نیاز را مرطوب می‌کند. در این حالت عمل خنک کردن بهتر صورت می‌گیرد.

٤-٢-٥- اجزای مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی موجود در صنایع و کارخانجات به ویژه صنعت پتروشیمی، معمولاً از نوع پوسته و لوله[5] می‌باشند. از مزایای این مبدل‌ها می‌توان به سطح تماس زیاد در حجم کم، طرح مکانیکی خوب و توزیع یکنواخت فشار و راحتی تمیزکردن آن‌ها اشاره کرد. همان طور که قبلا گفته شد، ساختمان این مبدل‌ها شامل تعدادی لوله است که در داخل یک استوانه قرار می‌گیرند و دو سیال مورد نظر که یکی سرد و دیگری گرم است، بدون این که به طور مستقیم با یکدیگر برخورد کنند، از طریق دیواره فلزی لوله‌ها با یکدیگر تبادل حرارت خواهند کرد. به عبارت دیگر، یکی از این دو سیال در لوله‌ها و دیگری در اطراف لوله‌ها، درون پوسته جریان خواهد داشت. در ادامه، به معرفی اجزای اصلی این مبدل‌ها پرداخته می‌شود.

[1] Induced Draft
[2] Forced Draft
[3] Natural Draft
[4] Humidity Air Cooler
[5] Shell and Tube

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴–۸) نمونه‌ای از مبدل حرارتی از نوع U-Type

٤-٢-٥-١- لوله‌ها

جنس، تعداد، قطر، طول و ضخامت لوله‌ها به طبیعت سیال (خورنده یا بی‌اثر، تمیز یا کثیف و ...)، مقدار جریان سیال، فشار و درجه حرارت سیال و بار حرارتی مبدل بستگی دارد. لوله‌ها ممکن است به صورت راست (دو سر باز) یا به شکل U روی صفحه لوله[1] پرس یا جوش داده شوند. قطر خارجی لوله‌ها بین ۱۵/۸۷۵ میلی‌متر تا ۳۱/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. قطرهای خارجی ۱۹/۰۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر متداول می‌باشد. ضخامت لوله‌ها نیز در محدوده ۱ تا ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد.

٤-٢-٥-٢- پوسته

جنس، قطر، ضخامت و حجم پوسته به طبیعت سیال، مقدار جریان سیال، فشار و درجه حرارت سیال و مشخصات دسته لوله‌ها[2] از نظر قطر و طول آن بستگی دارد. نوع کاربرد نیز تعیین‌کننده خواهد بود. به عنوان مثال، پوسته مبدل‌های از نوع تبخیرکننده و همچنین، مبدل‌های از نوع جوشاننده، دارای فضای تبخیر می‌باشند. توجه داشته باشید که نسبت طول دسته لوله به قطر داخلی پوسته باید در محدوده زیر قرار گیرد.

[1] Tube Sheet
[2] Tube Bundle

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

$$2 < \frac{\text{طوله دسته لول}}{\text{قطر داخلی پوسته}} < 5 \qquad (۴-۱۳)$$

٤-٢-٥-٣- صفحه لوله

صفحه‌ای دایره‌ای شکل که سر لوله‌ها روی آن قرار می‌گیرد. جنس، ضخامت و قطر این صفحه به جنس لوله‌ها، تعداد لوله‌ها و نوع مبدل حرارتی بستگی دارد. لوله‌ها ممکن است به آن جوش یا پرس شده باشند. تعداد آن یک یا دو عدد در هر مبدل می‌باشد. این صفحه نیز ممکن است به پوسته جوش داده شده یا توسط فلنج به آن متصل باشد. لوله‌ها عموماً با دو آرایش مربعی یا مثلثی روی صفحه لوله‌ها نصب می‌گردند. در آرایش مربعی، کمترین مقاومت در مقابل جریان و در نتیجه، کمترین افت فشار به وجود می‌آید. یکی از معایب آرایش مربعی، قرارگرفتن تعداد کمتر لوله در یک سطح معین می‌باشد. وقتی که آرایش لوله‌ها مثلثی باشد، افت فشار جریان پوسته بیشتر از وقتی است که آرایش مربعی باشد. اما میزان انتقال حرارت در آرایش مثلثی بیشتر است.

٤-٢-٥-٤- کانال

جریان سیال به داخل لوله‌ها از طریق کانال صورت می‌گیرد. تعداد یک یا دو کانال در هر مبدل موجود است. در مبدل‌های حرارتی چندگذره[1]، از یک صفحه تقسیم‌کننده جریان استفاده می‌شود تا کانال به دو یا چند قسمت تقسیم شود.

٤-٢-٥-٥- تیغه عرضی[2]

تیغه‌ها به شکل دایره برش خورده یا به شکل دیسک و حلقه[3] ساخته می‌شوند. برای افزایش زمان تبادل حرارتی بین لوله‌ها و سیال درون پوسته از تعداد معین و مناسبی تیغه استفاده می‌شود. تیغه‌ها در داخل پوسته قرار گرفته و لوله‌ها از میان سوراخ‌های آن‌ها که به تعداد لوله‌ها می‌باشند عبور می‌کنند. این صفحات دو نقش عمده دیگر نیز به عهده دارند: ۱) با ایجاد جریان‌های متقاطع، مقاومت فیلمی تشکیل شده روی لوله‌ها را از بین برده و ضریب انتقال حرارت را بالا می‌برند؛ ۲) لوله‌ها را نگه داشته و از خم شدن آن‌ها جلوگیری می‌کنند.

٤-٢-٥-٦- تیغه‌های طولی[4]

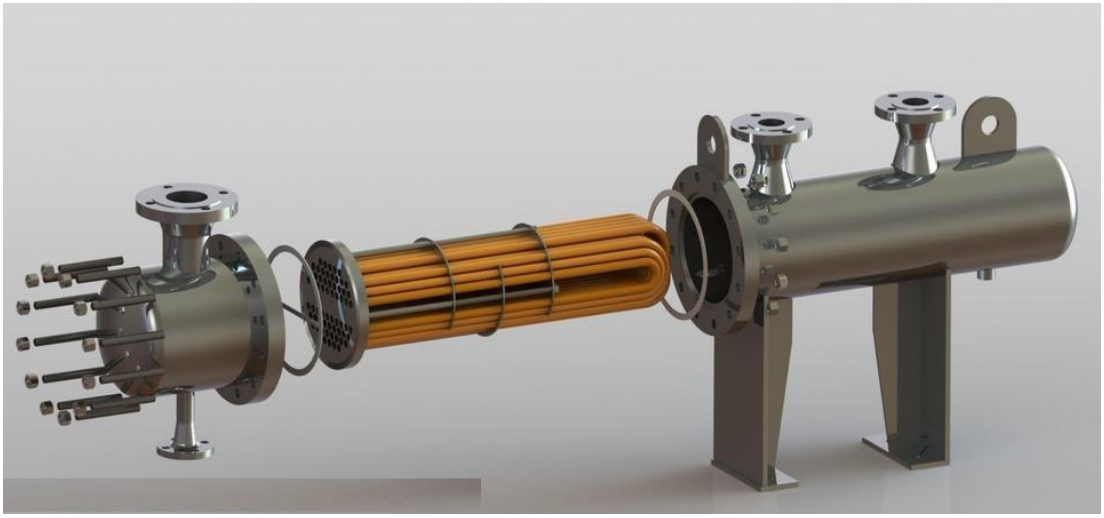
گاهی اوقات برای تقسیم کردن جریان پوسته به دو یا سه گذر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

٤-٢-٥-٧- سر پوسته[5]

[1] Multi-Pass
[2] Baffle
[3] Disc and Ring
[4] Longitudinal
[5] Shell Head

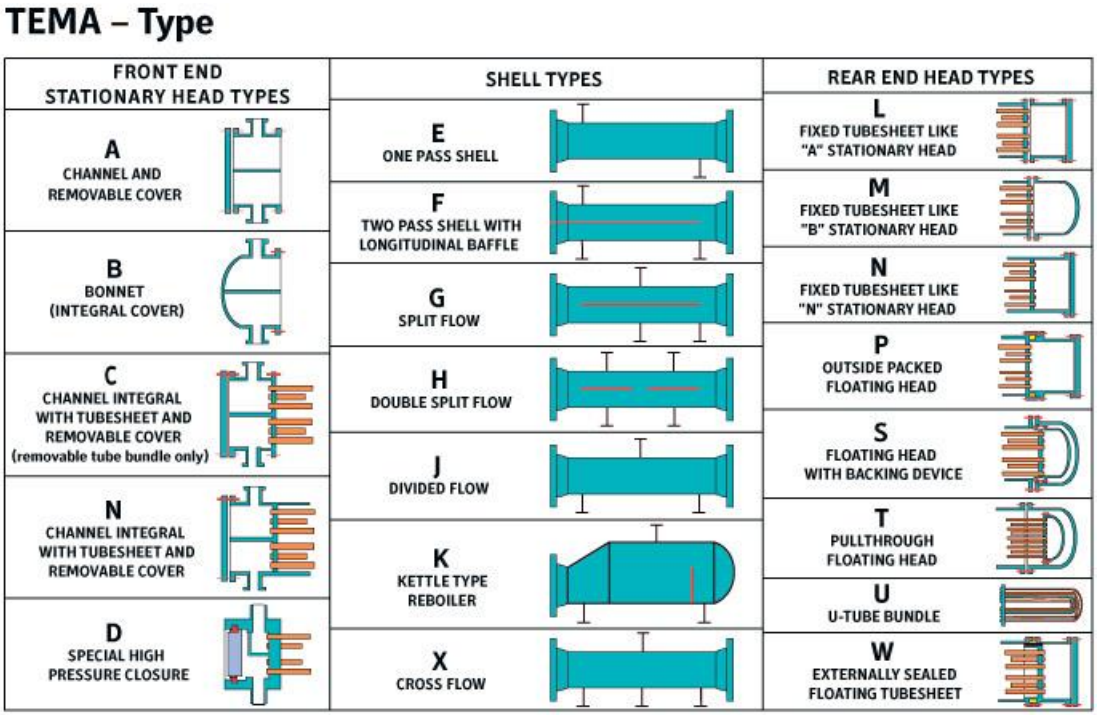
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

معمولاً به شکل نیم‌کره ساخته شده و به وسیله پیچ و مهره، به پوسته وصل می‌شود و در مواقع لزوم، برای بازرسی لوله‌ها برداشته می‌شود. در شکل زیر، یک نمونه مبدل حرارتی U-Type به همراه اجزای آن نشان داده شده است.



شکل (۴-۹) یک نمونه مبدل حرارتی پوسته لوله از نوع [6U-Type]

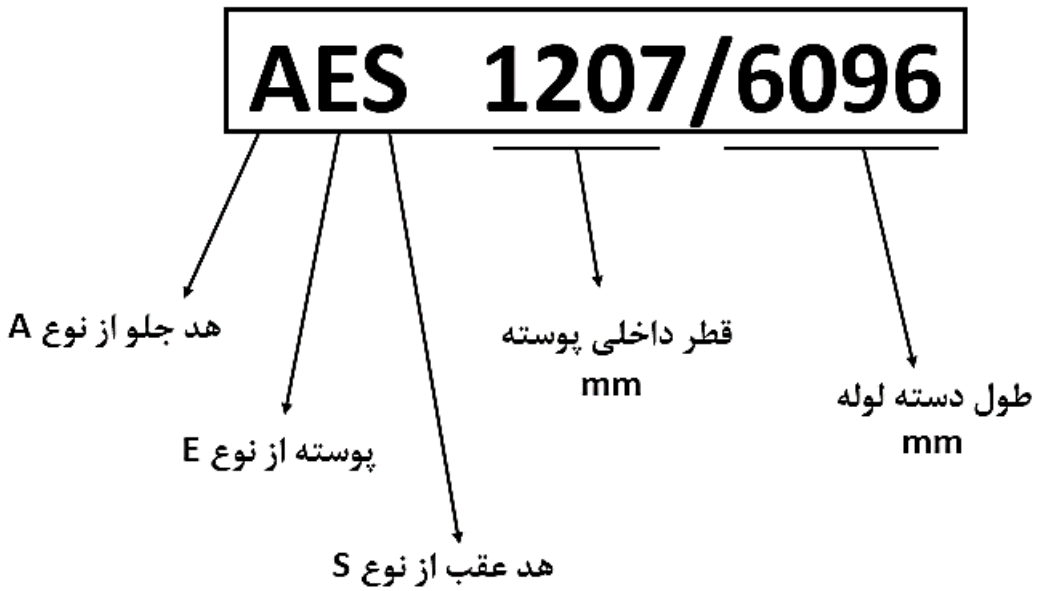
در شکل زیر، انواع سرهای ثابت و عقبی و انواع پوسته، مطابق استاندارد TEMA در مبدل‌های پوسته–لوله نشان داده شده است.



DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۴-۱۰) انواع هدها و پوسته‌ها در مبدل‌های پوسته–لوله

در منابع استاندارد، مبدل‌های حرارتی را به شکل زیر معرفی و تقسیم‌بندی می‌کنند.



شکل (۴-۱۱) پلاک مربوط به مبدل حرارتی

٤-٢-٦- طراحی مبدل حرارتی

به طور کلی برای طراحی یک مبدل حرارتی پارامترهای زیر محاسبه می‌شود:

۱- محاسبه انتقال حرارت در سمت پوسته و داخل لوله
۲- محاسبه افت فشار در سمت لوله و سمت پوسته
۳- ارتعاشات لوله
۴- تحلیل اگزرژی مبدل مورد نظر

در این قسمت، ابتدا روش‌های انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی بیان شده و سپس، به بررسی نحوه محاسبه انتقال حرارت در سمت پوسته و لوله پرداخته می‌شود.

٤-٢-٦-١- روش‌های انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

❑ هدایت[1]

در اثر اختلاف درجه حرارت بین دو نقطه از جسم صورت می‌گیرد. در این حالت، ذرات جسم تغییر مکان قابل ملاحظه‌ای ندارند. هدایت در حقیقت انتقال انرژی حرکتی یک ملکول به ملکول‌های مجاور بوده و تنها عامل ایجاد جریان حرارتی در جسم می‌باشد. بنابراین، هر چه تماس مولکول در یک جسم بیشتر باشد، هدایت حرارتی آن بیشتر است. در نتیجه، در گازها که فاصله بین ملکولی زیادتر می‌باشد، انتقال حرارت از طریق هدایت کمتر انجام می‌گیرد. ضریب هدایت جامدات از مایعات و مایعات از گازها بیشتر می‌باشد.

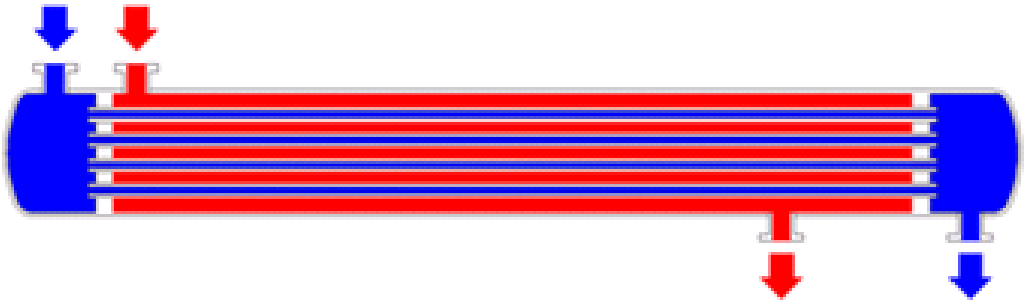
❑ جابه‌جایی[2]

در این روش، ملکول‌ها متحرک بوده و انرژی حرارتی را با خود جا به جا می‌کنند. وقتی برای سردکردن یک صفحه گرم، آن را در مقابل یک بادبزن قرار می‌دهند، این همان انتقال حرارت جابه‌جایی از صفحه گرم به هوای اطراف می‌باشد. در مثال فوق جابه‌جایی، اجباری است. عمل انتقال حرارت در حالت فوق به سرعت فن بستگی دارد. حال اگر برای سرد کردن صفحه گرم از فن استفاده نمی‌شد، عمل سرد شدن از طریق جابه‌جایی انجام می‌گرفت. بدین طریق که هوای مجاور صفحه، گرم شده و با تغییری که در وزن مخصوص آن بوجود می‌آید، به قسمت‌های دیگر حرکت کرده و هوای سرد جای آن را می‌گیرد. این حالت که انتقال حرارت در اثر تغییر وزن مخصوص سیال در اثر حرارت حاصل شده، انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی طبیعی می‌باشد. در حرکت هوا یا هر سیال دیگری روی سطح، سرعت هوا در مجاورت صفحه صفر است (در اثر ویسکوزیته)، سرعت از صفر تا سرعت جریان آزاد (U) تغییر می‌کند. هرچه ویسکوزیته سیال کمتر باشد، این طول کمتر بوده و با زیاد شدن ویسکوزیته این فاصله که به آن لایه مرزی می‌گویند، بیشتر است. چون سرعت در مجاورت صفحه صفر است، پس در این نقطه انتقال حرارت به وسیله هدایت انجام می‌پذیرد که به ضریب هدایت حرارتی سیال و اختلاف درجه حرارت در مجاور صفحه وابسته است. چون اختلاف درجه حرارت سیال با تغییر سرعت در حال تغییر است، بنابراین باید پارامتر سرعت را در انتقال حرارت در نظر گرفت.

جریان‌های تبادل‌کننده حرارت در مبدل‌ها ممکن است به شکل‌های مختلف (همسو، ناهمسو و متقاطع) به حرکت درآیند. در جریان‌های همسو، دو سیال گرم و سرد بدون تماس فیزیکی با همدیگر در طول مبدل به صورت هم جهت حرکت کرده و از طرف دیگر خارج می‌شود. در این حالت در ورود به مبدل بیشترین اختلاف دما و بنابراین، بیشترین میزان انتقال حرارت وجود دارد و در خروج اختلاف درجه حرارت حداقل شده و میزان انتقال حرارت کم می‌شود. در جریان همسو، چون دو سیال در یک جهت جریان دارند دمای سیال سرد در خروج نمی‌تواند بیشتر از دمای سیال گرم باشد.

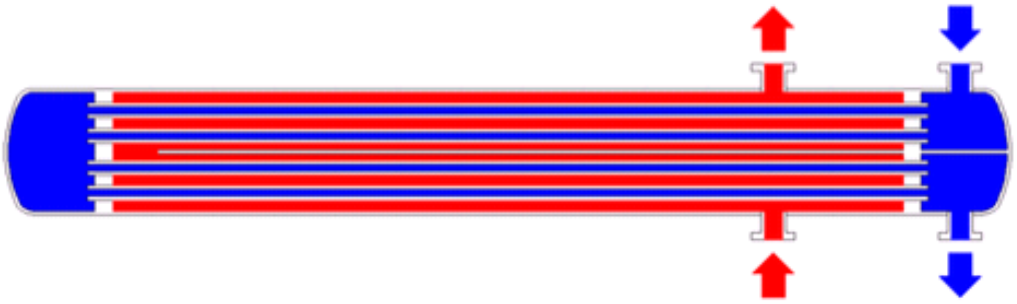
[1] Conduction
[2] Convection

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴-۱۲) جریان همسو (Co-Current)

در جریان‌های ناهمسو، سیالات در جهات مخالف همدیگر جریان می‌یابند. در این حالت، اختلاف درجه حرارت در طول لوله نسبت به جریان همسو یکنواخت‌تر است. میزان انتقال حرارت در جریان متقابل در طول لوله به مقدار کم تغییر می‌کند. در این حالت، دمای بالاتر برای سیال سرد از سیال گرم در خروج امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل (۴-۱۳) جریان غیرهمسو (Counter-Current)

جریان‌های متقاطع عموماً در گرمایش و سرمایش گازها استفاده می‌شود. در این حالت، یکی از جریان‌ها داخل لوله و دیگری عمود بر آن حرکت می‌کند.

٤-٢-٦-٢- محاسبه انتقال حرارت در داخل لوله و پوسته

در این بخش، به معرفی پارامترهای اصلی محاسبه انتقال حرارت در داخل لوله و پوسته پرداخته می‌شود. در نظر داشته باشید که این بخش فقط جهت آشنایی با بحث طراحی، بیان شده و تشریح پارامترهای آن از بحث اصلی خارج است.

❑ انتقال حرارت داخل لوله

۱- تعیین رژیم جریان داخل لوله (تعیین عدد گراشف، عدد ناسلت، عدد رینولدز و ...)

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲- بدست آوردن ضریب E
۳- در نهایت، محاسبه میزان انتقال حرارت در داخل لوله

❑ انتقال حرارت در سمت پوسته

برای محاسبه انتقال حرارت سمت پوسته از روش Bell یا Kern استفاده می‌شود.

❑ محاسبه افت فشار در داخل پوسته و لوله

همان طوری که پیشتر گفته شد، در این بخش، فقط به معرفی پارامترهای اصلی پرداخته شده و به علت خارج شدن از بحث اصلی، از تشریح متغیرها خودداری می‌شود.
افت فشار سمت لوله شامل موارد زیر می‌شود:

- افت فشار لوله‌های سیستم
- افت فشار نازل‌های سمت لوله
- افت فشار هدها

به عنوان نمونه، رابطه افت فشار لوله‌های سیستم در ادامه بیان می‌شود.

- افت فشار در لوله‌های سیستم

برای محاسبه افت فشار در داخل لوله‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta P_i = \left(\frac{4 * fi * \dot{m}^2}{2\rho * di * \emptyset}\right) \qquad (۴-۱۴)$$

در رابطه بالا، f_i ضریب اصطکاک، $\dot{m}$ دبی جرمی سیال داخل لوله، d_i قطر دهانه لوله و $\emptyset$ ضریب تصحیح می‌باشد.

- افت فشار در سمت پوسته

با استفاده از روش Kern یا Bell می‌توان افت فشار سمت پوسته را محاسبه کرد.

٤-۲-۷- کاربرد مبدل‌های حرارتی

به طور کلی مبدل‌های حرارتی یا برای گرمایش یا سرمایش جریان سیالات استفاده می‌شوند.

٤-۲-۷-۱- مبدل‌های حرارتی سردکننده

❑ خنک‌کننده

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

در این نوع مبدل، درجه حرارت سیال بدون این که حالت سیال عوض شود کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، قسمتی از گرمای محسوس سیال گرفته می‌شود. اگر عمل سرد کردن توسط آب صورت گیرد به آن کولر آبی می‌گویند و دارای ساختمان معمولی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله می‌باشد. چنان‌چه عمل خنک کردن توسط هوا صورت گیرد، این نوع مبدل حرارتی را کولر هوایی می‌گویند.

❑ چگالنده

وظیفه این مبدل، تبدیل بخار به مایع است و بر این اساس، لازم است که گرمای نهان تبخیر یک بخار را جذب تا به مایع تبدیل شود. این مبدل می‌تواند ساختمان یکی از انواع خنک‌کننده های آبی یا هوایی را داشته باشد و معمولاً به طور افقی نصب می‌شوند.

❑ سردکننده

هر مایعی که بخواهد تبخیر شـــود احتیاج به انرژی حرارتی دارد و اگر این انرژی حرارتی را از محیط بگیرد به ناچار محیط سرد خواهد شد. در صنایع نفت برای تولید سرما از مایعات نفتی مثل پروپان و بوتان که در شرایط متعارفی بخارند، استفاده می‌شود. سردکننده دارای ساختمان پوسته و لوله بوده و در قسمت فوقانی پوسته، دارای فضائی جهت تبخیر پروپان می‌باشد. مایع پروپان از ته مبدل وارد و در اطراف لوله‌ها، تبخیر و تولید سرما می‌کند.

٤-٢-٧-٢- مبدل‌های حرارتی گرم‌کننده

تمام مبدل‌های حرارتی که وظیفه افزایش درجه حرارت مواد را به عهده دارند در حقیقت گرم‌کننده می‌باشـــند. مانند مبدل‌های حرارتی جوشاننده، تبخیرکننده، کوره و غیره.

❑ جوشاننده[1]

این مبدل برخلاف تبخیرکننده، تنها جزئی از کل مایع را که مورد نظر باشد به حالت بخار تبدیل می‌کند. جوشاننده‌ها معمولاً دارای ساختمان لوله و پوسته و به قسمت پایین برج تفکیک متصل می‌شوند. جوشاننده‌ها به سه نوع مختلف در صنایع نفت یافت می‌شوند که عبارتند از:

۱- جوشاننده نوع سیفونی[2]: معمولاً به طور عمومی در کنار برج نصب می‌شود. جریان مایع از ته برج به لوله‌ها بر اساس خاصیت سیفونی برقرار می‌شود. به این ترتیب، که تبخیر جزئی از مایع داخل لوله توسط سیال گرم باعث می‌شود که سطح مایع در مبدل حرارتی نسبت به برج پایین‌تر رفته و به وجود آمدن این اختلاف سطح، موجب جریان مایع از برج به مبدل حرارتی خواهد شد. بخارات حاصل به قسمت پایین برج و بالاتر از سطح مایع در برج وارد می‌گردد.

۲- جوشاننده نوع کتری[3]: این مبدل حرارتی نیز دارای ساختمان پوسته و لوله بوده و دارای فضای تبخیر می‌باشد و معمولاً به طور افقی در کنار برج تقطیر نصب می‌گردد. مایع از ته برج بر اساس نیروی ثقل به داخل پوسته

[1] Reboiler
[2] Thermosyphon
[3] Kettle

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جریان داشته و بخارات حاصل به پایین برج برگشت می‌کند. با توجه به تفاوت ساختمان دو جوشاننده نوع سیفونی و کتری، در عمل تفاوت‌هایی نیز با یکدیگر دارند که عبارتند از:

۱- در جوشاننده نوع سیفونی مایع سنگین تبخیرنشده از ته برج گرفته می‌شود و در نوع کتری از زیر مبدل خارج می‌گردد.

۲- مبدل حرارتی نوع کتری همانند تبخیرکننده[1] و سردکننده دارای فضای تبخیر می‌باشد و در نوع سیفونی فضای تبخیر وجود ندارد و مایع و بخار به صورت مخلوط خارج می‌شوند.

۳- در جوشاننده نوع سیفونی مایع در لوله ها و در نوع کتری در پوسته تبخیر می‌شود.

۴- در جوشاننده نوع سیفونی بخارات برگشتی به برج با مایعات سنگین همراه است، ولی در نوع کتری تنها بخارات حاصل از عمل تبخیر جزئی مایع به برج برمی‌گردد.

۵- سطح و مقدار تبخیر در نوع کتری بیشتر از نوع سیفونی است.

۶- مبدل حرارتی نوع سیفونی معمولاً سرثابت و نوع کتری می‌تواند U شکل یا سرشناور باشد. بنابراین، در نوع سیفونی معمولاً اختلاف درجه حرارت دو سیال کم و در نوع کتری این اختلاف می‌تواند زیاد باشد.

۳- جوشاننده کوره‌ای[2]: زمانی این نوع جوشاننده به کار می‌رود که به سیال گرم و مناسبی در کارخانه دسترسی وجود ندارد. بنابراین، مایعی که قرار است تبخیر شود مستقیماً در کوره گرم و سپس به برج تفکیک هدایت می‌شود.

❑ تبخیرکننده

ساختمان آن از نوع پوسته و لوله می‌باشد و کل مایع ورودی به مبدل را به بخار تبدیل می‌کند. نوع عمودی آن برای تأمین گاز سوخت مصرفی کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یعنی مایع پروپان یا بوتان وارد شده و از طرف دیگر به صورت گاز خارج می‌شود. نوع افقی آن معمولاً در کارخانه‌ها به عنوان مبرد استفاده می‌شود که در آن از تبخیر پروپان به منظور ایجاد برودت استفاده می‌شود.

٤-۲-۸- راه‌کارهای افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی

۱- اگر دو سیال تمیز و پاک و بدون رسوب باشند انتخاب محل جریان آن‌ها در لوله یا پوسته اشکالی ایجاد نمی‌کند و تمام انواع مبدل‌ها در این مورد قابل استفاده‌اند.

۲- اگر یکی از دو سیال کثیف باشد بهتر است در لوله‌ها جریان پیدا کند، زیرا امکان تمیزکردن لوله‌ها بهتر است و در این صورت، دسته لوله‌ها باید از نوع مستقیم باشد. اگر سیال خورنده هم باشد بهتر است در لوله‌ها جریان یابد، زیرا لوله‌ها قابل تعویض می‌باشند.

۳- اگر یکی از دو سیال گازی یا همراه با گاز باشد بهتر است که در پوسته جریان یابد.

۴- اگر نگهداری سرما یا گرمای یکی از دو سیال از نظر اقتصادی مهم باشد بهتر است در لوله‌ها جریان داشته باشد.

[1] Vaporizer
[2] Fired Boiler

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵- اگر سرما یا گرمای سیالی که در پوسته جریان دارد زیاد باشد و نیز اگر کنترل درجه حرارت دو سیال مهم باشد در این صورت، مبدل حرارتی باید عایق‌بندی شود.
۶- اگر یکی از دو سیال آب باشد، درجه حرارت آن نباید از ۵۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند، زیرا در غیر این صورت، در داخل مبدل حرارتی تشکیل رسوب خواهد داد.

٤-۳- طراحی و ساخت مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

طراحی مبدل حرارتی ثانویه به منظور تأمین هوای مورد نیاز فتوبیوراکتورهای تولید جلبک در پروژه، به دو روش محاسبات دستی و با نرم‌افزار ASPEN B-JAC انجام گرفت. پارامترهای ورودی به نرم‌افزار در شکل زیر ارائه شده‌اند. خلاصه مشخصات مبدل حرارتی نیز در شکل (۲–۱۵) ارائه شده است.

		Hotside	ColdSide	Recent		Previous	
				Hotside	ColdSide	Hotside	ColdSide
Calculation mode:		Design (Sizing)					
Process Conditions							
Mass flow rate:	kg/s	0.008		0.008	0.7244	0.008	0.6703
Inlet pressure:	bar	0.34474	0.20684	0.34474	0.20684	0.34474	0.20684
Outlet pressure:	bar	0.24474	0.10684	0.33699	0.19359	0.33699	0.19542
Inlet Temperature:	°C	700	30	700	30	700	30
Outlet Temperature:	°C	40	32	40	31.85	40	32
Inlet vapor fraction:		1	0	1	0	1	0
Outlet vapor fraction:		1	0	1	0	1	0
Heat exchanged:	kW			5.6		5.6	
Process Input							
Allowable pressure drop :	bar	0.1	0.1	0.1	0.1	0.06895	0.04137
Fouling resistance :	m²-K/W	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Calculated Results							
Pressure drop:	bar			0.00775	0.01325	0.00775	0.01142

شکل (۴–۱۴) پارامترهای ورودی به نرم‌افزار طراحی مبدل

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۴–۱۵) خلاصه مشخصات مبدل

خلاصه مشخصات مبدل حرارتی و برگه خلاصه طراحی تِما[1] در جدول (۲–۳) ارائه شده است. به علت اختلاف دمای بسیار بالا و در حدود ۶۰۰ درجه بین ورودی و خروجی، تصمیم گرفته شد که مبدل در دو پوسته مجزا قرار داده شود. در شکل (۲–۵) شماتیک مبدل‌های ثانویه نمایش داده شده است. مشخصات مربوط به دو مبدل حرارتی ثانویه در جدول (۲–۱) ارائه شده است. علی‌رغم نظر سازنده مبدل حرارتی مبنی بر کافی بودن ظرفیت مبدل با سایز ۴ اینچ، تیم مهندسی پژوهشگاه نیرو تصمیم گرفت جهت حرکت در راستای اطمینان بیشتر به جای دو مبدل با سایز پوسته ۴ اینچ، از مبدل‌های با سایز پوسته ۶ اینچ استفاده گردد.

جدول (۳–۴) خلاصه مشخصات مبدل حرارتی

[1] TEMA Sheet

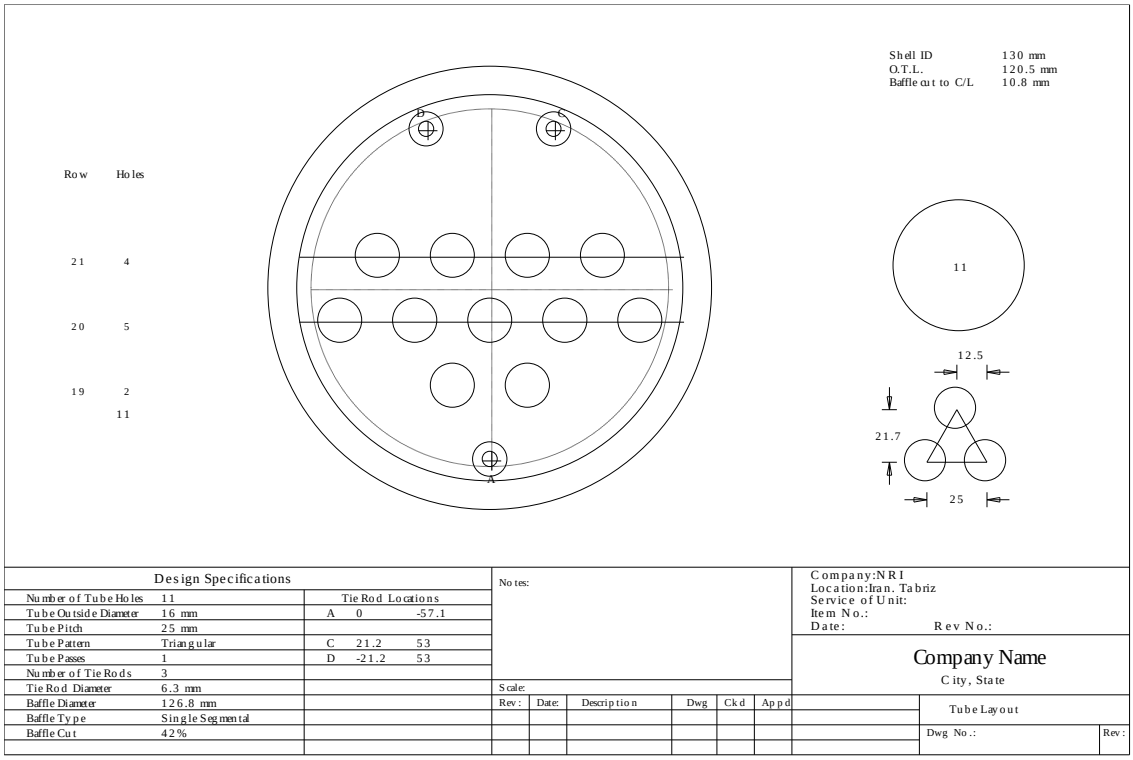
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

1	Company:NRI									
2	Location:Iran									
3	Service of Unit:			Our Reference:						
4	Item No.:			Your Reference:						
5	Date: 2016		Rev No.:	Job No.: 01						
6	Size : 102 - 2438.4	mm	Type: BMU	Horizontal		Connected in: 1 parallel		1 series		
7	Surf/unit(eff.) 1.5	m^2	Shells/unit 1			Surf/shell(eff.)		1.5	m^2	
8	**PERFORMANCE OF ONE UNIT**									
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name									
11	Fluid quantity, Total	kg/s		0.6703			0.008			
12	Vapor (In/Out)	kg/s		0	0		0.008	0.008		
13	Liquid	kg/s		0.6703	0.6703		0	0		
14	Noncondensable	kg/s		0	0		0	0		
15										
16	Temperature (In/Out)	°C		30	32		700	40		
17	Dew / Bubble point	°C		61.13	61.13					
18	Density Vapor/Liquid	kg/m^3		/ 997.34	/ 996.88		0.12 /	0.37 /		
19	Viscosity	mPa-s		/ 0.7998	/ 0.7658		0.0407 /	0.019 /		
20	Molecular wt, Vap						28.96	28.96		
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat	kJ/(kg-K)		/ 4.19	/ 4.19		1.136 /	1.005 /		
23	Thermal conductivity	W/(m-K)		/ 0.607	/ 0.6096		0.0684 /	0.0266 /		
24	Latent heat	kJ/kg								
25	Pressure (abs)	bar		0.20684	0.19874		0.34474	0.32896		
26	Velocity (Mean/Max)	m/s		/ 0.2			33.59 / 66.58			
27	Pressure drop, allow./calc.	bar		0.04137	0.0081		0.06895	0.01577		
28	Fouling resistance (min)	m^2-K/W		0.002			0.002	0.00242 Ao based		
29	Heat exchanged 5.6	kW				MTD (corrected)	162.32	°C		
30	Transfer rate, Service 22.6			Dirty 28.4		Clean	32.5	W/(m^2-K)		
31	**CONSTRUCTION OF ONE SHELL**							**Sketch**		
32				Shell Side		Tube Side				
33	Design/Vacuum/test pressure	bar		3.44738 / /		3.44738 / /				
34	Design temperature	°C		71.11		737.78				
35	Number passes per shell			1		1				
36	Corrosion allowance	mm		0		0				
37	Connections	In	mm	1 76.2 / -		1 50.8 / -				
38	Size/Rating	Out		1 76.2 / -		1 50.8 / -				
39	Nominal	Intermediate		/ -		/ -				
40	Tube No. 5 Us OD 19.05 Tks Average 1.65			mm Length 2438.4		mm Pitch 23.81		mm		
41	Tube type Plain			#/m Material SS 316				Tube pattern 30		
42	Shell SS 316	ID 102.26	OD 114.3	mm		Shell cover SS 316				
43	Channel or bonnet SS 316					Channel cover -				
44	Tubesheet-stationary SS 316		-			Tubesheet-floating -				
45	Floating head cover -					Impingement protection None				
46	Baffle-cross SS 316	Type	Single segmental	Cut(%d) 49		H Spacing: c/c 203.2		mm		
47	Baffle-long -	Seal Type				Inlet 577.85		mm		
48	Supports-tube	U-bend	0			Type				
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')				
50	Expansion joint	-		Type None						
51	RhoV2-Inlet nozzle 16		Bundle entrance 1			Bundle exit 1		kg/(m-s^2)		
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe		Tube side		Flat Metal Jacket Fibe				
53	Floating head	-								
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	R - refinery service				
55	Weight/Shell 184.4	Filled with water 202.6			Bundle 23.2	kg				
56	Remarks									
57										
58										

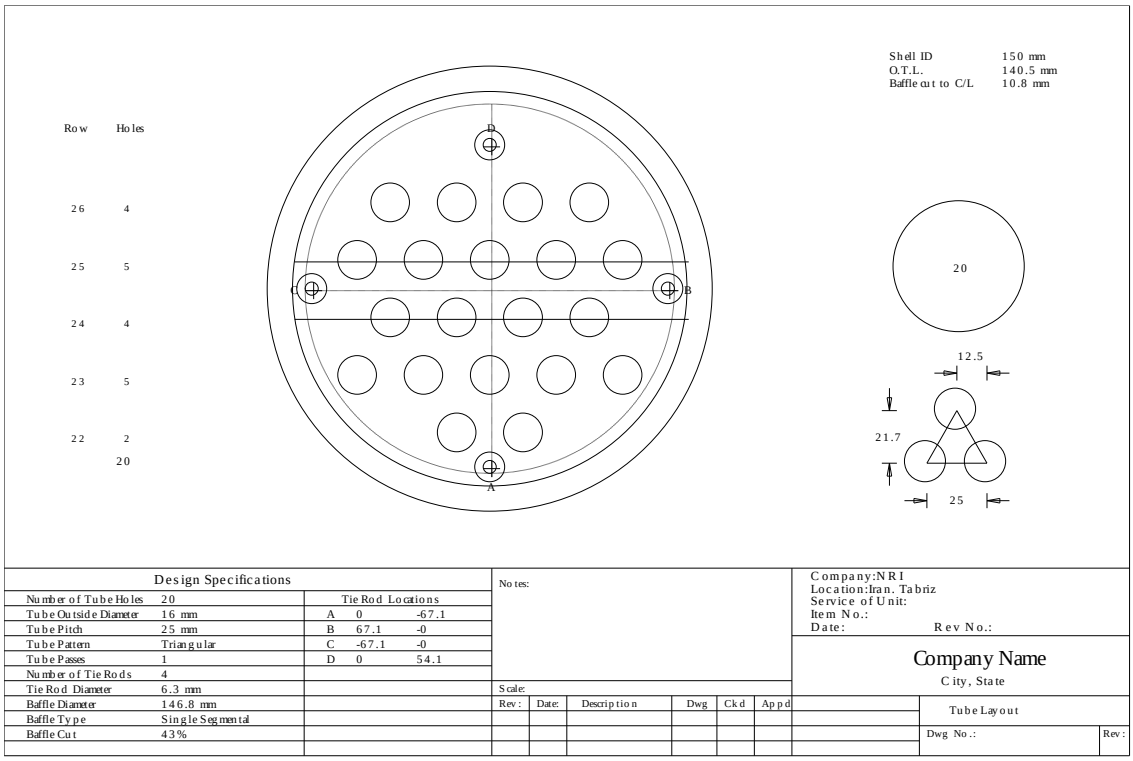
٤-٣-٩- نقشه‌های ساخت

در شکل‌های زیر، نقشه‌های ساخت مبدل‌های حرارتی ثانویه ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

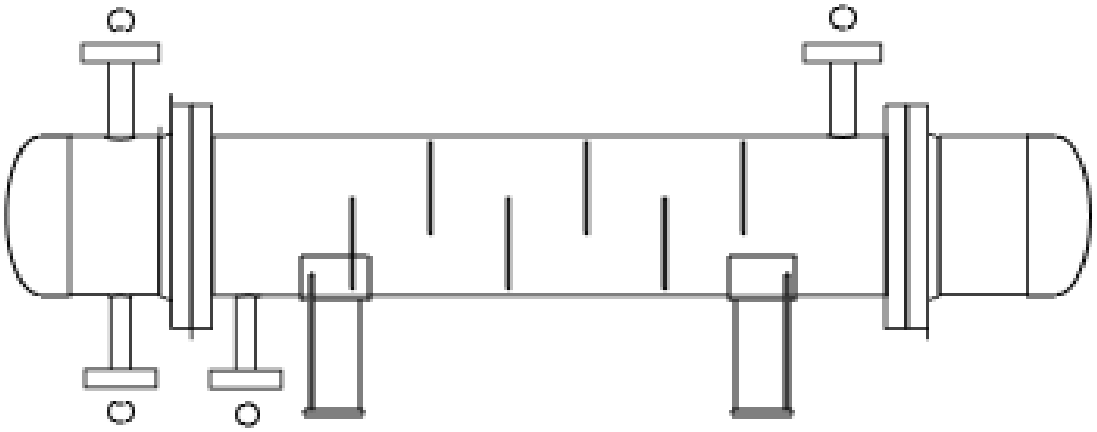


شکل (۴-۱۶) نقشه ساخت مبدل حرارتی ۱۱ لوله‌ای



DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۴-۱۷) نقشه ساخت مبدل حرارتی ۲۰ لوله‌ای

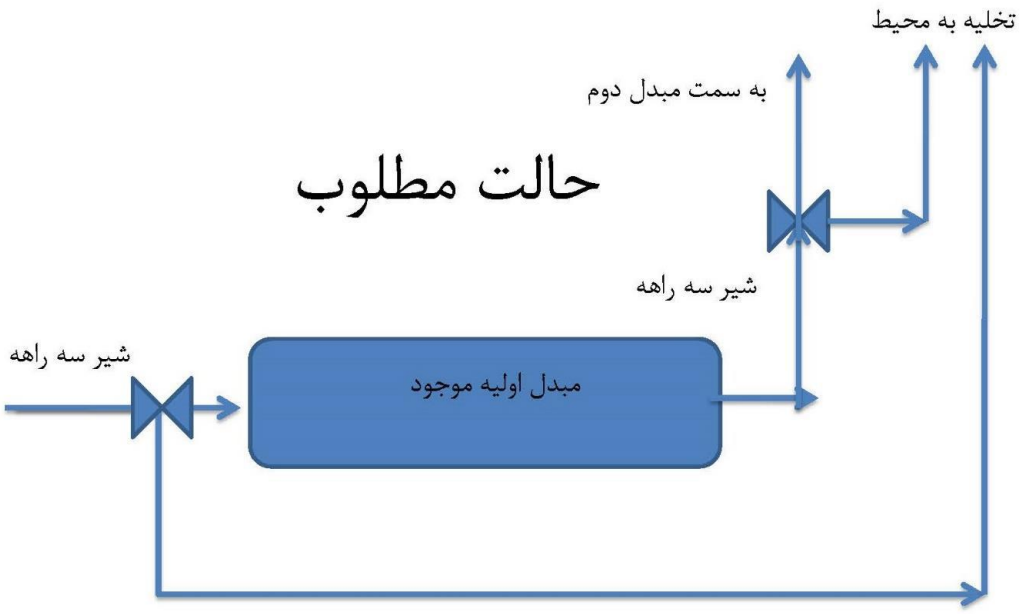


شکل (۴-۱۸) پوسته مبدل

٤-٤- انجام اصلاحات سیستم بازیافت حرارتی

پس از اتمام مراحل بازطراحی سیستم بازیافت حرارت و تهیه نقشه‌های اجرا، اقدامات لازم جهت پیاده‌سازی طرح جدید انجام شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



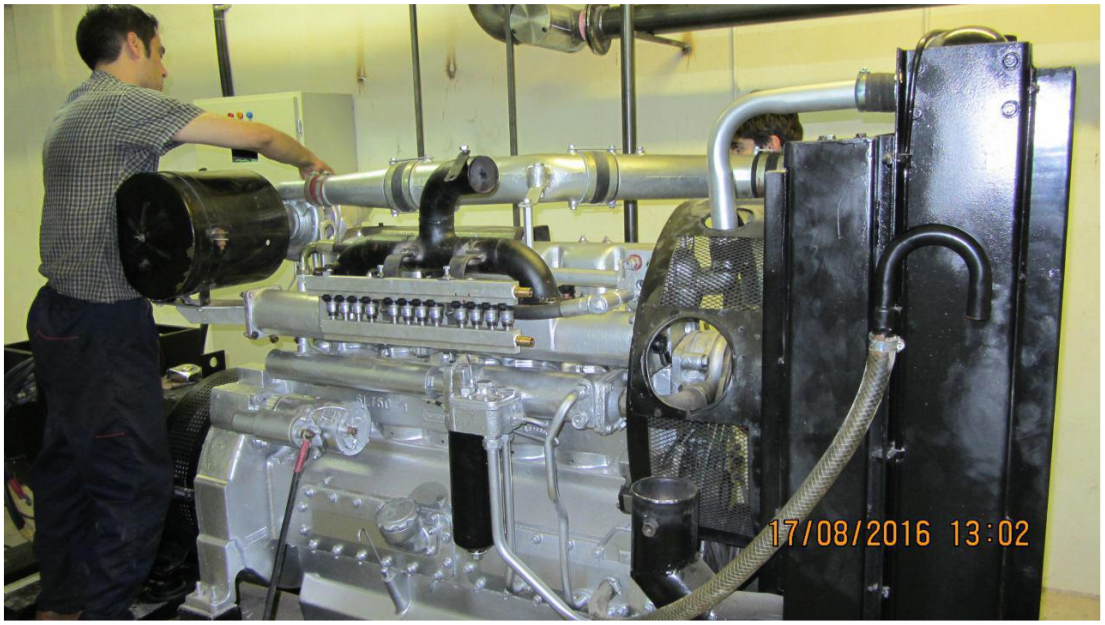
شکل (۴-۱۹) حالت مطلوب برای اجرای اصلاح مسیر دود

در ادامه، تصاویری از مراحل اصلاح سیستم بازیافت حرارتی (شامل تجهیزات، اصلاح مسیر و ...) نمایش داده شده است.



DOI: 10.30503/nripress.2020.290





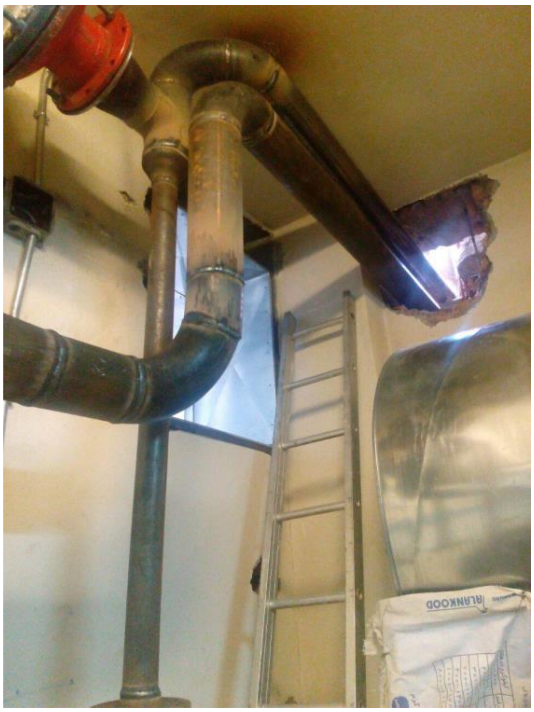
شکل (۴-۲۰) مراحل اجرای اصلاح مسیر دود

در شکل‌های زیر، اصلاح مسیر پس از اتمام کار به نمایش گذاشته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290







شکل (۴-۲۱) اصلاح مسیر دود پس از اتمام کار

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

پیوست

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

پیوست الف

Thermal Rating Of Heat Exchangers

ENGINEERING page

Project Data

Project	NRI			
Remarks				
Your ref	Ansari		Client	Rezaei
Identification			Client's ref	

Calculation Input

Duty				
Required Heat Transfer Duty	5.8	kW		
Fluids				
		Hot Fluid		Cold Fluid
Medium		air		water
Condition		Gas / Vapour		Liquid
Volumetric Flowrate	m^3/min	.4		0.05
Density	kg/m^3	1.2		1000
Inlet Temperature	° C	700		30
Specific Heat Cp	kJ/kg K	1.1		4.2
Viscosity at inlet temp	cP [=mPa.s]	0.03		1
Second temp. (see note)	° C			
Viscosity at second temp.	cP [=mPa.s]			
Thermal Conductivity	W/m K	.6		.05
Fouling Factor	m^2 K/W	.001		.001
Max. allowable Pressure Drop	bar	1		1
Exchanger Data				
Number of Shells in Series		1		

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Type of Heat Exchanger		Fixed Tubesheet		
Shell and Tube Side				
		Shell Side		Tube Side
Fluid		Cold Fluid		Hot Fluid
Number of Passes		1		1
Construction Data				
Shell				
Diameter	mm	120		
Wall Thickness	mm	4		
Tubes				
Number of Tubes		6		
Pattern		Triangular Pitch (30° flow angle)		
Standard tube		metric tube diameter 16 mm		
Diameter	mm	16		
Wall Thickness	mm	2		
Pitch (1.25 times tube diameter)	mm	20		
Tube Length	m	3		
Material Thermal Conductivity	W/m K	1000		
Bundle Diameter	mm	100		
Number of sealing strips		1		
Baffles				
Number of Baffles		8		
Baffle Thickness	mm	2		
Baffle cut	%	25		
Shell to Baffle Clearance	mm	2 Difference in diameter Shell - Baffle		
Tube to Baffle Clearance	mm	.8 Difference in diameter Baffle - Tube		

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Nozzle Data				
		Shell Side		Tube Side
Inlet Size and schedule		2 inch Schedule STD		2 inch Schedule STD
Inlet Diameter		60.32 mm 2.37 "		60.32 mm 2.37 "
Inlet Wall Thickness		3.91 mm 0.15 "		3.91 mm 0.15 "
Outlet Size		2 inch Schedule STD		2 inch Schedule STD
Outlet Diameter		60.32 mm 2.37 "		60.32 mm 2.37 "
Outlet Wall Thickness		3.91 mm 0.15 "		3.91 mm 0.15 "

Calculation Results

Main Thermal Sizing and Pressure Drop Data					
Log Mean Temperature Difference	159.76 ° C		287.56 ° F		
Correction factor F	1				
Corrected Mean Temperature Difference	159.76 ° C		287.56 ° F		
Actual Surface for 1 Shells	0.9	m^2	9.69	ft^2	
Clean Condition;					
Overall Heat Transfer Coefficient - clean (U)	135.47	$W/m^2.K$	23.86	$Btu/h.ft^2.°F$	
Required Surface - clean	0.27	m^2	2.88	ft^2	(70.22 % oversurface)
Pressure Drop Shell Side - clean	592	Pa	0.086	psi	0.006 bar
Pressure Drop Tube Side - clean	764	Pa	0.111	psi	0.008 bar
Fouled Condition;					
Overall Heat Transfer	102.93	$W/m^2.K$	18.13	$Btu/h.ft^2.°F$	

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Coefficient - foul (U)					
Required Surface - foul	0.35	m^2	3.8	ft^2	(60.81 % oversurface)
Pressure Drop Shell Side - foul	592	Pa	0.086	psi	0.006 bar

Temp's and Heat Transfer coeff's	Shell Side				Tube Side			
Inlet Temperature	30	° C	86	° F	700	° C	1292	° F
Outlet Temperature	31.66	° C	88.98	° F	40.91	° C	105.64	° F
Fluid velocity	0.112	m/s	0.368	ft/s	9.824	m/s	32.232	ft/s
Reynolds number	1795				4716			
Prandl number	84				0.055			
Heat transfer coefficient	341.2	$W/m^2.K$	60.09	$Btu/h.ft^2.°F$	299.71	$W/m^2.K$	52.78	$Btu/h.ft^2.°F$

Shell Side numbers (Bell's method)			
Factors for Shell Side Heat Transfer			
Heat Transfer Factor jH		0.017737	
Tube row correction Factor Fn		1	
Window Factor Fw		1.04	
By pass correction Factor Fb		0.913	
Leakage correction Factor Fl		0.825	
Factors for Shell Side pressure drop			
Friction Factor jF		0.165659	
By Pass correction Factor Fb'		0.763	
Leakage correction Factor Fl'		0.668	
Dimensions and Areas used to obtain the above factors			
Average spacing between two baffles	332 mm		

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Cross flow Area between Tubes As	0.0074 m^2	0.0799 ft^2	
Flow Area between tubes in Window above baffle Aw	0.0017 m^2	0.0186 ft^2	0.23 = Aw/As
Clearance Area between Bundle and Shell Ab	0.004 m^2	0.0428 ft^2	53.57 % of As
Leakage Area between Shell and Baffle Asb	0.0002 m^2	0.0025 ft^2	3.13 % of As
Leakage Area between Tubes and Baffle Atb	0.0001 m^2	0.0011 ft^2	1.39 % of As

Fluid velocities in Nozzles

	Shell Side				Tube Side			
Inlet Nozzle velocity	0.385	m/s	1.263	ft/s	3.08	m/s	10.104	ft/s
Outlet Nozzle velocity	0.385	m/s	1.263	ft/s	3.08	m/s	10.104	ft/s

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مراجع

[2] Ropenus, S., & Skytte, K. (2005, November). Regulatory review and barriers for the electricity supply system for distributed generation in EU-15. In Future Power Systems, 2005 International Conference on (pp. 6-pp). IEEE.

[3] Scheepers, M. J. J. (2004). Policy and regulatory roadmaps for the integration of distributed generation and the development of sustainable electricity networks. Energy Research Center of the Netherlands (ECN-C—04-034.(

[4] Medrano, M., Brouwer, J., McDonell, V., Mauzey, J., & Samuelsen, S. (2008). Integration of distributed generation systems into generic types of commercial buildings in California. Energy and Buildings, 40(4), 537-548.

[5] Moreno-Munoz, A., De-La-Rosa, J. J. G., Lopez-Rodriguez, M. A., Flores-Arias, J. M., Bellido-Outerino, F. J., & Ruiz-de-Adana, M. (2010). Improvement of power quality using distributed generation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 32(10), 1069-1076.

[6] Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Huang, T. T., Lin, C. J., Ong, S. C., Chen, C. D., ... & Lin, C. S. (2011). Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using Chlorella sp. cultures. Bioresource technology, 102(19), 9135-9142.

[7] Zhang, X. (2015). Microalgae removal of CO2 from flue gas.

[8] Guruvaiah, M., & Lee, K. (2014). Utilization of Flue Gas from Coal Burning Power Plant for Microalgae Cultivation for Biofuel Production. Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng, 3(8), 1-10.

[9] Abd El Baky, H. H., El-Baroty, G. S., & Bouaid, A. (2014). Lipid Induction in Dunaliella salina Culture Aerated with Various Levels CO2 and Its Biodiesel Production. J. Aquac. Res. Development, 5(3).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵- فصل پنجم : کلیات

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵-۱- مقدمه

ریزجلبک‌ها به صورت وسیعی در سیستم‌های کشت باز و بسته رشد می‌کنند. سیستم‌های باز اغلب در مقیاس وسیع و در سطح تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند و در این سیستم‌ها ریز جلبک‌ها به طور مستقیم با محیط بیرون در ارتباط هستند. برخلاف سیستم‌های باز در سیستم‌های بسته، ریزجلبک با محیط تماس مستقیم ندارد. سیستم‌های بسته با عنوان فتوبیوراکتور نیز شناخته می‌شوند. فتوبیوراکتورهای بسته در انواع راکتورهای ستونی عمودی، راکتورهای همزن دار (اغلب با نور داخلی)، راکتورهای لوله‌ای و راکتورهای صفحه تخت موجود می‌باشند. راکتورهای صفحه تخت معمولاً از یک محفظه مستطیل شکل با عمق ۱-۱۰ سانتی متر و ارتفاع و عرضی که عملاً بیش از ۱ متر نمی‌باشد تشکیل می‌شود [۱, ۲]. طول و ارتفاع واقعی فتوبیوراکتورهای صفحه تخت بر اساس اختلاط محیط داخل آن تعیین می‌شود. ابعاد این سیستم‌ها طوری باید طراحی شود که الگوی اختلاط مناسبی در راکتور برقرار شود تا مواد مغذی و خود ریز جلبک‌ها توزیع متوازنی داشته باشند [۲]. این گونه فتوبیوراکتورها بر مبنای نسبت بالای سطح به حجم (S/V) که منجر به افزایش راندمان فتوسنتز خواهد شد طراحی می‌شوند [۱]. استفاده از فتوبیوراکتوردر مقایسه با سیستم‌های باز دارای مزیت نیاز به فضای کمتر و هزینه برداشت پایین است. ازدیگر مزایای عمده فتوبیوراکتورها می‌توان به جلوگیری از آلودگی محیط کشت، کنترل بهتر شرایط کشت مانند دما و pH، ممانعت از تبخیر آب محیط و اتلاف گاز دی اکسید کربن و حصول غلظت بالای سلولی اشاره کرد. با این وجود هزینه نصب و نگهداری آنها نسبت به سیستم‌های باز بیشتر می‌باشد. نسبت سطح به حجم (S/V) فتوبیوراکتور، (نسبت سطح در معرض نور به حجم بیوراکتور) میزان نور ورودی به سیستم در واحد حجم و همچنین رژیم نوری که جمعیت سلول‌ها در معرض آن قرار می‌گیرد را تعیین می‌کند و در نتیجه یکی از موضوعات مهم در طراحی فتوبیوراکتور خواهد بود. همچنین رفتار هیدرودینامیکی محیط تحت تاثیر این پارامتر قرار می‌گیرد. نسبت S/V بالاتر منجر به کوتاه شدن دوره‌های روشنایی و تاریکی می‌شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر روند کلی طراحی فتوبیوراکتور به سمت کاهش قطر بیوراکتورها و کاهش ضخامت آنها پیش می‌رود. علاوه بر موارد ذکر شده طراحی فتوبیوراکتورها بر اساس دریافت نور بالا، چرخه‌های نور به تاریکی بالا، اختلاط مناسب، شرایط کنترلی مانند کنترل دما و سایر شرایط فیزیکی مانند خارج سازی گاز (degassing) انجام می‌شوند [۳-۵]. ورودی‌های اصلی سیستم‌های بسته شامل جلبک، نور، آب، دی اکسید کربن و منابع نیتروژن و فسفر می‌باشد. نوع تجهیزات مورد استفاده برای اختلاط و گردش محیط امری مهم در طراحی فتوبیوراکتور می‌باشد. بهره‌وری و هزینه ساخت فتوبیوراکتور به انتخاب سیستم همزن برای برقراری الگوی اختلاط مناسب وابسته می‌باشد [۵]. اختلاط مناسب باعث جلوگیری از ته‌نشینی سلول‌ها در فتوبیوراکتور، توزیع مناسب مواد مغذی، حذف اکسیژن تولیدی از فتوسنتز، تأمین و توزیع مناسب دی اکسید کربن و افزایش نوررسانی در فتوبیوراکتور خواهد شد. با این حال اختلاط بیش از حد می‌تواند منجر به آسیب سلولی و در نهایت مرگ سلولی شود [۶]. به همین دلیل انتخاب سیستم اختلاط و شدت آن باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های میکرو ارگانیسم مورد استفاده انجام شود. در سال‌های اخیر تلاش عمده جهت افزایش کارایی فتوسنتتیک ریزجلبک‌ها تحت نور بالا (شرایط عادی در یک روز آفتابی) انجام شده است. استراتژی مهم جهت اینکار افزایش میزان نور در سطح راکتور می‌باشد که این امر با انباشته‌سازی واحدهای فتوبیوراکتور بصورت عمودی امکانپذیر خواهد بود. در حال حاضر سه نوع فناوری برای تولید ریزجلبک وجود دارد که شامل استخرهای باز فتوبیوراکتورهای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

لوله ای افقی و فتوبیوراکتورهای صفحه تخت می‌باشند. با این حال از آنجایی که شرایط عملیاتی در فتوبیوراکتورهای بسته نسبت به استخرهای باز به صورت دقیقتری کنترل می‌شود این سیستم‌ها قابلیت تکنیکی بالایی جهت افزایش در بهره‌وری در آینده خواهند داشت [۲].

هدف از پروژه حاضر طراحی و ساخت فتوبیوراکتور صفحه تحت عمودی در مقیاس ۲۵۰ و ۳۰۰ لیتر است که نسبت به مدل‌های مشابه دارای ظرفیت بزرگتر و الگوی اختلاط مناسبتر برای کشت ریزجلبک می‌باشد. استفاده از فتوبیوراکتورهای تخت که دارای نسبت بالای سطح به حجم (S/V) هستند منجر به افزایش راندمان فتوسنتز خواهد شد و همچنین نسبت به سایر فتوبیوراکتورها و همچنین سیستم‌های باز دارای مزیت نیاز به فضای کمتر و هزینه برداشت پایین می‌باشد. استخرهای باز نیاز به زمین بیشتری دارند اما به طور کلی ارزان‌تر نسبت به گزینه‌های دیگر هستند. مصالح به کار برده شده و نحوه اتصال آنها در این فتوبیوراکتور به گونه‌ای است که نسبت به موارد مشابه دارای هزینه نگهداری و استهلاک و هزینه نهایی کمتری می‌باشد. این فتوبیوراکتور داری سیستم کنترلی پیشرفته برای کنترل کردن شرایط عملیاتی مانند دما، pH، کنترل کف و تنظیم دوره‌های روشنایی-تاریکی خواهد بود. همچنین سیستم کنترلی دارای سنسوری برای کنترل ارتفاع محیط کشت خواهد بود که در صورت نیاز قادر به تزریق محیط کشت به داخل سیستم می‌باشد.

۵-۲- جلبک‌ها

جلبک‌ها به دو گروه طبقه‌بندی می‌شود: میکروجلبک‌ها (ریزجلبک‌ها) و ماکروجلبک‌ها[1] (درشت‌جلبک‌ها). ماکروجلبک‌ها اندازه‌ی بزرگی (در حدود یک اینچ و بزرگتر) داشته، پر سلولی۲ بوده و اغلب در برکه‌ها و تالاب‌ها دیده می‌شوند. در مقابل ریزجلبک‌ها اندازه‌ی بسیار ریزی (در حد میکرومتر) داشته و تک سلولی بوده و بصورت سوسپانسیون در آب رشد می‌کنند. ریزجلبک‌ها اغلب همان کدورت ایجاد شده در آب تالاب‌ها و حتی در آکواریوم‌ها هستند که سرعت رشد هر دو نوع جلبک‌ها بسیار بالاست. ریزجلبک‌ها قادرند در هر چند ساعت در طی رشد لگاریتمی دو برابر شوند. این رشد سریع باعث شده که محصولاتی آینده‌دار بشمار روند [۷].

بطورکلی ماکروجلبک‌ها حاوی لیپید نیستند و بیشتر حاوی قندهای طبیعی و سایر کربوهیدرات‌ها هستند که قابلیت تخمیر به بیوگاز یا سوخت‌های پایه-الکلی دارند. اما ریزجلبک‌ها به علت داشتن راندمان فتوسنتزی بالا و قابلیت تولید لیپید جهت تولید بیودیزل بطور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته‌اند.

۵-۲-۱- جلبک‌های میکروسکوپی

جلبک‌های میکروسکوپی از قدیمی‌ترین ساکنان اقیانوس‌ها و آب‌های شیرین هستند. نه تنها خلقت آن‌ها به میلیاردها سال قبل از تاریخ حیات بشر بر می‌گردد، بلکه پیش از تمامی گونه‌های جانوری می‌زیسته‌اند و اکنون نیز

[1]Macroalgae
[2]Multi-cellular

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

در طبیعت پیرامون ما وجود دارند. جلبک‌های میکروسکوپی مشابه با گیاهان، یکی از فعال‌ترین موجودات فتوسنتز کننده و دارای کلروفیل با تراکم بالا هستند، اما دیواره سلولی آن‌ها سلولزی می‌باشد. مشابه با جانوران، مواد ذخیره غذایی و دیواره سلولی ساخته شده از نوعی نشاسته و پروتئین دارند، اما برخلاف آن‌ها فتوسنتز می‌کنند. مشابه باکتری‌ها قابلیت سازگاری با شرایط مختلف طبیعی را دارند. اطلاعات ژنتیکی بین آن‌ها به آسانی مبادله می‌شود، اما وجود کلروفیل آن‌ها را از باکتری‌ها متمایز می‌کند. تعداد جلبک‌های میکروسکوپی را بین ۲۲۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ تخمین می‌زنند که از بین آن‌ها ۵۰ جلبک میکروسکوپی، به صورت صنعتی تولید می‌شوند [۷-۹]. حداقل ۳۰۰۰۰ گونه ریزجلبکی تا کنون شناخته شده است که از این میان تنها تعداد انگشت شماری از نقطه نظر تجاری مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاکنون ریزجلبک‌ها بیشتر جهت استخراج ترکیبات باارزشی نظیر رنگدانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و پروتئین‌ها و برخی گونه‌ها بعنوان خوراک در پرورش آبزیان و یا غنی‌سازی پروتئین مصرفی و یا منابع آبی دام و ظیور کشت داده می‌شدند [۵]. تحقیقات روی تولید سوخت از ریزجلبک‌ها از ۱۳۰ سال پیش با آشکار شدن قابلیت آنها در تولید ترکیبات شیمیایی واسطه و هیدروکربن‌هایی که پتانسیل استفاده بعنوان سوخت را دارند آغاز شد. ترکیبات عمده‌ی قابل استخراج از زیست‌توده ریزجلبک‌ها شامل لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها هستند که همه‌ی این ترکیبات را می‌توان به سوخت تبدیل کرد [۱۰]. اما چون لیپیدها محتوای انرژی بالایی دارند، تحقیقات وسیعی در زمینه غربال‌گری گونه‌ها جهت تولید ترکیبات مطلوب با تمرکز اصلی بر روی میزان محصول‌دهی لیپیدی و متعاقبا استریفیکاسیون لیپیدها آغاز گردید.

۵-۲-۲- روش‌های تغذیه‌ای جلبک‌ها

جلبک‌ها قادرند به انواع روش‌های تغذیه‌ای زیست نمایند. برای مثال اتوتروفی (خوداتکایی) و هتروتروفی (دگراتکایی) که اتوتروفی از مهم‌ترین آن‌هاست. در روش اتوتروفی ارگانیسم‌ها انرژی لازم برای احیاء CO_2 و اکسایش سوبسترا به ویژه آب را از نور خورشید جذب و O_2 تولید می‌کنند. ارگانیسم‌های فتواتوتروفیک[1] فقط به یون‌های مواد معدنی نیاز داشته و به همراه فتواتوتروف‌های اجباری قادر به رشد در تاریکی نیستند. ارگانیسم‌های هتروتروف مواد و انرژی مورد نیاز خود را از مواد آلی که توسط دیگر موجودات تولید شده است بدست می‌آورند. ارگانیسم‌های فتوهتروتروف نیازمند نور به عنوان منبع انرژی و مواد آلی به عنوان مواد غذایی می‌باشند. جلبک‌های اکسوتروف[2] فقط نیازمند مقادیر اندکی از مواد آلی مثل ویتأمین‌ها و اسید آمینه‌ها برای رشد هستند. جلبک‌های میکسوتروف[3] یا آمفی تروف[4] مابین اتوتروف‌ها و هتروتروف‌ها بوده و مستلزم CO_2 و ترکیبات آلی برای رشد می‌باشند [۹]. قبلاً عصاره آب خاک، محلول‌های کشت جلبک را تشکیل می‌داد، ولی به واسطه مطالعات زیاد، غلظت مناسب عناصر، برای گونه‌های مختلف جلبک تعیین شد. به طور خلاصه عناصر مورد نیاز به شرح ذیل می‌باشند:

۱- نمک کل: با توجه به محل زندگی اصلی جلبک تعیین می‌شود.

۲- ترکیبات یونی اصلی که در ترکیب سلولی وجود دارد مثل Na^+, Mg^{2+}, K^+، Ca^{2+}، SO_4^{2-} و Cl^-

[1] photoautotrophic
[2] auxotrophy
[3] mixotrophic
[4] amphitrophic

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۳- منبع نیتروژن به ویژه نیترات، آمونیوم و اوره
٤- منبع کربن مثل CO2 یا HCO3-
٥- عناصر کم مصرف و برخی کلات کننده‌ها مثل اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA)
٦- ویتأمین‌ها

در رشد اتوتروفی فراهم بودن حدود ۳۰ عنصر ضروریست که سه عنصر بسیار مهم برای رشد اتوتروفی جلبک شامل C، N و P است که در زیر به اختصار تشریح می‌گردند. برای شدت بالای تولید اتوتروفی فراهم بودن CO2 و HCO3- خیلی مهم است. برخلاف گیاهان مقدار CO2 اتمسفر برای تولید انبوه جلبک در حالت اتوتروفی کافی نخواهد بود چرا که سرعت انتشار CO2از اتمسفر در استخرهای روباز حداکثر تأمین کننده حدود g dry weight ۱۱۰ m-2d-1 از تولیدات می‌باشد. در حالی که سرعت بیش از ۷۰ gdw m-2d-1 در تولید گزارش شده است که کمبود حدود ۳۰ g C m-2d-1 (با فرض میزان کربن ۵۰ درصد در زیست‌توده) را نشان می‌دهد. سیستم CO2-H2CO3-HCO3-1-CO3-2 مهم‌ترین بافر ارائه شده در آب‌های شیرین بوده و بهترین ابزار کنترل pH در شرایط مناسب جهت تولید انبوه گونه‌های جلبک می‌باشد.
سیستم بافر کربنات – بیکربنات طی واکنش‌های زیر می‌تواند CO2 را طی عمل فتوسنتز فراهم نماید:

$$2HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O + CO_2 \quad (۵-۱۵)$$
$$HCO_3^- \leftrightarrow CO_2 + OH^- \quad (۵-۱۶)$$
$$CO_3^{2-} + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2\,OH^- \quad (۵-۱۷)$$

این واکنش‌ها گویای این مطلب است که طی تثبیت فتوسنتزی CO2 آنیون OH- در محلول کشت تجمع یافته و موجب افزایش pH می‌شود. و غیر عادی نخواهد بود که pH بیش از ۱۱ در سیستم‌های تولید انبوه جلبک اندازه‌گیری شود. کنترل استاتیک (پایای) pH از طریق تزریق CO2 به داخل محیط کشت بهترین روش مرسوم در کنترل pH و در عین حال تأمین CO2 برای کشت انبوه جلبک می‌باشد. طی فرایند فتوسنتز pH افزایش می‌یابد در حالی که طی فرایند تنفس در تاریکی CO2 آزاد می‌گردد ولی این مقدار کمتر از۱۰ درصد کل تولیدات فتوسنتز می‌باشد. قابل ذکر است که برخی ترکیبات کربنی به صورت آلی در ترکیبات اسیدها و الکل‌ها در روش تغذیه میکسوتروفی می‌تواند فراهم گردد. برای مثال اسید استیک می‌تواند برای کنترل pH در چنین محیط‌هایی بکار برده شود [۹].
بعد از کربن نیتروژن مهم‌ترین عنصر در تولید زیست‌توده می‌باشد. مقدار نیتروژن در زیست‌توده سلولی از یک تا ۱۰ درصد بسته به گروه‌های مختلف جلبک و حتی بین گونه‌های مختلف با توجه به میزان دسترسی تغییر می‌کند. پاسخ عمده جلبک‌ها به کمبود نیتروژن به صورت از دست دادن رنگ(کاهش کلروفیل‌ها و افزایش کاراتونوئیدها) و تجمع ترکیبات کربنی آلی مثل پلی ساکاریدها و برخی روغن‌ها (PUFAs)[۲] می‌باشد. نیتروژن عمدتاً به صورت نیترات جذب می‌شود ولی اغلب به صورت آمونیوم و اوره نیز با سرعت رشد مشابه جذب می‌شود. نیتروژن آمونیاکی در

[۱] واحد بر اساس گرم بی‌وماس خشک بر واحد سطح (متر مربع) و زمان (روز) استفاده شده است.
[2] Polyunsaturated fatty acids

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برخی ارگانیسم‌ها به عنوان منبع نیتروژن ترجیح داده می‌شود و جذب و ترکیب نیترات و آمونیوم به pH محیط کشت بستگی دارد. با مصرف آمونیوم به عنوان تنها منبع نیتروژن، pH به طور محسوسی افت می‌کند که ناشی از رها شدن +H در محیط می‌باشد. هر گاه نیترات تنها منبع تأمین نیتروژن باشد، pH افزایش می‌یابد. برخی از سیانوباکترها قادرند عنصر نیتروژن را از احیا ازت اتمسفر به یون آمونیوم بدست آورند که یک فرایند کاتالیستی با حضور آنزیم نیتروژناز می‌باشد. البته مقدار ازت تثبیت شده در این فرایند خیلی کمتر از مقدار مورد نیاز برای سیستم‌های رشد سریع جلبک خواهد بود. تثبیت ازت اتمسفر وقتی برجسته می‌شود که در سیستم‌های رشد سریع جلبک اشکال دیگر نیتروژن محدودیت داشته و تثبیت ازت اتمسفر تنهاترین تأمین کننده نیتروژن در سیستم تولید انبوه باشد [۹].

فسفر از عناصر ضروری برای رشد و خیلی از فرایندهای سلولی مثل انتقال انرژی، بیوسنتز اسیدهای نوکلئوئیک، DNA و غیره می‌باشد. شکل ترجیحی قابل جذب فسفر به صورت ارتوفسفات (PO4-3) بوده و برای جذب آن انرژی مصرف می‌شود. زیست‌توده جلبک حاوی کمتر از ۱ درصد فسفر است که اغلب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده در رشد بیولوژیکی جلبک می‌باشد. علت این امر پیوند آسان این عنصر با دیگر یون‌ها مثل کلسیم و آهن می‌باشد که موجب رسوب و غیر قابل دسترس شدن آن برای جلبک می‌شود. جلبک‌ها قادر به جذب بیش از حد فسفر هستند که به صورت پلی فسفات در سلول ذخیره می‌شود و این عمل را جذب تجملی یا لوکس۱ گویند. از فسفات ذخیره شده در هنگام محدودیت وجود فسفر در محیط استفاده می‌شود. فراهم کردن فسفر تحت تأثیر ترکیب زیست‌توده تولیدی نیز می‌باشد [۱۱].

غیر از کربن، نیتروژن و فسفر عناصر S، K، Na، Fe، Ca،Mg و عناصر کم مصرفی مثل B، Cu، Mn Zn، Mo ، V،Co و Se در ترکیب عناصر جلبک مشهود هستند. خیلی از عناصر کم مصرف در واکنش‌های آنزیمی برای سنتز بسیاری از ترکیبات نقش دارند. برای مثال Co در تولید ویتأمین B12 ضروری است. حضور و قابل دسترس بودن این عناصر بایستی مورد پایش قرار گیرد زیرا این عناصر تمایل به ایجاد پیوند با فسفر و دیگر محتویات محیط کشت را داشته و در نتیجه رسوب کرده و از دسترس خارج می‌شوند. افزودن کلات کننده‌هایی مثل ۲EDTA به ویژه نمک دی سدیم آن که در آب محلول است مشکل را حل می‌نماید. در کشت‌های آزمایشگاهی آب مورد استفاده برای محیط کشت آب یک‌بار تقطیر یا دوبار تقطیر، آب فیلتر شده یا آب دیونیزه شده می‌تواند باشد. در مقیاس‌های بزرگ از آب‌های سطحی یا زیرزمینی یا آب شرب استفاده می‌شود. در استفاده از آب شرب باقیمانده کلر می‌تواند مشکل آفرین باشد لذا لازم است این آب‌ها به مدت دو روز در مخازن روباز نگهداشت و بعد از آن مدت مورد استفاده قرار داد [۱۲].

۵-۳- عوامل فیزیکی موثر در جذب عناصر غذایی توسط جلبک‌ها

جذب عناصر غذایی به کلیه عواملی که در رشد جلبک اعم از نور، دما و بهم زدن موثرند، بستگی دارد. در طول انجام فتوسنتز میزان جذب به مقدار انرژی نورانی قابل دسترس بستگی خواهد داشت. در حالی که در شدت‌های نور اشباع،

[1] Luxury uptake
[2] Ethylenediaminetriacetic acid

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

میزان جذب عناصر غذایی مقدار ثابت می‌باشد. اثرات دمایی که ضریب دما نیز گفته می‌شود در فعالیت‌های آنزیمی تأثیر گذاشته به طوری که با افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد، میزان فعالیت آنزیمی هم ۲ برابر می‌شود [۱۲].
هم زدن محیط کشت جلبک یکی از عوامل اساسی در تولید حداکثر زیست‌توده سلولی می‌باشد هرچند در تراکم سلولی کم همزدن محیط تأثیر زیادی روی میزان تولید زیست‌توده نشان نداده ولی در تراکم سلولی بالا به دلیل نقش همزدن و اختلاط در میزان تولید می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

۱- جلوگیری از رسوب سلول‌های جلبک در محیط کشت و انتشار یکنواخت سلول‌ها در محیط
۲- جلوگیری از تجمع مواد آلی حاصل از مرگ و میر سلول‌ها در یک نقطه از محیط و فساد آن‌ها در اثر تخمیر بی هوازی
۳- کاهش لایه محدود کننده اطراف سلول و در نتیجه افزایش انتقال مواد غذایی و گازها به سلول جلبک
٤- جلوگیری از تجمع اکسیژن محلول حاصل از فتوسنتز به ویژه در اواسط روز که فتوسنتز در حداکثر مقدار خود می‌باشد
٥- ایجاد امکان دسترسی سلول‌ها به انرژی نورانی در تراکم سلولی بالا
٦- افزایش تناوب دوره‌های تاریکی-روشنایی [۱۱].

٥-٤- کاربرد ریزجلبک‌ها

نقش جلبک‌ها در زنجیره غذایی به عنوان منبع تأمین کننده مواد غذایی آبزیان، بسیار مهم و حیاتی است. انسان نیز با استفاده از موجودات دریایی از قبیل ماهی، خرچنگ، نهنگ و غیره به طور غیر مستقیم از این بابت سود می‌برد. از سوی دیگر، استفاده مستقیم از جلبک‌ها به عنوان غذا توسط انسان از قدمت قابل توجهی برخوردار است.
امروزه کلرلا ولگاریس به عنوان ماده افزودنی غذایی[1] و مکمل‌های غذایی[2] به صورت مستقیم در اشکال قرص، پودر، عصاره و به صورت غیرمستقیم به شکل مکمل غذایی انسان (پودر افزودنی در ماکارونی، کیک، نان، کلوچه، شکلات، نوشابه، بستنی، پنیر و سس مایونز) مصرف می‌شود. در ژاپن روزانه ۱۷ میلیون مصرف‌کننده ریزجلبک وجود دارد. در این کشور سالانه ۲۰۰۰ تن ریزجلبک مصرف می‌شود و حجم تجارت سالانه آن بیش از ۵۰۰ میلیون دلار می‌باشد، که این میزان برای کل جلبک‌ها در سال ۱۹۹۹ بالغ بر ۶ میلیارد دلار بوده است [۱۲].
مصرف جلبک‌های میکروسکوپی به عنوان خوراک دام باعث تسریع رشد دام‌ها و بالا رفتن مقدار چربی در شیر آن‌ها می‌شود. در پرورش طیور مصرف جلبک‌ها موجب افزایش مقدار زردهٔ تخم، افزایش دفعات تخم‌گذاری، خوابیدن بر روی تخم‌ها و تولید جوجه بیشتر می‌شود. همچنین جلبک‌های میکروسکوپی یکی از منابع غذایی مهم موجودات آبزی از جمله صدف‌های دوکفه‌ای و بعضی از گونه‌های ماهی‌ها و زئوپلانکتون‌ها هستند. امروزه در بعضی از نقاط جهان بیش از ۴۰ گونه از جلبک‌های میکروسکوپی از جمله کلرلا جهت کشت به عنوان غذای آبزیان استفاده

[1] Food additive
[2] Food supplement

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

می‌شود [۱۲]. همچنین استفاده از عصاره جلبک‌ها به عنوان کود موجب اصلاح بافت خاک، تسریع در رویش بذر و ازدیاد مقاومت گیاه در مقابل حمله قارچ‌ها و حشرات می‌گردد [۱۳].
عصاره کلرلا ولگاریس در تهیه دارو مصرف می‌شود. رنگدانه‌های موجود در این میکروارگانیسم در ساخت داروهای ضد سرطان مصرف جهانی دارد. کلرلا ولگاریس باعث تقویت سیستم ایمنی، بهبود سوخت و ساز و کاهش چربی‌های مضر، شادابی پوست و تقویت مو، تنظیم دستگاه گوارش، تصفیه و سم زدایی و سلامت قلب و عروق می‌شود. استفاده از کلرلا در نقش یک ماده ضد باکتری موضوع جدیدی نیست. در دهه ۱۹۴۰ یک آنتی‌بیوتیک از کلرلا بدست آمد که کلرین نامیده شد. کلروفیل خاصیت ضد باکتری و ترمیم کنندگی بافت را دارد [۱۳].
از زمانی که طرح فرستادن انسان به فضا عنوان شد مسئله تأمین غذا و اکسیژن مورد نیاز سرنشینان سفینه‌های فضایی مطرح گردید، دانشمندان زیست‌شناس موفق شدند با استفاده از جلبک‌ها، یک چرخه زیستی را در سفینه‌های فضایی پیاده کنند. در این چرخه، از جلبک‌های تک یاخته‌ای مثل کلرلا، استفاده می‌شود. کلرلا از دی اکسید کربن به وجود آمده توسط فضانورد برای عمل فتوسنتز و تولید مواد غذایی و اکسیژن استفاده می‌کند [۱۳].
فاضلاب‌هایی که عمدتاً از ضایعات صنعتی و شهرنشینی ایجاد شده باشند دارای بسیاری از ترکیبات آلی و معدنی هستند که در آن‌ها حل شده و به حالت معلق در آمده است. تصفیه چنین فاضلاب‌هایی غالباً یک فرایند اکسیژن خواه تلقی می‌شود زیرا برای تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌ها به اکسیژن نیاز است. یکی از راه‌های تأمین اکسیژن به صورت طبیعی، ایجاد اکسیژن به صورت بیولوژیکی است که برخی از جلبک‌ها نظیر Chlorella، Chlamydomonas و Euglena در این پدیده بسیار مؤثر واقع می‌شوند. اکسیژنه نمودن فاضلاب‌ها به خصوص در توده‌های کوچک نظیر استخرها ضرورت دارد تا بوی بد از آن‌ها برطرف گردد. همچنین از آنجایی که جلبک‌ها با جذب مواد معدنی از جمله نیترات، فسفات و کاتیون‌های مختلف قادر به تولید مواد آلی مورد نیاز خود هستند لذا از پتانسیل آن‌ها می‌توان در اکوسیستم‌های آبی جهت پالایش و حذف برخی آنیون‌ها و کاتیون‌های آلاینده بهره جست [۱۳]. از مزایای عمده این روش می‌توان به تولید همزمان ریزجلبک در حین فرایند تصفیه اشاره کرد. جلبک‌ها نقش مهمی را در تصفیه فاضلاب‌ها به عهده دارند که گاه به صورت طبیعی این پدیده انجام می‌شود [۱۴].

۵-۵- ضرورت استفاده از سوخت‌های بیولوژیکی

هرچند در گذشته روی‌آوردن به انرژی‌های نو با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی نمایان می‌شد، اما امروزه جنبش دست‌یابی به انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین با آینده‌نگری به روند کاهش چشمگیر میزان ذخایر موجود انرژی و مشکلات گریبانگیر زیست محیطی، یک ضرورت بشمار می‌رود. منابعی به عنوان انرژی جایگزین سوخت فسیلی می‌توانند مطرح شوند که هم منابعی ارزان قیمت و در دسترس بوده و هم سازگار با محیط زیست باشند. توسعه سوخت‌های CO_2- خنثی[۱] نقش مؤثری در کاهش میزان گاز CO_2 موجود در اتمسفر دارد. طبق موازین سال

[۱] CO_2-neutral: منظور سوخت‌هایی هستند که در فرایند تولید آنها نیز از بجای استفاده از انرژی‌های فسیلی از سوخت‌های تجدیدپذیر بیولوژیکی استفاده شده باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲۰۰۸ سازمان‌های محیط‌زیستی، سطح CO2 اتمسفری بالاتر از میزان ۴۵۰ppm CO2-e[1] بعنوان محدوده‌ی ریسک بالا معرفی شده است؛ این درحالیست که دنیای متمدن امروزی ۱۰ سال زودتر از پیش‌بینی‌های انجام شده از این آستانه تجاوز کرده و در حال حاضر به بیش از ۴۵۵ppm CO2-e رسیده است. . بدین ترتیب، تلاش عظیم در جهت کاهش چشمگیر انتشار CO2 ضرورتی انکارناپذیر است [۱۶].

از اقسام مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر قابل جایگزینی جهت استفاده در موتور،می‌توان به سوخت هیدروژن، گاز طبیعی و سوخت‌های بیولوژیکی مایع اشاره کرد. از بین انرژی‌های نام برده شده به جز سوخت‌های بیولوژیکی تقریباً برای استفاده از همه آنها در موتور باید تغییرات اساسی در موتور ایجاد کرد.

معضل‌هایی مانند آلودگی زیاد محیط زیست، بهم خوردن شرایط و تعادل اکولوژیک و محدود بودن ذخایر سوخت فسیلی موجب شده است تا این نوع انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و بیشتر کشورها بازار مصرف انرژی خود را به سوی استفاده از این نوع سوخت‌ها سوق دهند. در حال حاضر عزم جهانی جهت توسعه‌سوخت‌های بیولوژیکی بوجود آمده است که در این بین بیودیزل و بیواتانول بعنوان گزینه‌هایی که قابلیت تجاری‌سازی بیشتری دارند، مطرح شده‌اند. بیودیزل که بخشی از مطالعه حاضر بوده و در صفحات آتی بیشتر بحث خواهد شد، به مخلوطی از متیل‌استرهای اسیدچرب (FAME) اطلاق می‌شود که معمولاً طی فرایندی بنام ترانس‌استریفیکاسیون از دانه‌های روغنی بدست می‌آید. در این میان منابع دیگری همچون بیومتان، دیزل حاصل از تبدیل مستقیم زیست‌توده به مایع (BTL) و بیوهیدروژن نیز در حال توسعه هستند.

۵-۵-۱- سوخت‌های بیولوژیکی نسل اول و دوم

با اینکه امروزه بخش سوخت حدود ۶۷٪ از بازار جهانی انرژی را به خود اختصاص داده اما تاکنون سیستم‌های تولید سوخت‌های CO2–خنثی (مانند بیودیزل، بیواتانول، بیومتان و دیزل BTL) و سوخت عاری از CO2 (مانند بیوهیدروژن) بسیار کمتر توسعه یافته‌اند. این سوخت‌های بیولوژیکی نشان داده‌اند که قابلیت صنعتی شدن را دارند. سوخت‌های بیولوژیکی بسته به مواد اولیه شان به دو نسل قابل تقسیم هستند. سوخت‌های زیستی نسل اول از محصولات کشاورزی نظیر نیشکر و غلات (جهت تولید بیواتانول) و ذرت و دانه‌های روغنی مانند سویا (جهت تولید بیودیزل) تأمین می‌شوند. با این حال، این نسل نتوانست به رویای تولید تجاری سوخت‌های بیولوژیکی تحقق بخشد. در مقابل سوخت‌های بیولوژیکی نسل دوم (نظیر سوخت‌های بیولوژیکی لیگنوسلولزی و ریزجلبکی) پتانسیل غلبه بر بسیاری از محدودیت‌ها را داشته و می‌توانند موردتوجه ویژه بازارهای جدید انرژی پاک قرار گیرند [۱۶]. بطوریکه پیش‌بینی می‌شود گسترش آن تا سال ۲۰۵۰ به سرعت تا ۵۰۰ بیلیون دلار آمریکاو حتی بیشتر برسد [۱۷] (این درحالیست که ارزش بازار کنونی نفت ۲/۶۵ تریلیون دلار آمریکاست).

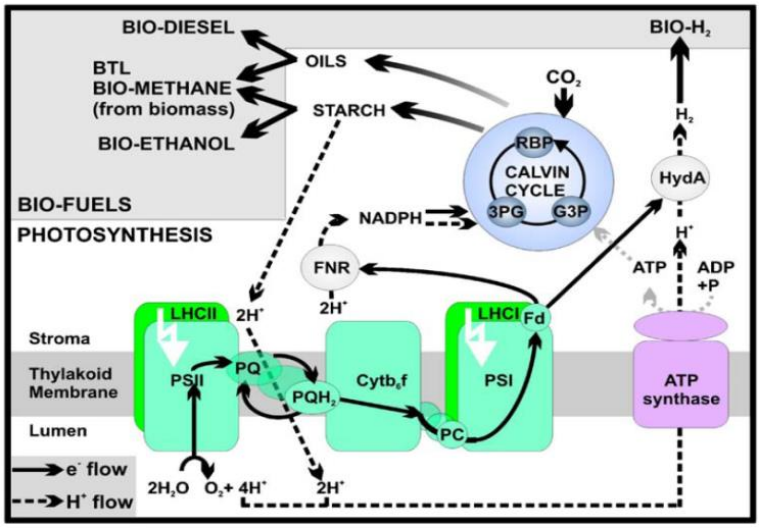
عمده‌ترین بخش سوخت‌های بیولوژیکی از گیاهان عالی که از فتوسنتز جهت تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی استفاده می‌کنند، تولید می‌شود (شکل ۲-۱). در طبیعت این انرژی شیمیایی در مولکول‌های مختلفی (نظیر لیگنین[2]، سلولز، نشاسته و روغن‌ها) ذخیره می‌شود.لیگنوسلولزها[3] اصلی‌ترین جزء گیاهان هستند که قابلیت استفاده

[1] e: توزیع متناظر همه‌ی گازهای گلخانه‌ای

[2] Lignin
[3] Lignocellulose

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

بعنوان ماده‌ی اولیه تولید اتانول را دارند. این فرایند هم از طریق گازیفیکاسیون[1] و هم از شکستن سلولز (هیدرولیز شیمیایی یا آنزیمی) امکان‌پذیر است [۱۶]. امروزه این فرایندها برای سوخت‌های بیولوژیکی نسل دوم در حال توسعه هستند و اغلب بعنوان فرایندهای لیگنوسلولزی شناخته می‌شوند. به همین ترتیب نشاسته (حاصل از ذرت) و قندها (حاصل از نیشکر) نیز توسط فرایند تخمیر به اتانول تبدیل می‌شوند [۱۸] درحالیکه روغن‌ها (نظیر روغن کانولا، سویا و پالم) بعنوان ماده‌ی اولیه جهت تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹]. میکروجلبک با بازدهی بالایی قادر به تولید سلولز، نشاسته و روغن‌ها در مقادیر زیاد است [۲۰]. علاوه براین برخی از میکروجلبک‌ها و سیانوباکترها (که بجای نشاسته گلیکوژن تولید می‌کنند) تحت شرایط بی‌هوازی قادر به تولید بیوهیدروژن هستند [۲۱] و از تخمیر آنها نیز می‌توان متان تولید کرد.



شکل (۵-۱) : فرایند تبدیل فتوسنتزی انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی و تولید انواع سوخت‌های بیولوژیکی [۱۶]

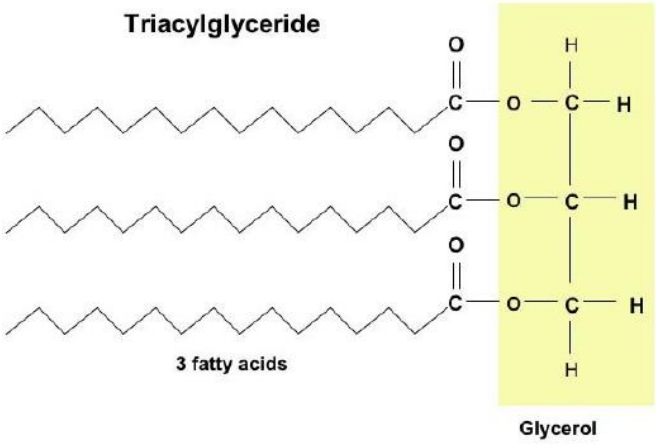
۵-۵-۲- سوخت بیودیزل: جایگزینی مطمئن برای پترودیزل

واژه "دیزل" از نام مخترع آلمانی "رادولف کریستین کارل دیزل[2]" که موتور دیزلی را در سال ۱۸۹۲ اختراع کرد، گرفته‌شده است. پترودیزل از مشتقات نفتی است که مخلوطی از ٪۷۵ هیدروکربن‌های اشباع (نظیر پارافین‌ها) و ٪۲۵ هیدروکربن‌های آروماتیک (نظیر نفتالین و الکیل بنزن) است. اشتیاق به "سوخت پاک" منجر به رویکرد جدید به بیودیزل شد که درعین داشتن توان احتراقی پترودیزل، پاک و قابل اتکا نیز باشد. بیودیزل، سوخت نوبنیادی است که تقریباً ۹۰ سال پس از پترودیزل مورد استفاده قرار گرفته است. ایده‌ی استفاده از بیودیزل بعنوان سوخت به سال ۱۹۸۱ برمی‌گردد [۲۱]. تری‌گلیسرید (TG)، گلیسریدی است که در آن یک بدنه‌ی گلیسرولی با سه اسید چرب

[1] Gasification
[2] Rudolf Christian Karl Diesel

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

استری شده است، جز اصلی تشکیل‌دهنده‌ی روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی است. در واقع بیودیزل، همین تری‌گلیسریدهایی است که استری شده و به متیل‌استرهای‌اسیدچرب (FAMEs) تبدیل شده‌اند [۲۳].



شکل (۵-۲) : ساختار کلی تری‌گلیسرید [۲۰]

بطورکلی مواد اولیه‌ی تولید بیودیزل نسل اول را می‌توان در سه گروه روغن‌های گیاهی، روغن‌های منشأ حیوانی و روغن‌های مصرف‌شده طبقه‌بندی کرد.روغن سویا، روغن پالم[1]، روغن آفتابگردان، روغن آشپزی مصرف‌شده و کلزا نمونه‌هایی از منابع تأمین بیودیزل هستند. روش‌ها و تکنولوژی‌های متداول تولید بیودیزل نیز شامل اختلاط و استفاده‌ی مستقیم، پیرولیز و ترانس‌استریفیکاسیون است [۷].

۵-۶- مزایای بیودیزل

تجدیدپذیر بودن مهم‌ترین ویژگی بیودیزل است. برخلاف منابع نفتی، بیودیزل به دلیل زوال ناپذیر بودن می‌تولند زنجیره‌ی سوختی پایدار را در سراسر جهان بوجود آورد.

همانطور که قبلا گفته شد، بیودیزل دوستدار طبیعت است و از آنجاییکه همه‌ی کربن بیودیزل از CO_2 اتمسفری که طی احتراق آزاد شده، مشتق می‌شود، می‌توان چرخه‌ی حیات بیودیزل را نزدیک به فرایندهای کربن-خنثی درنظرگرفت. استفاده از آن همچنین می‌تولند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، هیدروکربن‌ها، ذرات معلق سرطان‌زا، منواکسیدکربن، ذرات دوده‌ای، اکسیدهای سولفوری و ترکیبات سولفاتی کمک کند [۷, ۲۲].

بیودیزل می‌تولند در موتورهای دیزلی کنونی (پس از ۱۹۹۲) بدون هیچ نوع اصلاحاتی در موتور بکار برده شود. خاصیت روان‌کاری و حلالیت بهتر و عدم ایجاد رسوب و حتی قابلیت پاک‌سازی این رسوبات و رفع گرفتگی فیلترهای سوختی از مزایای آن است.

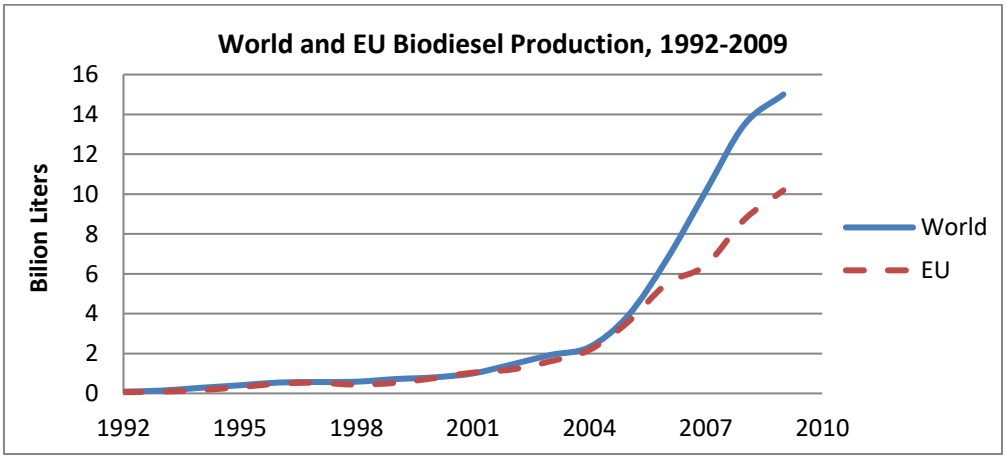
[1]Palm oil

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مزیت دیگر بیودیزل خواص زیست‌تخریب‌پذیری[1] و غیرسمی و نقطه اشتعال نسبتاً بالای آن است. درصورت نشت بیودیزل به محیط‌زیست، چهار بار سریعتر از دیزل نفتی تخریب می‌شود. توان حرارتی بیودیزل تنها ۱۰٪ کمتر از دیزل نفتی است [۲۲].

۵-۶-۱- تولید جهانی بیودیزل

بیودیزل بطور تجاری از انواع دانه‌های روغنی تولید شده و تولید جهانی این سوخت سبز از سال ۲۰۰۲ روندی رو به رشدی دارد [۸].

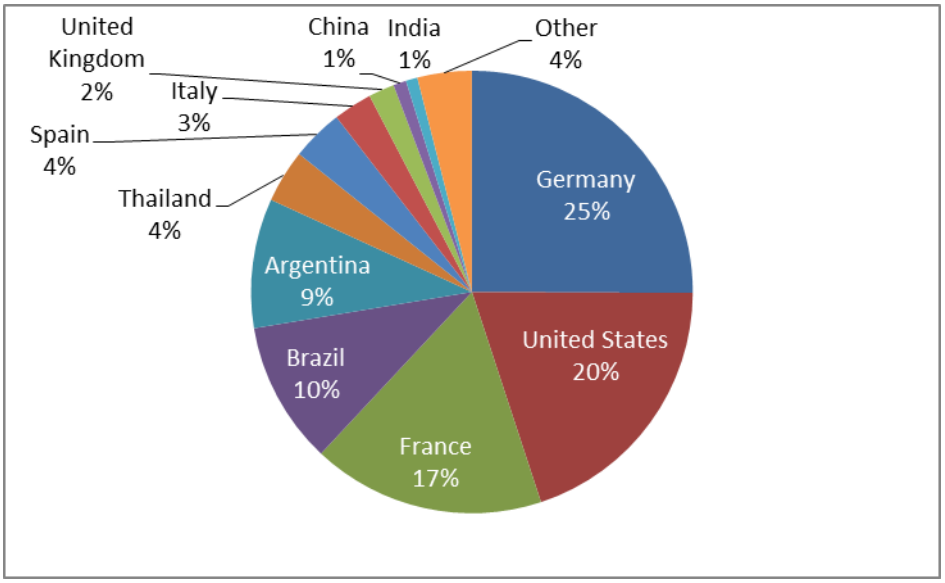


شکل (۵-۳) روند تولید جهانی بیودیزل از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۹ [۲۱]

شکل ۲-۴ سهم تولیدکنندگان بیودیزل را در جهان در سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود آلمان در بین ۲۸ کشور، بزرگترین تولیدکننده جهانی بوده و پس از آن ایالات متحده آمریکا، فرانسه، برزیل و آرژانتین بیشترین تولید را داشته‌اند. در بین کشورهای آسیایی نیز تایلند، بیشترین میزان تولید را دارد و چین و هند در رده‌های بعدی هستند.

[1]Biodegradable

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۵-۴) سهم ۲۸ کشور در تولید جهانی بیودیزل در سال ۲۰۰۹ [۲۲]

۵-۷- چالش‌های پیش‌روی تولید سوخت‌های بیولوژیکی

اگرچه فرایندهای تولید سوخت‌های بیولوژیکی پتانسیل زیادی را جهت فراهم آوردن مسیر کربن-خنثی در تولید سوخت دارند، اما سیستم‌های تولید سوخت‌های بیولوژیکی نسل اول با چالش‌های جدی محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه شده است. بر همین اساس، تولید بیودیزل حاصل از محصولات کشاورزی نیز مورد انتقاد بین‌المللی قرار گرفته است [۱۶].

۵-۷-۱- زمین زراعی مورد نیاز برای تولید سوخت‌های بیولوژیکی

همگام با افزایش سوخت‌های زیستی که از منابع کشاورزی بدست می‌آیند، رقابت شدیدی با محصولات کشاورزی در استفاده از زمین‌های زراعتی در تولید محصولات غذایی بوجود خواهد آمد. افزایش فشار بر زمین‌های زراعتی عواقبی چون برهم‌خوردن توازن در استفاده از زمین‌های کشاورزی، کمبود شدید موادغذایی و صدمات زیست‌محیطی در اثر استفاده مفرط از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در مزارع و همچنین مصرف آب‌شیرین دارد [۷].

۵-۷-۲- بالانس خالص انرژی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جهت ارزیابی ارزش و قابل اتکا بودن فرایند تولید ســوخت‌های بیولوژیکی برآورد بالانس خالص انرژی[1](NEB) آن ضــروری اســت. هرچندکه مقادیر دقیق NEB به جزئیات موارد و آنالیز چرخه حیات بســتگی دارد، با وجوداین ادعا می‌شود که هزینه‌های انرژی بکاربرده شده در کودهای شیمیایی، ماشین‌آلات کشاورزی و تأسیسات فرآوری موجب منفی شدن میزان NEB برای سوخت بیولوژیکی می‌شود [۴, ۱۶].

۵-۷-۲-۱- بالانس کربن

فرایند تولید ســوخت‌های بیولوژیکی از محصــولات کشــاورزی بعنوان فرایندهایی نزدیک به فرایند کربن–خنثی درنظرگرفته می‌شود؛ چراکه تقریبا تمام کربن این سوخت‌های بیولوژیکی مشتق از CO2 اتمسفری است که در حین احتراق سوخت آزاد می‌شود. جهت برقراری بالانس دقیق انتشار CO2 در تولید سوخت‌های بیولوژیکی می‌بایست فرایندهای منتشر کننده‌ی CO2 نظیر استفاده از ماشین‌آلات در کشت و فرآوری و نیز حمل و نقل نیز مورد ارزیابی قرار داد [۱۵].

۵-۷-۲-۲- حذف CO_2

یکی از مهمترین پیشرفت‌هایی که نه تنها بالانس خالص CO2 فرایندهای سوخت‌بیولوژیکی را بسیار بهبود بخشیده بلکه در کاهش CO2 اتمسفری مشارکت دارد، ادغام تولید سوخت‌های بیولوژیکی با سیستم‌های توقیف CO2 است [۱۵]. روش‌های مختلفی برای حذف دی اکســید کربن پیشــنهاد شــده اســت که یکی از این روش‌ها اســتفاده از فرآیندهای بیولوژیکی اســت. در روش‌های بیولوژیکی برپایه جلبک‌ها، این موجودات می‌توانند گازهای آلاینده را حذف و از دی اکسید کربن (مهمترین گاز گلخانه ای) به عنوان منبع کربن جهت رشد خود استفاده نمایند. بنابراین در این شــیوه نه تنها آلاینده‌ها حذف می‌شــود بلکه گاز دی اکســید کربن به ترکیبات آلی با ارزش که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل می‌شود. سوخت‌های زیستی از فراورده‌هایی است که از جلبک‌ها قابل استحصال است. جلبک‌ها با توجه به داشتن پتانسیل بالای جذب دی اکسیدکربن و خواص منحصر به فردی که در جذب دی اکسیدکربن دارند و اکسیژن بیشتری نسبت به سایر گیاهان تولید می‌کنند، در سطح دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. محققان در ســال ۲۰۱۱ نشــان دادند که ریز جلبک کلرلا قابلیت حذف ۶۰٪ از دی اکســید کربن با غلظت ۲۵٪ در هوای آلوده را دارا می‌باشد [۲۴]. ریز جلبک‌ها قابلیت بالایی در تحمل مقادیر بالای آلاینده دی اکسید کربن و همچنین پتانسیل بالا در حذف این آلاینده را دارند [۴, ۵]. جلبک‌ها شامل انواع مختلف از جلبک‌های تک سلولی تا گونه‌های بزرگ دریایی هستندکه بیش از نیمی از اکسیژن موجود در سطح زمین از طریق همین جلبک‌ها تأمین می‌شــود. توده زیســتی این جلبک‌ها در مدت زمان ۲۴ تا ۴۸ ســاعت تکثیر شــده و به میزان دو برابر افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این از زیست‌توده یا زیست توده‌ای که از این جلبک‌ها باقی می‌ماند می‌توان فرآورده‌های مختلفی مانند سوخت‌های زیستی، کود گیاهی، محصولات غذایی، فرآورده‌های دارویی، بهداشتی و آرایشی و پلاستیک‌های زیستی تولید کرد که ارزش اقتصادی بالایی دارند. این جلبک‌ها می‌توانند حجم قابل توجهی از دی اکسیدکربن را به دام اندازند و در عین حال می‌توان فرآورده‌های جانبی با ارزشــی را نیز از آنها تهیه کرد. میزان فتوســنتز جلبک‌ها در مقایسه با دیگر گیاهان به مراتب بیشتر است. تخمین زده شده است برای تولید یک تن زیست توده جلبکی حدود دو

[1]Net Energy Balance

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

تن دی اکسیدکربن مورد نیاز است. تثبیت و حذف دی اکسیدکربن در جلبک‌ها برخلاف دیگر گیاهان و درختان به فصل خاصی محدود نیست و حتی در فصل پاییز و زمستان هم انجام می‌شود. در دوران مدرن و زندگی صنعتی در بسیاری از شهرهای بزرگ با پدیده وارونگی هوا مواجه هستیم. در فصل‌های پاییز و زمستان که درختان برگ ندارند این پدیده و پیامدهای ناشی از آن تشدید می‌شود؛ اما در صورتی که شرایط مساعد باشد جلبک‌ها حتی در این فصول نیز قادر به انجام فتوسنتز هستند، بنابراین می‌توانند دی اکسیدکربن موجود در هوا را به دام اندازند و در کاهش پیامدهای ناشی از وارونگی نیز تاثیرگذار باشد. براساس بررسی‌های آماری، هر درخت به طور متوسط می‌تواند سالانه ۵۰۰ کیلوگرم دی اکسیدکربن جذب کند. درای صورت در صورتی که در زمین به ازای هر نفر یک درخت وجود داشته باشد. به این ترتیب تقریبا ۳/۵ میلیارد تن دی اکسیدکربن در سال جذب می‌شود؛ اما تولید سالانه دی اکسیدکربن در سطح دنیا حدود ۳۲ میلیارد تن است؛ یعنی میزان دی اکسیدکربن تولید شده تقریبا ده برابر مقدار دی اکسیدکربنی است که درختان می‌توانند به دام اندازند. پس فقط با کاشت درخت نمی‌توان با اثر گلخانه‌ای مبارزه کرد. به همین دلیل در سطح دنیا استفاده از جلبک‌ها به عنوان راهکاری برای کاهش پیامدهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته و برنامه ریزی‌هایی برای استفاده هر چه بیشتر از جلبک‌ها انجام شده است.

۵-۸- نسل دوم پاسخگوی چالش‌های تولید سوخت بیولوژیکی

طیفی از سیستم‌های نسل دوم تولید سوخت‌های بیولوژیکی که دارای NEBs بسیار بالاتر و مصرف بهینه آب بوده و زمین زراعتی بسیار کمتری نیاز دارند، در حال توسعه هستند. در این راستا تکنولوژی‌های لیگنوسلولزی و میکروجلبکی بطور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. گزارشات نشان می‌دهند که میکروجلبک‌های مورد استفاده جهت تولید بیودیزل، ۱۵-۳۰۰ برابر روغن بیشتری در واحد سطح نسبت به محصولات کشاورزی مرسوم تولید می‌کنند (جدول ۱-۲) [۷, ۲۵].

علاوه براین محصولات کشاورزی مرسوم معمولا یک یا دو بار در سال برداشت محصول دارند، درحالیکه میکروجلبک‌ها دوره‌ی برداشت محصول بسیار کوتاهی (۱تا۱۰ روز بسته به نوع فرایند) دارند که همین مزیت اجازه برداشت پیوسته محصول را داده و منجر به افزایش چشمگیر در بازده تولید می‌شود (جدول ۱-۱) [۷].

جدول (۵-۱) راندمان تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی در قیاس با روغن ریزجلبکی [۷]

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Plant source	Biodiesel (L/ha/year)	Area to produce global oil demand (hectares × 10^6)	Area required as percent global land mass	Area as percent global arable land
Cotton	325	15,002	100.7	756.9
Soybean	446	10,932	73.4	551.6
Mustard seed	572	8,524	57.2	430.1
Sunflower	952	5,121	34.4	258.4
Rapeseed/canola	1,190	4,097	27.5	206.7
Jatropha	1,892	2,577	17.3	130 (0^a)
Oil palm	5,950	819	5.5	41.3
Algae (10 g m^{-2} day^{-1} at 30% TAG)	12,000	406	2.7	20.5 (0^a)
Algae (50 g m^{-2} day^{-1} at 50% TAG)	98,500	49	0.3	2.5 (0*)

توانایی دریافت انرژی نوری بیشـــتر و بازده تبدیل بالاتر نهایتا به کاهش کودشـــمیایی و مواد مغذی موردنیاز منتهی شده و درنتیجه موجب ایجاد آلودگی و ضایعات کمتری می‌شود. استفاده از فاضلاب‌ها در کشت میکروجلبک‌ها نیز گزینه قابل اتکایی بشمار می‌رود [۲۶]. مضاف بر این موارد درصورتیکه هدف از کشت میکروجلبک تولید سوخت بیولوژیکی باشد، می‌توان این کشت را در زمین‌های لم‌یزرع انجام داد که این موضوع می‌تواند درطول زمان موجب کاهش رقابت برای زمین‌های زراعتی شده و فرصت اقتصادی جدیدی را برای زمین‌های بایر، خشک یا نمکزارها فراهم آورد. درحالی که محصولات کشاورزی مرسوم جهت تولید سوخت‌های بیولوژیکی نیازمند مقدار قابل توجهی آب شیرین هستند، با استفاده از جنس‌های میکروجلبکی دریایی و یا آب شور و نیز با استفاده از سیستم‌های بسته بیورآکتوری می‌توان صرفه‌جویی بسیار زیادی در مصرف خالص آب شیرین انجام داد. زیست‌توده میکروجلبکی بوجود آمده در بیورآکتورها را نیز می‌توان تبدیل به گاز کرده و یا پیرولیز نمود تا گســـتره‌ای از ســـوخت‌های بیولوژیکی را بعنوان بخشی از استراتژی حبس CO_2 تولید کرد. در این روش زائدات بیولوژیکی GMO را نیز می‌توان با روشی ایمن برای محیط‌زیست دفع کرد. بقایای زیست‌توده غنی از کربن را نیز می‌توان بعنوان بخشی از استراتژی توقیف کربن ذخیره کرد [۱۶]. از دیگر جنبه‌های جالب‌توجه سیستم‌های میکروجلبکی نسل دوم این است که این سیستم‌ها می‌توانند جایگاه بسیار مناسبی در روند نوین بیوتکنولوژی داشته باشند چراکه گونه‌های میکروجلبکی قابلیت بهبود و ارتقای ســـریعی دارند. این جنبه از میکروجلبک‌ها می‌تواند تضـــمین کننده افزایش بازدهی آنها توســـط مهندســـی متابولیک باشد. پیشرفت‌های چشمگیر در سال‌های اخیر در بسیاری از زمینه‌ها انجام شده است و مثالهایی از افزایش بازده فتوسنتزی و تحمل رشد در محیط‌های شور یا در فاضلاب در قسمت‌های بعدی شرح داده خواهد شد. با اینهمه برخی از محدودیت‌های سیستم‌های میکروجلبکی نسل دوم در فرایند برداشت محصول و تغذیه CO_2 جهت بازده تولید بالاتر شناسایی شده‌اند [۱۶].

۵-۹- پتانسیل تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها

ریزجلبک‌ها خواصی از خود نشان داده‌اند که جهت تولید بیودیزل در مقیاس انبوه مناسب است [۱۹]. مزیت اصلی ریزجلبک‌ها رشد سریع آنهاست. درصورت فراهم شرایط مناسب محتوای روغن ریزجلبک‌ها می‌تواند تا ٪۹۰ وزن

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

خشک زیست‌توده نیز برسد [۲۷]. نرخ رشد و محتوای روغن ریزجلبک تعیین‌کننده میزان روغن تولیدی در هر روز است. نرخ تولید روغن ریزجلبک‌ها بصورت جرم روغن تولیدی در حجم محیط کشت محاسبه می‌شود [۷]. جدول (۱-۲) محتوای روغن گونه‌های چند ریزجلبک مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۲) محتوای روغن جنس‌های ریزجلبکی مختلف [۵]

Microalga	Oil content (% dry wt)
Botryococcus braunii	25–75
Chlorella sp.	28–32
Crypthecodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16–37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25–33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20–35
Nannochloropsis sp.	31–68
Neochloris oleoabundans	35–54
Nitzschia sp.	45–47
Phaeodactylum tricornutum	20–30
Schizochytrium sp.	50–77
Tetraselmis sueica	15–23

مطالعات انجام یافته اخیر مشخص نموده است که تولید تجاری بیودیزل ریزجلبکی تنها زمانی می‌تواند ماندگار باشد که هزینه تولید آن در قیاس با بهای نفت خام کمتر باشد. در این راستا دو قسمت از فرایند تولید بیودیزل یعنی جداسازی زیست‌توده از محیط‌کشت و استخراج روغن از زیست‌توده نیازمند توجه بیشتری هستند [۲۸]. بهبود طراحی راکتور، تکنیک‌های برداشت و استخراج می‌تواند به منجر به کاهش هزینه تولید زیست‌توده و در نهایت حل معضل منبع مناسب برای تولید سوخت‌های بیولوژیکی شود.

۵-۹-۱- مزایای ریزجلبک‌ها بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل

ریزجلبک‌ها مزایای زیادی نسبت به محصولات کشاورزی متداول بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل دارند.اول اینکه ریزجلبک‌ها جهت کشت و تکثیر به زمین کشاورزی نیاز نداشته و اورگانیسم‌هایی بسیار ساده و اولیه دارند. آنها قادر به حیات در شرایط آبی اکولوژیک مختلف نظیر آب‌شیرین، آب شور (شوری کمتر از ٪۳/۵)، آب دریا (شوری ٪۳/۵) و آب بسیار شور (شوری بالاتر از ٪۳/۵) و نیز در محیط‌هایی با گستره‌ی دمایی (°C ۴۰-۱۰) و pHنسبتا وسیع(۱۰-۳) هستند. این گستره‌ی وسیع تحمل ریزجلبک‌ها در انواع محیط‌ها، منجر به عدم نیاز به شرایط استریل شده و در نتیجه به تسهیل در کشت ریزجلبک‌ها جهت تولید صنعتی بیودیزل منتهی می‌شود.

دوم اینکه ریزجلبک‌ها انرژی خورشیدی را با راندمان بالایی جذب و آن را تبدیل می‌کنند. آنها قادر به تبدیل فتوسنتزی بیش از ٪۱۵ از تشعشع خورشیدی دردسترس، یا تقریباً ٪۶ از کل نور تابشی به داخل زیست‌توده هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

درحالیکه نیشکر (پرمحصول‌ترین گیاه کشاورزی روی کره زمین) در شرایط یکسان تنها قادر به تبدیل فتوسنتزی با راندمانی بین ۳/۵ تا ۴ درصد است. توانایی بالا در تبدیل انرژی خورشیدی منجر به مشارکت ۵۰ درصدی ریزجلبک‌ها در تثبیت کربن جهانی دارد؛ این درحالیست که ریزجلبک‌ها تنها ۰/۲ درصد از زیست‌توده فتوسنتزی جهان را به خود اختصاص داده‌اند.
در نهایت، ریزجلبک‌ها دارای محصول‌دهی روغن بسیار بالایی در هر هکتار نسبت به دانه‌های روغنی هستند. علت این مزیت این است که سلول ریزجلبک‌ها یک کارخانه‌ی تولید لیپید ۳۰ میکرونی است، در حالیکه محصولات کشاورزی تنها قادر به تولید روغن به اندازه گنجایش دانه‌های‌شان هستند.

۵-۹-۲- سابقه‌ی تاریخی تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها

در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰، دو محقق بنام‌های می‌یر[1](۱۹۵۵) و گولوئک[2](۱۹۶۰) استفاده از کربوهیدرات جلبکی را جهت تولید گاز متان طی فرایند تخمیر بی‌هوازی ارائه کردند. اما پروپوزال آنها ۱۰ سال بعد، یعنی اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ که بهای انرژی دست‌خوش تغییرات شد، مورد توجه قرار گرفت.
در میان تمام تحقیقات و فعالیت‌های انجام شده بر روی سوخت ریزجلبکی، مهمترین تلاش تحقیقاتی انجام شده طی برنامه‌ی گونه‌های آبزی (ASP)[3] با حمایت دپارتمان انرژی آمریکا (DOE)[4] از سال ۱۹۷۸ تا سال ۱۹۹۶ است. این برنامه‌ی تحقیقاتی با هزینه‌ای بالغ بر ۲۵ میلیون دلار انجام شد. طرح ASP در سال ۱۹۹۶ به علت تخمین عدم رقابت بهای بیودیزل جلبکی با بهای دیزل نفتی در آن زمان، متوقف شد [۲۰].

۵-۱۰- رویکرد طلایی به ریزجلبک‌ها

دو سال پس از خاتمه کار ASP، گزارشی از آن توسط DOE منتشر شد. شیهان[5] و همکاران نتیجه گرفتند که ASP زیربنای محکمی برای تحقیقات جلبک به سوخت فراهم آورد، و مهمتر اینکه به این گزارش نه بعنوان پایان کار، بلکه می‌بایست بعنوان یک شروع نگریسته شود.
امروزه تغییرات شدید بهای جهانی نفت از یک سو و نگرانی‌های جهانی در مورد حذفCO2 از سوی دیگر رویای جایگزین شدن دیزل نفتی با یک سوخت "سبز" را بیش از پیش تهییج کرده است. با توجه به زوایای تکنیکی، شکوفایی در بیوتکنولوژی، بویژه در مهندسی متابولیکی ابزار قدرتمندی جهت ساختن ویا اصلاح گونه‌های جدید ریزجلبکی با صفات مورد نظر فراهم کرده است. پیشرفت‌های عظیم در طراحی بیورآکتور نیز راه‌حل‌های جالب توجهی را در راستای تجاری‌سازی کشت ریزجلبک‌ها ارائه کرده است.

[1]Meier
[2]Golueke
[3]Aquatic Species Program
[4]Departmet of Energy
[5]Sheehan

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

بنابراین، در حقیقت رقابت گسترده جهانی برای تولید بیودیزل ریزجلبکی در راه است. در حال حاضر بیش از ۲۰۰ شرکت در تلاش برای یافتن روشهای مقرون‌به‌صرفه و پایدار جهت تبدیل ریزجلبک به بیودیزل هستند. این همان زمان طلایی رویکرد به ریزجلبک‌هاست.

۵-۱۱- شکاف تحقیقاتی در زمینه تولیدبیودیزل از ریزجلبک‌ها

در حال حاضر مهمترین چالش در راستای تولید انبوه بیودیزل از ریزجلبک‌ها، توجیه‌ناپذیر بودن اقتصادی این فرایند است که بیشتر به گران قیمت بودن و مشکلات توسعه بیورآکتورهای استریل در مقیاس وسیع مزبوط می‌شود. بیورآکتورهای استریل برای کشت بسیاری از گونه‌های ریزجلبکی (نظیر NanochloropsisTetraselmis suesisa,Scenedesmus,) که قادر به تولید مقادیر بالایی لیپید هستند، ضروری است. استفاده از حوضچه‌های ریزجلبکی وسیع در فضای باز که نسبت به بیورآکتورها کم هزینه‌تر هستند، یک راه‌کار مناسب برای تولید اقتصادی بیودیزل ریزجلبکی در مقیاس انبوه است. به همین دلیل، کشت ریزجلبک‌ها در فضای باز در چهار دهه گذشته مورد مطالعات گسترده قرار گرفته و حوضچه‌هایی که منجر به حداکثر رشد ریزجلبک‌ها می‌شوند، توسعه یافته‌اند [۲۹].
اما کشت انبوه در حوضچه‌های باز غیراستریل تنها برای سه گونه ریزجلبکیSpirulina planensis، Dunaliella salina و انواع خاصی ازChlorella امکان پذیر است [۲۹]. این موضوع به علت توانایی این گونه در رشد و زندگی در شرایط محیطی حداکثری[1] است؛ بعنوان مثال اسپیرولینا پلاتنسیس قادر به رشد محیط‌های بسیار قلیایی تا pH=10 و دونالیلا قادر به رشد در سطوح شوری بالاتر از ۲۰۰ gNaCl. L-1 است. به همین دلیل هیچ آلودگی میکروبی و حتی‌گونه ریزجلبکی نامطلوبی در این محیط‌ها قادر به رشد نبوده و درنتیجه حداکثر میزان نرخ تولید زیست‌توده برای گونه ریزجلبکی مطلوب حاصل می‌شود.
با این وجود تحقیقات بسیار اندکی برروی قابلیت تولید لیپید توسط گونه‌های فوق‌الذکر صورت گرفته است. در این میان بعنوان مثال یک شکاف تحقیقاتی بر روی جنس ریزجلبک دونالیلاگونه که قابلیت صنعتی در فضای باز را دارد، احساس می‌شود. در نتیجه با توجه به تعریف این تحقیق در راستای طرح صنعتی تولید بیودیزل ریزجلبکی، این تحقیق درصدد پرکردن این شکاف تحقیقاتی برآمده و تأثیر شرایط استرس محیطی مختلف نظیر شدت نور و سطوح مختلف شوری را بر تولید لپید مورد بررسی قرار دادیم.

۵-۱۱-۱- وضعیت کنونی انرژی‌های بیولوژیکی در ایران

طبق اسناد و مدارک موجود، تاکنون منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران بطور کارآمدی مورد استفاده قرار نگرفته و سوخت بیولوژیکی جهت پاسخگویی به نیازهای گوناگون انرژی نظیر سوخت وسائل نقلیه، تولید الکتریسیته و غیره مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. مدیریت ضایعات محصولات کشاورزی جهت تولید انرژی از آنها (نظیر بیواتانول، بیوگاز و غیره) و همچنین سرمایه‌گذاری روی محصولات غیرغذایی نظیر جاتروفا و همچنین ریزجلبک‌ها

[1] Extream Condition

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برای تولید بیودیزل از آنها راهکارهای مناسبی در این زمینه به‌شمار می‌روند. با این‌همه بدلیل عدم تطابق شرایط بهینه رشد جاتروفا با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، و عدم قابلیت بومی‌سازی آن، ریزجلبک‌ها بهترین گزینه هستند [۳۰]. گونه‌های مختلفی از ریزجلبک‌های غنی از روغن که قابلیت تبدیل به بیودیزل را دارا می‌باشند، در ایران وجود داشته و به عنوان گونه‌های بومی مناطق مختلف ایران به شمار می‌روند. صرف نظر از بیودیزل، ریزجلبک‌ها می‌توانند بعنوان منابعی برای تولید سایر سوخت‌های بیولوژیکی تجدیدپذیر نظیر بیومتان نیز بشمار روند. بیومتان از تخمیر بی‌هوازی زیست‌توده میکروجلبک حاصل می‌شود. وجود انواع دریاچه‌های آب‌شور در ایران نظیر دریاچه‌ی ارومیه، سومین دریاچه‌ی آب شور بزرگ کره زمین، که دارای گستره وسیع و متمایزی از گونه‌های ریزجلبکی است از یک سو و امکان راه‌اندازی حوضچه‌های کشت وسیع ریزجلبک در مناطق مختلف ایران بویژه در مناطق جنوبی از سوی دیگر باعث می‌شود تا تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها در ایران رویایی دست‌یافتنی و کاملا امکان پذیر باشد [۳۰].

۵-۱۱-۲- چشم‌انداز آینده بیودیزل در ایران

جایگزین کردن تمام سوخت دیزل مصرفی در ایران با بیودیزل مستلزم تولید سالانه‌ی ۳۶/۵ میلیون مترمکعب بیودیزل با درنظرگرفتن نرخ کنونی مصرف است. اما واقعیت این است که منابع اولیه تولید بیودیزل قادر نیستند جوابگوی این نیاز گسترده باشند [۳۰]. در جدول (۱-۳)، با درنظرگرفتن متوسط محصول‌دهی روغن در هر هکتار از دانه‌های روغنی مختلف، سطح زمین زراعتی موردنیاز برای جوابگویی به ٪۵۰ از نیاز ایران به سوخت دیزلی در ستون ۳ و درصدی که این سطح زمین از کل سطح زمین‌های زراعتی ایران (۱،۶۳۶،۰۰۰km2) به خود اختصاص می‌دهد، در ستون ۴ جدول محاسبه شده است.

جدول (۵-۳) مقایسه قابلیت منابع مختلف در تولید بیودیزل در ایران [۲۸]

Crop	Oil yield (L/ha)[a]	Land area needed (M ha)[b]	Percent of existing Iran cropping area[b]
Corn	172	106	65
Soybean	446	41	25
Canola	1190	15.3	9
Jatropha	1892	9.6	6
Microalgae[c]	136,900[d]	0.13	0.08
Microalgae[e]	58,700[d]	0.31	0.19

[a] Chisti, 2007.
[b] For meeting 50% of all transport fuel needs of Iran.
[c] 70% oil (by weight) in biomass.
[d] Oil yields based on biomass productivity in photobioreactors.
[e] 30% oil (by weight) in biomass.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

براساس داده‌های این جدول، تنها ۰/۰۸ تا ۰/۱۹ درصد از کل زمین‌های کشاورزی ایران جهت تولید زیست‌توده جلبکی به منظور تأمین ٪۵۰ از نیاز کشور به سوخت دیزلی کفایت می‌کند. بنابراین ریزجلبک‌ها تنها منبع قابل اتکا برای تولید بیودیزل در ایران هستند که پتانسیل جایگزینی کامل بجای دیزل نفتی را دارند [۷, ۳۰].
بنابراین با توجه به مزایای ذاتی ریزجلبک‌ها و نیز محدودیت‌های کنونی موجود در استفاده از سایر محصولات کشاورزی روغنی، مهندسی ژنتیک میکروجلبک‌ها می‌تواند به اقتصادی شدن تولید بیودیزل در ایران کمک شایانی کند. وجود دریاچه‌های آب شور متعدد در ایران (نظیر دریاچه ارومیه، دریاچه قم، دریاچه گاوخونی و مهارلو)، دسترسی آسان به این دریاچه‌ها و وفور تابش نور خورشید منجر به رشد و تکثیر انواع مختلف گونه‌های ریزجلبکی در ایران شده که می‌توانند منابع خوبی برای تولید روغن باشند.

۱۲-۵- بیوسنتز لیپیدها در ریزجلبک‌ها

"لیپید"ها از لحاظ شیمیایی از تنوع بسیاری برخوردارند و بسته به لحاظ ساختاری و عملیاتی تعاریف و دسته‌بندی‌های متفاوتی را دربرمی‌گیرند.
در یک تعریف ساختاری رایج، به اسیدهای چرب و مشتقات حاصل از آنها و تمام موادی که بنحوی از لحاظ بیوسنتزی یا عملکردی، با این ترکیبات مرتبط هستند، لیپیدها اطلاق می‌شود. این تعریف کلسترول را شامل می‌شود. اما سایر استروئیدها، ویتأمین‌های محلول در چربی، کاروتنوئیدها یا روغن معدنی را بجز در موارد خاص در برنمی‌گیرد. با این وجود گاه عبارت "لیپید" بعنوان مترادفی برای چربی‌هایی که معمولا تحت عنوان تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها[1] شناخته می‌شوند، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.
در تعاریف عملیاتی، لیپیدها عبارت از مواد غیرفراری هستند که بتوان آنها را با استفاده از حلال‌هایی با قطبیت کم تا متوسط از منابع بیولوژیکی استخراج کرد. به لیپید استخراج شده توسط حلال‌ها "چربی‌خام[2]" یا "چربی قابل‌استخراج[3]" گفته می‌شود. چربی‌خام در واقع ماده‌ی ناهمگنی متشکل از تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها، فسفولیپیدها، اسیدهای چرب، استرول‌ها، واکس‌ها و رنگدانه‌هاست. معمولا میزان لیپیدهای خام اندازه‌گرفته شده به روش وزنی تحت عنوان "لیپید کل[4]" خوانده می‌شود.
سازمان غذایی و دارویی آمریکا چربی‌کل را بعنوان مجموع همه‌ی اسیدهای‌چرب حاصل از استخراج لیپید کل که بصورت تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها بیان شده‌اند تعریف کرده‌است. جهت جلوگیری از اشتباه گرفتن چربی‌کل با لیپید کل حاصل از استخراج با حلال از عبارت "اسیدهای‌چرب‌کل" برای مجموع اسیدهای‌چرب بیان شده بصورت تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها که متعاقبا متیله خواهند شد، استفاده می‌شود.
تری‌گلیسریدها (تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها) در واقع زیرمجموعه‌ای از لیپیدهای خنثی هستند که مواد اصلی در تولید بیودیزل به شمار می‌روند. ریزجلبک‌ها نیز همانند گیاهان و حیوانات قادر به بیوسنتز تری‌گلیسریدها جهت ذخیره مواد و انرژی هستند. مسیر سنتز تری‌گلیسریدها در ریزجلبک‌ها شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

[1]Triacylglycerols
[2]Crude fat
[3]Extractable fat
[4]Total lipid

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- تشکیل استیل‌کوآنزیم A (استیل‌کوآ)[1] در سیتوپلاسم؛
- طویل‌شدن[2] و غیراشباع شدن زنجیره‌ی کربنی اسیدهای چرب؛
- بیوسنتز تری‌گلیسرید

۵-۱۲-۱- بیوسنتز لیپید در دونالیلا

اثرات شرایط محیطی مختلف به طور اختصاصی بر محتوای لیپیدی و اسید چرب برخی گونه‌های دونالیلا بررسی شده است. دونالیلا سالینا در پاسخ به استرس شوری، نور بالا، دمای بالا و فقر غذایی نیتروژن، لیپید بالایی تولید می‌کند. شناخته شده ترین گونه دونالیلا، دونالیلا سالینا است که حاوی مشتقات هگزادکان منشعب است. هگزادکان ترکیبی مدل برای سوخت دیزل است.اخیرا برنامه تحقیقی در مورد قابلیت دونالیلا در تولیدسوخت‌زیستی در دپارتمان علوم‌زیستی دانشگاه‌کالگری[3] کانادا انجام‌گرفته‌است.
گونه‌هایی از جنس دونالیلا که قابلیت بالایی از نظر تولید لیپید دارند موضوع مطالعات توالی یابی ژنومی و بررسی بیان ژنی هستند تا ژن‌های با نقش موثر در تولید لیپیدها شناسایی شوند. ازاین نتایج می‌توان در فرایندهای مهندسی ژنتیک و مهندسی متابولیک به منظور افزایش تولید لیپید استفاده نمود.

۵-۱۲-۲- اصول حاکم بر استخراج لیپیدها

استخراج لیپیدها از بافت‌ها از سه منظر اصلی قابل بررسی است. اول، استخراج کامل و حلالیت لیپیدها در حلال آلی؛ دوم، حذف آلودگی‌های غیرلیپیدی از ماده‌ی استخراج شده و سوم، پتانسیل سمیت حلال.
لیپیدهای خالص در حلال‌های گوناگونی حل می‌شوند. این انحلال بستگی به برهم‌کنش‌های کشش نسبی بین حلال با نواحی آبدوست و آبگریز مولکول لیپیدی دارد. لیپیدهایی که گروه‌های عاملی‌شان قطبیت کمی دارند، نظیر تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها و کلسترول استرها، در حلال‌های هیدروکربنی مانند هگزان، سیکلوهگزان یا تولوئن و نیز در حلال‌هایی با قطبیت نسبتا بیشتر نظیر کلروفرم و اترها حلالیت بالایی دارند. این لیپیدها در حلال‌های قطبی نظیر الکل‌ها و بویژه متانول نسبتا انحلال ناپذیرند. حلالیت آنها در حلال‌های قطبی با کاهش طول زنجیره‌ی اسیدهای چرب و یا افزایش طول زنجیر حلال الکلی افزایش می‌یابد. لیپیدهای غیراشباع با سهولت بیشتری نسبت به لیپیدهای اشباع در اغلب حلال‌ها حلمی‌شوند، در مقابل لیپیدهای پیچیده‌ی قطبی تنها به مقدار ناچیزی در حلال‌های هیدروکربنی حل شده و تمایل به انحلال در حلال‌های قطبی نظیر کلروفرم و متانول و اتانول دارند.
در راستای استخراج لیپیدها از بافت‌ها، یافتن حلال‌هایی که علاوه بر سهولت انحلال لیپیدها در آنها منجر به ازهم گسیختن برهمکنش بین لیپیدها و ماتریکس بافت شوند، ضروری است. تراوایی[4] دیواره‌ی سلولی برخی از اورگانیسم‌ها برای حلال‌ها نسبت به سایر اورگانیسم‌ها کمتر است؛ دراین صورت آب با متورم کردن بیوپلیمرهای

[1]Acetyl coenzyme A (acetyl-coA)
[2]Elongation
[3]Calgeri
[4]Permeability

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

موجود در ساختار سلولی به استخراج کمک می‌کند و در واقع آب اساسی‌ترین جز بسیاری از سیستم‌های استخراجی محسوب می‌شود. در برخی موارد جهت افزایش راندمان استخراج و گاه حتی برای امکان‌پذیر شدن استخراج لیپیدها، شکستن دیواره‌ی سلولی ضروری است.
لیپیدهای استخراجی از سلول‌ها می‌تواند حاوی آلودگی‌های غیرلیپیدی نظیر قندها، امینواسیدها یا نمک‌ها باشد. از اینرو جهت حذف این ناخالصی از لیپید استخراجی نیاز به شستشو و انجام مراحل خالص‌سازی بعدی وجود دارد.

۵-۱۲-۳- روش‌های استخراج و تعیین لیپید کل

اگرچه روش‌های زیادی برای تعیین لیپیدکل وجود دارد، اما روش گراویمتری پس از استخراج با حلال معمول‌ترین روش مورد استفاده برای استخراج لیپید از مواد مختلف و تعیین محتوای لیپیدکل محصول است. روش‌های استخراج با حلال را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی کرد: استخراج ناپیوسته، استخراج نیمه‌پیوسته[1] و استخراج پیوسته [۳۱].

۵-۱۲-۳-۱- استخراج ناپیوسته با حلال

این روش برمبنای اختلاط نمونه و حلال در محفظه‌ای مناسب مانند فونل جداسازی استوار است. محفظه به شدت تکان خورده و یا نمونه و حلال تحت هموژناسیون قرار می‌گیرد تا حلال و بقایای نمونه از طریق نیروی گرانی، فیلتراسیون یا سانتریفیوژکردن از هم جدا شوند. گاه ممکن است نیاز به تکرار این روند با مخلوطی از حلال‌ها با خواص مختلف، جهت افزایش راندمان فرایند استخراج، وجود داشته باشد. استخراج ناپیوسته معمولا با مخلوطی از حلال‌هایی که تشکیل دوفاز می‌دهند، یکی قطبی و دیگری غیرقطبی انجام می‌شود؛ فاز قطبی عموما دور ریخته شده و فاز غیرقطبی جهت تعیین لیپید مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش فولچ[2] و روش بلای و دایر[3] (B&D) [۳۱] به این گروه تعلق دارند.

۵-۱۲-۳-۲- استخراج نیمه‌پیوسته با حلال

روش سوکسله[4] معمول‌ترین نمونه مورد استفاده از روش استخراج نیمه‌پیوسته با حلال است. در این روش استخراج لیپید معمولا از حلال‌های غیرقطبی نظیر هگزان، اتیل‌استات یا پترولیوم‌اتر استفاده می‌شود. از برجسته‌ترین مزایای روش سوکسله می‌توان به تماس مکرر نمونه با بخش تازه‌ای از حلال و درنتیجه‌ی آن کمک به جابجایی تعادل انتقال، عدم نیاز به فیلتراسیون و قابلیت افزایش ظرفیت نمونه با استخراج موازی همزمان اشاره کرد. با وجود این مزایا روش سوکسله دارای معایبی است که استفاده از آن را محدود می‌کند. بارزترین معایب آن زمان طولانی موردنیاز جهت استخراج و مقدار زیاد اتلاف حلال با مشکلات زیست‌محیطی است. نمونه‌ها معمولا در نقطه‌جوش حلال برای مدت طولانی تحت استخراج قرار می‌گیرند؛ ازاینرو نمی‌توان از امکان تخریب ترکیبات هدف چشم‌پوشی کرد.

[1] Semi-continuous
[2] Folch
[3] Bligh & Dye
[4] Soxhlet

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

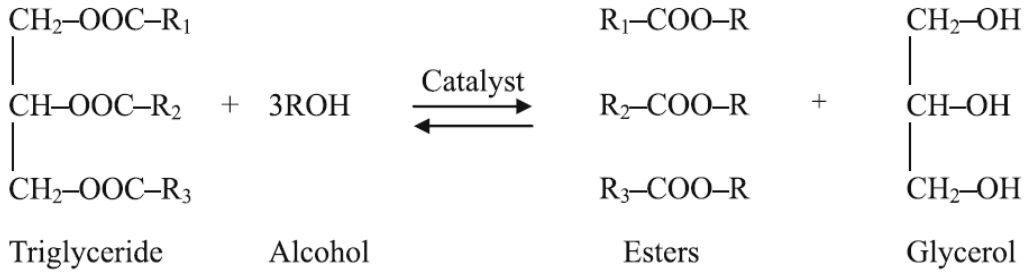
۵-۱۲-۳-۳- روش استخراج B&D

بطورکلی روش استخراج B&D بعنوان بهترین روش استخراج لیپیدهای قطبی شناخته شده و معمولا برای تعیین محتوای لیپیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. درواقع روش B&D اقتباس ساده‌ای از روش فولچ است که منحصراً بعنوان یک روش اقتصادی (از لحاظ حجم حلال مصرفی) استخراج لیپیدها از بافت‌هایی که حاوی لیپید نسبتاً کم و سهم آب زیاد هستند. براساس این روش، لیپید موجود در نمونه توسط مخلوطی از حلال‌های قطبی شامل کلروفرم، متانول و آب (1:2:1.8) که تشکلیل یک فاز می‌دهند، استخراج می‌گردد. پس از انجام‌شدن استخراج در سیستم تک فازی، با افزودن کلروفرم و آب، دوفاز کلروفرم و فاز آب/متانول از هم جدا می‌شوند. فاز کلروفرم حاوی لیپیدهای استخراجی است. معمولا محتوای لیپیدی با توزین لیپید حاصل، پس از تبخیر کلروفرم تعیین می‌شود. با این روش هم لیپیدهای قطبی و هم لیپیدهای خنثی استخراج می‌شوند.

ایراد وارد بر روش B&D این است که نیاز به تکنسین ماهر برای دست‌یابی به نتایج قابل تکرار است. همچنین با توجه به اثرات منفی حلال‌های کلردار بر محیط‌زیست، استفاده از کلروفرم می‌بایستی محدود شود. تحقیقاتی جهت سازگاری روش B&D با حلال‌های غیرکلردار انجام شده‌است. اما با توجه به راندمان بالای سیستم B&D برای استخراج هر دو گروه لیپیدهای قطبی و غیرقطبی، هنوز بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱۲-۳-٤- تبدیل لیپید به بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون

تولید بیودیزل از لیپید به وسیله ترنس‌استریفیکاسیون انجام می‌شود. ترنس‌استریفیکاسیون فرایند تبادل گروه آلی Rیک استر با گروه R یک الکل است که واکنش عکس آن جهت تبدیل چربی‌ها (تری‌گلیسریدها) به بیودیزل استفاده می‌شود.



شکل (۵-۵) فرایند تبدیل کاتالیستی تری‌گلیسرید به بیودیزل طی ترانس استریفیکاسیون

جهت تبدیل شیمیایی لیپید به بیودیزل دو روش تبدیل کاتالیستی بازی و اسیدی مرسوم است. البته اخیراً تبدیل آنزیمی نیز مطرح شده است که هنوز در مراحل تحقیق قرار دارد. هریک از روش‌های کاتالیستی اسیدی و بازی دارای مزایا و معایبی هستند که به طور خلاصه در جدول (۱-۴) نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۵-۴) مقایسه ویژگی‌های ترانس‌استریفیکاسیون بازی و اسیدی

	اسیدی	بازی
دما	بالا (حدود ۹۰°C)	پایین
زمان	چند دقیقه تا چند ساعت	چند ثانیه تا چند دقیقه
قدرت استریفای کردن	متوسط تا بالا	–
قدرت ترانس‌استریفیکاسیون	پایین	بالا
ریسک صابونی شدن	پایین	بالا
امکان مزاحمت آب	پایین	بالا

۵-۱۳- بازار مصرف جلبک‌ها

بیش از ۷۰ درصد از سطح زمین را آب پوشانده است که از عمده‌ترین گروه موجودات آن می‌توان به جلبک‌ها اشاره کرد. اکثر این موجودات که در آب زندگی می‌کنند و قابلیت حیاط در سرتاسر محیط زیست را دارا می‌باشند. جلبک‌ها بعنوان تولید کنندگان عمده مواد غذایی تأثیر بسزایی در پایداری اکوسیستم دریا دارند و از این رو منبع غذایی مناسبی برای سایر جانداران آبزی به شمار می‌روند [۳۲].

در پی کمبود منابع غذایی، بشر کنونی به دنبال منابع غذایی جدید جهت تامین نیازهای روزافزون خود بوده است. یکی از این منابع غذایی که از چندین دهه پیش مورد توجه قرار گرفت، جلبک بود. تولید جلبک و مشتقات آن توانایی بالقوه‌ای برای تبدیل به شاخه بسیار مهم از بخش بیوتکنولوژی کشاورزی دارد.

جلبک‌ها جز ساده‌ترین موجودات کلروفیل‌دار بشمار می‌آیند. با آنکه گفته می‌شود جلبک‌ها موجودات بسیار ساده‌ای هستند ولی این تعریف در مورد تمام آن‌ها عمومیت ندارد. در بعضی از موارد این موجودات نه تنها ساده نیستند بلکه از بسیاری از جهات پیشرفته، تکامل یافته و دارای ساختار رویشی و زایشی بسیار پیچیده هستند. برخی از انواع جلبک‌ها برای تولید پروتئین‌ها، آستاگزانتین ، بتاکاروتن ، گلیسرول، سوخت‌های زیستی، داروهای مختلف و همچنین مواد شیمیایی مطلوب کشت می‌شوند [۳۳].

امروزه دانشمندان و محققین به دنبال یافتن مواد و پیش‌سازهایی هستند که از جانوران، گیاهان، باکتری‌ها، جلبک‌ها و سایر موجودات به صورت طبیعی به دست آید، علت این امر آن است که تولید مواد مذکور از این طریق از لحاظ اقتصادی بسیار مرقوم به صرفه بوده و همچنین سازگاری بیشتری با سیستم‌های بیولوژیک نسبت به مواد شیمیایی مشابه دارند. به طور نمونه با کشف رنگ‌های مصنوعی تقاضا برای رنگ‌های طبیعی کاهش یافت زیرا عصاره‌های طبیعی فاقد قوام لازم جهت ایجاد طیف‌های مختلف رنگ بودند، همچنین مقاومت کافی در برابر نور و حرارت را دارا نبودند. رنگ‌های طبیعی تغییر پذیر بوده و اغلب استفاده از آن‌ها نسبت به رنگ‌های مصنوعی مشکل‌تر می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

در طول دهه‌های گذشته به جهت بررسی‌های گسترده‌ای که انجام شد دانشمندان به این نتیجه رسیدند که رنگ‌های مصنوعی سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند و باعث ایجاد بیماری سرطان می‌شود در نتیجه مصرف قسمت عمده‌ای از این رنگ‌ها در مواد غذایی غیرمجاز اعلام شد و رنگ‌های طبیعی جایگزین آن‌ها شدند. رنگ‌های طبیعی ممکن است از منابع طبیعی بدست آیند و یا اینکه از طریق سنتز ساخته و تهیه شوند. بطور کلی افزودن این مواد، به مواد و محصولات غذایی کاملاً مجاز و آزاد است. به همین دلیل به آن‌ها "رنگ‌های بی نیاز به تائید" می‌گویند.

علاوه بر محیط‌های آبی، در سطح خاکهای مرطوب نیز تعداد بسیار زیادی جلبک یافت می‌شود. بخشهای هوایی درختان و همچنین سنگها و صخره‌ها محلهای دیگری هستند که جلبک‌ها می‌توانند بر روی آنها رشد کنند. بعضی از جلبک‌ها می‌توانند در محیطهای غیر معمولی، مثل دریاچه‌های نمک، چشمه‌های آب گرم و یخچال‌های طبیعی و حتی در درون بدن و بافتهای موجودات زنده زیست کنند. جلبک‌های تک سلولی جزء اولین زنجیره‌های غذایی می‌باشند که با مصرف دی اکسید کربن، اتمسفر و تولید اکسیژن زمینه حیات جانوری و گیاهی را در کره خاکی فراهم آورده‌اند. ریزجلبک‌ها گروهی از جلبک‌ها هستند که برخی انواع آن برای تولید پروتئین‌ها، کاروتنوئیدها (آستاگزانتین ، بتاکاروتن)، گلیسرول، سوخت‌های زیستی، داروهای مختلف و همچنین ترکیبات شیمیایی با ارزش بالا کشت می‌شوند [۳۳]. جلبک‌ها علاوه بر این که بعنوان منبع غذایی موجود آبزی مطرح هستند از طرف دیگر منجر به بهره مندی سایر موجودات از متابولیت‌های ثانوی تولید شده توسط جلبک‌ها می‌شوند.

جلبک‌ها بر اساس تعداد سلول‌های تشکیل دهنده آن‌ها می‌توانند به دو گروه تک یاخته و پریاخته تقسیم شوند. هم‌چنین این طبقه بندی تحت عنوان میکروجلبک یا فیتوپلانکتون و ماکروجلبک شناخته می‌شود. دیواره یاخته‌ای در جلبک‌ها بسیار حائز اهمیت است. علت آن وجود مواد مختلفی است که بعضی از آنها کاربرد صنعتی ، دارویی و پزشکی دارند. یاخته‌های زایشی از قبیل گامتها و زئوسپورها فاقد دیواره یاخته‌ای هستند. دیواره یاخته‌ای در جلبک‌ها معمولا از ۲ لایه تشکیل شده است لایه بیرونی لایه‌ای است ژلاتینی از مواد پکتینی ساخته شده و در آب گرم حل می‌شود. لزج بودن جلبک‌ها بدلیل وجود این لایه بیرونی است.

اغلب جلبک‌ها یا خود متحرک‌اند و یا یاخته‌های زایشی آنها متحرک است. در بین جلبک‌ها فقط دو گروه یعنی جلبک‌های سبز–آبی و جلبک‌های قرمز از این قاعده مستثنی هستند. فرم‌های متحرک و یاخته‌های زایشی متحرک در آنها دیده نمی‌شود. وسیله حرکت یاخته‌ای متحرک ، تاژک نام دارد که از نظر شکل ظاهری بر دو نوع است. یکی تاژک شلاقی که سطح آن صاف و دیگری تاژک پر مانند که سطحی ناصاف و همانند پر دارد. همچنین تعداد تاژک و محل قرار گرفتن در جلبک‌های گوناگون متفاوت است.

تولید مثل در جلبک‌ها به دو روش غیر جنسی و جنسی صورت می‌گیرد. تولید مثل غیر جنسی یا رویشی توسط یاخته‌های رویشی معمولی انجام می‌شود بدون آنکه در دیواره یاخته اصلی تغییری حاصل گردد قطعه قطعه شدن کلونی ، ریسه یا بطور کلی تال ، تقسیم یاخته‌ای به صورت دوتایی و تغییر شکل یاخته‌های رویشی و تبدیل آنها به یاخته‌های مقاوم و زایشی از انواع تولید مثل رویشی بشمار می‌آیند. تولید مثل غیر جنسی ، روش معمولی و طبیعی جلبک‌هاست که در این حالت‌هاگهای متحرک به نام زئوسپور و یا غیر متحرک بنام آپلانسپور در کیسه‌هایی به نام هاگدان بوجود می‌آیند.

تولید جلبک و مشتقات آن توانایی بالقوه‌ای برای تبدیل به شاخه بسیار مهم از کشاورزی دارد و باید بطور فعالانه‌ای دنبال گردد. جلبک‌های اتوتروف نیازمندی‌های مواد آلی را از همان مواد پایه‌ای اکسید شده ضروری برای تمام گیاهان به دست می‌آورند. همچنین جلبک یک واحد تولیدی است که دی اکسیدکربن را از هوا خارج ساخته و بدون

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

رهاسازی هیچ بقایای آلاینده، اکسیژن، محصولات شیمیایی مفید و غذا تولید می‌کند (کاسول و زیلبرمن، ۲۰۰۰). در سال‌های اخیر توسعه علوم داروسازی و حرکت بسوی کاربرد بیوفناوری در صنایع شیمیایی منجر به استفاده وسیع از جلبک‌ها شده است [۳۴]. از اهمیت جلبک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جلبک‌ها ۱۰۰–۱۰ برابر بیشتر از گیاهان روی زمین CO_2 هوا را مصرف می‌کنند.
- می‌توانند در محیط آبی رشد کرده و به راحتی به CO_2 و مواد مغذی دسترسی داشته باشند.
- توسط انسان و حیوانات مصرف شوند.
- تنوع گونه‌ای بالایی دارند.
- انواع مختلفی از موادرا می‌توانند تولید کنند.
- منجر به کاهش CO_2 می‌شوند.
- منجر به بازیافت مواد می‌شوند.

جلبک‌ها یکی از فعال‌ترین موجودات فتوسنتزکننده و دارای کلروفیل باتراکم بالا هستند، اما دیواره سلولی آن‌ها سلولزی و قابل هضم می‌باشد. در هیچ گیاه دیگری میزان کلروفیل به این حد نیست. جلبک‌ها همانند جانوران، مواد ذخیره غذایی ساخته شده از نوعی نشاسته و پروتئین دارند، اما برخلاف آن‌ها فتوسنتز می‌کنند. آن‌ها همانند باکتری‌ها قابلیت سازگاری با شرایط مختلف طبیعی را دارند. اطلاعات ژنتیکی آن‌ها به آسانی مبادله می‌شود، اما وجود کلروفیل آن‌ها را از باکتری‌ها متمایز می‌سازد.

تعداد میکروجلبک‌ها را بین ۲۲۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ تخمین می‌زنند که از بین آنها ۵۰ میکروجلبک، بصورت صنعتی تولید می‌شوند. از مهمترین میکروجلبک‌ها که به صورت صنعتی تولید و استفاده می‌شوند می‌توان به گونه‌های زیر اشاره نمود:

- دونالیلا (Dunaliella)
- هماتوکوک (Hematococcus)
- اسپیرولینا (Spirulina)
- سندیموس (Scenedesmus)
- کلامیدوناس (Chlamydomonas)
- کلرلا (Chlorella)

از نظر تغذیه‌ای میکروجلبک‌ها منبع غنی از پروتئین، کربوهیدرات، ویتامین‌های طبیعی، مواد معدنی و به ویژه اسیدهای چرب ضروری هستند. میکروجلبک‌ها علاوه بر طبقه‌بندی به عنوان غذا، با کاربردهای متفاوتی مانند مکمل غذایی، رنگدانه، غذای آبزیان، تثبیت کننده ازت و کود بیولوژیک نیز تولید شده‌اند [۱۲, ۳۶].

در مورد کاربرد وسیع میکروجلبک‌ها مقالات و نوشته‌های فراوانی وجود دارد. میکروجلبک‌ها در سطح وسیعی چون غذاهای سالم، افزودنی‌های غذایی، رنگدانه‌ها، همچنین استفاده در رژیم غذایی پرورش آبزیان، به عنوان عامل تنظیم کننده رشد و در تصفیه فاضلاب‌ها کاربرد دارند، از مهم‌ترین کاربردهای جلبک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- تولید ترکیبات زیست فعال

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

ترکیبات زیستی فعال دریایی ترکیبات آلی تولید شده توسط میکروب‌ها، اسفنج‌ها، جلبک‌ها و دیگر موجودات دریایی هستند. امروزه این ترکیبات با ارزش در تولید محصولات دارویی و شیمیایی نوین کاربرد دارند. میکروارگانیسم‌های دریایی با سایر موجودات همانند اسفنج‌ها، کوزه داران و گیاهان دریایی راتباط نزدیک و هم زیستی دارند. ریزجلبک دریایی منابع نسبتا ناشناخته اما غنی برای ترکیبات فعال زیستی هستند. تا به امروز مطالعات مختلفی بر روی میکروجلبک‌ها انجام گرفته است که نشان می‌دهد ۲۵ درصد از آن‌ها یک یا چندین ترکیب مختلف از مواد زیست فعال را تولید می‌کنند. از انواع مواد زیست فعال که توسط ر یز جلبک‌ها سنتز می‌شوند می‌توان ترکیبات زیر را نام برد:

الف) رنگدانه‌ها (کاراتنوئیدها)

از مهم‌ترین رنگدانه‌هایی که توسط جلبک‌ها تولید می‌شوند می‌توان به موارد اشاره کرد:

۱- آستاگزانتین
۲- کانتاگزانتین
۳- لوتئین
٤- ویلوگزانتین

کاروتنوئیدها رنگ دانه‌های محلول در چربی هستند که بطور عمده در گیاهان، جلبک‌ها، باکتری‌های فتوسنتز کننده یافت می‌شوند. همچنین در تعدادی از باکتری‌های غیر فتوسنتز کننده، مخمر و قارچها ممکن است در برابر تخریب فوری و اکسیژن یک عملکرد حفاظتی داشته باشند. همان طوری که انتظار می‌رود جانوران قادر به سنتز کاروتنوئیدها نیستند، و کاروتنوئیدها را از طریق رژیم غذایی خود دریافت می‌کنند. در جانوران کاروتنوئیدها در آماده‌سازی و رنگ پذیری درخشان، تهیه آنتی اکسیدان‌ها و همینطور می‌توانند یک منبع غنی از ویتأمین A باشند.

کاروتنوئیدها مسئول تغییر رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز دربرگ‌ها، گیاهان، میوه‌ها، گل‌ها و رنگ‌های پرهای زینتی بسیاری از پرندگان، حشرات، رنگ صورتی در فلامینگو و ماهی قزل آلا و سخت پوستانی نظیر خرچنگ دریایی می‌باشند. کاروتنوئیدها پیچیده‌ترین طبقه از رنگ‌های مواد غذایی طبیعی با حدود ۷۵۰ ساختار متفاوت در طبیعت هستند و کاروتنوئیدهای مشتق شده از یک زنجیره ۴۰ کربنه پلی‌ئن شناخته شده‌اند. این زنجیره ممکن است با یک حلقه پایان یافته و با گروه‌های واکنشگر با اکسیژن تکمیل شده باشند.

کاروتنوئیدها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- کاروتن‌ها با فرمول شیمیایی C40H56 که فقط ماهیت هیدرو کربنی دارند.
۲- گزانتوفیل‌ها با فرمول شیمیایی C40H56O2 که مشتقات اکسیژنه شده این هیدروکربن‌ها هستند.

کاروتن‌ها رنگدانه رنگ زرد و از انواع کاروتنوئیدها هستند که بصورت محلول در چربی یا به اشکال ویژه در آب پراکنده شده و یا به صورت مصنوعی که مشابه نوع طبیعی در تجارت کاربرد دارد ، وجود دارند. انواع کاروتن‌ها شامل آلفا کاروتن ، بتا کاروتن ، گاما کاروتن ، فیتوئن ، فیتوفلوئن می‌باشد . براساس قوانین اتحادیه اروپا ، کاروتن گیاهی ممکن است ازگیاهان خوراکی مثل هویج ، یونجه، ذرت همچنین دیگر محصولات طبیعی مثل عصاره جلبک دونالی(Dunaliella) نیز یافت شود، همانطوریکه درقبل نیز گفته شد بتاکاروتن یکی از مهمترین کاروتنوئیدهای پیش ساز ویتأمین A است. کاروتن‌ها طیف وسیعی از رنگهای زرد تا پرتقالی را ایجاد می‌کنند. ازکاروتنها علاوه بر

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

اینکه بعنوان رنگ استفاده می‌شود برای اهداف تغذیه‌ای و مکمل‌های غذایی بعنوان پیش ویتأمین (Provitamin) مثل مارگارین و کره کاربرد دارد . دردیگر فرآورده‌های غذایی مثل روغن‌ها، پنیر، نوشلبه‌های غیرالکلی، بستنی، ماست، دسرها، فرآورده‌های شکر و آردی قنادی، ژله‌ها و سس‌ها و فرآورده‌های گوشتی نیز بکار می‌رود. یکی از کاروتنوئیدها که کاربردهای منحصر به فردی دارد بتاکاروتن است. بتا کاروتن یکی ازمعروف ترین کاروتنوئیدهایی است که به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است و دارای خاصیت آنتی اکسیدانی است [۳۷].

بتاکاروتن طبیعی محلول در چربی است که این قابلیت آنرا نسبت به بتاکاروتن مصنوعی تبدیل به عامل موثر ضد سرطان و بیماری قلبی و عامل کنترل کننده کلسترول می‌کند. تولید بتاکاروتن به علت کاربرد فراوان که در صنایع دارویی به عنوان پیش ساز ویتامین A، صنایع آرایشی و بهداشتی دارد برای بشر امروز بسیار ضروری به نظر می‌رسد. یک مولکول بتاکاروتن می‌تواند بیش از هزار مولکول رادیکال آزاد را خنثی سازد [۸]. بتاکاروتن طبیعی تولید شده نسبت به بتا کاروتن مصنوعی دارای تقاضای جهانی بیشتر و قیمت بسیار بالاتری است. انتظار می‌رود میزان درخواست جهانی بتاکاروتن به ۲۵۳ میلیون دلار در سال ۲۰۰۹ برسد [۳۷]. جدول زیر شرح واردات بتا کاروتن را نشان می‌دهد.

جدول (۵–۵) شرح واردات بتا کاروتن

شرح (واردات) بتا کاروتن		
سال	وزن (کیلو گرم)	ارزش دلاری
1384	692299	9545461
1385	444235	7085628
1386	392945	8752823
1387	160886	4487551
1388	283900	9833959
1389	307327	9165240

یکی از موجوداتی که دارای قابلیت و پتانسیل بالا برای تولید بتاکاروتن است، جلبک متحمل و سبز دونالیلا است. این جلبک دارای چندین ویژگی جالب است که عبارتند از تولید بتاکاروتن، گلیسرول و تحمل بسیار بالای آن نسبت به میزان بالای نمک است. دونالیلا که حدود صد سال از شناخت آن می‌گذرد موضوع مطالعات فراوان بیوشیمی، فیزیولوژیکی و کاربردهای تجاری بوده است [۳۸]. اولین بار ماسیوک (۱۹۶۶) به اهمیت جلبک دونالیلا سالینا به عنوان منبع اقتصادی استخراج بتاکاروتن اشاره کرد. اما تولید تجاری اولیه بتاکاروتن به صورت مصنوعی بود. به نظر می‌رسد عمده‌ترین علت اهمیت دونالیلا تولید بتاکاروتن در آن است.

ب) اسیدهای چرب

از اسیدهای چرب عمده‌ای که توسط جلبک‌ها سنتز می‌شوند عبارتند از:

۱- EPA کانتاگزانتین

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۲- اسیدهای چرب دی هیدروکسی اسید (DHA) و ویلوگزانتین
۳- لینولئیک
٤- پالمیتیک اسید
٥- پالمیتولئیک اسید

در مورد اسیدهای چرب مربوط به ریزجلبک‌ها می‌توان چنین عنوان کرد که منجر به کاهش مشکلات قلبی شده و همچنین فعالیت ضد سرطانی و ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند. ترکیب چربی ریز جلبک‌ها برای مقاصد مختلفی مورد بررسی قرار میگیرد، در اقیانوس شناسی به دلیل نقش آنها در ایجاد کشندهای سمی و نشانگر زیستی، در آبزیپروری به دلیل تغذیه آبزیان در مراحل الروی و در نهایت برای تولید سوخت زیستی مورد بررسی قرار می‌گیرند [۳۹].

محتوای هیدروکربنی جلبک‌ها مانند اسیدهای چرب و آسیل گلیسرول‌ها توانایی جایگزین شدن سوخت‌های فسیلی را دارند [۳۹]. ریز جلبک‌ها قادرند با شرایط مختلف محیطی سازگار شوند. بنابراین امکان یافتن شرایط محیطی مناسب‌تر از لحاظ رشد و تولید چربی در گونه‌های مختلف ریز جلبکی بیش‌تر است. درحالی که امکان چنین تغییری در سایر منابع سوخت زیستی مانند سویا، کلزا و آفتابگردان وجود ندارد [۴۰]. تغییر شرایط محیطی علاوه بر تأثیر بر میزان رشد و تولید چربی می‌تواند بر کیفیت لیپید ریز جلبک‌ها نیز اثرگذار باشد [۴۱]. ترکیب چربی جلبک‌ها تا حد زیادی به عوامل ژنتیکی و محیطی بستگی دارد [۴۲]. ریز جلبک‌ها ترکیبی از اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع ۱۲ الی ۲۲ کربنه تولید می‌کنند که برخی از آن‌ها از خانوادهای امگا۳ و امگا۶ می‌باشند [۴۳]. ترکیب اسیدهای چرب ریز جلبک‌ها تأثیر بسیاری بر کیفیت سوخت زیستی تولید شده دارد و تا حد زیادی به نسبت اسیدهای چرب اشباع به غیراشباع بستگی دارد.

ج) پروتئین‌ها

فیکوبیلی پروتئین‌ها از مهم‌ترین اثرات کاربردی پروتئین جلبک‌ها افزایش مقاومت سیستم ایمنی بدن، خاصیت ضد سرطانی، افزایش مقاومت به هپاتیت، ضد التهاب و خاصیت آنتی اکسیدانی می‌باشد. اسپیرولینا حاوی حدود ۷۰ درصد پروتئین است و به همین دلیل جلوی احساس گرسنگی را می‌گیرد. در واقع مانند یک ضداشتها عمل می‌کند. پروتئین‌ها باعث افزایش سرعت ارسال احساس سیری به مغز می‌شوند و همین امر هم به کنترل وزن کمک می‌کند [۴۳].

د) پلی‌ساکاریدها

پلی‌ساکاریدهای سولفاته و فیبرهای غیرمحلول در آب: ضد ویروس، ضد تومور، ضد افزایش کلسترول خون، کاهش دهنده LDL و کلسترول کل [۴۵].

ه) ویتأمین‌ها (توکوفرول‌ها)

مهم‌ترین ویتأمین تولیدی جلبک‌ها ویتأمین E می‌باشد که منجر به خاصیت آنتی اکسیدانی می‌شود. جلبکها از نظر ترکیب دارای مقادیر قابل ملاحظه ای انواع کربوهیدراتها، مواد معدنی و انواع ویتامینها و نیز یونهای پتاسیم، ید،

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

سدیم و همچنین اسید آلژنیک و غیره بوده که شامل خواص درمانی چون کاهش کلسترول خون، کاهش فشار خون، جلوگیری از تصلب شرایین، خواص ضد توموری، درمان تیرویید و برطرف نمودن علایم کمبود ویتامینA و غیره می‌باشد [۴۵].

و) فنل‌ها و ترکیبات فرار

این مواد منجر به خاصیت ضد سرطانی شده و هم‌چنین اثرات ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند. ترکیبات فنلی به عنوان دهنده‌ی الکترون عمل می‌کنند و ممکن است واکنش‌های ناخواسته‌ی ایجاد شده با رادیکال‌های آزاد در بدن را خنثی کند [۴۶]. ترکیبات فنلی در (جلبک‌های دریایی) در همبستگی با فعالیت آنتی اکسیدانی و وابسته به حلال و همچنین گونه‌ی جلبکی هستند که برای عصاره گیری استفاده می‌شوند. ما می‌توانیم به راحتی ترکیبات فنلی را با آب استخراج کنیم و با استفاده از آن‌ها تاثیرات آنتی اکسیدانی بالایی داشته باشیم [۴۷].

امروزه ایالات‌متحده‌ی آمریکا، چین، تایلند، ویتنام، هند، مکزیک و شیلی جزو بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های جلبک هستند. از بزرگ‌ترین کشورهای مصرف‌کننده‌ی آن نیز ژاپن، روسیه، هند و آفریقا به خصوص کشورهای قحطی‌زده را می‌توان نام برد.

استفاده‌های صنعتی جلبک تقریبا ۸ ـ ۷/۵ میلیون تن (وزن تر جلبک استحصالی از دریا یا پرورشی) در سال می‌باشد. برداشت تجاری آن در ۳۵ کشور جهان از نیمکره شمالی تا جنوبی، در آبهای سرد، معتدل تا تروپیکال صورت می‌گیرد. در ایران جلبک‌های دریایی در سواحل جنوبی کشور به ویژه در سواحل سیستان و بلوچستان (چابهار) فراوان یافت می‌شوند که بر اساس تقسیم بندی گیاه شناسان از هر سه گروه جلبک‌های سبز یا کلروفیت، جلبک‌های قهوه‌ای یا فیتوفیت و جلبک‌های قرمز یا رودوفیت در این منطقه وجود دارند. کشور چین یکی از بزرگترین تولید کنندگان جلبک‌های خوراکی در دنیا بوده که سالانه حدود ۵ میلیون تن برداشت می‌کند. در سال ۱۹۹۹، میزان برداشت جلبک‌ها در حدود ۱۰۰۰ تن ماده خشک برآورد شده است [۴۸]. این میزان تولید در سال ۲۰۰۴ با افزایش ۵ برابری به ۵۰۰۰ تن ماده خشک افزایش پیدا کرد. در سال ۲۰۱۱رتولید جلبک افزایش چشمگیری داشت و به ۹۰۰۰ تن ماده خشک در سال رسید. در دهه‌های گذشته ۷۵ درصد از محولات تولیدی جلبک‌ها در مصارف پزشکی و غذایی استفاده شده است.

طبق پیش بینی قاره اروپا از سال ۲۰۲۰ به بعد با رشد ۳۸ درصدی به تولید کننده اصلی زیست‌توده از جلبک‌ها تبدیل خواهد شد [۴۸]. بطور عمده ترکیبات با ارزش همچون EPA، DHA و آستاگزانتین در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ تولید خواهند شد. در حال حاضر در کشور آمریکا ۹۹ درصد از DHA بدست آمده از جلبک‌ها در تهیه غذای کودک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۹]. کشورهایی نظیر ژاپن، تایوان، کره و ... نیز مدت طولانی است که در زمینه برداشت از دریا و پرورش فعالیت دارند و هر ساله میلیونها دلار ارز از تولید و صادرات آن بصورت خام یا بصورت عمل آوری شده، بدست می‌آورند. امروزه نیز جلبک شناسان در کشورهای مختلف، در کنار تحقیقات زیستی خود دربارهٔ جلبک‌ها، به دنبال کشف خواص مفید و روش‌های استفاده اقتصادی از آنها هستند.

جدول (۵-۶) بازار مصرف برخی از ترکیبات استخراج شده از ریزجلبک‌ها [۴۷]

محصول	تولید	برداشت جلبک	ارزش

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

	(بر حسب دلار آمریکا)	(تن/سال)	(تن/سال)
کاراگینان	۳۳۰۰۰	۱۶۸۴۰۰	۲۴۰
آلژینات	۳۰۰۰۰	۱۲۶۵۰۰	۲۱۳
آستاگزانتین	---	۳۰۰	۲۰۰
بتاکاروتن	---	۱۲۰۰	۲۸۵
آگار	۷۶۳۰	۵۵۶۵۰	۱۳۷
Nori (غذا)	۴۰۰۰	(تنها در ژاپن) ۴۰۰۰۰۰	۱۵۰۰

ژاپن اولین کشوری که روش صنعتی کشت و پرورش جلبک را ابداع کرد. تنها در سال ۱۹۹۵ در ژاپن ۲۲۰۰۰۰ تن جلبک بصورت غذای انسان مصرف شده است. استفاده از جلبک‌های دریایی بعنوان غذای جایگزین حاوی کمی پروتئین، تمام اسیدآمینه ضروری، ویتأمین‌ها، مواد معدنی، اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه مانند آراشیدونیک اسید، ایکوساپنتئنویک اسید و دوکوسوهگزائینویک اسید هستند. حدود ۷۰-۶۰ درصد وزن خشک اسپیرولینا پروتئین می‌باشد. امروزه از اسپیرولینا در کلوچه‌ها، نانها، سالاد و سوپ مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کشورهای اروپایی برای بهبود رژیم غذایی قرص‌های اسپیرولینا به صورت روزانه مصرف می‌شود. مصارف انسانی ترکیباتی همچون لامینارین و فوکوایدان‌ها متابولیت‌های ثانویه استخراج شده از جلبک‌ها (مانند ترکیبات هالوژنه)، عصاره‌های برگرفته از برخی جلبک‌های قرمز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، هالوپرواکسیدازها می‌باشند. استفاده از جلبک‌ها برای تغذیه انسان سابقهٔ طولانی دارد و به سال‌های قبل از میلاد می‌رسد. طی قحطی بزرگی که در اواسط قرن نوزدهم در انگلستان بر اثر آلودگی قارچی سیب زمینی رخ داد، یک نوع جلبک قرمز دریایی جایگزین مهمی برای محصولات سیب زمینی شد. امروزه نیز در بسیاری از کشورهای آسیایی و اروپایی، به ویژه در کشورهایی که دارای سواحل طولانی با دریاهای آزاد هستند، به شکل‌های مختلفی از جلبک‌ها به منظور تغذیه استفاده می‌شود. مشتقات اسید آلژنیک همچنین در تهیه سوپ، خامه و سس و دیگر مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به رشد جمعیت و کمبود منابع کشاورزی در خشکی، این روش‌ها می‌تواند به استفادهٔ بهینه از منابع کمک نماید. در بخش‌های مختلف جهان بیش از یکصد نوع جلبک که عمدتاً از جلبک‌های قهوه‌ای و قرمز هستند به عنوان غذا استفاده می‌شوند. تعداد اندکی از جلبک‌های سبز نیز که مواد معدنی، ویتأمین، قند و پروتئین بالایی دارند، به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از جلبک‌های قهوه‌ای جنس‌های لامیناریا، سارگاسوم و آلاریا معروفند. در ژاپن غذاهای خاصی از لامیناریا و آلاریا تهیه می‌شود. در آمریکای جنوبی، نوعی جلبک قهوه‌ای را جمع آوری کرده و پس از خشک کردن و نمک زدن، به تدریج به مصرف تغذیه می‌رسانند. جلبک‌های قهوه‌ای در حدود ۱۵ درصد پروتئین، ۱۷ نوع اسید آمینه، ۱/۵۶ درصد چربی و ۵۷ درصد کربوهیدرات دارند. به علاوه، مقادیر مناسبی از مواد معدنی، کاروتن و برخی مواد دیگر را دارا می‌باشند.

از جلبک‌های قرمز جنس‌های پورفیرا و کوندروس معروفند. پورفیرا از مهم‌ترین جلبک‌های قرمز است که توسط انسان به عنوان غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد .در کشورهای ژاپن، اسکاتلند، انگلستان و آمریکا، با این جلبک‌ها غذاهای محلی خاصی تهیه می‌کنند. در ژاپن سالانه مقادیر زیادی از این جلبک را به طور انبوه پرورش می‌دهند. روش مرسوم در ژاپن اینست که بخش‌هایی از ساحل را در ماه‌های اکتبر تا نوامبر به وسیلهٔ فرو کردن نی‌های بامبو،

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

محصور می‌کنند و سپس با استفاده از تورهای نایلونی یا الیاف گیاهی، بستر کشت جلبک پورفیرا را فراهم می‌سازند. استفاده از پورفیرا در ژاپن قدمتی ۳۰۰ ساله دارد و کشت انبوه آن سالانه درآمد هنگفتی را برای کشور ایجاد می‌نماید. در ژاپن به تنهایی حدود ۳۰ هزار تن پورفیرا در سال مصرف می‌شود. جلبک پورفیرا غنی از ویتأمینهای D ,A ,B ,C و E است و مقدار قابل توجهی پرئتئین دارد.

هر ۱۰۰ گرم پورفیرا به طور میانگین ۱۱/۴ گرم آب، ۳۵/۶ گرم پروتئین، ۰/۷ گرم چربی، ۳/۴۴ گرم کربوهیدرات و ۸ گرم مواد معدنی دارد. جلبک قرمز کوندروس به مقدار زیادی در آمریکا و اروپا به مصرف می‌رسد .از جلبک‌های سبز، جنسهای اولوا و کلرلا معروفند. از اولوا که به خاطر شباهت پهنک آن به برگ گاهوی دریایی شهرت دارد، برای تهیه سالاد و سوپ استفاده می‌شود. یک گونهٔ معروف آن Ulva lactuca است.کلرلا از جلبک‌های تک یاخته‌ای آب‌های شیرین است و به راحتی به صورت انبوه کشت می‌شود. در کشور کوچک تایوان سالانه بیش از ۱۵۰۰ تن پودر جلبک کلرلا تولید می‌گردد. این جلبک در حدود ۳۰ درصد پروتئین، ۱۵ درصد چربی، ۳۰ درصد کربوهیدرات و ۵ درصد مواد معدنی دارد و در شرایط مناسب تا ۵۰ درصد وزن خشک این جلبک را پروتئین و ۸/۵ درصد آن را چربی‌ها تشکیل می‌دهند .پروتئین‌های کلرلا تمام اسیدهای امینه ضروری را دارا هستند، از این رو در مسافرت‌های فضایی به عنوان فضایی به عنوان غذا مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تأمین غذای فضا نوردان در مسافرت‌های طولانی، دانشمندان با استفاده از کلرلا، یک چرخه اکولوژیک طراحی کرده‌اند. میکروجلبک‌ها با همه امتیازات برجسته، ارزنده ترین ماده زیستی روی کره زمین محسوب می‌شوند. آنها پایه و اساس زنجیره غذایی بوده و از قدرت تکثیر بالایی برخوردارند.

از مهم‌ترین محصولاتی که بعنوان مکمل از جلبک‌ها حاصل می‌شوند عبارتند از:

- مکمل‌های پروتئینی
- مکمل‌های ویتأمینی
- مکمل‌های غذای حیوانات خانگی
- غذا و مکمل‌های ویتأمینی ماهیان
- فرمولاسیون غذای کودکان
- رقیق کننده خون

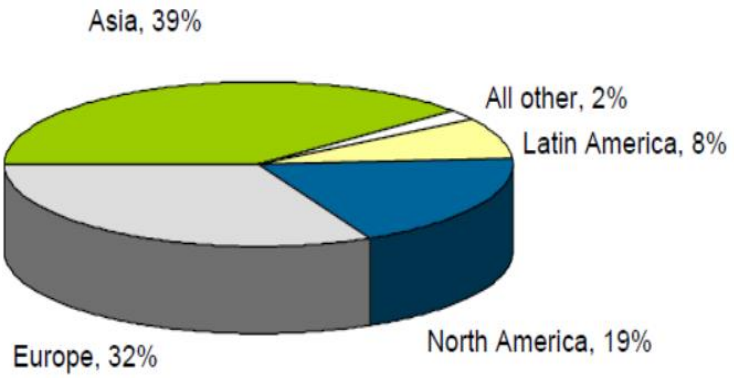
جلبک‌هایی نظیر دونالیلا و اسپرولینا بعنوان منبع سرشار از کارتنوئیدها در صنایع غذایی و رنگ آمیزی زرده تخم مرغ بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۳۴].

جدول (۵-۷) کاربرد ریزجلبک‌ها در صنایع غذای و دارویی

ترکیب شیمیایی	کاربردها	ارزش تقریبی (کیلوگرم/دلار)
فیکوبیلی پروتئین‌ها	درمان‌های پزشکی	>۱۰۰۰۰
آستاگزانتین	مکمل‌های غذایی: انسان و حیوانات- محیطهای کشت آبی	>۲۵۰۰
گزانتوفیل	غذای ماهیان	۱۰۰۰
بتا کاروتن	مکمل غذایی	>۵۰۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

امروزه ترکیبات مشتق شده از موجودات دریایی در تهیه محصولات آرایشی و بهداشتی مورد توجه وافر قرار گرفته‌اند. با توجه به گزارش شرکت فرانسوی Eurostaf، گردش مالی صنعت لوازم آرایشی در حدود ۱۷۰ میلیارد دلار در سال برآورد شده است [۴۹]. از آن جایی که بانوان آسیایی به پوست صاف اهمیت زیادی می‌دهند، محصولات سفید کننده پوست به محصولی پرفروش در این قاره تبدیل شده است. در نمودار زیر میزان مصرف محصولات آرایشی نشان داده شده است.



شکل (۵–۶) میزان مصرف محصولات آرایشی در دنیا

در سال ۲۰۱۲ تقاضای جهانی برای محصولات آرایشی بهداشتی بیش از ۷/۶ میلیارد دلار بود و انتظار می‌رود این میزان در سال ۲۰۱۸ با افزایش ۹/۶ درصدی به ۱۳/۲ میلیارد دلار برسد. ارزش تقریبی محضولات به دست آمده از گونه‌های مختلف و متداول مورد استفاده در بازارهای جهانی و کاربرد آن‌ها در جدول زیر آورده شده است [۵۰].

دول (۵–۸) ارزش تقریبی محصولات تولیدشده از گونه‌های مختلف و متداول مورد استفاده در بازارهای جهانی و کاربرد آن‌ها

نوع جلبک	کاربردها	ارزش تقریبی (کیلوگرم/دلار)
اسپرولینا	لوازم آرایشی و بهداشتی	۴۸
کلرلا	لوازم آرایشی و بهداشتی	۴۸
دونالیلا	دارویی و بهداشتی	۲۸۶
کریپتکودینوم/شیزوکتریوم	روغن‌های DHA	۰/۵۷۰

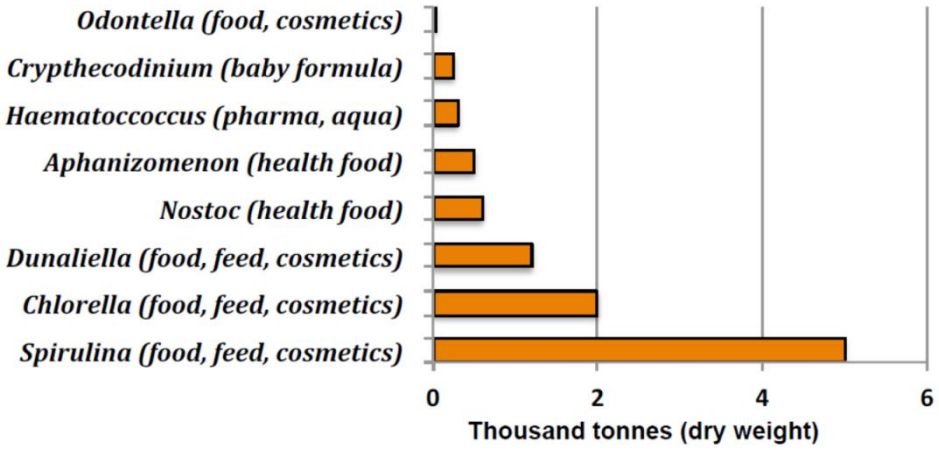
از عمده مزایای استفاده جلبک‌ها در محصولات آرایشی و بهداشتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اسیدهای چرب امگا ۳ منجر به صاف کردن خط و چروک صورت می‌شود.
- جلوگیری از خشکی پوست و مقابله با مشکلاتی همچون اگزما و آکنه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- جلبک منجر به تنظیم تولید سبوم (Sebum) می‌شود (سبوم به عنوان ماده ضروری در حفظ رطوبت پوست و جلوگیری از خشکی پوست بکار می‌رود).
- جلبک‌ها با رادیکال‌های آزاد مقابله کرده و منجر به تولید الاستین و کلاژن می‌شوند که این مواد در لطافت و نرمی پوست ضروری می‌باشند.
- جلبک‌های دریایی سرشار از املاح معدنی و ویتأمین‌های ضروری می‌باشند.

در فرمولاسیون مواد آرایشی و بهداشتی از هیدروکسی اسید بطور بالینی بعنوان مرطوب کننده پوست بمار می‌رود. Chondrus cripus دارای اثرات مرطوب‌کنندگی و درمانی دارد. آستاگزانتین می‌تواند منجر به سرکوپ هیپرپیگمانتاسیون، مهار سنتز ملانین و بهبود وضعیت تمام لایه‌های پوست از طریق هر دو استفاده موضعی و خوراکی شود. لوتئین زمانی که با سایر مواد آنتی اکسیدان همراه شود منجر به حفاظت پوست در مقابل اشعه ماوراء بنفش خورشید شده و بعنوان یک ماده محافظ سیستم ایمنی بدن شناخته می‌شود.
همچنین لوتئین به عنوان رنگ در لوازم آرایشی و بهداشتی کاربرد دارد که از سویه‌های اسپرولینا و رودوفیتا استحصال می‌شود. گزارش سالیانه تولیدات و مصارف گونه‌های برتر جلبک در بازارهای جهانی در زیر آورده شده است [۴۹].



شکل (۵–۷) گزارش سالیانه تولیدات و مصارف گونه‌های برتر جلبک در بازارهای جهانی

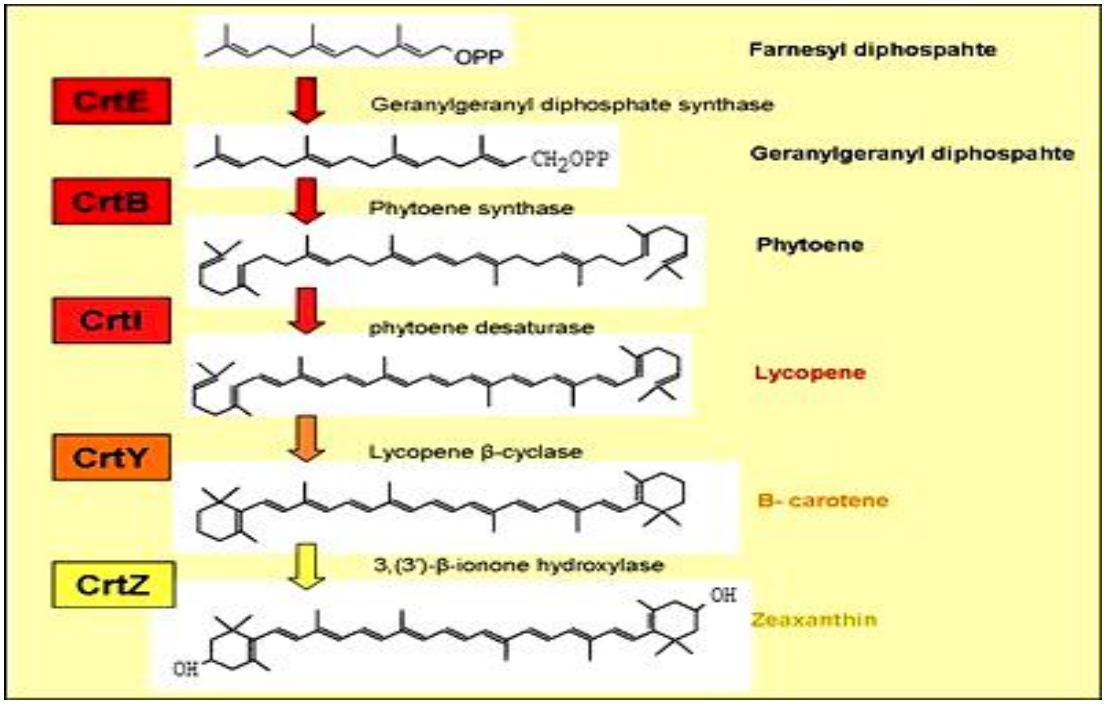
۵-۱۴- تولید بتاکاروتن از جلبک دونالیلا

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

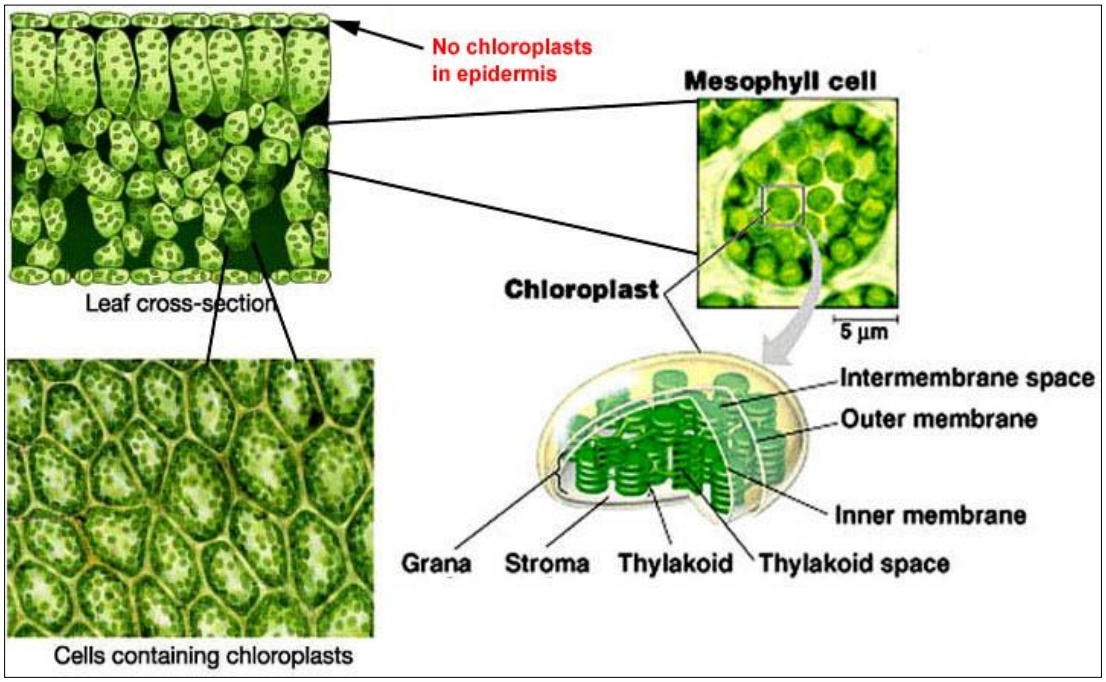
کاروتنوئیدها[1] یکی از بزرگترین و گسترده ترین گروه‌های مشتق شده از پیگمانت‌های[2] طبیعی هستند که بوسیله همه موجودات فتوسنتز کننده[3] و اغلب موجودات غیرفتوسنتز کننده[4] مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها و گیاهان عالی تولید می‌شوند [۵۱]. در جانداران فتوسنتز کننده عموما کاروتنوئیدها خانواده‌ای از رنگیزه‌های زرد و نارنجی را تشکیل می‌دهند که با ساختارهای متنوع و عملکردهای متفاوت وجود دارند. حداقل ۷۰۰ نوع کاروتنوئید از منابع طبیعی پیدا شده است. کاروتنوئیدها در فضای غشای داخلی تیلاکوئید کلروپلاست تجمع می‌یابند. بیشتر کاروتنوئیدها ایزوپرنوئیدهای[5] چهل کربنی هستند که از ۸ واحد ایزوپرنی تشکیل شده‌اند. کاروتنوئیدهای طبیعی شناخته شده عبارتند از: زگزانتین[6]، آستاگزانتین[7]، کانتاگزانتین[8]، بتاکاروتن[9]، آلفاکاروتن[10]، لیکوپن[11] و لوتئین[12]. بتاکاروتن[13] که کاربردهای مختلفی برای انسان دارند. گوناگونی در نحوه در هم آمیختن پیوندهای دوگانه در طول زنجیره عامل تفاوت در مشخصات جذب طیفی و خاصیت فتوشیمیایی در کاروتنوئیدهاست. کاروتنوئیدها نقش مهمی در شرایط فتوسنتز و انتقال اکسیژن به عنوان پیگمانت‌های جانبی بازی می‌کنند و از لندام‌های فتوسنتز کننده بر علیه آسیب‌هایی که توسط فتواکسیدانت‌ها ایجاد می‌شود محافظت می‌کنند. نقش حیاتی کاروتنوئیدها در خاموش کردن اکسیژن یکتایی ($^1O_2$) و رادیکال‌های آزاد[14] که از تخریب متابولیسمی بافت‌ها تولید می‌شوند بسیار با ارزش است. در علوم پزشکی کاروتنوئیدها در پروسه‌ی پیشگیری و کنترل برخی از انواع بیماری‌ها مانند بیماریهای قلبی، آب مروارید[15] و برخی سرطان‌ها نقش بسیار مهمی دارند. کاروتنوئیدها همچنین به عنوان آنتی اکسیدان‌ها و پیش ماده فعال‌کننده تولید ویتامین A، در صنایع داروسازی و غذایی کاربردهای ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۵۲].

[1] Carotenoid
[2] Pigmant
[3] Photosynthesis
[4] Nonphotosynthesis
[5] Isopernoid
[6] Zeaxanthin
[7] Astaxanthin
[8] Canthaxathin
[9] β-Carotene
[10] α-Carotene
[11] Lycopene
[12] Lutein
[13] β-carotene
[14] Free radical
[15] Cataract

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۵-۸) ساختارهای کاروتنوئیدها

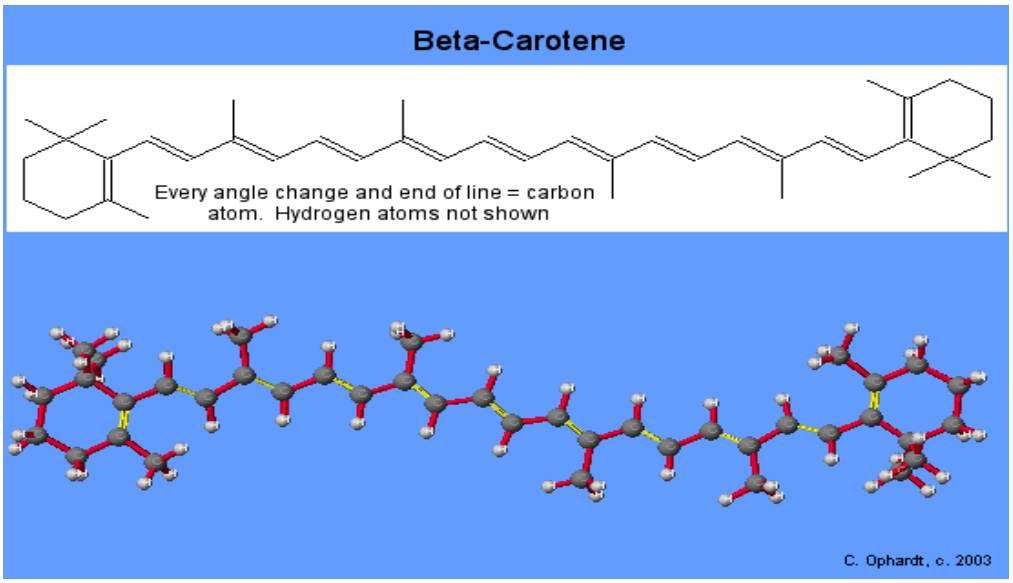


شکل (۵-۹) تجمع بتاکاروتن در فضای غشای داخلی تیلاکوئید

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵-۱۴-۱- بتاکاروتن

یکی از مهمترین اعضـای کاروتنوئیدها، بتاکاروتن اسـت که با سـاختارهای مختلفی که به علت در هم آمیختن هر کدام از پیوندهای دوگانه که در طول زنجیره ایزوپرنوئیدی ایجاد می‌شـود باعث بوجود آمدن همه اسـترواییزومرهای ترانس[1]، ۹-سیس[2]، ۱۳-سیس و ۱۵-سیس به عنوان منابع طبیعی بتاکاروتن می‌شود. استرواییزومرهای بتاکاروتن جنبشـها و فعالیتهای مختلف زیسـتی از خود نشـان می‌دهند [۵۳]. بتاکاروتن طبیعی به دلیل محلول بودن در چربی نسـبت به بتاکاروتن سـنتز شـده به روش شـیمیایی دارای کاربردهای فراوانی اسـت. بتاکاروتن دارای خاصـیت آنتی‌اکسیدانی[3] است. یک مولکول بتاکاروتن بیش از هزار مولکول اکسیژن رادیکال آزاد[4] را خنثی می‌سازد [۵۴].



شکل (۵-۱۰) نمایی از ساختار بتاکاروتن

تولید تجاری اولیه بتاکاروتن، مصـنوعی بود . اما اولین بار ماسـیوک [۵۵] به اهمیت جلبک دونالیلا سـالینا به عنوان منبع اقتصادی استخراج بتاکاروتن طبیعی اشاره کرد. قیمت بتاکاروتن طبیعی استخراج و خالص شده بسیار بالاتر از نوع مصـنوعی آن اسـت (بیش از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار در مقابل ۴۰۰ تا ۸۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم) با این وجود این اختلاف قیمت در آینده با افزایش منابع بتاکاروتن طبیعی و تولید در سطح تجاری کاهش خواهد یافت.

نژادهای دونالیلای رشـد یافته در دریاچه‌های بسـیار شـور، که اغلب از منبع نیتروژن کم و تشـعشـعات نوری بالایی برخوردارند، بدلیل انباشـتگی بالای بتاکاروتن رنگ قرمزی از خود نشـان می‌دهند. بتاکاروتن در دونالیلا در داخل دانه‌های روغنی فضاهای داخل تیلاکوئیدی کلروفیل انباشته می‌شود که شامل استرواییزومرهای ۹- سیس و all-

[1] Steroisomer Trans
[2] 9-cis
[3] anti oxidant
[4] Radical free

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

ترنس است. بتاکاروتن انباشته شده، دونالیلا را بر علیه شدت بالای نوری که در محل طبیعی در معرض آن هستند، با جذب انرژی درطیف آبی محافظت می‌کند.

بعضی از سویه‌های دونالیلا، بویژه دونالیلا سالینا[1] و دونالیلا بارداویل[2] قادر به تجمع میزان بالایی از کاروتنوئیدها در شرایط رشد اختصاصی هستند. این شرایط اختصاصی در متناسب با شرایط رشد بهینه جلبک نمی‌باشد و عبارت از قرار گرفتن جلبک در محیط با نمک بالا، نور شـــدید، اســـترس دمایی و کمبود غذایی (فقدان نیتروژن، ســـولفور و فسفات) است [۵۶].تحت شرایط مناسب، بعضی از سویه‌های دونالیلا می‌توانند تا ۱۳ درصد یا بیشتر وزن خشک خود در درون خود بتاکاروتن انباشته نمایند. بتاکاروتن سنتز شده توسط دونالیلا شامل ۹-سیس و همه استروایزومرهای ترانس است که به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد بتاکاروتن تولیدی است[۵۳] . دونالیلا به علت بهرهء اقتصادی که دارد در کشورهای فلسطین اشغالی، چین، آمریکا، استرالیا و مکزیک از تاریخ ۱۹۸۰ کشت می‌شود [۵۶].

همچنین اهمیت دونالیلا به علت رشدی که در نواحی ویژه گرمسیری دارد و نیز قیمت بالا و عملکردهای بالایی که در کشت‌های باز از خود نشان می‌دهد بسیار در تولید بتاکاروتن مورد توجه است [۵۵]. با این وجود نکته قابل توجه این است که ۸۴/۴ درصد بتاکاروتن مصرفی فراهم می‌شود از طریق سنتز شیمیایی که محصول کاروتن تولیدی بوسیله جلبک تنها در حدود ۸/۵ درصد از کل مصرف کاروتن در سال ۲۰۰۴ تخمین زده می‌شود.



شکل (۵-۱۱) کشت جلبک دونالیلا در سراسر جهان بعنوان منبع تولید بتاکاروتن

۵-۱۵- روش‌های استخراج بتاکاروتن

[1] Dunaliella Salina
[2] Dunaliella bardawil

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

اگرچه سنتز توسط واسط کاروتنوئید میکروجلبک امری دشوار در تولیدات بیوتکنولوژیکی می‌باشد، بخش اعظم هزینه‌ها مربوط به جداسازی‌های پایین‌دستی و همچنین خشک کردن زیست‌توده و تخریب سلول در مراحل استخراج و خالص‌سازی می‌باشد.

یکی از مشکلات عمده در استفاده از بیشتر میکروجلبک‌ها، تخریب دیواره سلولی آن‌ها می‌باشد. این کار توسط روش‌های مختلفی از جمله آسیاب کردن، فراصوت، میکرویو، انجماد، گرمایش و تخریب شیمیایی صورت می‌گیرد. کاروتنوئید موجود در زیست‌توده میکروجلبک معمولا تحت فرآیند استخراج با حلال جداسازی می‌شود. این روش می‌تواند به صورت مستقیم و یا در چند مرحله از جمله خالص‌سازی، هیدرولیز برای آزادسازی کاروتنوئیدها از اسیدهای چرب و در نهایت تبلور مجدد برای خاص‌سازی محصول صورت می‌گیرد.

استخراج با حلال معمولا توسط هگزان گزارش شده است و دارای مزیت‌هایی بدلیل رفتار قلیاییش دارد چراکه تمام لوتئین و زگزانتین به فرم آزاد خود تبدیل می‌شوند، در حالی‌که کربوکسیلیک اسیدها و کلروفیل‌ها در فاز محلول باقی می‌مانند. این روش برای برخی از میکروجلبک‌ها بهینه شده است. استخراج با نسبت حجمی ۱:۱ هگزان و نمونه به بیشترین مقدار رسیده است و تعداد بهینه مراحل استخراج معمولا ۶ مرحله است مه منجر به بازیابی ۹۵ درصد لوتئین شده‌است. حلال‌ها غیرمتداول مانند اتیل لاکتات در مطالعات اخیر برای مواد گیاهی بزرگ استفاده شده است که اصولا قابل استفاده برای میکروجلبک‌ها نیز می‌باشد. پیشرفت‌های زیادی باید در زمینه حذف مرحله خشک کردن جلبک قبل از استخراج صورت گیرد. البته پیشرفت‌هایی در مورد روش‌های قدیمی صورت گرفته است که از زیست‌توده مرطوب استفاده می‌شود، که بر اساس فاز استخراخ با ترکیب هگزان، اتانول، آب و هیدروکسید پتاسیم می‌باشد و بر فاز قلیایی و صابونی شدن لیپیدها و استخراج کاروتنوئیدها تاثیر می‌گذارد.

روش‌های دیگری نیز برای سرعت بخشیدن به استخراج حلال وجود دارد. استفاده از نوع خاصی از کنتاکتور که با به گردش درآوردن حلال فشار بالا از روی لایه‌ای از زیست‌توده جزء این روش‌ها می‌باشد.

استفاده از فرآیندهای پایین‌دستی دوستدار محیط‌زیست با استفاده از روغن‌های گیاهی از جمله‌ی این روش‌ها می‌باشد. در این روش‌ها معمولا حلال نیز به آسانی قابل جداسازی از محیط کشت حاوی ذرات و زیست‌توده می‌باشد.

روش‌های استخراج کلاسیک با استفاده از حلال‌های آلی دارای درجه خلوص کافی برای تولید لوتئین در مقیاس‌های بزرگ و تجاری می‌باشد. با توجه به این‌که استخراج کاروتنوئیدها از میکروجلبک‌ها با استفاده از حلال‌های رایج نیازمند صرف زمان زیاد، انجام مراحل مختلف و مصرف حلال زیاد که معمولا گران و مضر می‌باشند، رسوب دادن انتخابی با استفاده از CO_2 را می‌توان جایگزین مناسبی در نظر گرفت. استخراج توسط حلال فوق بحرانی (SFE) با استفاده از CO_2 توسعه داده‌شده می‌تواند باعث ایجاد روش تخلیص آسان و صرف زمان کمتر برای استخراج شود.

روش میلکینگ در دو مرحله صورت میگیرد. در مرحله اول سلول‌ها تحت شرایط نور پایین رشد داده می‌شوند و پس از رسیدن به رشد مناسب، سلول‌ها تحت شرایط نور شدید قرار می‌گیرند تا تولید بتاکارونتن در آن‌ها افزایش یابد. در مرحله دو فاز آلی به رآکتور اضافه می‌شود و عمل هم‌زدن و استخراج با سیرکولاسیون مداوم حلال در داخل بیورآکتور انجام می‌گیرد. با گذشت زمان لازم، کاروتنوئید موجود در سلول‌ها بدون از بین بین رفتن آن‌ها به فاز حلال آلی منتقل می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵-۱۶- روش‌های کشت جلبک

از دغدغه‌های اصلی در کشت صنعتی میکروجلبک‌ها میتوان از طراحی و ساخت سیستمها و روشهای کشت و شناسایی گونه‌های متعدد که توانایی افزایش راندمان در استفاده از انرژی خورشید و کربن دی اکسید را دارند نام برد. با وجود انجام تحقیقات متعدد در مورد افزایش راندمان، تا کنون بیوراکتوری با سیستم کاملاً بهینه معرفی نشده است که بتواند حداکثر تولید را با حداقل مقدار هزینه نتیجه دهد [۵۶]. تلاش‌ها در جهت ساخت بستری مناسب برای رشد و پرورش جلبک‌ها از حدود ۵۰ سال قبل آغاز گردید و در نهایت منجر به ساخت فتوبیوراکتورها شد و تحقیقات در این زمینه هنوز ادامه دارد.

۵-۱۶-۱- سیستم‌های باز

کشت میکروجلبک در بسترهای متفاوت انجام می‌شود که عمده‌ترین آن که از دیر باز مورد استفاده قرار می‌گیرد، کشت باز دریاچه‌ای می‌باشد. کشت باز دریاچه‌ای یک استخر حاوی میکروارگانیسم‌های زنده با واکنش‌های بیولوژیکی است [۵۷]. نمونه‌ای از کشت باز دریاچه‌ای در شکل ۱-۳۱ نشان داده شده است. جهت طراحی این سیستم ابتدا می‌بایست زمین صاف و مسطح شود. جهت حصول راندمان بهینه پهنای این سیستم می‌بایست از ۲ متر کمتر و عمق محیط کشت می‌بایست از ۱۵ سانتیمتر کمتر و از ۱۰ سانتی متر بیشتر باشد. انتهای حوضچه به شکل بیضی طراحی می‌شود. یک حوضچه باز دریاچه‌ای با طول ۱۰۰ متر و عرض ۲ متر و عمق ۱۵ سانتی‌متر محیط کشتی بالغ بر ۳۰ هزار لیتر را در خود جای می‌دهد. یک دیوار ساده و باریک حوضچه را جهت گردش مناسبتر از وسط نصف می‌کند. باید در نظر داشت که مواد به کار برده شده در ساخت حوضچه در برابر شتشوی مکرر مقاوم باشد. سرعت جریان محیط کشت در این سیستم به طور متوسط ۲۰-۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و جهت تسهیل در سرعت محیط کشت در دو انتهای آن بافل‌هایی طراحی شده تا از ایجاد نقاط کور ممانعت شود. الک‌هایی با مش ۲-۳ سانتی متر در کانال‌ها جهت جدا کردن لاشه حشرات یا اجسام خارجی بزرگتر که در محیط کشت افتاده‌اند بکار می‌رود. نکته مورد توجه در مورد این سیستم آن است که این حوضچه‌ها می‌بایست در جهت شمال– جنوب طراحی شود [۵].

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



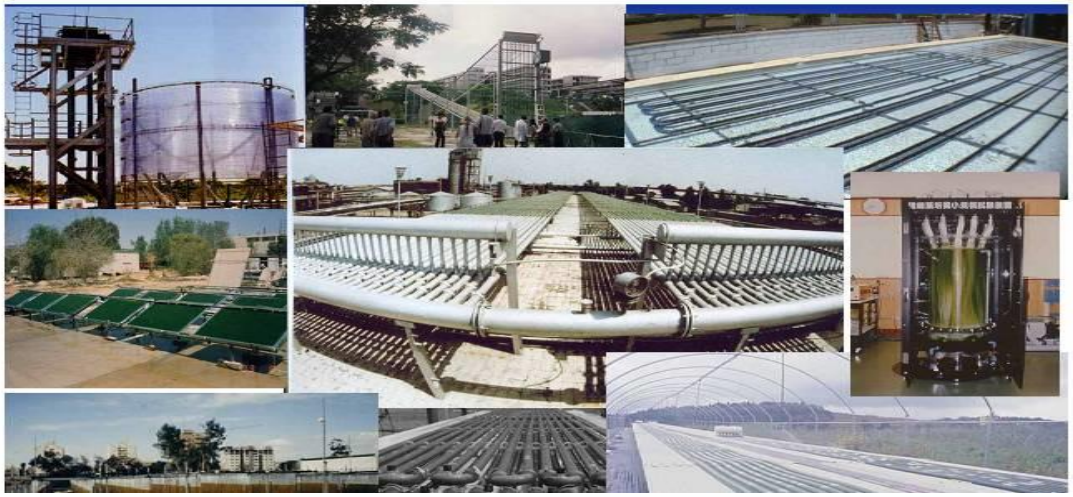
شکل (۵-۱۲) نمونه‌ای از کشت باز دریاچه‌ای

اگر چه تمام تلاش‌ها در حال حاضر جهت تولید و کشت میکروجلبک در سیستم‌های بسته صورت می‌گیرد، اما اغلب سیستم‌های تجاری به صورت کشت باز دریاچه‌ای می‌باشد. علت این امر مسائل اقتصادی و همچنین ارزان بودن این سیستم در مقایسه با سیستم‌های بسته است [۵۷].

۵-۱۶-۲- سیستم‌های بسته

در این نوع سیستم، محیط کشت در یک محیط بسته گردش می‌کند. از این روش عموماً برای کشت میکروجلبک‌های خاص و در جهت تولید مواد شیمیایی گران قیمت و حساس به آلودگی از قبیل آنزیم‌ها، سیتو کروم‌ها، سموم، مواد نشان دار به رادیواکتیو و مواد دارویی استفاده می‌شود. به این منظور انواع بیوراکتورها با لوله‌های شیشه‌ای، پلی‌اتیلن، پی وی سی شفاف و مقاوم به اشعه ماوراء بنفش و فایبرگلاس طراحی کرده‌اند. بیوراکتورها سیستم‌های کنترل شده‌ای هستند که در آن‌ها واکنش‌های بیولوژیک صورت می‌گیرند. طبق تعریف به سیستم‌های کنترل‌شده (بسته) مورد استفاده جهت تولید میکروجلبک‌ها، باکتری‌های فتوسنتز کننده و بافت‌های گیاهی فتوبیوراکتیو گفته می‌شود. درسال‌های اخیر پیشرفت‌های متعددی در طراحی و عملکرد فتوبیوراکتورهای بسته برای کشت میکروجلبک‌ها صورت گرفته است و احتمالا سیستم‌های متعددی در آینده نزدیک به صورت تجاری بکار برده شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۵-۱۳) شمایی از انواع فتوبیوراکتورهای بسته

فتوبیوراکتورها بر اساس شکل (لوله ای و تخت)، شیب آنها نسبت به زمین (افقی، عمودی، زاویه دار و مارپیچی)، نحوه همزنی و جابجایی مواد توسط پمپ یا هوا، تک فازی یا دو فازی بودن و جنس (شیشه ای و پلاستیکی) طبقه‌بندی می‌شوند.

اصول این راکتورها، کاهش ضخامت فتوبیوراکتور و در نتیجه افزایش میزان نورعبوری و در دسترس برای هر سلول استوار است. این راکتورها برای اطمینان از اپتیمم دسترسی سلول‌ها به نور و نیز افزایش تبادل گاز به خوبی بهم زده می‌شوند. از مزایای سیستم‌های بسته، کاهش آلودگی، افزایش راندمان بیومس، عدم افت دی اکسید کربن، شرایط تکرار پذیر کشت، قابلیت کنترل همه پارامترهای مهم بیوتکنولوژی و قابلیت انعطاف تکنیک‌های طراحی می‌باشند. بنابراین این سیستم‌ها می‌توانند تحت شرایط آب وهوایی مختلف عمل کنند. از جمله معایب سیستم‌های کشت بسته، هزینه بالای این سیستم‌هاست. زیرا اکثر سیستم‌های بسته تحت نور مصنوعی قرار می‌گیرند و این امر باعث هزینه بالای انرژی در این سیستم‌ها می‌شود [۵۸, ۵۹].

۵-۱۷- انواع فتوبیوراکتورها

- بیوراکتور لوله‌ای
- بیوراکتور لوله‌ای عمودی
- بیوراکتور لوله‌ای افقی
- بیوراکتور لوله‌ای حلزونی (پیچی شکل)
- بیوراکتور α شکل
- بیوراکتور تخمیری
- بیوراکتور صفحه تخت

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

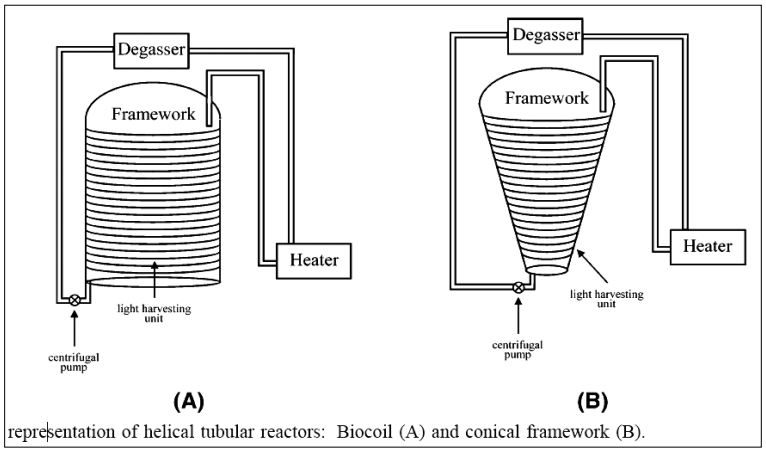
جهت افزایش نسبت سطح به حجم و کاهش کمبود نور تا کنون سه نوع فتوبیوراکتور پیشنهاد شده است:

- Fermenter-type Rectors یا راکتور تخمیری
- Flat plate Reactors یا صفحه تخت
- Tubular reactors یا لوله‌ای

لوله‌ای و صـفحه تخت طراحی ویژه ای جهت بکارگیری حداکثر نور دارند. در نوع لوله‌ای جهت اسـتفاده از حداکثر نور، قطر لوله‌ها به طور متوسط ۳۲ سانتی متر و با طول ۲۵۰ سانتی متر در نظر گرفته می‌شود. این دو نوع (لوله‌ای و صـفحه تخت) بدون شـک بدلیل منبع انرژی رایگان و سـهولت تامین انرژی بیشـتر مورد توجه می‌باشـند. اما دارای معایبی نیز می‌باشند. اگر چه کشت میکروجلبک‌ها در سیستم‌های مطرح شده ساده و رایج است اما این سیستم‌ها بدلیل تکنولوژی اولیه، شکنندگی، عدم انطباق پذیری دارای محدودیت‌هایی هستند. با آنکه ابتدا افزایش مقیاس این سیستم‌ها ساده به نظر می‌رسید اما آزمایشات نشانگر این بودند که با افزایش مقیاس حجم محصول تولیدی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مشکلات اصلی در بعضی از راکتورهای لوله‌ای بلند کنترل دما می‌باشد [۵۷].

۵-۱۷-۱- بیوراکتورهای لوله‌ای

این راکتورها از لایه‌های زیاد و پیچیده‌ای تشـکیل شـده اسـت که اولین بار توسـط آقای رابینسـون پیشـنهاد شـده‌اند. راکتور شامل لوله‌های پلی اتیلن به قطر داخلی ۳ سانتی متر که در یک بدنه مدور پیچیده شده است، می‌باشد [۵۸]. افزایش نسبت سـطح به حجم آن از یک طرف و از طرف دیگر کاهش نیاز به فضـای بزرگ نسـبت به حجم زیاد آن موجب رجحان این بیوراکتور نسبت به بیوراکتورهای پیشین شده است. اما این بیوراکتور نیز دارای معایبی در سیستم کنترل دما است. همچنین با افزایش رشد مقدار نور دریافتی توسط میکروجلبک به شدت کاهش می‌یابد [۶۱].



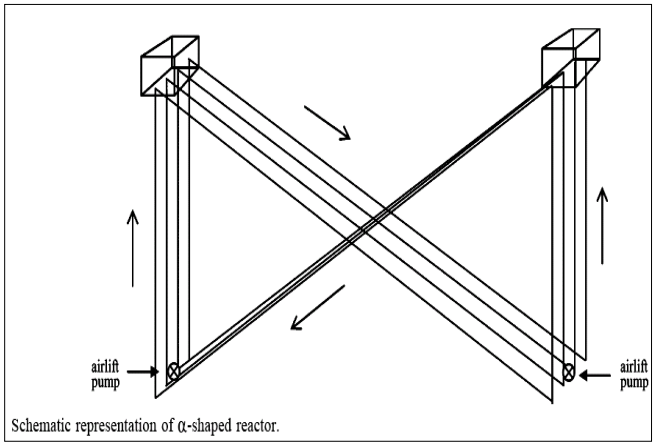
representation of helical tubular reactors: Biocoil (A) and conical framework (B).

شکل (۵-۱۴) بیوراکتور لوله‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۵-۱۷-۲- بیوراکتور به شکل آلفا

در این بیوراکتور که نمایی از آن در ۱-۳۴ آمده است جهت به حرکت درآوردن و هم‌زدن محیط کشت از پمپ airlift استفاده می‌گردد. قطر لوله‌های پی وی سی در این راکتور ۲/۵ سانتی متر با طول ۲۵ متر در نظر گرفته می‌شود. این راکتور دارای مزیت‌های فراوانی است که از آن جمله می‌توان به صعود و نزول مایع در زاویه ۴۵ درجه اشاره کرد که در این حالت نور به مقدار کافی به آن برخورد می‌کند. در این سیستم سرعت بالای جریان موجب کاهش در استفاده از نیروی هوا جهت بالا بردن مایع می‌گردد [۶۲].

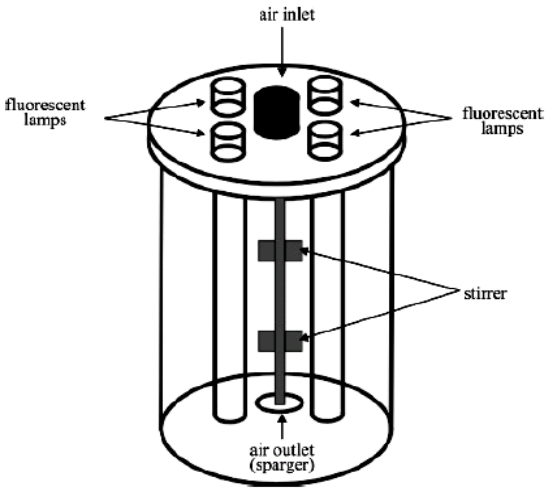


شکل (۵-۱۵) بیوراکتور به شکل آلفا

۵-۱۷-۳- بیوراکتورهایی به شکل فرمانتور

در این نوع از بیوراکتورها (شکل ۱-۳۵) که با حجم متوسط ۲۵۰ لیتر برای کشت میکروجلبک مورد استفاده قرار می‌گیرند، به علت پایین بودن نسبت سطح به حجم و همچنین پایین بودن کارائی نور راندمان تولید پایین است. برای غالب شدن به این مشکل اصلی، یک سیستم مصنوعی جهت تامین نور در داخل آن تعبیه شده است که سیستم را قادر به توزیع یکنواخت نور می‌سازد [۶۳].

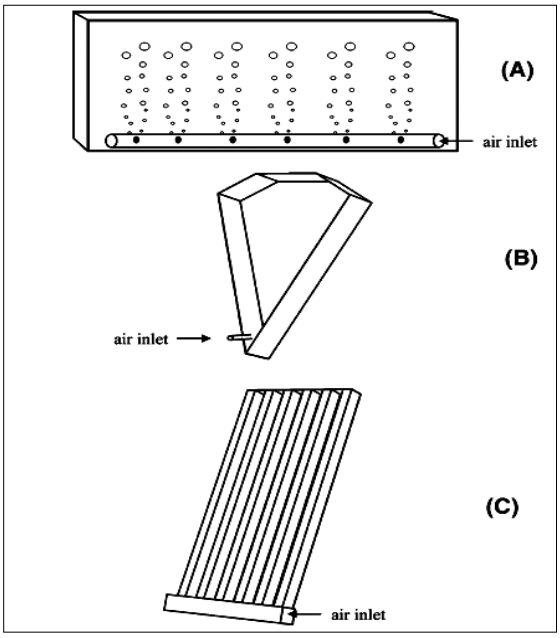
DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۵-۱۶) راکتور به شکل فرمانتور

۵-۱۷-٤- بیوراکتور صفحه تخت

این بیوراکتور به تصور استفاده از حداکثر نور خورشید در ابعاد ۲ متر در ۱ متر در ۱۰ سانتی متر و به طور متوسط حجم ۲۰۰ لیتر طراحی شده است. بنابراین صفحه‌هایی با عمق کم و نسبت سطح به حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. محیط کشت در یک سرعت آرام در بین صفحات به جریان در می‌آید. اما با گذشت زمان و افزایش رشد نیز کاهش در میزان نوردهی مشاهده می‌گردد که باید صفحات باریک طراحی شود که این خود نیز عیب به شمار می‌رود چون نیازمند فضای بیشتر جهت تولید است [۶۴]. شکل زیر نمایی از بیوراکتور صفحه تخت را نشان می‌دهد.



DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۵-۱۷) بیوراکتور صفحه صاف

۵-۱۷-٤-۱- مزیت استفاده از فتوبیوراکتورهای تخت

فتوبیوراکتورهای صفحه تخت معمولاً از یک محفظه مستطیل شکل با عمق ۱-۱۰ سانتی متر و ارتفاع و عرضی که عملاً بیش از ۱ متر نمی‌باشد تشکیل می‌شود [۱و۲]. طول و ارتفاع واقعی فتوبیوراکتورهای صفحه تخت بر اساس اختلاط محیط داخل آن تعیین می‌شود. ابعاد این سیستم‌ها طوری باید طراحی شود که الگوی اختلاط مناسبی در بیوراکتور برقرار شود تا مواد مغذی و خود ریز جلبک‌ها توزیع متوازنی داشته باشند [۱]. این گونه فتوبیوراکتورها بر مبنای نسبت بالای سطح به حجم (S/V) که منجر به افزایش راندمان فتوسنتز خواهد شد طراحی می‌شوند [۲]. مزیت استفاده از فتوبیوراکتورها تخت در مقایسه با سیستم‌های باز و سایر فتوبیوراکتورهای بسته فضای کمتر و هزینه برداشت پایین می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش عمده جهت افزایش کارایی فتوسنتتیک ریزجلبک‌ها تحت نور بالا (شرایط عادی در یک روز آفتابی) انجام شده است. استراتژی مهم جهت اینکار افزایش میزان نور در سطح راکتور می‌باشد که این امر با انباشته سازی واحدهای فتوبیوراکتور بصورت عمودی (فتوبیوراکتورهای صفحه تخت) امکانپذیر خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۶- فصل ششم : طراحی و ساخت فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

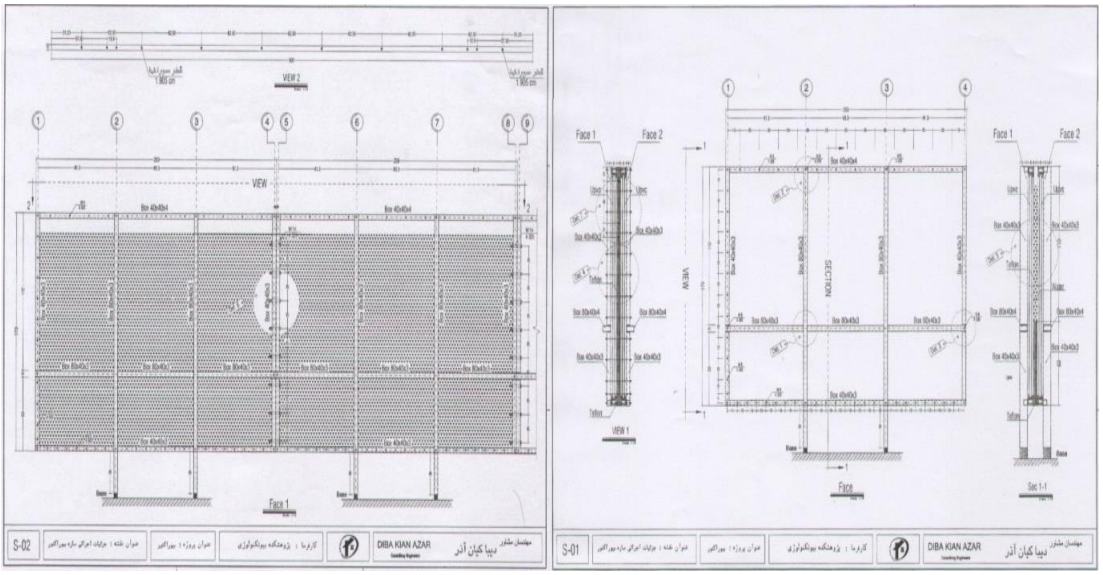
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

٦-١- مقدمه

در این فصل، طراحی، ساخت و پارامترهای مؤثر بر عملکرد فتوبیوراکتورها از جمله زمان اختلاط و انباشتگی گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

٦-٢- طراحی

ظرفیت بالای فتوبیوراکتور تخت (طول و ارتفاع بالا) باعث افزایش مضاعف فشار استاتیکی در قسمت‌های پایینی و جداره سیستم خواهد شد. بنابرین برای ساخت این سیستم محاسبات سازه‌ای جهت تعیین مصالح مورد نیاز با مقاومت مطلوب لازم بود که این کار به صورت کاملاً دقیق به انجام رسید. شکل زیر جزئیات اجرایی سازه فتوبیوراکتور را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۱) جزئیات سازه‌ای فتو بیوراکتور

٦-٣- مصالح و ساخت

فتوبیوراکتور ساخته شده در این پروژه فتوبیوراکتور صفحه تخت مسطح با ابعاد ۱/۷ × ۳ متر می‌باشد. نوع مصالح استفاده شده در این فتوبیوراکتور به گونه‌ای است مقاوم بالایی در مقابل مواد خورنده دارند. فتوبیوراکتورهای عمودی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

موجود در دنیا در حال حاضر تا ارتفاع ۱ متر استفاده می‌شوند [۱, ۲]. که در این پروژه ارتفاع فتوبیوراکتور عمودی ۱/۷ متر با ارتفاع کاری ۱/۵ متر انتخاب شد تا راندمان تولید در واحد سطح افزایش یابد. همچنین جهت افزایش عمر دستگاه و نیز راحتی در تمیزکاری آن و تعویض قطعات، فتوبیوراکتور به نحوی طراحی گردید که بخش‌های مختلف آن بدون آسیب رساندن به بخش‌های دیگر قابل تعویض و تمیز کردن باشد. سیستم کنترلی پیشرفته این فتوبیوراکتور با امکانات لازم برای کنترل کردن دما، pH، کنترل کف، کنترل ارتفاع مایع و تنظیم دوره‌های روشنایی- تاریکی طراحی شد.

٦-٤- زمان اختلاط (mixing time)

زمان اختلاط به صورت زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۹۵ درصد اختلاط کامل تعریف می‌شود. برای اندازه‌گیری زمان اختلاط از روش ردیابی pH استفاده شد [۶۵]. زمان اختلاط در این روش با انحراف ۵ درصد انحراف از همگنی کامل ثبت شد.

٦-٥- انباشتگی گاز (gas holdup)

انباشتگی گاز بر حسب انبساط حجمی به صورت رابطه زیر محاسبه شد. در این رابطه H_L و H_G به ترتیب ارتفاع مایع قبل و بعد از هوادهی می‌باشد [۶۶].

$$\varepsilon = \frac{H_G - H_L}{H_G} \qquad (۶-۱۸)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۷- فصل هفتم : تست عملکرد فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۷-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج تست عملکردی فتوبیوراکتورها شامل تست راندمان تولید در واحد سطح و جذب دی اکسید کربن، تست دریافت نور، تست مقاومت سازه، تست خوردگی و دوام مصالح، تست الگو و زمان اختلاط و تست انباشتگی گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷-۲- نتایج تست عملکرد فتوبیوراکتورهای تولید جلبک

شکل زیر نمایی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی ساخته شده را در این پروژه نشان می‌دهد. خصوصیات مختلف این فتوبیوراکتور به شرح زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.





شکل (۷-۱) نمایی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی

۷-۲-۱- راندمان تولید در واحد سطح و جذب دی اکسید کربن

فتوبیوراکتور ساخته شده در این پروژه دارای ارتفاع و طول بیشتر نسبت به گونه‌های مشابه خود می‌باشد. با افزایش ابعاد فتوبیوراکتور از یک سو حجم محیط کشت در واحد سطح افزایش می‌یابد و از سوی دیگر فرصت بیشتری جهت

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

تبادل گاز و انتقال جرم بین محیط کشت و گاز ورودی ایجاد شود [۶۷]. همچنین ارتفاع بالای فتوبیوراکتورمنجر به افزایش میزان انتقال جرم بین فازی (gas-liquid mass transfer) و افزایش نرخ جذب گاز کربن دی اکسید (CO_2 capturing) خواهد شد [۶۸]. در حقیقت با افزایش ارتفاع فتوبیوراکتور زمان ملند گاز ورودی (هوا – کربن دی اکسید) به سیستم بیشتر شده و در نهایت میزان حذف کربن دی اکسید به طور چشم گیری افزایش می‌یابد.

۷-۲-۲- دریافت نور

با در نظر گرفتن ابعاد فتوبیوراکتور ومقایسه آن با موارد مشابه نسبت (S/V) در فتوبیوراکتور ساخته شده علی رغم افزایش ارتفاع نه تنها کاهش نیافته بلکه به مقدار بسیار جزئی بهبود یافته است [۲]. این مسئله بیانگر آنست که به افزایش تولید در واحد سطح امیدوار بود.

۷-۲-۳- مقاومت سازه

با افزایش ارتفاع و حجم محیط کشت در راکتور، فشار استاتیکی وارد شده به کف و سطوح جانبی فتوبیوراکتور افزایش می‌یابد که در صورت عدم انجام محاسبات مهندسی سازه، فتوبیوراکتور دچار تغییر فرم شده و شکستن قطعات فتوبیوراکتور اتفاق می‌افتد. به این منظور محاسبات فنی لازم برای برآورد میزان مقاومت مصالح در مقابل خمش و کرنش مصالح به کار رفته انجام گردید.

۷-۲-٤- خوردگی و دوام مصالح بکار رفته

کیفیت آب در فتوبیوراکتورها به گونه‌ای است که موجب خوردگی مصالح در تماس با آن می‌شود. بنابراین بنابر تجربیات پیشین جنس مواد بکار رفته در قسمت‌های داخلی (قسمت‌هایی که در تماس مداوم با محیط کشت قرار دارند) طوری انتخاب شد که دارای خصوصیات مطلوب از نظر مقاومت به خوردگی و دوام باشند.

۷-۲-۵- کاهش هزینه‌های استهلاک

افزایش طول عمر فتوبیوراکتور باعث کاهش هزینه‌های استهلاک شده و هزینه‌های کلی را کاهش می‌دهد. این امر به دو طریق انتخاب مصالح با دوام و نیز طراحی مناسب به نحوی که قطعات به راحتی قابل تعویض باشند می‌تواند اتفاق بیفتد که هر دو مسئله مورد توجه قرار گرفت. فتوبیوراکتور ساخته شده در این طرح به گونه‌ای طراحی شد که

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

در صورت بروز مشکلاتی ازقبیل شکستگی و تغییر شکل هر یک از قطعات می‌توان بدون آسیب رساندن به قسمت‌های دیگر قطعه مورد نظر را به راحتی جدا کرده وتعمیر یا تعویض کرد.

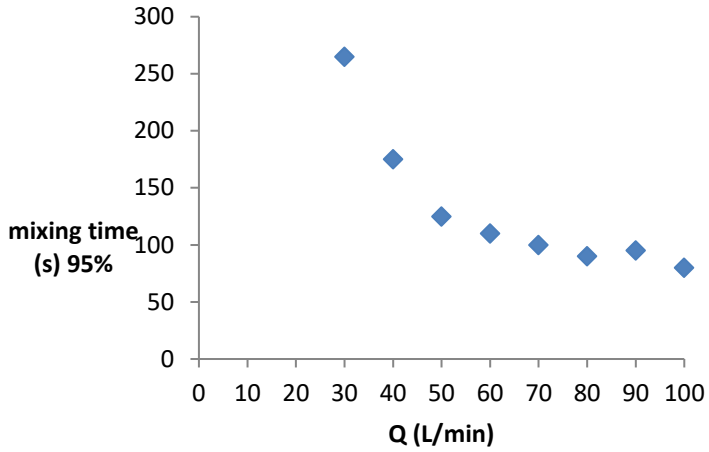
۷-۲-٦- الگوی اختلاط

اختلاط مناسب نقش مهمی را در افزایش بازده فتوبیوبیوراکتورها دارد [۶۹]. برای انجام اختلاط در فتوبیوراکتورهای صفحه مسطح از سیستم‌های هوادهی استفاده می‌شود. برای بهینه سازی شرایط عملیاتی باید هوا دهی به گونه‌ای باشد که زمان اختلاط به کمترین میزان خود برسد. زمان اختلاط نشان دهنده زمان مورد نیاز برای همگن سازی بیش از ۹۵٪ از محیط در طی یک چرخه از گردش مواد در داخل راکتور می‌باشد [۷۰]. سیستم‌های هوادهی در فتوبیوراکتورهای عمودی معمولاً از قسمت تحتانی این سیستم‌ها انجام می‌شود. مشکل عمده این سیستم‌ها توزیع نامتوازن هوا در قسمت‌های مختلف آن و رسوب مواد بر روی سوراخ‌های هوادهی و گرفتی آن‌هاست. برای رفع این مشکل در این پروژه از لوله‌های عمودی استفاده شده است که باعث توزیع یکنواخت هوا در کلیه قسمت‌های فتوبیوراکتور میشود. در صورت گرفتی هر یک از این لوله‌ها، بدون نیاز به متوقف کردن فرایند، لوله گرفته شده به راحتی از سیستم جدا شده و بعد از رفع عیب مجدداً در سیستم نصب می‌شود.

۷-۲-۷- زمان اختلاط

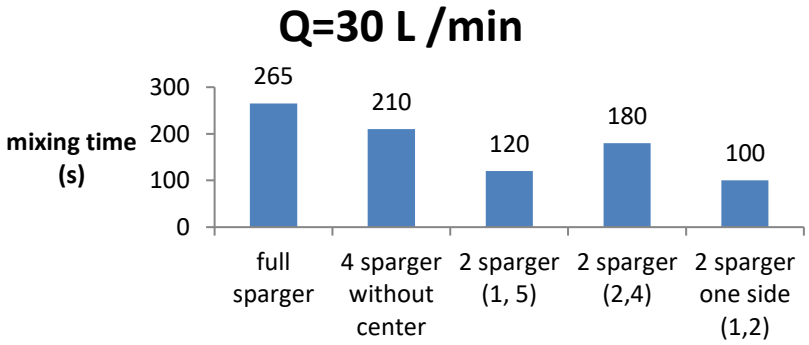
اختلاط یکی از مهمترین پارامترهای رشد می‌باشد که منجر به توزیع یکنواخت میکروجلبک در محیط کشت شده و گرادیان نور، غلظت مواد غذایی و درجه حرارت را حذف می‌کند. زمان اختلاط به صورت زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۹۵ درصد اختلاط کامل تعریف می‌شود [۷۱]. زمان اختلاط طولانی و مصرف انرژی زیاد از مشکلات عمده در طراحی فتوبیوراکتورها می‌باشند. زمان اختلاط در بیوراکتور ساخته شده در این طرح در شدت‌های مختلف هوا دهی با نصب یکنواخت اسپارژرها عمودی محاسبه شد. همان طور که از شکل ۳-۲ مشخص است با افزایش شدت هوا دهی زمان اختلاط کاهش پیدا می‌کند. تحت این شرایط در شدت هوا دهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه زمان اختلاط ۸۰ ثانیه محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای زمان اختلاط در این بیوراکتور با استفاده از اسپارژرهای عمودی همخوانی بالایی با موارد مشابه موجود در مراجع دارد. Mariana زمان اختلاط ۳۳.۹ ثانیه را برای بیوراکتور ستون حبابی ۵۰ لیتری و با شدت هوادهی ۲۲.۹ لیتر بر دقیقه به دست آورد [۶۵]. در تحقیق دیگری زمان اختلاط ۵۰ تا ۱۲۰ ثانیه برای شدت‌های هوادهی مختلف در بیوراکتور ستون حبابی ۶۰ لیتری بدست آمد [۷۲]. در مطالعه دیگری که علی پیروزی و همکاران بر روی بیوراکتور ایرلیفت با حجم ۶۳ لیتری انجام دادند مقادیر ۶۰ تا ۸۰ ثانیه را برای زمان اختلاط در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز بدست آوردند [۷۲]. در راکتور صفحه تخت مشابه با حجم کاری ۲۵۰ لیتر مقادیر ۱۰۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای زمان اختلاط در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز گزارش شده است [۷۳]. با توجه به مقادیر گزارش شده در مراجع بیوراکتور طراحی شده با اسپارژرهای عمودی با توجه به حجم کاری بالا زمان اختلاط مناسبی نسبت به موارد مشابه دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

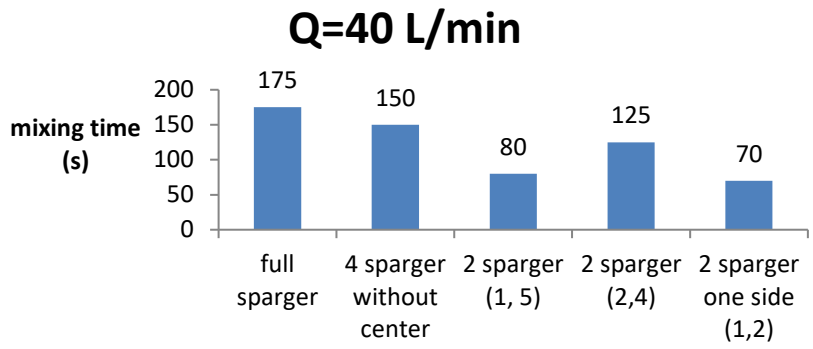


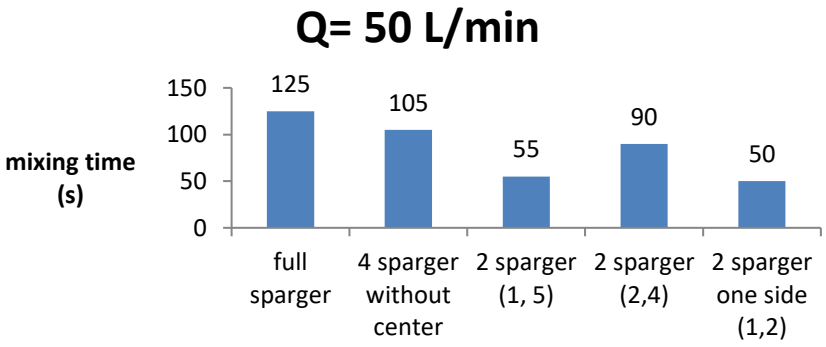
شکل (۷-۲) تغییرات زمان اختلاط بر حسب شدت هوادهی

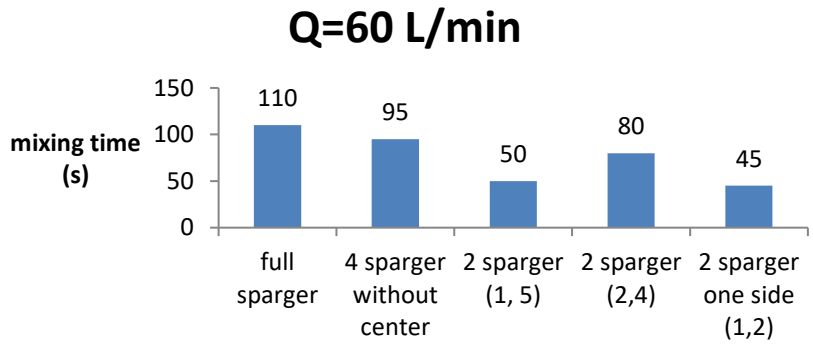
برای بهینه سازی و کاهش زمان اختلاط چیدمان متفاوتی از اسپارژرها در شدت‌های هوادهی ثابت به کار گرفته شد. همان طور که از شکل (۳-۳) نمایان است تفاوت چشمگیری در زمان اختلاط در چیدمان‌های مختلف اسپارژرها به چشم می‌خورد. با توجه به شکل (۳-۳) بهترین زمان اختلاط در شدت هوا دهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه (۳۵ ثانیه) با تعبیه ۲ اسپارژر در یک جهت بیوراکتور بدست آمد. الیته با محدود کردن تعداد اسپارژرها در شدت هوا دهی ثابت میزان سرعت گاز ورودی از سوراخ‌های اسپارژرها افزایش یافته و در نتیجه با افزایش میزان تنش برشی موجب آسیب رسانی به سلول‌ها خواهد شد. عمل تنش در فتوبیوراکتورهای اسپارژردار همانند فتوبیوراکتورهای ستون حبابی (bubble columns) و صفحه تخت به دلیل انتقال جرم و نور، اختلاط و انتقال حرارت ضروری می‌باشد که در مقیاس بالا اهمیت آن افزایش می‌یابد. اگرچه اعمال تنش بیش از حد منجر به رشد ناقص سلول، آسیب سلولی و در نهایت مرگ سلولی می‌شود.

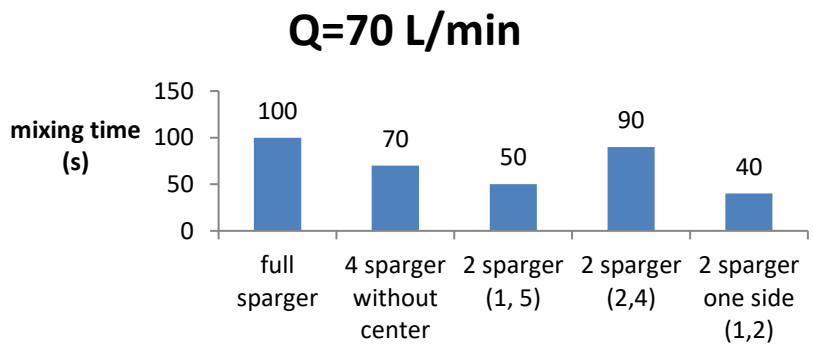


DOI: 10.30503/nripress.2020.290

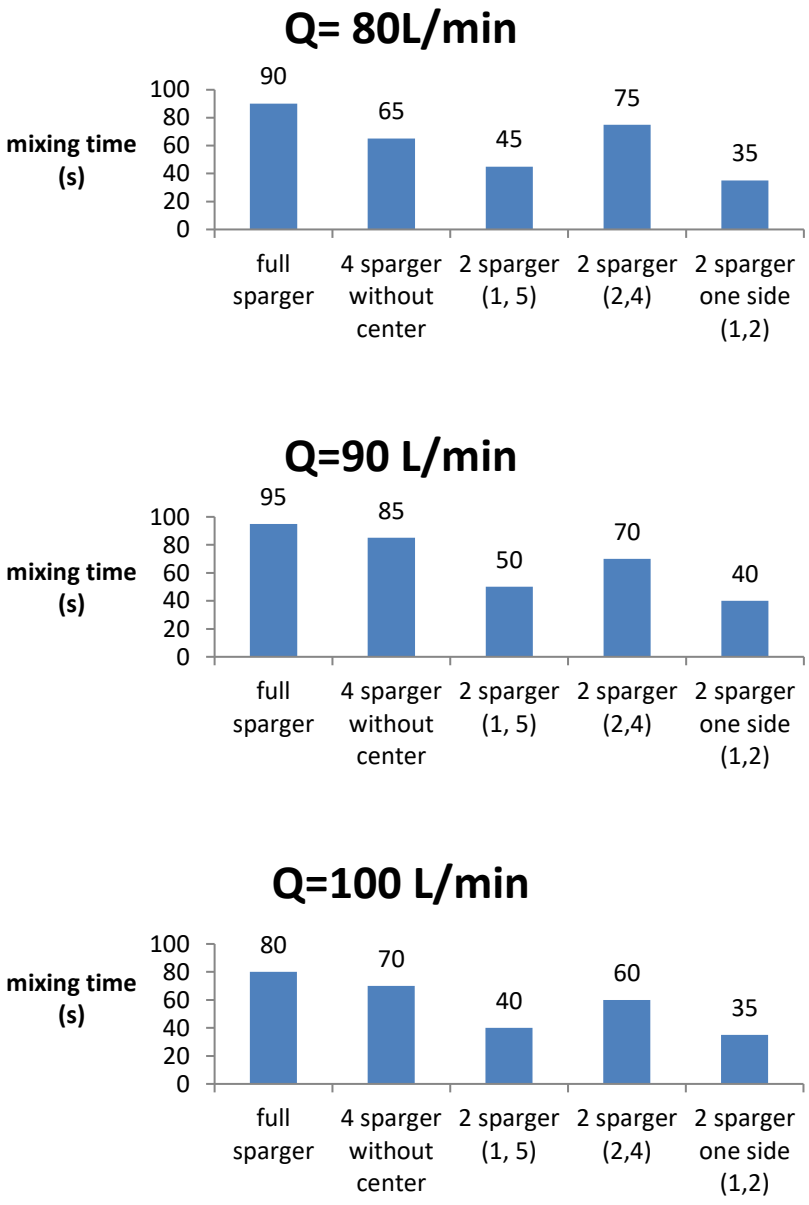








DOI: 10.30503/nripress.2020.290



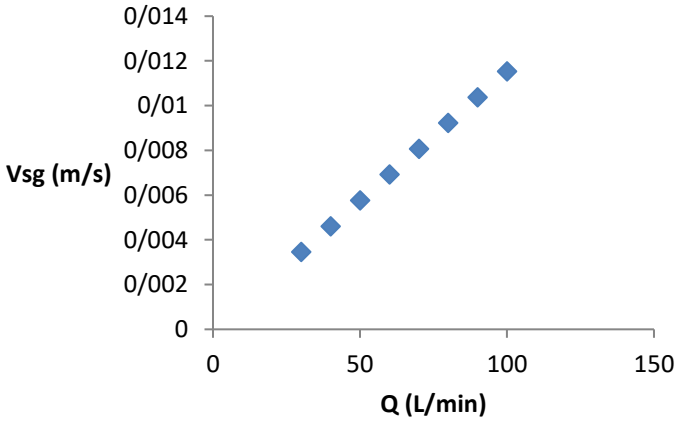
شکل (۷–۳) زمان اختلاط در شدت‌های هوادهی مختلف و تعبیه متنوع اسپارژرها

۷-۲-۸- انباشتگی گاز (Holdup)

انباشتگی گاز پارمتر کلیدی بدون بعدی در طراحی فرآیند می‌باشد که پدیده‌های انتقال در سیستم بیوراکتور ستون حبابی را مشخص می‌کند. انباشتگی گاز به عنوان سرعت حجم گاز اشغال شده توسط حباب‌های هوا تعریف می‌شود. انباشتگی گاز با افزایش سرعت گاز افزایش می‌یابد. بیشترین انباشتگی در بالاترین سرعت‌های گاز و برای حداقل سطح مایع در راکتورها ثبت شده است. افزایش شدت هوادهی منجر به افزایش سرعت ظاهری گاز شده و در نتیجه

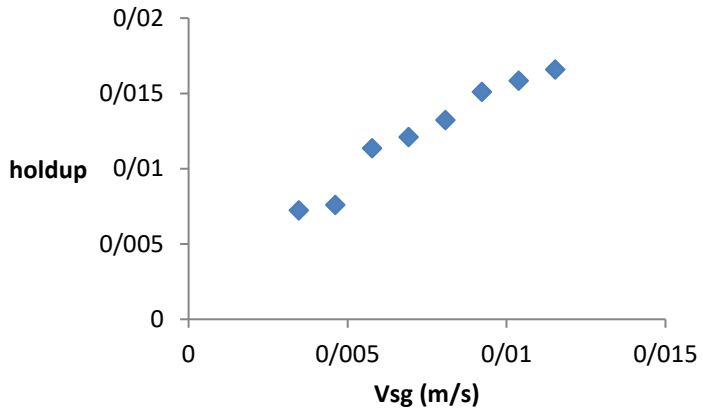
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

افزایش انباشتگی گاز را در پی خواهد داشت. سرعت ظاهری بالای گازها در کشت میکروجلبک‌ها به منظور ایجاد درجه بالایی از اختلاط که منجر به گردش سلول‌ها از نقطه تاریک بیوراکتور به قسمت روشن آن می‌شود حائز اهمیت می‌باشد. میزان سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز در بیوراکتور طراحی شده در شدت‌های هوادهی مختلف محاسبه شد. همان طور که در شکل (۳-۴) دیده می‌شود با افزایش شدت هوا دهی سرعت ظاهری گاز افزایش یافته است. همچنین در سرعت‌های ظاهری بالا میزان انباشتگی گاز بیشتر شده است (شکل (۳-۵)). مقادیر سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز در شدت‌های هوادهی مختلف در محدوده مقادیر گزارش شده در مراجع می‌باشد. مقدار ۰.۰۱۶۶ به عنوان بیشترین مقدار انباشتگی گاز در شدت هوا دهی ۱۰۰ لیتر در دقیقه به دست آمد که با عدد به دست آمده (۰.۰۱۸) در بیوراکتور مشابه که با اسپارژرهای افقی مطابقت دارد [۷۳]. همچنین مقدار بیشینه ۰.۰۱۱۵ برای سرعت ظاهری گاز در شدت هوا دهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه یه دست آمد که در محدوده قابل قبول ارائه شده در منابع می‌باشد. در سرعت‌های ظاهری۰/۰۷۶ برای جلبک (D. tertiolecta) و ۰/۰۸۵ برای جلبک (C. reinhardtii) هیچ گونه آسیب سلولی مشاهده نشده است [۶]. کاماچو و همکاران اعلام کردند که مقادیر سرعت ظاهری گاز بین ۰.۰۱ و ۰.۰۵ برای ریزجلبک Phaeodactylum tricornutum که نسبت به تنش هیدرودینامیکی حساس است مناسب می‌باشد [۷۴]. سوزوکی و همکاران نشان دادند در سرعت ظاهری بالای ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه میزان مرگ و میر سلول‌ها افزایش می‌یابد [۷۵]. برای نگه داشتن سرعت گاز کمتر از مقدار بحرانی باید تعداد نازل‌ها و یا قطر سوراخ‌ها را افزایش داد.



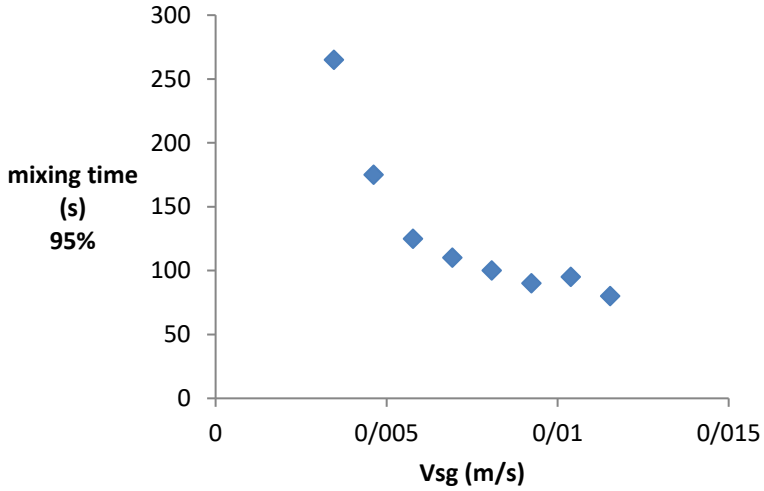
شکل (۴-۷) تغییرات سرعت ظاهری گاز بر حسب شدت هوادهی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



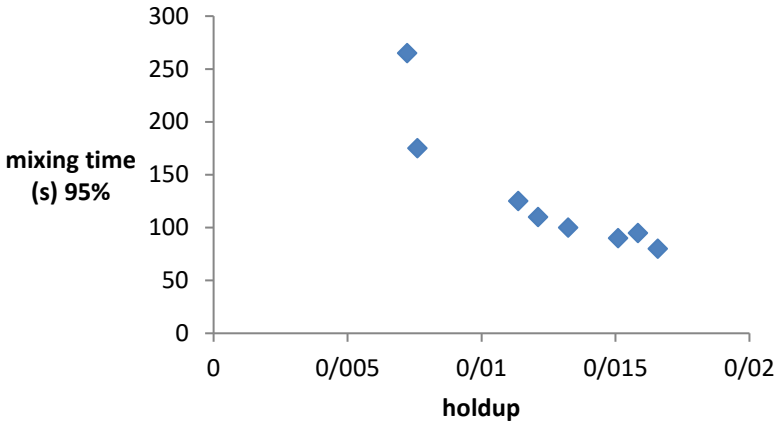
شکل (۷-۵) تغییرات انباشتگی گاز بر حسب سرعت ظاهری

تغییرات زمان اختلاط بر مبنای سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز در شکل‌های (۳-۶) و (۳-۷) آورده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز زمان اختلاط کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۷-۶) تغییرات زمان اختلاط بر حسب سرعت ظاهری

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۷-۷) تغییرات زمان اختلاط بر حسب انباشتگی گاز

۷-۳- نتیجه گیری

در پروژه حاضر فتوبیوراکتوری با دو ظرفیت ۲۵۰ و ۳۰۰ لیتر برای کشت ریز جلبک‌ها طراحی و ساخته شد. پارامترهای عملیاتی، فنی و اقتصادی مانند راندمان تولید در واحد سطح، جذب دی اکسید کربن، الگوی مناسب اختلاط، دریافت نور، مقاومت سازه، مقاومت مصالح بکار رفته در برابر خوردگی و کاهش هزینه‌های استهلاک تعیین شدند. همچنین شرایط مختلف هوا دهی برای یافتن الگوی اختلاط بهینه بررسی شد. طراحی راکتور جدید بطور قابل توجهی منجر به کاهش زمان اختلاط شده که منجر به کاهش انرژی نسبت به طراحی‌های قبلی می‌شود. همچنین در آینده با اندازه‌گیری و آنالیز ضرایب انتقال جرم، سنتیک رشد ریز جلبک‌ها در شرایط متفاوت مطالعه شده و میزان رشد آنها بهینه‌سازی می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مراجع:

1. Tamburic, B., et al., *Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production.* international journal of hydrogen energy, 2011. **36**(11): p. 6578-6591.
2. Enzing, C., et al., *Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe.* IPTS Institute for Prospective technological Studies, JRC, Seville, 2014.
3. Ojo, E.O., et al., *Design and parallelisation of a miniature photobioreactor platform for microalgal culture evaluation and optimisation.* Biochemical Engineering Journal, 2015. **103**: p. 93-102.
4. Béchet, Q., A. Shilton, and B. Guieysse, *Modeling the effects of light and temperature on algae growth: state of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation.* Biotechnology advances, 2013. **31**(8): p. 1648-1663.
5. Ugwu, C., H. Aoyagi, and H. Uchiyama, *Photobioreactors for mass cultivation of algae.* Bioresource technology, 2008. **99**(10): p. 4021-4028.
6. Barbosa, M.J., M. Albrecht, and R.H. Wijffels, *Hydrodynamic stress and lethal events in sparged microalgae cultures.* Biotechnology and bioengineering, 2003. **83**(1): p. 112-120.
7. Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae.* Biotechnology advances, 2007. **25**(3): p. 294-306.
8. Demirbas, A., *Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics.* Energy conversion and Management, 2006. **47**(15): p. 2271-2282.
9. Martinot, E., *Renewables 2005: Global status report.* REN21 Renewable Energy Policy Network/Worldwatch Institute, 2005: p. 14.
10. Zahra Lari , Parvaneh Abrishamchi , Hossein Ahmadzadeh , Neda Soltani , Differential carbon partitioning and fatty acid composition in mixotrophic and autotrophic cultures of a new marine isolate Tetraselmis sp. KY114885 , *Journal of Applied Phycology* , Volume (31) , 2018-7, Pages 201-210
11. Hu, Q., *5 Environmental Effects on Cell Composition.* Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology, 2004: p. 83.
12. Richmond, A., *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. 2008: John Wiley & Sons.
13. Janelt, G., et al., *The lamellar settler–a low-cost alternative for separating the micro-alga Chlorella vulgaris from a cultivation broth?* Applied microbiology and biotechnology, 1997. **48**(1): p. 6-10.
14. Hammouda, O., A. Gaber, and N. Abdelraouf, *Microalgae and wastewater treatment.* Ecotoxicology and Environmental safety, 1995. **31**(3): p. 205-210.
15. Fariba Bagheri Bajestani , Nasrin Moshtaghi , Hossein Ahmadzadeh , F.Talebi , Using of Chlorella vulgaris for livestock wastewater treatment and the expression of NR gene , *Journal of Global Pharma Technology* , Volume (12) , 2017-9, Pages 278-289
16. Schenk, P.M., et al., *Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production.* Bioenergy research, 2008. **1**(1): p. 20-43.
17. Goulder, L.H. and W.A. Pizer, *The economics of climate change*. 2006, National Bureau of Economic Research.
18. Hahn-Hägerdal, B., et al., *Bio-ethanol–the fuel of tomorrow from the residues of today.* Trends in biotechnology, 2006. **24**(12): p. 549-556.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

19. Schmidt, C.W., *Biodiesel: cultivating alternative fuels.* Environmental health perspectives, 2007. **115**(2): p. A86.
20. Sheehan, J., et al., *A look back at the US Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae.* National Renewable Energy Laboratory, 1998. **328**.
21. Hankamer, B., et al., *Photosynthetic biomass and H2 production by green algae: from bioengineering to bioreactor scale-up.* Physiologia Plantarum, 2007. **131**(1): p. 10-21.
22. Xu, R., *Downstream processing of microalgal biodiesel production.* 2010.
23. Martinot, E., et al., *Renewables global status report-2006 Update.* 2009.
24. Bitog, J., et al., *Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review.* Computers and Electronics in Agriculture, 2011. **76**(2): p. 131-147.
25. Schaub, G., T. Kolb, and W. Steiger, *Biofuels.* Second-generation biofuels. Chemie Ingenieurtechnik, 2007. **79**: p. 1325-1326.
26. Munoz, R. and B. Guieysse, *Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review.* Water research, 2006. **40**(15): p. 2799-2815.
27. Benemann, J., et al., *Microalgae as a source of liquid fuels. Final technical report.[200 references]*. 1982, EnBio, Inc., Fairfield, CA (USA).
28. Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae beats bioethanol.* Trends in biotechnology, 2008. **26**(3): p. 126-131.
29. Weldy, C.S. and M. Huesemann, *Lipid production by Dunaliella salina in batch culture: effects of nitrogen limitation and light intensity.* US Department of Energy Journal of Undergraduate Research, 2007. **7**(1): p. 115-22.
30. Tabatabaei, M., et al., *Biodiesel production from genetically engineered microalgae: future of bioenergy in Iran.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(4): p. 1918-1927.
31. Takagi, M. and T. Yoshida, *Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae Dunaliella cells.* Journal of bioscience and bioengineering, 2006. **101**(3): p. 223-226.
32. Stengel, D.B., S. Connan, and Z.A. Popper, *Algal chemodiversity and bioactivity: sources of natural variability and implications for commercial application.* Biotechnology advances, 2011. **29**(5): p. 483-501.
33. Mimouni, V., et al., *The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest.* Current pharmaceutical biotechnology, 2012. **13**(15): p. 2733-2750.
34. Spolaore, P., et al., *Commercial applications of microalgae.* Journal of bioscience and bioengineering, 2006. **101**(2): p. 87-96.
35. Deshpande, A., *Optimization of Growth of Dunaliella Salina for Carotenoid production*. 2005, Thesis of MS faculty of the school of engineering. University of Southern California.
36. Tokuşoglu, Ö. and M. Üunal, *Biomass nutrient profiles of three microalgae: Spirulina platensis, Chlorella vulgaris, and Isochrisis galbana.* Journal of food science, 2003. **68**(4): p. 1144-1148.
37. Foote, C.S., Y.C. Chang, and R.W. Denny, *Chemistry of singlet oxygen. X. Carotenoid quenching parallels biological protection.* Journal of the American Chemical Society, 1970. **92**(17): p. 5216-5218.
38. Ben-Amotz, A. and M. Avron, *Dunaliella: physiology, biochemistry, and biotechnology*. 1992: CRC press.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

39. Gordillo, F.J., et al., *Effects of light intensity, CO2 and nitrogen supply on lipid class composition of Dunaliella viridis.* Journal of Applied Phycology, 1998. **10**(2): p. 135-144.
40. Halim, R., M.K. Danquah, and P.A. Webley, *Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review.* Biotechnology advances, 2012. **30**(3): p. 709-732.
41. Azachi, M., et al., *Salt induction of fatty acid elongase and membrane lipid modifications in the extreme halotolerant alga Dunaliella salina.* Plant physiology, 2002. **129**(3): p. 1320-1329.
42. Nuzzo, G., et al., *Composition and quantitation of microalgal lipids by ERETIC 1H NMR method.* Marine drugs, 2013. **11**(10): p. 3742-3753.
43. Mata, T.M., A.A. Martins, and N.S. Caetano, *Microalgae for biodiesel production and other applications: a review.* Renewable and sustainable energy reviews, 2010. **14**(1): p. 217-232.
44. Diplock, A., et al., *The European comission concerted action on functional foods science in Europe (FUFOSE). Scientific concepts of functional foods in Europe. Consensus document.* Br J Nutr, 1999. **81**: p. S1-S27.
45. Gouveia, L., et al., *Chlorella vulgaris and Haematococcus pluvialis biomass as colouring and antioxidant in food emulsions.* European Food Research and Technology, 2006. **222**(3-4): p. 362-367.
46. Manian, R., et al., *The antioxidant activity and free radical scavenging potential of two different solvent extracts of Camellia sinensis (L.) O. Kuntz, Ficus bengalensis L. and Ficus racemosa L.* Food Chemistry, 2008. **107**(3): p. 1000-1007.
47. Horincar, V.-B., P. Parfene, and G. Bahrim, *Evaluation of bioactive compounds in extracts obtained from three Romanian marine algae species.* Romanian Biotechnological Letters, 2011. **16**(6): p. 71-78.
48. Stewart, B. and C.P. Wild, *World cancer report 2014.* World, 2016.
49. Singh, J. and S. Gu, *Commercialization potential of microalgae for biofuels production.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(9): p. 2596-2610.
50. Arora, N., S. Agarwal, and R. Murthy, *Latest technology advances in cosmaceuticals.* Int. J. Pharm. Sci. Drug Res, 2012. **4**(3): p. 168-182.
51. Goettsch, W.G. and J. Enzing, *Review: report of the ISPOR 2012 Budget Impact Analysis Good Practice II Task Force.* Value in Health, 2014. **17**(1): p. 1-2.
52. Hemmi, H., et al., *Fusion-type lycopene β-cyclase from a thermoacidophilic archaeon Sulfolobus solfataricus.* Biochemical and biophysical research communications, 2003. **305**(3): p. 586-591.
53. Amotz, A. and M. Avron, *potential use of Dunaliella for the production of glycerol, beta-carotene and high-protein feed.* Environmental science research, 1982.
54. Kamal-Eldin, A. and L.-Å. Appelqvist, *The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols.* Lipids, 1996. **31**(7): p. 671-701.
55. Masyuk, N., *Mass culture of the carotene containing alga Dunaliella salina Teod.* Ukr Bot Zh, 1965. **23**: p. 12-19.
56. Raja, R., et al., *PCR-identification of Dunaliella salina (Volvocales, Chlorophyta) and its growth characteristics.* Microbiological Research, 2007. **162**(2): p. 168-176.
57. Carvalho, A.P., L.A. Meireles, and F.X. Malcata, *Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances.* Biotechnology progress, 2006. **22**(6): p. 1490-1506.
58. Pushparaj, B., et al., *As integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria.* Journal of Applied Phycology, 1997. **9**(2): p. 113-119.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

59. Spektorova, L., R. Creswell, and D. Vaughn, *Closed tubular cultivators: an innovative system for commercial culture of macroalgae.* WORLD AQUACULTURE-BATON ROUGE-, 1997. **28**: p. 39-44.
60. Robinson, L., A. Morrison, and M. Bamforth, *Improvements relating to biosynthesis.* European patent, 1988. **261**: p. 872.
61. Morita, M., et al., *Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactors incorporating Chlorella sp. under various culture medium flow conditions.* Biotechnology and bioengineering, 2001. **74**(2): p. 136-144.
62. Lee, Y.-K., et al., *Design and performance of an α-type tubular photobioreactor for mass cultivation of microalgae.* Journal of Applied Phycology, 1995. **7**(1): p. 47-51.
63. Eriksen, N.T., T. Geest, and J.L. Iversen, *Phototrophic growth in the lumostat: a photo-bioreactor with on-line optimization of light intensity.* journal of applied phycology, 1996. **8**(4-5): p. 345-352.
64. Tredici, M.R., *Mass production of microalgae: photobioreactors.* Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology, 2004. **1**: p. 178-214.
65. de Araújo, M.S., *Characterization and validation of a new photobioreactor, bubble column type with axial mixing, for production of single cell oil for biodiesel from microalgae.* 2014.
66. Pirouzi, A., et al., *Improvement of mixing time, mass transfer, and power consumption in an external loop airlift photobioreactor for microalgae cultures.* Biochemical Engineering Journal, 2014. **87**: p. 25-32.
67. Kunjapur, A.M. and R.B. Eldridge, *Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae.* Industrial & engineering chemistry research, 2010. **49**(8): p. 3516-3526.
68. Soman, A. and Y. Shastri, *Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics.* Applied Energy, 2015. **140**: p. 246-255.
69. Eriksen, N.T., *The technology of microalgal culturing.* Biotechnology letters, 2008. **30**(9): p. 1525-1536.
70. Ojo, E.O., *Photobioreactor Technologies for High-throughput Microalgae Cultivation*. 2015, UCL (University College London).
71. Mendoza, J., et al., *Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production.* Biomass and Bioenergy, 2013. **54**: p. 267-275.
72. Mirón, A.S., et al., *Mixing in bubble column and airlift reactors.* Chemical Engineering Research and Design, 2004. **82**(10): p. 1367-1374.
73. Oncel, S. and A. Kose, *Comparison of tubular and panel type photobioreactors for biohydrogen production utilizing Chlamydomonas reinhardtii considering mixing time and light intensity.* Bioresource technology, 2014. **151**: p. 265-270.
74. Camacho, F.G., et al., *Use of concentric-tube airlift photobioreactors for microalgal outdoor mass cultures.* Enzyme and microbial technology, 1999. **24**(3): p. 164-172.
75. Suzuki, T., et al., *Gas-Sparged bioreactors for CO2 fixation by Dunaliella tertiolecta.* Journal of chemical technology and biotechnology, 1995. **62**(4): p. 351-358.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸- فصل هشتم : راه اندازی، ارزیابی و رفع مشکلات احتمالی کارکرد سامانه DG-CHP

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-۱- مقدمه

ریزجلبک‌ها به صورت وسیعی در سیستم‌های کشت باز و کشت بسته پرورش داده می‌شوند که اغلب در مقیاس وسیع و در سطح تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخلاف سیستم‌های باز در سیستم‌های بسته (فتوبیوراکتور)، ریزجلبک با محیط تماس مستقیم ندارند. سیستم‌های بسته در انواع راکتورهای ستونی عمودی، راکتورهای همزن دار (اغلب با نور داخلی)، راکتورهای لوله‌ای و راکتورهای صفحه تخت موجود می‌باشند. بطورکلی از مزیت‌های استفاده از فتوبیوراکتور در مقایسه با سیستم‌های باز می‌توان به و هزینه پایین برداشت، نیاز به فضای کمتر، جلوگیری از آلودگی محیط کشت، کنترل بهتر شرایط کشت مانند دما و pH، ممانعت از تبخیر آب محیط و اتلاف گاز دی‌اکسید کربن و حصول غلظت بالای سلولی اشاره نمود. با این وجود هزینه اولیه نصب و نگهداری آن‌ها نسبت به سیستم‌های باز بیشتر می‌باشد. نسبت سطح به حجم (S/V) فتوبیوراکتور (نسبت سطح در معرض نور به حجم بیوراکتور) میزان نور ورودی به سیستم در واحد حجم و همچنین رژیم نوری که جمعیت سلول‌ها در معرض آن قرار می‌گیرد را تعیین می‌کند و در نتیجه یکی از موضوعات مهم در طراحی فتوبیوراکتور خواهد بود. طول و ارتفاع واقعی فتوبیوراکتورهای صفحه تخت بر اساس اختلاط محیط داخل آن تعیین می‌شود. ابعاد این سیستم‌ها طوری باید طراحی شود که الگوی اختلاط مناسبی در راکتور برقرار شود تا مواد مغذی و خود ریز جلبک‌ها توزیع متوازنی داشته باشند (Enzing *et al*. 2014). این گونه فتوبیوراکتورها بر مبنای نسبت بالای سطح به حجم (S/V) که منجر به افزایش راندمان فتوسنتز خواهد شد طراحی می‌شوند (Tamburic *et al*, 2011). بطورکلی نسبت S/V بالاتر منجر به کوتاه شدن دوره‌های روشنایی و تاریکی می‌شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر روند کلی طراحی فتوبیوراکتور به سمت کاهش قطر بیوراکتورها و کاهش ضخامت آن‌ها پیش می‌رود. قابل ذکر است که راکتورهای صفحه تخت معمولاً از یک محفظه مستطیل شکل با عمق ۱-۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع و عرضی که عملاً بیش از ۱ متر نمی‌باشد تشکیل می‌شود (Tamburic *et al*, 2011: Enzing *et al*. 2014). علاوه بر موارد ذکر شده طراحی فتوبیوراکتورها بر اساس دریافت نور بالا، چرخه‌های نور به تاریکی بالا، اختلاط مناسب، شرایط کنترلی مانند کنترل دما و سایر شرایط فیزیکی مانند خارج سازی گاز (degassing) انجام می‌شوند (Ojo *et al*. 2015: Béchet *et al*. 2013: Ugwu *et al*. 2008). ورودی‌های اصلی سیستم‌های بسته شامل جلبک، نور، آب، دی اکسیدکربن و منابع نیتروژن و فسفر می‌باشد. نوع تجهیزات مورد استفاده برای اختلاط و گردش محیط امری مهم در طراحی فتوبیوراکتور می باشد. بهره‌وری و هزینه ساخت فتوبیوراکتور به انتخاب سیستم همزن برای برقراری الگوی اختلاط مناسب وابسته می‌باشد (Ugwu *et al*. 2008). اختلاط مناسب باعث جلوگیری از ته نشینی سلول‌ها در فتوبیوراکتور، توزیع مناسب مواد مغذی، حذف اکسیژن تولیدی از فتوسنتز، تامین و توزیع مناسب دی‌اکسید کربن و افزایش نور رسانی در فتو بیوراکتور خواهد شد. با این حال اختلاط بیش از حد می‌تواند منجر به آسیب سلولی و در نهایت مرگ سلولی شود (Barbosa *et al*. 2003). به همین دلیل انتخاب سیستم اختلاط و شدت آن باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های میکروارگانیسم مورد استفاده انجام شود. در سال‌های اخیر تلاش عمده جهت افزایش کارایی فتوسنتتیک ریزجلبک‌ها تحت نور بالا انجام شده است. استراتژی مهم جهت اینکار افزایش میزان نور در سطح راکتور می‌باشد که با انباشته‌سازی واحدهای فتوبیوراکتور بصورت عمودی امکانپذیر خواهد بود. در حال حاضر سه نوع تکنولوژی برای تولید ریزجلبک وجود دارد که شامل استخرهای باز، فتوبیوراکتورهای لوله‌ای افقی و صفحه تخت می‌باشند و از

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

آنجایی که شرایط عملیاتی در فتوبیوراکتورهای بسته نسبت به استخرهای باز به صورت دقیق‌تری کنترل می‌شود این سیستم‌ها قابلیت تکنیکی بالایی جهت افزایش در بهره‌وری خواهند داشت (Enzing *et al.* 2014). بنابراین هدف از پروژه حاضر طراحی و ساخت فتوبیوراکتور صفحه تحت عمودی در مقیاس ۵۰۰ لیتری با هدف بهره‌برداری از دودهای خروجی یک سیستم DG-CHP جهت پرورش جلبک‌های مولد سوخت زیستی است که نسبت به مدل‌های مشابه دارای ظرفیت بزرگتر و الگوی اختلاط مناسب‌تر برای کشت ریزجلبک می‌باشد.

۸-۲- جلبک‌ها

بطورکلی جلبک‌ها به دو گروه میکروجلبک‌ها (ریزجلبک‌ها) و ماکروجلبک‌ها[1] (درشت‌جلبک‌ها) طبقه‌بندی می‌شود. ماکروجلبک‌ها اندازه‌ی بزرگی (در حدود یک اینچ و بزرگتر) داشته، پر سلولی[2] بوده و اغلب در برکه‌ها و تالاب‌ها دیده می‌شوند. در مقابل ریزجلبک‌ها اندازه‌ی بسیار ریزی (در حد میکرومتر) داشته و تک سلولی بوده و بصورت سوسپانسیون در آب رشد می‌کنند. ریزجلبک‌ها اغلب همان کدورت ایجاد شده در آب تالاب‌ها و حتی در آکواریوم‌ها هستند که سرعت رشد هر دو نوع جلبک‌ها بسیار بالاست. ریزجلبک‌ها قادرند در هر چند ساعت در طی رشد لگاریتمی دو برابر شوند. این رشد سریع باعث شده که محصولاتی آینده‌دار بشمار روند (Chisti, 2007). بطورکلی ماکروجلبک‌ها حاوی لیپید نیستند و بیشتر حاوی قندهای طبیعی و سایر کربوهیدرات‌ها هستند که قابلیت تخمیر به بیوگاز یا سوخت‌های پایه الکلی دارند. اما ریزجلبک‌ها به علت داشتن راندمان فتوسنتزی بالا و قابلیت تولید لیپید جهت تولید بیودیزل بطور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته‌اند.

۸-۳- جلبک‌های میکروسکوپی

جلبک‌های میکروسکوپی از قدیمی‌ترین ساکنان اقیانوس‌ها و آب‌های شیرین هستند. نه تنها خلقت آن‌ها به میلیاردها سال قبل از تاریخ حیات بشر بر می‌گردد، بلکه پیش از تمامی گونه‌های جانوری می‌زیسته‌اند و اکنون نیز در طبیعت پیرامون ما وجود دارند. جلبک‌های میکروسکوپی مشابه با گیاهان، یکی از فعال‌ترین موجودات فتوسنتز کننده و دارای کلروفیل با تراکم بالا هستند، اما دیواره سلولی آن‌ها سلولزی می‌باشد. مشابه با جانوران، مواد ذخیره غذایی و دیواره سلولی ساخته شده از نوعی نشاسته و پروتئین دارند، اما برخلاف آن‌ها فتوسنتز می‌کنند. مشابه باکتری‌ها قابلیت سازگاری با شرایط مختلف طبیعی را دارند. اطلاعات ژنتیکی بین آن‌ها به آسانی مبادله می‌شود، اما وجود کلروفیل آن‌ها را از باکتری‌ها متمایز می‌کند. تعداد جلبک‌های میکروسکوپی را بین ۲۲۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ تخمین می‌زنند که از بین آن‌ها ۵۰ جلبک میکروسکوپی، به صورت صنعتی تولید می‌شوند (Hemaiswarya *et al.* 2013: Chisti, 2007: Demirbas, 2006: Martinot, 2005). حداقل ۳۰۰۰۰ گونه ریزجلبکی تا کنون شناخته

[1]Macroalgae
[2]Multi-cellular

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شـــده اســـت که از این میان تنها تعداد انگشـــت شـــماری از نقطه نظر تجاری مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاکنون ریزجلبک‌ها بیشـتر جهت اسـتخراج ترکیبات باارزشـی نظیر رنگدانه‌ها، آنتی‌اکسـیدان‌ها و پروتئین‌ها و برخی گونه‌ها بعنوان خوراک در پرورش آبزیان و یا غنی‌سـازی پروتئین مصـرفی و یا منابع آبی دام و ظیور کشـت داده می‌شـدند (Sathasivam *et al*. 2019). تحقیقات روی تولید سوخت از ریزجلبک‌ها از ۱۳۰ سال پیش با آشکار شدن قابلیت آن‌ها در تولید ترکیبات شـیمیایی واسـطه و هیدروکربن‌هایی که پتانسـیل اسـتفاده بعنوان سـوخت را دارند آغاز شـد. ترکیبات عمده‌ی قابل استخراج از بیوماس ریزجلبک‌ها شامل لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها هستند که همه‌ی این ترکیبات را می‌توان به سـوخت تبدیل کرد (Lari *et al*. 2018). اما چون لیپیدها محتوای انرژی بالایی دارند، تحقیقات وســـیعی در زمینـه غربال‌گری گونه‌ها جهت تولید ترکیبـات مطلوب با تمرکز اصـــلی بر روی میزان محصول‌دهی لیپیدی و متعاقبا استریفیکاسیون لیپیدها آغاز گردید.

۸-٤- ریزجلبک *Dunaliella sp.*

صدها سال از زمان توصیف سرده دونالیلا به عنوان یک جلبک سبز تک‌یاخته‌ای که مسئول اولیه تولید بیومس در محیط‌های شور در سراسر دنیا است، می‌گذرد. اولین بار در سال ۱۸۳۸ در تالاب‌های تبخیر نمک در جنوب فرانسه توسـط Michel Felix Dunal دیده شـد (Dunal 1838). ولی بعد از کشـف آن توسـط Teodoresco در سـال ۱۹۰۵ نامگذاری شـــد (Teodoresco 1905). بر اســـاس طبقه‌بندی‌های جدید (جدول ۱-۱) ریزجلبک ســـبز تک‌یاخته‌ای دونالیلا یکی از ســـرده‌های مهم تیره Dunaliellaceae از شـــاخه Chlorophyta می‌باشـــد (Borowitzka and Siva, 2007). این جلبک تک‌یاخته‌ای تاژکدار بدون دیواره یاخته‌ای، قادر است در تنش‌های محیطی مختلف زندگی کند (Abusara *et al*., 2011). این سـرده دارای ۲۹ گونه می‌باشـد که اغلب گونه‌های این سـرده به دلیل توانایی تولید گلیسـرول قادر هسـتند در محیط‌های شـور زندگی کنند (Borowitzka and Siva, 2007).

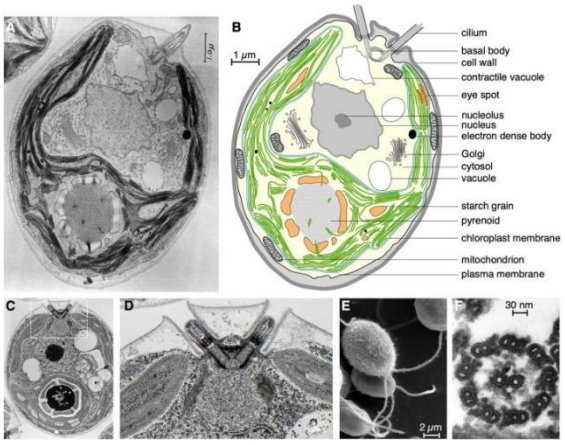
جدول (۸-۱) رده‌بندی و جایگاه سرده Dunaliella (Borowitzka and Siva 2007)

Eukaryota	دامنه
Plantae	سلسله
Viridaeplantae	زیرسلسله
Chlorophyta	شاخه
Chlorophyceae	رده
Dunaliellales	راسته
Dunaniellaceae	خانواده
Dunaliella	سرده

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-٤-۱- ریخت‌شناسی *Dunaliella*

شکل یاخته در دونالیلا از بیضوی, تخم مرغی, استوانه ای, گلابی شکل, دوکی تا تقریبا کروی شکل متغیر است. تقارن یاخته شعاعی, دو طرفه یا اندکی نامتقارن است. شکل یاخته‌ها ممکن است در اثر تغییرات شرایط محیطی تغییر کند که اغلب در شرایط نامساعد کروی است. اندازه یاخته ممکن است تا حدودی تحت تاثیر شرایط محیط و شدت نور تغییر کند (Marano 1976; Riisgard and Randløv 1981; Einspahr *et al*. 1988). فاقد دیواره یاخته‌ای سختی می‌باشد اما دارای پوشش یاخته‌ای موسیلاژی مشخص و متمایزی است. دوتاژک آن راسی بوده دارای طول یکسان و معمولا الگوی حرکتی و تاژک زدن یکسانی ارائه می‌کنند. ساختارflagellar apparatus پیچیده است و از انواعی است که در کلروفیسه‌های دیگر یافت می‌شود (Melkonian, 1989). یک کلروپلاست فنجانی شکل, یا زنگی شکل بیشتر حجم یاخته را فرا گرفته، قسمت پایه‌ای آن ضخیم و حاوی یک پیرنوئید می‌باشد. دانه‌های نشاسته معمولا دور پیرنوئید را گرفته و ممکن است در قسمت‌های دیگر کلروپلاست نیز وجود داشته باشد. کلروپلاست همچنین ممکن است حاوی مقادیر زیادی بتاکاروتن باشد بنابراین یاخته‌ها نارنجی- قرمز دیده می‌شوند. لکه چشمی یا استیگما موقعیت پیرامونی قدامی دارد (شکل ۱-۱). تکثیر آن‌ها از طریق تقسیم طولی یاخته و یا از طریق تلفیق دو یاخته برای تشکیل یاخته زیگوت انجام می‌شود (Oren 2005).



شکل (۸-۱) نماهایی از ریخت‌شناسی و ساختار یاخته‌ای *Dunaliella* sp. (Wu *et al*. 2016)

۸-۵- روش‌های تغذیه‌ای جلبک‌ها

جلبک‌ها قادرند به انواع روش‌های تغذیه‌ای زیست نمایند برای مثال اتوتروفی (خود اتکایی) و هتروتروفی (دگراتکایی) که اتوتروفی از مهم‌ترین آن‌هاست. در روش اتوتروفی ارگانیسم‌ها انرژی لازم برای احیاء CO_2 و

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

اکسایش سوبسترا به ویژه آب را از نور خورشید جذب و O_2 تولید می‌کنند. ارگانیسم‌های فتواتوتروفیک[1] فقط به یون‌های مواد معدنی نیاز داشته و به همراه فتواتوتروف‌های اجباری قادر به رشد در تاریکی نیستند. ارگانیسم‌های هتروتروف مواد و انرژی مورد نیاز خود را از مواد آلی که توسط دیگر موجودات تولید شده است بدست می‌آورند. ارگانیسم‌های فتوهتروتروف نیازمند نور به عنوان منبع انرژی و مواد آلی به عنوان مواد غذایی می‌باشند. جلبک‌های اکسوتروف[2] فقط نیازمند مقادیر اندکی از مواد آلی مثل ویتامین‌ها و اسید آمینه‌ها برای رشد هستند. جلبک‌های میکسوتروف[3] یا آمفی‌تروف[4] مابین اتوتروف‌ها و هتروتروف‌ها بوده و مستلزم CO_2 و ترکیبات آلی برای رشد می‌باشند (Martinot, 2005).

۸-٦- مواد غذایی ضروری جلبک‌ها

قبلاً عصاره آب خاک، محلول‌های کشت جلبک را تشکیل می‌داد، ولی به واسطه مطالعات زیاد، غلظت مناسب عناصر، برای گونه‌های مختلف جلبک تعیین شد. به طور خلاصه عناصر مورد نیاز به شرح ذیل می‌باشند:

- نمک کل: با توجه به محل زندگی اصلی جلبک تعیین می‌شود.
- ترکیبات یونی اصلی که در ترکیب سلولی وجود دارد مثل Na^+ ,Mg^{2+} ,K^+ ،Ca^{2+} ،SO_4^{2-} و Cl^-
- منبع نیتروژن به ویژه نیترات، آمونیوم و اوره
- منبع کربن مثل CO_2 یا HCO_3^-
- عناصر کم مصرف و برخی کلات کننده‌ها مثل اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA)
- ویتامین‌ها

مواد فوق بسته به شرایط زیر بکار برده می‌شوند:

- روش تغذیه جلبک
- نوع گونه جلبک تحت کشت

در رشد اتوتروفی فراهم بودن حدود ۳۰ عنصر ضروریست که سه عنصر بسیار مهم برای رشد اتوتروفی جلبک شامل C، N و P است که در زیر به اختصار تشریح می‌گردند.

۸-٦-۱- کربن

[1] photoautotrophic
[2] auxotrophy
[3] mixotrophic
[4] amphitrophic

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برای شدت بالای تولید اتوتروفی فراهم بودن CO_2 و HCO_3^- خیلی مهم است. برخلاف گیاهان مقدار CO_2 اتمسفر برای تولید انبوه جلبک در حالت اتوتروفی کافی نخواهد بود چرا که سرعت انتشار CO_2 از اتمسفر در استخرهای روباز حداکثر تأمین کننده حدود $10\ g_{dry\ weight}\ m^{-2}d^{-1}$[1] از تولیدات می‌باشد. در حالی که سرعت بیش از $70\ g_{dw}\ m^{-2}d^{-1}$ در تولید گزارش شده است که کمبود حدود $30\ g\ C\ m^{-2}d^{-1}$ (با فرض میزان کربن ۵۰ درصد در بیوماس) را نشان می‌دهد. سیستم CO_2-H_2CO_3-HCO_3^{-1}-CO_3^{-2} مهم‌ترین بافر ارائه شده در آب‌های شیرین بوده و بهترین ابزار کنترل pH در شرایط مناسب جهت تولید انبوه گونه های جلبک می‌باشد. سیستم بافر کربنات – بیکربنات طی واکنش‌های زیر می‌تواند CO_2 را طی عمل فتوسنتز فراهم نماید:

$$2HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O + CO_2 \quad (۸-۱۹)$$

$$HCO_3^- \leftrightarrow CO_2 + OH^- \quad (۸-۲۰)$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2\ OH^- \quad (۸-۲۱)$$

این واکنش‌ها گویای این مطلب است که طی تثبیت فتوسنتزی CO_2 آنیون OH^- در محلول کشت تجمع یافته و موجب افزایش pH می‌شود. و غیر عادی نخواهد بود که pH بیش از ۱۱ در سیستم‌های تولید انبوه جلبک اندازه گیری شود. کنترل استاتیک (پایای) pH از طریق تزریق CO_2 به داخل محیط کشت بهترین روش مرسوم در کنترل pH و در عین حال تأمین CO_2 برای کشت انبوه جلبک می‌باشد. طی فرایند فتوسنتز pH افزایش می‌یابد در حالی که طی فرایند تنفس در تاریکی CO_2 آزاد می‌گردد ولی این مقدار کمتر از۱۰ درصد کل تولیدات فتوسنتز می‌باشد. قابل ذکر است که برخی ترکیبات کربنی به صورت آلی در ترکیبات اسیدها و الکل‌ها در روش تغذیه میکسوتروفی می‌تولند فراهم گردد. برای مثال اسید استیک می‌تولند برای کنترل pH در چنین محیط‌هایی بکار برده شود (Martinot, 2005).

۸-۶-۲- نیتروژن

بعد از کربن نیتروژن مهم‌ترین عنصر در تولید بیوماس می‌باشد. مقدار نیتروژن در بیوماس سلولی از یک تا ۱۰ درصد بسته به گروه‌های مختلف جلبک و حتی بین گونه‌های مختلف با توجه به میزان دسترسی تغییر می‌کند. پاسخ عمده جلبک‌ها به کمبود نیتروژن به صورت از دست دادن رنگ (کاهش کلروفیل‌ها و افزایش کاراتونوئیدها) و تجمع ترکیبات کربنی آلی مثل پلی ساکاریدها و برخی روغن‌ها (PUFAs)[2] می‌باشد. نیتروژن عمدتاً به صورت نیترات جذب می‌شود ولی اغلب به صورت آمونیوم و اوره نیز با سرعت رشد مشابه جذب می‌شود. نیتروژن آمونیاکی در برخی ارگانیسم‌ها به عنوان منبع نیتروژن ترجیح داده می‌شود و جذب و ترکیب نیترات و آمونیوم به pH محیط کشت بستگی دارد. با مصرف آمونیوم به عنوان تنها منبع نیتروژن، pH به طور محسوسی افت می‌کند که ناشی از رها شدن H^+ در محیط می‌باشد.

[1] : واحد بر اساس گرم بیوماس خشک بر واحد سطح (متر مربع) و زمان (روز) استفاده شده است.

[2] Polyunsaturated fatty acids

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

هر گاه نیترات تنها منبع تأمین نیتروژن باشد، pH افزایش می‌یابد. برخی از سیانوباکترها قادرند عنصر نیتروژن را از احیا ازت اتمسفر به یون آمونیوم بدست آورند که یک فرایند کاتالیستی با حضور آنزیم نیتروژناز می‌باشد. البته مقدار ازت تثبیت شده در این فرایند خیلی کمتر از مقدار مورد نیاز برای سیستم‌های رشد سریع جلبک خواهد بود. تثبیت ازت اتمسفر وقتی برجسته می‌شود که در سیستم‌های رشد سریع جلبک اشکال دیگر نیتروژن محدودیت داشته و تثبیت ازت اتمسفر تنهاترین تأمین کننده نیتروژن در سیستم تولید انبوه باشد (Martinot, 2005; Kumar & Bera, 2020).

۸-٦-۳- فسفر

فسفر از عناصر ضروری برای رشد و خیلی از فرایندهای سلولی مثل انتقال انرژی، بیوسنتز اسیدهای نوکلئوئیک، DNA و غیره می‌باشد. شکل ترجیحی قابل جذب فسفر به صورت ارتوفسفات (PO_4^{-3}) بوده و برای جذب آن انرژی مصرف می‌شود. بیوماس جلبک حاوی کمتر از ۱ درصد فسفر است که اغلب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده در رشد بیولوژیکی جلبک می‌باشد. علت این امر پیوند آسان این عنصر با دیگر یون‌ها مثل کلسیم و آهن می‌باشد که موجب رسوب و غیر قابل دسترس شدن آن برای جلبک می‌شود. جلبک‌ها قادر به جذب بیش از حد فسفر هستند که به صورت پلی فسفات در سلول ذخیره می‌شود و این عمل را جذب تجملی یا لوکس[1] گویند. از فسفات ذخیره شده در هنگام محدودیت وجود فسفر در محیط استفاده می‌شود. فراهم کردن فسفر تحت تأثیر ترکیب بیوماس تولیدی نیز می‌باشد (Hu, 2004; Maizatul Azrina *et al*. 2021).

۸-٦-٤- سایر عناصر ماکرو و میکرو، کلات کننده‌ها و آب

غیر از کربن، نیتروژن و فسفر عناصر S، K، Na، Fe، Ca،Mg و عناصر کم مصرفی مثل B، Cu، Mn Zn، Mo ، V،Co و Se در ترکیب عناصر جلبک مشهود هستند. خیلی از عناصر کم مصرف در واکنش‌های آنزیمی برای سنتز بسیاری از ترکیبات نقش دارند. برای مثال Co در تولید ویتامین B_{12} ضروری است. حضور و قابل دسترس بودن این عناصر بایستی مورد پایش قرار گیرد زیرا این عناصر تمایل به ایجاد پیوند با فسفر و دیگر محتویات محیط کشت را داشته و در نتیجه رسوب کرده و از دسترس خارج می‌شوند. افزودن کلات کننده‌هایی مثل EDTA[2] به ویژه نمک دی سدیم آن که در آب محلول است مشکل را حل می‌نماید. در کشت‌های آزمایشگاهی آب مورد استفاده برای محیط کشت آب یک‌بار تقطیر یا دوبار تقطیر، آب فیلتر شده یا آب دیونیزه شده می‌تواند باشد. در مقیاس‌های بزرگ از آب‌های سطحی یا زیرزمینی یا آب شرب استفاده می‌شود. در استفاده از آب شرب باقیمانده کلر می‌تواند مشکل آفرین باشد لذا لازم است این آب‌ها به مدت دو روز در مخازن روباز نگهداشت و بعد از آن مدت مورد استفاده قرار داد (Richmond, 2008; Ana *et al*. 2018).

[1] Luxury uptake
[2] Ethylenediaminetriacetic acid

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-۷- عوامل فیزیکی موثر در جذب عناصر غذایی توسط جلبک‌ها

جذب عناصر غذایی به کلیه عواملی که در رشد جلبک اعم از نور، دما و بهم زدن موثرند، بستگی دارد. در طول انجام فتوسنتز میزان جذب به مقدار انرژی نورانی قابل دسترس بستگی خواهد داشت. در حالی که در شدت‌های نور اشباع، میزان جذب عناصر غذایی مقدار ثابت می‌باشد. اثرات دمایی که ضریب دما نیز گفته می‌شود در فعالیت‌های آنزیمی تأثیر گذاشته به طوری که با افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد، میزان فعالیت آنزیمی هم ۲ برابر می‌شود (Richmond, 2008). هم زدن محیط کشت جلبک یکی از عوامل اساسی در تولید حداکثر بیوماس سلولی می‌باشد هرچند در تراکم سلولی کم همزدن محیط تأثیر زیادی روی میزان تولید بیوماس نشان نداده ولی در تراکم سلولی بالا به دلیل نقش همزدن و اختلاط در میزان تولید می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

- جلوگیری از رسوب سلول‌های جلبک در محیط کشت و انتشار یکنواخت سلول‌ها در محیط
- جلوگیری از تجمع مواد آلی حاصل از مرگ و میر سلول‌ها در یک نقطه از محیط و فساد آن‌ها در اثر تخمیر بی هوازی
- کاهش لایه محدود کننده اطراف سلول و در نتیجه افزایش انتقال مواد غذایی و گازها به سلول جلبک
- جلوگیری از تجمع اکسیژن محلول حاصل از فتوسنتز به ویژه در اواسط روز که فتوسنتز در حداکثر مقدار خود می‌باشد
- ایجاد امکان دسترسی سلول‌ها به انرژی نورانی در تراکم سلولی بالا
- افزایش تناوب دوره های تاریکی–روشنایی (Richmond, 2008).

۸-۸- اهمیت و بازار مصرف جلبک‌ها

بیش از ۷۰ درصد از سطح زمین را آب پوشانده است که از عمده‌ترین گروه موجودات آن می‌توان به جلبک‌ها اشاره کرد. اکثر این موجودات که در آب زندگی می‌کنند و قابلیت حیاط در سرتاسر محیط زیست را دارا می‌باشند. جلبک‌ها بعنوان تولید کنندگان عمده مواد غذایی تأثیر بسزایی در پایداری اکوسیستم دریا دارند و از این رو منبع غذایی مناسبی برای سایر جانداران آبزی به شمار می‌روند (Stengel et al. 2011). در پی کمبود منابع غذایی، بشر کنونی به دنبال منابع غذایی جدید جهت تامین نیازهای روزافزون خود بوده است. یکی از این منابع غذایی که از چندین دهه پیش مورد توجه قرار گرفت، جلبک بود. تولید جلبک و مشتقات آن توانایی بالقوه‌ای برای تبدیل به شاخه بسیار مهم از بخش بیوتکنولوژی کشاورزی دارد. جلبک‌ها جز ساده‌ترین موجودات کلروفیل‌دار بشمار می‌آیند. با آنکه گفته می‌شود جلبک‌ها موجودات بسیار ساده‌ای هستند ولی این تعریف در مورد تمام آن‌ها عمومیت ندارد. در بعضی از موارد این موجودات نه تنها ساده نیستند بلکه از بسیاری از جهات پیشرفته، تکامل یافته و دارای ساختار رویشی و زایشی بسیار پیچیده هستند. برخی از انواع جلبک‌ها برای تولید پروتئین‌ها، آستاگزانتین، بتاکاروتن، گلیسرول، سوخت‌های زیستی، داروهای مختلف و همچنین مواد شیمیایی مطلوب کشت می‌شوند (Mimouni *et al*. 2012; Sathasivam *et al*. 2019).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

امروزه دانشمندان و محققین به دنبال یافتن مواد و پیش‌سازهایی هستند که از جانوران، گیاهان، باکتری‌ها، جلبک‌ها و سایر موجودات به صورت طبیعی به دست آید، علت این امر آن است که تولید مواد مذکور از این طریق از لحاظ اقتصادی بسیار مرقوم به صرفه بوده و همچنین سازگاری بیشتری با سیستم‌های بیولوژیک نسبت به مواد شیمیایی مشابه دارند. به طور نمونه با کشف رنگ‌های مصنوعی تقاضا برای رنگ‌های طبیعی کاهش یافت زیرا عصاره‌های طبیعی فاقد قوام لازم جهت ایجاد طیف‌های مختلف رنگ بودند، همچنین مقاومت کافی در برابر نور و حرارت را دارا نبودند. رنگ‌های طبیعی تغییر پذیر بوده و اغلب استفاده از آن‌ها نسبت به رنگ‌های مصنوعی مشکل‌تر می‌باشد. در طول دهه‌های گذشته به جهت بررسی‌های گسترده‌ای که انجام شد دانشمندان به این نتیجه رسیدند که رنگ‌های مصنوعی سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند و باعث ایجاد بیماری سرطان می‌شود در نتیجه مصرف قسمت عمده‌ای از این رنگ‌ها در مواد غذایی غیرمجاز اعلام شد و رنگ‌های طبیعی جایگزین آن‌ها شدند. رنگ‌های طبیعی ممکن است از منابع طبیعی بدست آیند و یا اینکه از طریق سنتز ساخته و تهیه شوند. بطورکلی افزودن این مواد، به محصولات غذایی کاملاً مجاز و آزاد است. به همین دلیل به آن‌ها رنگ‌های بی‌نیاز به تائید می‌گویند. علاوه بر محیط های آبی، در سطح خاک‌های مرطوب نیز تعداد بسیار زیادی جلبک یافت می‌شود. بخش‌های هوایی درختان و همچنین سنگ‌ها و صخره‌ها محل‌های دیگری هستند که جلبک‌ها می‌توانند بر روی آن‌ها رشد کنند. بعضی از جلبک‌ها می‌توانند در محیط‌های غیرمعمولی، مثل دریاچه‌های نمک، چشمه‌های آب‌گرم و یخچال‌های طبیعی و حتی در درون بدن و بافت‌های موجودات زنده زیست کنند. جلبک‌های تک سلولی جزء اولین زنجیره‌های غذایی می‌باشند که با مصرف دی اکسید کربن، اتمسفر و تولید اکسیژن زمینه حیات جانوری و گیاهی را در کره خاکی فراهم آورده‌اند. ریزجلبک‌ها گروهی از جلبک‌ها هستند که برخی انواع آن برای تولید پروتئین‌ها، کاروتنوئیدها (آستاگزانتین ، بتاکاروتن)، گلیسرول، سوخت‌های زیستی، داروهای مختلف و همچنین ترکیبات شیمیایی با ارزش بالا کشت می‌شوند (Spolaore *et al*. 2006; Sathasivam *et al*. 2019). جلبک‌ها علاوه براین که بعنوان منبع غذایی موجود آبزی مطرح هستند از طرف دیگر منجر به بهره‌مندی سایر موجودات از متابولیت‌های ثانوی تولید شده توسط جلبک‌ها می‌شوند. جلبک‌ها بر اساس تعداد سلول‌های تشکیل دهنده آن‌ها می‌توانند به دو گروه تک‌یاخته و پریاخته تقسیم شوند. هم‌چنین این طبقه‌بندی تحت عنوان میکروجلبک یا فیتوپلانکتون و ماکروجلبک شناخته می‌شود. دیواره یاخته‌ای در جلبک‌ها بسیار حائز اهمیت است. علت آن وجود مواد مختلفی است که بعضی از آن‌ها کاربرد صنعتی، دارویی و پزشکی دارند. یاخته‌های زایشی از قبیل گامت‌ها و زئوسپورها فاقد دیواره یاخته‌ای هستند. دیواره یاخته‌ای در جلبک‌ها معمولا از ۲ لایه تشکیل شده است لایه بیرونی لایه‌ای است ژلاتینی از مواد پکتینی ساخته شده و در آب گرم حل می‌شود. لزج بودن جلبک‌ها بدلیل وجود این لایه بیرونی است. اغلب جلبک‌ها یا خود متحرک‌اند و یا یاخته‌های زایشی آن‌ها متحرک است. در بین جلبک‌ها فقط دو گروه یعنی جلبک‌های سبز–آبی و جلبک‌های قرمز از این قاعده مستثنی هستند. فرم‌های متحرک و یاخته‌های زایشی متحرک در آن‌ها دیده نمی‌شود. وسیله حرکت یاخته‌ای متحرک، تاژک نام دارد که از نظر شکل ظاهری بر دو نوع است. یکی تاژک شلاقی که سطح آن صاف و دیگری تاژک پر مانند که سطحی ناصاف و همانند پر دارد. همچنین تعداد تاژک و محل قرار گرفتن در جلبک‌های گوناگون متفاوت است. تولید مثل در جلبک‌ها به دو روش غیر جنسی و جنسی صورت می‌گیرد. تولید مثل غیر جنسی یا رویشی توسط یاخته‌های رویشی معمولی انجام می‌شود بدون آنکه در دیواره یاخته اصلی تغییری حاصل گردد قطعه قطعه شدن کلونی، ریسه یا بطورکلی تال، تقسیم یاخته‌ای به صورت دوتایی و تغییر شکل یاخته‌های رویشی و تبدیل آن‌ها به یاخته‌های مقاوم و زایشی از انواع تولید مثل رویشی بشمار می‌آیند. تولید مثل

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

غیر جنسی، روش معمولی و طبیعی جلبک‌هاست که در این حالت هاگ‌های متحرک به نام زئوسپور و یا غیر متحرک بنام آپلانسپور در کیسه‌هایی به نام هاگدان بوجود می‌آیند. تولید جلبک و مشتقات آن توانایی بالقوه‌ای برای تبدیل به شاخه بسیار مهم از کشاورزی دارد و باید بطور فعالانه‌ای دنبال گردد. جلبک‌های اتوتروف نیازمندی‌های مواد آلی را از همان مواد پایه‌ای اکسید شده ضروری برای تمام گیاهان به دست می‌آورند. همچنین جلبک یک واحد تولیدی است که دی اکسیدکربن را از هوا خارج ساخته و بدون رهاسازی هیچ بقایای آلاینده، اکسیژن، محصولات شیمیایی مفید و غذا تولید می‌کند (کاسول و زیلبرمن، ۲۰۰۰). در سال‌های اخیر توسعه علوم داروسازی و حرکت بسوی کاربرد بیوتکنولوژی در صنایع شیمیایی منجر به استفاده وسیع از جلبک‌ها شده است (Deshpande, 2005; Ashfaq *et al*. 2021). از اهمیت جلبک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جلبک ها ۱۰۰-۱۰ برابر بیشتر از گیاهان روی زمین CO_2 هوا را مصرف می‌کنند.
- می‌توانند در محیط آبی رشد کرده و به راحتی به CO_2 و مواد مغذی دسترسی داشته باشند.
- توسط انسان و حیوانات مصرف شوند.
- تنوع گونه ای بالایی دارند.
- انواع مختلفی از موادرا می‌توانند تولید کنند
- منجر به کاهش CO_2 می‌شوند.
- منجر به بازیافت مواد می‌شند.

جلبک‌ها یکی از فعال‌ترین موجودات فتوسنتزکننده و دارای کلروفیل باتراکم بالا هستند، اما دیواره سلولی آن‌ها سلولزی و قابل هضم می‌باشد. در هیچ گیاه دیگری میزان کلروفیل به این حد نیست. جلبک‌ها همانند جانوران، مواد ذخیره غذایی ساخته شده از نوعی نشاسته و پروتئین دارند، اما برخلاف آن‌ها فتوسنتز می‌کنند. آن‌ها همانند باکتری‌ها قابلیت سازگاری با شرایط مختلف طبیعی را دارند. اطلاعات ژنتیکی آن‌ها به آسانی مبادله می‌شود، اما وجود کلروفیل آن‌ها را از باکتری‌ها متمایز می‌سازد. تعداد میکروجلبک‌ها را بین ۲۲۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ تخمین می‌زنند که از بین آن‌ها ۵۰ میکروجلبک، بصورت صنعتی تولید می‌شوند (Ugwu *et al*. 2008; Hemaiswarya *et al*. 2013). از مهمترین میکروجلبک ها که به صورت صنعتی تولید و استفاده می‌شوند می‌توان به گونه‌های زیر اشاره نمود: Scenedesmus, Chlamydomonas Spirulina, Dunaliella, Hematococcus, Chlorella.

از نظر تغذیه‌ای میکروجلبک‌ها منبع غنی از پروتئین، کربوهیدرات، ویتامین‌های طبیعی، مواد معدنی و به ویژه اسیدهای چرب ضروری هستند. میکروجلبک‌ها علاوه بر طبقه‌بندی به عنوان غذا، با کاربردهای متفاوتی مانند مکمل غذایی، رنگدانه، غذای آبزیان، تثبیت کننده ازت و کود بیولوژیک نیز تولید شده‌اند (Richmond, 2008: Elwi *et al*. 2021: Tokuşoglu and Üunal, 2003). در مورد کاربرد وسیع میکروجلبک‌ها مقالات و نوشته‌های فراوانی وجود دارد. میکروجلبک‌ها در سطح وسیعی چون غذاهای سالم، افزودنی‌های غذایی، رنگدانه‌ها، همچنین استفاده در رژیم غذایی پرورش آبزیان، به عنوان عامل تنظیم کننده رشد و در تصفیه فاضلاب‌ها کاربرد دارند، از مهم‌ترین کاربردهای جلبک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۸-۸-۱- استفاده از جلبک‌ها به عنوان غذای انسان

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

نقش جلبک‌ها در زنجیره غذایی به عنوان منبع تأمین کننده مواد غذایی آبزیان، بسیار مهم و حیاتی است. انسان نیز با استفاده از موجودات دریایی از قبیل ماهی، خرچنگ، نهنگ و غیره به طور غیر مستقیم از این بابت سود می‌برد. از سوی دیگر، استفاده مستقیم از جلبک‌ها به عنوان غذا توسط انسان از قدمت قابل توجهی برخوردار است. امروزه کلرلا ولگاریس به عنوان ماده افزودنی غذایی[1] و مکمل‌های غذایی[2] به صورت مستقیم در اشکال قرص، پودر، عصاره و به صورت غیرمستقیم به شکل مکمل غذایی انسان (پودر افزودنی در ماکارونی، کیک، نان، کلوچه، شکلات، نوشابه، بستنی، پنیر و سس مایونز) مصرف می‌شود. در آمریکای جنوبی، نوعی جلبک قهوه‌ای را جمع‌آوری کرده و پس از خشک کردن و نمک زدن، به تدریج به مصرف تغذیه می‌رسانند. جلبک‌های قهوه‌ای در حدود ۱۵ درصد پروتئین، ۱۷ نوع اسید آمینه، ۱/۵۶ درصد چربی و ۵۷ درصد کربوهیدرات دارند. به علاوه، مقادیر مناسبی از مواد معدنی، کاروتن و برخی مواد دیگر را دارا می‌باشند. از جلبک‌های قرمز جنس‌های پورفیرا و کوندروس معروفند. پورفیرا از مهم‌ترین جلبک‌های قرمز است که توسط انسان به عنوان غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کشورهای ژاپن، اسکاتلند، انگلستان و آمریکا، با این جلبک‌ها غذاهای محلی خاصی تهیه می‌کنند. در ژاپن سالانه مقادیر زیادی از این جلبک را به طور انبوه پرورش می‌دهند. روش مرسوم در ژاپن اینست که بخش‌هایی از ساحل را در ماه‌های اکتبر تا نوامبر به وسیلهٔ فرو کردن نی‌های بامبو، محصور می‌کنند و سپس با استفاده از تورهای نایلونی یا الیاف گیاهی، بستر کشت جلبک پورفیرا را فراهم می‌سازند. استفاده از پورفیرا در ژاپن قدمتی ۳۰۰ ساله دارد و کشت انبوه آن سالانه درآمد هنگفتی را برای کشور ایجاد می‌نماید. در ژاپن به تنهایی حدود ۳۰ هزار تن پورفیرا در سال مصرف می‌شود. جلبک پورفیرا غنی از ویتامین‌های A, B, C, D و E است و مقدار قابل توجهی پرئتئین دارد. هر ۱۰۰ گرم پورفیرا به طور میانگین ۱۱/۴ گرم آب، ۳۵/۶ گرم پروتئین، ۰/۷ گرم چربی، ۳/۴۴ گرم کربوهیدرات و ۸ گرم مواد معدنی دارد. در ژاپن روزانه ۱۷ میلیون مصرف‌کننده ریزجلبک وجود دارد. در این کشور سالانه ۲۰۰۰ تن ریزجلبک مصرف می‌شود و حجم تجارت سالانه آن بیش از ۵۰۰ میلیون دلار می‌باشد، که این میزان برای کل جلبک‌ها در سال ۱۹۹۹ بالغ بر ۶ میلیارد دلار بوده است (Richmond, 2008; Ferdouse, *et al*. 2018). جلبک قرمز کوندروس به مقدار زیادی در آمریکا و اروپا به مصرف می‌رسد. از جلبک‌های سبز، جنس‌های اولوا و کلرلا معروفند. از اولوا که به خاطر شباهت پهنک آن به برگ کاهوی دریایی شهرت دارد، برای تهیه سالاد و سوپ استفاده می‌شود. یک گونهٔ معروف آن Ulva lactuca است. کلرلا از جلبک‌های تک یاخته‌ای آب‌های شیرین است و به راحتی به صورت انبوه کشت می‌شود. در کشور کوچک تایوان سالانه بیش از ۱۵۰۰ تن پودر جلبک کلرلا تولید می‌گردد. این جلبک در حدود ۳۰ درصد پروتئین، ۱۵ درصد چربی، ۳۰ درصد کربوهیدرات و ۵ درصد مواد معدنی دارد و در شرایط مناسب تا ۵۰ درصد وزن خشک این جلبک را پروتئین و ۸/۵ درصد آن را چربی ها تشکیل می‌دهند. پروتئین‌موجود در کلرلا تمام اسیدهای امینه ضروری را دارا هستند، از این رو در مسافرت‌های فضایی به عنوان فضایی به عنوان غذا مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروجلبک‌ها با همه امتیازات برجسته، ارزنده ترین ماده زیستی روی کره زمین محسوب می‌شوند. آن‌ها پایه و اساس زنجیره غذایی بوده و از قدرت تکثیر بالایی برخوردارند.

۸-۸-۲- استفاده از جلبک‌ها به عنوان خوراک دام، طیور و آبزیان

[1] Food additive
[2] Food supplement

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مصرف جلبک‌های میکروسکوپی به عنوان خوراک دام باعث تسریع رشد دام‌ها و بالا رفتن مقدار چربی در شیر آن‌ها می‌شود. در پرورش طیور مصرف جلبک‌ها موجب افزایش مقدار زردهٔ تخم، افزایش دفعات تخم‌گذاری، خوابیدن بر روی تخم‌ها و تولید جوجه بیشتر می‌شود. همچنین جلبک‌های میکروسکوپی یکی از منابع غذایی مهم موجودات آبزی از جمله صدف‌های دوکفه‌ای و بعضی از گونه‌های ماهی‌ها و زئوپلانکتون‌ها هستند. امروزه در بعضی از نقاط جهان بیش از ۴۰ گونه از جلبک‌های میکروسکوپی از جمله کلرلا جهت کشت به عنوان غذای آبزیان استفاده می‌شود (Janelt *et al*. 1997; Saadaoui *et al*. 2021).

۸-۸-۳- استفاده از جلبک‌ها در کشاورزی

استفاده از عصاره جلبک‌ها به عنوان کود موجب اصلاح بافت خاک، تسریع در رویش بذر و ازدیاد مقاومت گیاه در مقابل حمله قارچ‌ها و حشرات می‌گردد (Janelt *et al*. 1997).

۸-۸-٤- استفاده از جلبک‌ها در تصفیه فاضلاب و پساب‌ها

فاضلاب‌هایی که عمدتاً از ضایعات صنعتی و شهرنشینی ایجاد شده باشند دارای بسیاری از ترکیبات آلی و معدنی هستند که در آن‌ها حل شده و به حالت معلق در آمده است. تصفیه چنین فاضلاب‌هایی غالباً یک فرایند اکسیژن خواه تلقی می‌شود زیرا برای تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌ها به اکسیژن نیاز است. یکی از راه‌های تأمین اکسیژن به صورت طبیعی، ایجاد اکسیژن به صورت بیولوژیکی است که برخی از جلبک‌ها نظیر *Chlorella*، *Chlamydomonas* و *Euglena* در این پدیده بسیار مؤثر واقع می‌شوند. اکسیژنه نمودن فاضلاب‌ها به خصوص در توده‌های کوچک نظیر استخرها ضرورت دارد تا بوی بد از آن‌ها برطرف گردد. همچنین از آنجایی که جلبک‌ها با جذب مواد معدنی از جمله نیترات، فسفات و کاتیون‌های مختلف قادر به تولید مواد آلی مورد نیاز خود هستند لذا از پتانسیل آن‌ها می‌توان در اکوسیستم‌های آبی جهت پالایش و حذف برخی آنیون‌ها و کاتیون‌های آلاینده بهره جست. از مزایای عمده این روش می‌توان به تولید همزمان ریزجلبک در حین فرایند تصفیه اشاره کرد. به این ترتیب جلبک‌ها نقش مهمی را در تصفیه فاضلاب‌ها به عهده دارند که گاه به صورت طبیعی این پدیده انجام می‌شود (Hammouda, 1995; Mohsenpour *et al*. 2021).

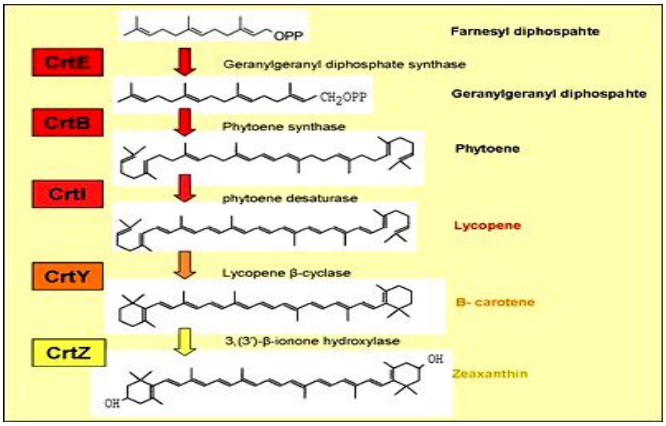
۸-۸-۵- استفاده از جلبک‌ها در تولید رنگدانه‌ها (کاراتنوئیدها)

کاروتنوئیدها[1] یکی از بزرگترین و گسترده‌ترین گروه‌های مشتق شده از پیگمانت‌های[2] طبیعی هستند که بوسیله همه موجودات فتوسنتز کننده[3] و اغلب موجودات غیرفتوسنتز کننده[4] مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها و گیاهان عالی

[1] Carotenoid
[2] Pigmant
[3] Photosynthesis
[4] Nonphotosynthesis

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

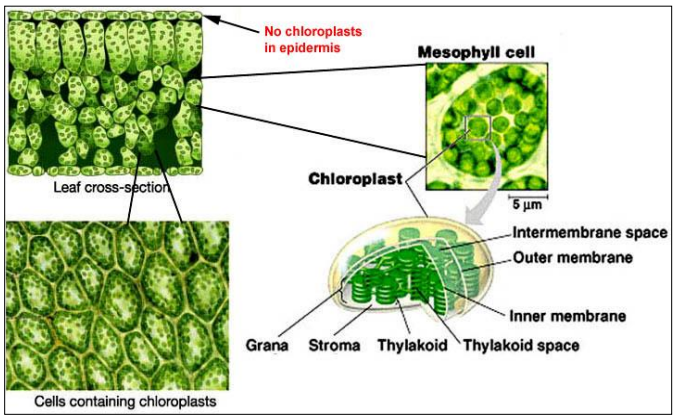
تولید می‌شـــوند (Goettsch and Enzing, 2014). در جانداران فتوســـنتز کننده عموما کاروتنوئیدها خانواده‌ای از رنگیزه‌های زرد و نارنجی را تشکیل می‌دهند که با ساختارهای متنوع و عملکردهای متفاوت وجود دارند. حداقل ۷۰۰ نوع کاروتنوئید از منابع طبیعی پیدا شـده اسـت. کاروتنوئیدها در فضـای غشـای داخلی تیلاکوئید کلروپلاسـت تجمع می‌یابند. بیشـــتر کاروتنوئیدها ایزوپرنوئیدهای[1] چهل کربنی هســـتند که از ۸ واحد ایزوپرنی تشـــکیل شـــده‌اند. کاروتنوئیدهای طبیعی شـــناخته شـــده عبارتند از زگزانتین[2]، آســـتاگزانتین[3]، کانتاگزانتین[4]، بتاکاروتن[5]، آلفاکاروتن[6]، لیکوپن[7] و لوتئین[8]. بتاکاروتن[9] که کاربردهای مختلفی برای انسان دارند. گوناگونی در نحوه در هم آمیختن پیوندهای دوگانه در طول زنجیره عامل تفاوت در مشـــخصـــات جذب طیفی و خاصـــیت فتوشـــیمیایی در کاروتنوئیدهاســـت. کاروتنوئیدها نقش مهمی در شـــرایط فتوســـنتز و انتقال اکســـیژن به عنوان پیگمانت‌های جانبی بازی می‌کنند و از اندام‌های فتوسنتز کننده بر علیه آسیب‌هایی که توسط فتواکسیدانت‌ها ایجاد می‌شود محافظت می‌کنند. نقش حیاتی کاروتنوئیدها در خاموش کردن اکسیژن یکتایی ($^1O_2$) و رادیکال‌های آزاد[10] که از تخریب متابولیسـمی بافت‌ها تولید می‌شوند بسیار با ارزش است. در علوم پزشکی کاروتنوئیدها در پروسه‌ی پیشگیری و کنترل برخی از انواع بیماری‌ها مانند بیماریهای قلبی، آب مروارید[11] و برخی ســـرطان‌ها نقش بســـیار مهمی دارند. کاروتنوئیدها همچنین به عنوان آنتی اکســـیدان‌ها و پیش ماده فعال‌کننده تولید ویتامین A، در صـــنایع داروســـازی و غذایی کاربردهای ویژه‌ای پیدا کرده‌اند (Hemmi *et al*. 2003).



شکل (۸-۲) ساختارهای کاروتنوئیدها

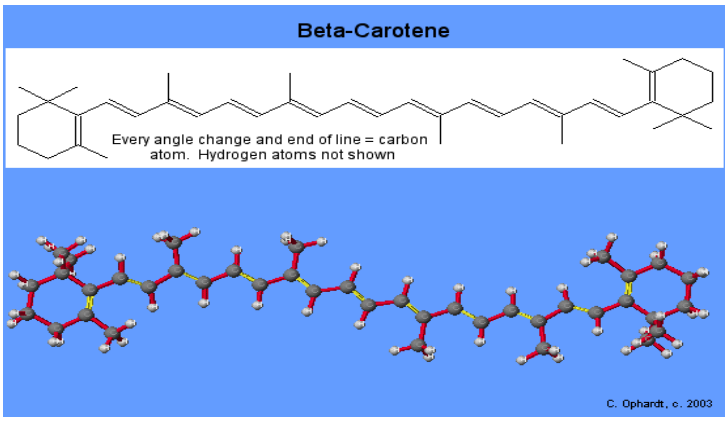
[1] Isopernoid
[2] Zeaxanthin
[3] Astaxanthin
[4] Canthaxathin
[5] β-Carotene
[6] α-Carotene
[7] Lycopene
[8] Lutein
[9] β-carotene
[10] Free radical
[11] Cataract

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۸-۳) تجمع بتاکاروتن در فضای غشای داخلی تیلاکوئید

یکی از مهمترین اعضای کاروتنوئیدها، بتاکاروتن است که با ساختارهای مختلفی که به علت در هم آمیختن هر کدام از پیوندهای دوگانه که در طول زنجیره ایزوپرنوئیدی ایجاد می‌شود باعث بوجود آمدن همه استروایزومرهای ترانس ۹،۱-سیس، ۳،۲-سیس و ۱۵-سیس به عنوان منابع طبیعی بتاکاروتن می‌شود. استروایزومرهای بتاکاروتن جنبش‌ها و فعالیت‌های مختلف زیستی از خود نشان می‌دهند (Amotz and Avron, 1982). بتاکاروتن طبیعی به دلیل محلول بودن در چربی نسبت به بتاکاروتن سنتز شده به روش شیمیایی دارای کاربردهای فراوانی است. بتاکاروتن دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی[3] است. یک مولکول بتاکاروتن بیش از هزار مولکول اکسیژن رادیکال آزاد[4] را خنثی می‌سازد (Kamal-Eldin and Appelqvist, 1996).



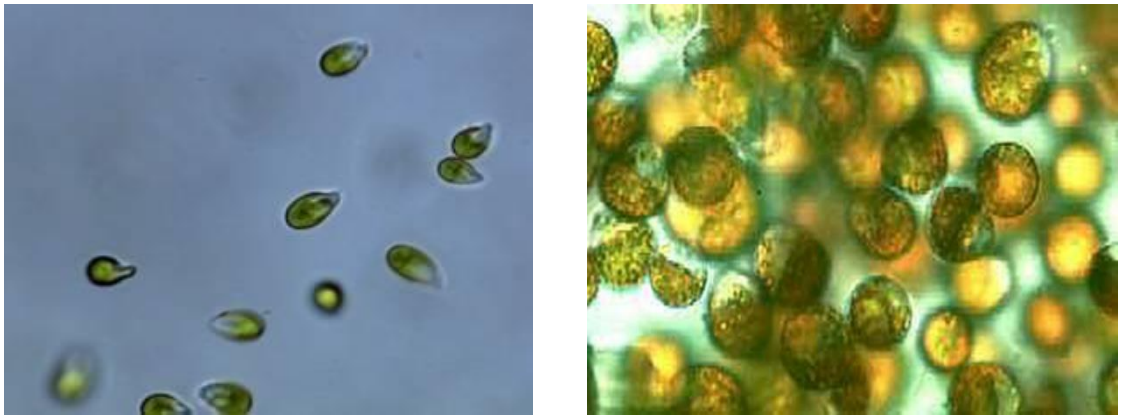
شکل (۸-۴) نمایی از ساختار بتاکاروتن

اولین بار ماسیوک (Masyuk, 1965) به اهمیت جلبک دونالیلا سالینا به عنوان منبع اقتصادی استخراج بتاکاروتن طبیعی اشاره کرد. قیمت بتاکاروتن طبیعی استخراج و خالص شده بسیار بالاتر از نوع مصنوعی آن است (بیش از

[1] steroisomer trans
[2] 9-cis
[3] anti oxidant
[4] Radical free

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار در مقابل ۴۰۰ تا ۸۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم) با این وجود این اختلاف قیمت در آینده با افزایش منابع بتاکاروتن طبیعی و تولید در سطح تجاری کاهش خواهد یافت. نژادهای دونالیلای رشد یافته در دریاچه‌های بسیار شور، که اغلب از منبع نیتروژن کم و تشعشعات نوری بالایی برخوردارند، بدلیل انباشتگی بالای بتاکاروتن رنگ قرمزی از خود نشان می‌دهند. بتاکاروتن در دونالیلا در داخل دلنه‌های روغنی فضاهای داخل تیلاکوئیدی کلروفیل انباشته می‌شود که شامل استروایزومرهای ۹- سیس و all- ترنس است. بتاکاروتن انباشته شده، دونالیلا را بر علیه شدت بالای نوری که در محل طبیعی در معرض آن هستند، با جذب انرژی درطیف آبی محافظت می‌کند. بعضی از سویه‌های دونالیلا، بویژه دونالیلا سالینا[1] و دونالیلا بارداویل[2] قادر به تجمع میزان بالایی از کاروتنوئیدها در شرایط رشد اختصاصی هستند.



شکل (۸-۵) تصویر میکروسکوپی از ریزجلبک دونالیلا

تحت شرایط مناسب، بعضی از سویه‌های دونالیلا می‌توانند تا ۱۳ درصد یا بیشتر وزن خشک خود در درون خود بتاکاروتن انباشته نمایند. دونالیلا به علت بهرهء اقتصادی که دارد در کشورهای فلسطین اشغالی، چین، آمریکا، استرالیا و مکزیک (**Error! Reference source not found.**۶) از تاریخ ۱۹۸۰ کشت می‌شود (Raja et al. 2007). همچنین اهمیت دونالیلا به علت رشدی که در نواحی ویژه گرمسیری دارد و نیز قیمت بالا و عملکردهای بالایی که در کشت‌های باز از خود نشان می‌دهد بسیار در تولید بتاکاروتن مورد توجه است (Raja et al. 2007).

[1] Dunaliella Salina
[2] Dunaliella bardawil

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۸-۶) کشت جلبک دونالیلا در سراسر جهان بعنوان منبع تولید بتاکاروتن

۸-۸-٦- استفاده از جلبک‌ها در تولید اسیدهای چرب

از اسیدهای چرب عمده‌ای که توسط جلبک‌ها سنتز می‌شوند عبارتند از:

- EPA کانتاگزانتین
- اسیدهای چرب دی هیدروکسی اسید (DHA) و ویلوگزانتین
- لینولئیک
- پالمیتیک اسید

در مورد اسیدهای چرب مربوط به ریزجلبک‌ها می‌توان چنین عنوان کرد که منجر به کاهش مشکلات قلبی شده و همچنین فعالیت ضدسرطانی و ضدمیکروبی از خود نشان می‌دهند. ترکیب چربی ریز جلبک‌ها برای مقاصد مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد، در اقیانوس شناسی به دلیل نقش آن‌ها در ایجاد کشندهای سمی و نشانگر زیستی، در آبزیپروری به دلیل تغذیه آبزیان در مراحل لاروی و در نهایت برای تولید سوخت زیستی مورد بررسی قرار می‌گیرند (Gordillo *et al*. 1998). محتوای هیدروکربنی جلبک‌ها مانند اسیدهای چرب و آسیل گلیسرول‌ها توانایی جایگزین شدن سوخت‌های فسیلی را دارند (Gordillo *et al*. 1998). ریز جلبک‌ها قادرند با شرایط مختلف محیطی سازگار شوند. بنابراین امکان یافتن شرایط محیطی مناسب‌تر از لحاظ رشد و تولید چربی در گونه‌های مختلف ریز جلبکی بیش‌تر است. درحالی که امکان چنین تغییری در سایر منابع سوخت زیستی مانند سویا، کلزا و آفتابگردان وجود ندارد (Halim *et al*. 2012). تغییر شرایط محیطی علاوه بر تأثیر بر میزان رشد و تولید چربی می‌تواند بر کیفیت لیپید ریز جلبک‌ها نیز اثرگذار باشد (Azachi *et al*. 2002). ترکیب چربی جلبک‌ها تا حد زیادی به عوامل ژنتیکی و محیطی بستگی دارد (Nuzzo *et al*. 2013). ریز جلبک‌ها ترکیبی از اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع ۱۲ الی ۲۲ کربنه تولید می‌کنند که برخی از آن‌ها از خانوادهای امگا۳ و امگا ۶ می‌باشند (Mata *et al*. 2010). ترکیب اسیدهای چرب ریز جلبک‌ها تأثیر بسیاری بر کیفیت سوخت زیستی تولید شده دارد و تا حد زیادی به نسبت

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

اسیدهای چرب اشباع به غیراشباع بستگی دارد. در مطالعات قبلی اثرات غلظت‌های متفاوت (۰/۰۱٪، ۰/۰۳٪، ۳٪، ۹٪ و ۱۲٪ CO2) در تولید بیومس، تجمع لیپید و پروفیل اسید چرب و همینطور خواص بیودیزل در ریزجلبک salina Dunaliella مورد بررسی قرار گرفت (Abd El Baky et al. 2014). نتایج نشان داد که میزان CO2 اثرات بارزی در ترکیب اسید چرب دونالیلا داشت. لینولنیک اسید و پالمیتیک اسید، اسیدهای چرب عمده در سلول‌های این جلبک بودند. بر اساس این نتایج D. salina می‌تواند برای تولید بیومس در دریاچه‌ها و مرداب‌ها، بعنوان جایگزینی جهت راهبرد کاهش CO2 و بعنوان یک مواد اولیه برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرد (Abd El Baky et al. 2014).

۸-۸-۷- استفاده از جلبک‌ها به عنوان منبع پروتئین‌ها

از مهم‌ترین اثرات کاربردی پروتئین جلبک‌ها افزایش مقاومت سیستم ایمنی بدن، خاصیت ضد سرطانی، افزایش مقاومت به هپاتیت، ضد التهاب و خاصیت آنتی‌اکسیدانی می‌باشد. اسپیرولینا حاوی حدود ۷۰ درصد پروتئین است و به همین دلیل جلوی احساس گرسنگی را می‌گیرد. در واقع مانند یک ضداشتها عمل می‌کند. پروتئین‌ها باعث افزایش سرعت ارسال احساس سیری به مغز می‌شوند و همین امر هم به کنترل وزن کمک می‌کند (Bleakley & Hayes *et al*. 2017: Diplock *et al*. 1999).

۸-۸-۸- استفاده از جلبک‌ها به عنوان منبع ویتامین‌ها (توکوفرول‌ها)

مهم‌ترین ویتامین تولیدی جلبک‌ها ویتامین E می‌باشد که منجر به خاصیت آنتی اکسیدانی می‌شود. جلبکها از نظر ترکیب دارای مقادیر قابل ملاحظه ای انواع کربوهیدراتها، مواد معدنی و انواع ویتامینها و نیز یونهای پتاسیم، ید، سدیم و همچنین اسید آلژنیک و غیره بوده که شامل خواص درمانی چون کاهش کلسترول خون، کاهش فشار خون، جلوگیری از تصلب شرایین، خواص ضد توموری، درمان تیرویید و برطرف نمودن علایم کمبود ویتامین A و غیره می‌باشد (Gouveia *et al*. 2006; Agrawal & Agrawal, 2018).

۸-۸-۹- استفاده از جلبک‌ها برای تولید فنل‌ها و ترکیبات فرار

این مواد منجر به خاصیت ضد سرطانی شده و هم‌چنین اثرات ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند. ترکیبات فنلی به عنوان دهنده‌ی الکترون عمل می‌کنند و ممکن است واکنش‌های ناخواسته‌ی ایجاد شده با رادیکال‌های آزاد در بدن را خنثی کند (Manian *et al*. 2008). ترکیبات فنلی در (جلبک‌های دریایی) در همبستگی با فعالیت آنتی اکسیدانی و وابسته به حلال و همچنین گونه‌ی جلبکی هستند که برای عصاره گیری استفاده می‌شوند. ما می‌توانیم به راحتی ترکیبات فنلی را با آب استخراج کنیم و با استفاده از آن ها تاثیرات آنتی اکسیدانی بالایی داشته باشیم (Horincar *et al*. 2011). امروزه ایالات‌متحده‌ی آمریکا، چین، تایلند، ویتنام، هند، مکزیک و شیلی جزو بزرگ‌ترین

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

تولیدکننده‌های جلبک هستند. از بزرگ‌ترین کشورهای مصرف‌کننده‌ی آن نیز ژاپن، روسیه، هند و آفریقا به خصوص کشورهای قحطی‌زده را می توان نام برد.
استفاده های صنعتی جلبک تقریباً ۸-۷/۵ میلیون تن (وزن تر جلبک استحصالی از دریا یا پرورشی) در سال می‌باشد. برداشت تجاری آن در ۳۵ کشور جهان از نیمکره شمالی تا جنوبی، در آبهای سرد، معتدل تا تروپیکال صورت می گیرد. در ایران جلبک های دریایی در سواحل جنوبی کشور به ویژه در سواحل سیستان و بلوچستان (چابهار) فراوان یافت می شوند که بر اساس تقسیم بندی گیاه شناسان از هر سه گروه جلبک های سبز یا کلروفیت، جلبک های قهوه ای یا فیتوفیت و جلبک های قرمز یا رودوفیت در این منطقه وجود دارند. کشور چین یکی از بزرگترین تولید کنندگان جلبک‌های خوراکی در دنیا بوده که سالانه حدود ۵ میلیون تن برداشت می کند. در سال ۱۹۹۹، میزان برداشت جلبک‌ها در حدود ۱۰۰۰ تن ماده خشک برآورد شده است. این میزان تولید در سال ۲۰۰۴ با افزایش ۵ برابری به ۵۰۰۰ تن ماده خشک افزایش پیدا کرد. در سال ۲۰۱۱ تولید جلبک افزایش چشمگیری داشت و به ۹۰۰۰ تن ماده خشک در سال رسید. در دهه‌های گذشته ۷۵ درصد از محولات تولیدی جلبک‌ها در مصارف پزشکی و غذایی استفاده شده است (Stewart and Wild, 2014). کشور آمریکا ۹۹ درصد از DHA بدست آمده از جلبک‌ها در تهیه غذای کودک مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۱-۲) (Singh and Gu, 2010).

جدول (۸-۲) بازار مصرف برخی از ترکیبات استخراج شده از ریزجلبک‌ها (Singh and Gu, 2010)

محصول	تولید (بر حسب دلار آمریکا)	برداشت جلبک(تن/سال)	ارزش (تن/سال)
کاراگینان	۳۳۰۰۰	۱۶۸۴۰۰	۲۴۰
آلژینات	۳۰۰۰۰	۱۲۶۵۰۰	۲۱۳
آستاگزانتین	---	۳۰۰	۲۰۰
بتاکاروتن	---	۱۲۰۰	۲۸۵
آگار	۷۶۳۰	۵۵۶۵۰	۱۳۷
Nori (غذا)	۴۰۰۰	۴۰۰۰۰۰ (تنها در ژاپن)	۱۵۰۰

کشورهایی نظیر ژاپن، تایوان، کره و ... نیز مدت طولانی است که در زمینه برداشت از دریا و پرورش فعالیت دارند و هر ساله میلیون‌ها دلار ارز از تولید و صادرات آن بصورت خام یا بصورت عمل آوری شده، بدست می‌آورند. امروزه نیز جلبک شناسان در کشورهای مختلف، در کنار تحقیقات زیستی خود دربارۀ جلبک‌ها، به دنبال کشف خواص مفید و روش‌های استفاده اقتصادی از آن‌ها هستند.

۸-۸-۱۰- استفاده از جلبک‌ها برای تولید ترکیبات دارویی

جلبک‌های دریایی به علت تولید ترکیبات دارویی فراوانی که دارند حائز اهمیت هستند. از ترکیبات دارویی عمده می‌توان ترکیبات زیر را نام برد:

- ضد میکروبی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- ضد ویروس
- ضد قارچ
- ضد حساسیت
- ضد لخته
- آنتی اکسیدان

خاصیت آنتی بیوتیکی متابولیت‌های جلبک‌ها به فاکتورهای متعددی بستگی دارد از جمله:

- نوع جلبک
- نوع میکروارگانیسم هدف
- فصل
- شرایط رشد

متابولیت‌های تولیدی ماکرو و میکروجلبک‌ها منجر به مقاومت اعصاب شده و هم‌چنین طول عمر این سلول‌ها را افزایش می‌دهند. عصاره کلرلا ولگاریس در تهیه دارو مصرف می‌شود. رنگدانه های موجود در این میکروارگانیسم در ساخت داروهای ضد سرطان مصرف جهانی دارد. کلرلا ولگاریس باعث تقویت سیستم ایمنی، بهبود سوخت و ساز و کاهش چربی‌های مضر، شادابی پوست و تقویت مو، تنظیم دستگاه گوارش، تصفیه و سم زدایی و سلامت قلب و عروق می‌شود. استفاده از کلرلا در نقش یک ماده ضد باکتری موضوع جدیدی نیست. در دهه ۱۹۴۰ یک آنتی‌بیوتیک از کلرلا بدست آمد که کلرین نامیده شد. کلروفیل خاصیت ضد باکتری و ترمیم کنندگی بافت را دارد. همچنین کریپتوفیسن-۱ که از جلبک سبز-آبی جداسازی شده است به طور قابل توجهی در داروهای ضد سرطان کاربرد دارد. متابولیت‌های زیست فعال جلبک‌ها در درمان سرطان به خصوص مواد سیتوتوکسین که در شیمی درمانی کاربرد دارد حائز اهمیت می‌باشند. هم‌چنین آلکالوییدهای جلبک‌ها بطور گسترده در تهیه داروهای ضد سرطان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آلکالوییدهای نوروتوکسین هم‌چون ساکسی توکسین (Saxitoxin) و برویتوکسین (Brevetoxin) در تولید داروهای ضد سرطان به کار می‌روند. در جدول ۱-۳ کاربرد جلبک‌ها در تهیه داروها نشان داده شده است (Janelt *et al*. 1997; Sathasivam *et al*. 2019; Elkhateeb *et al*. 2021).

جدول (۸-۳) کاربرد جلبک‌ها در تهیه داروها

جلبک مورد استفاده	محصولات
دونالیلا سالینا	آنتی‌ژن هپاتیت ب
کلرلا ولگاریس	هورمون رشد انسانی
کلرلا سوروکینیا	هورمون رشد انسانی
کلرلا رینهاردتی	لاکتوفریسین حیوانی
کلرلا رینهاردتی	پروتئین‌ها و پپتیدهای آنتی ژنی P57

۸-۸-۱۱- استفاده از جلبک‌ها به عنوان مکمل‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

حدود ۷۰-۶۰ درصد وزن خشک اسپیرولینا پروتئین می‌باشد. امروزه از اسپیرولینا در کلوچه‌ها، سالاد و سوپ مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کشورهای اروپایی برای بهبود رژیم غذایی قرص‌های اسپیرولینا به صورت روزانه مصرف می‌شود. مصارف انسانی ترکیباتی همچون لامینارین و فوکوایدان‌ها متابولیت‌های ثانویه استخراج شده از جلبک‌ها (مانند ترکیبات هالوژنه)، عصاره‌های برگرفته از برخی جلبک‌های قرمز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، هالوپرواکسیدازها می‌باشند. استفاده از جلبک‌ها برای تغذیه انسان سابقهٔ طولانی دارد و به سال‌های قبل از میلاد می‌رسد. طی قحطی بزرگی که در اواسط قرن نوزدهم در انگلستان بر اثر آلودگی قارچی سیب‌زمینی رخ داد، یک نوع جلبک قرمز دریایی جایگزین مهمی برای محصولات سیب زمینی شد. امروزه نیز در بسیاری از کشورهای آسیایی و اروپایی، به ویژه در کشورهایی که دارای سواحل طولانی با دریاهای آزاد هستند، به شکل‌های مختلفی از جلبک‌ها به منظور تغذیه استفاده می‌شود. مشتقات اسید آلژنیک همچنین در تهیه سوپ، خامه و سس و دیگر مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به رشد جمعیت و کمبود منابع کشاورزی در خشکی، این روش‌ها می‌تواند به استفادهٔ بهینه از منابع کمک نماید. در بخش‌های مختلف جهان بیش از یکصد نوع جلبک که عمدتاً از جلبک‌های قهوه‌ای و قرمز هستند به عنوان غذا استفاده می‌شوند. تعداد اندکی از جلبک‌های سبز نیز که مواد معدنی، ویتامین، قند و پروتئین بالایی دارند، به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند (Apurav *et al*. 2019; Elkhateeb *et al*. 2021). از مهم‌ترین محصولاتی که بعنوان مکمل از جلبک‌ها حاصل می‌شوند عبارتند از:

- مکمل‌های پروتئینی
- مکمل‌های ویتامینی
- مکمل‌های غذای حیوانات خانگی
- غذا و مکمل‌های ویتامینی ماهیان
- فرمولاسیون غذای کودکان
- رقیق کننده خون

۸-۹- ضرورت استفاده از سوخت‌های بیولوژیکی

هرچند در گذشته روی‌آوردن به انرژی‌های نو با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی نمایان می‌شد، اما امروزه جنبش دست‌یابی به انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین با آینده‌نگری به روند کاهش چشمگیر میزان ذخایر موجود انرژی و مشکلات گریبانگیر زیست محیطی، یک ضرورت بشمار می‌رود. منابعی به عنوان انرژی جایگزین سوخت فسیلی می‌توانند مطرح شوند که هم منابعی ارزان قیمت و در دسترس بوده و هم سازگار با محیط زیست باشند. توسعه سوخت‌های CO_2- خنثی[1] نقش مؤثری در کاهش میزان گاز CO_2 موجود در اتمسفر دارد. طبق موازین سال ۲۰۰۸ سازمان‌های محیط‌زیستی، سطح CO_2 اتمسفری بالاتر از میزان ۴۵۰ppm CO_2-^{2}e بعنوان محدوده‌ی ریسک بالا معرفی شده است؛ این درحالیست که دنیای متمدن امروزی ۱۰ سال زودتر از پیش‌بینی‌های انجام شده از این آستانه

[1] CO_2-neutral: منظور سوخت‌هایی هستند که در فرایند تولید آنها نیز از بجای استفاده از انرژی‌های فسیلی از سوخت‌های تجدیدپذیر بیولوژیکی استفاده شده باشد.

[2] e: توزیع متناظر همه‌ی گازهای گلخانه‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

تجاوز کرده و در حال حاضر به بیش از ۴۵۵ppm CO_2-e رسیده است. بدین ترتیب، تلاش عظیم در جهت کاهش چشمگیر انتشار CO_2 ضرورتی انکارناپذیر است (Schenk, *et al*. 2008). از اقسام مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر قابل جایگزینی جهت استفاده در موتور،می‌توان به سوخت هیدروژن، گاز طبیعی و سوخت‌های بیولوژیکی مایع اشاره کرد. از بین انرژی‌های نام برده شده به جز سوخت‌های بیولوژیکی تقریباً برای استفاده از همه آنها در موتور باید تغییرات اساسی در موتور ایجاد کرد. معضل‌هایی مانند آلودگی زیاد محیط زیست، بهم خوردن شرایط و تعادل اکولوژیک و محدود بودن ذخایر سوخت فسیلی موجب شده است تا این نوع انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و بیشتر کشورها بازار مصرف انرژی خود را به سوی استفاده از این نوع سوخت‌ها سوق دهند. در حال حاضر عزم جهانی جهت توسعه‌سوخت‌های بیولوژیکی بوجود آمده است که در این بین بیودیزل و بیولتانول بعنوان گزینه‌هایی که قابلیت تجاری‌سازی بیشتری دارند، مطرح شده‌اند. بیودیزل که بخشی از مطالعه حاضر بوده و در صفحات آتی بیشتر بحث خواهد شد، به مخلوطی از متیل‌استرهای اسیدچرب (FAME) اطلاق می‌شود که معمولاً طی فرایندی بنام ترانس‌استریفیکاسیون از دانه‌های روغنی بدست می‌آید. در این میان منابع دیگری همچون بیومتان، دیزل حاصل از تبدیل مستقیم بیومس به مایع (BTL) و بیوهیدروژن نیز در حال توسعه هستند (Ebhodag et al. 2022; Tiwari & Kiran, 2018).

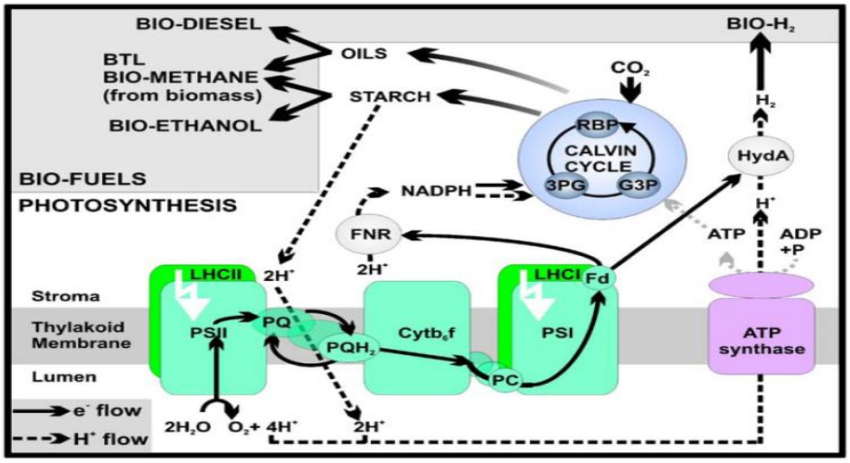
۸-۱۰- سوخت‌های بیولوژیکی نسل اول و دوم

با اینکه امروزه بخش سوخت حدود ۶۷٪ از بازار جهانی انرژی را به خود اختصاص داده اما تاکنون سیستم‌های تولید سوخت‌های CO_2–خنثی (مانند بیودیزل، بیواتانول، بیومتان و دیزل BTL) و سوخت عاری از CO_2 (مانند بیوهیدروژن) بسیار کمتر توسعه یافته‌اند. این سوخت‌های بیولوژیکی نشان داده‌اند که قابلیت صنعتی شدن را دارند. سوخت‌های بیولوژیکی بسته به مواد اولیه شان به دو نسل قابل تقسیم هستند. سوخت‌های زیستی نسل اول از محصولات کشاورزی نظیر نیشکر و غلات (جهت تولید بیواتانول) و ذرت و دانه‌های روغنی مانند سویا (جهت تولید بیودیزل) تأمین می‌شوند. با این حال، این نسل نتوانست به رویای تولید تجاری سوخت‌های بیولوژیکی تحقق بخشد. در مقابل سوخت‌های بیولوژیکی نسل دوم (نظیر سوخت‌های بیولوژیکی لیگنوسلولزی و ریزجلبکی) پتانسیل غلبه بر بسیاری از محدودیت‌ها را داشته و می‌توانند موردتوجه ویژه بازارهای جدید انرژی پاک قرار گیرند (Schenk, *et al*. 2008). بطوریکه پیش‌بینی می‌شود گسترش آن تا سال ۲۰۵۰ به سرعت تا ۵۰۰ بیلیون دلار آمریکاو حتی بیشتر برسد (Goulder and Pizer, 2006) (این درحالیست که ارزش بازار کنونی نفت ۲/۶۵ تریلیون دلار آمریکاست). عمده‌ترین بخش سوخت‌های بیولوژیکی از گیاهان عالی که از فتوسنتز جهت تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی استفاده می‌کنند، تولید می‌شود. در طبیعت این انرژی شیمیایی در مولکول‌های مختلفی (نظیر لیگنین[1]، سلولز، نشاسته و روغن‌ها) ذخیره می‌شود. لیگنوسلولزها[2] اصلی‌ترین جزء گیاهان هستند که قابلیت استفاده بعنوان ماده‌ی اولیه تولید اتانول را دارند. این فرایند هم از طریق گازیفیکاسیون[3] و هم از شکستن سلولز (هیدرولیز شیمیایی

[1]Lignin
[2]Lignocellulose
[3]Gasification

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

یا آنزیمی) امکان‌پذیر است (Schenk, *et al*. 2008). امروزه این فرایندها برای سوخت‌های بیولوژیکی نسل دوم در حال توسعه هستند و اغلب بعنوان فرایندهای لیگنوسلولزی شناخته می‌شوند. به همین ترتیب نشاسته (حاصل از ذرت) و قندها (حاصل از نیشکر) نیز توسط فرایند تخمیر به اتانول تبدیل می‌شوند (Hahn-Hägerdal *et al*. 2006) درحالیکه روغن‌ها (نظیر روغن کانولا، سویا و پالم) بعنوان ماده‌ی اولیه جهت تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند (Schmidt, 2007). میکروجلبک با بازدهی بالایی قادر به تولید سلولز، نشاسته و روغن‌ها در مقادیر زیاد است (Sheehan *et al*. 1998). علاوه براین برخی از میکروجلبک‌ها و سیانوباکترها (که بجای نشاسته گلیکوژن تولید می‌کنند) تحت شرایط بی‌هوازی قادر به تولید بیوهیدروژن هستند (Hankamer *et al*. 2007) و از تخمیر آن‌ها نیز می‌توان متان تولید کرد (شکل ۱-۷).



ل (۸-۷) فرایند تبدیل فتوسنتزی انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی و تولید انواع سوخت‌های بیولوژیکی (Schenk, *et al*. 2008).

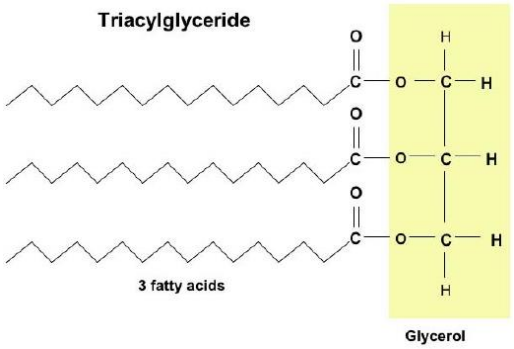
۸-۱۱- سوخت بیودیزل: جایگزینی مطمئن برای پترودیزل

واژه "دیزل" از نام مخترع آلمانی "رادولف کریستین کارل دیزل[1]" که موتور دیزلی را در سال ۱۸۹۲ اختراع کرد، گرفته‌شده است. پترودیزل از مشتقات نفتی است که مخلوطی از ٪۷۵ هیدروکربن‌های اشباع (نظیر پارافین‌ها) و ٪۲۵ هیدروکربن‌های آروماتیک (نظیر نفتالین و الکیل بنزن) است. اشتیاق به "سوخت پاک" منجر به رویکرد جدید به بیودیزل شد که درعین داشتن توان احتراقی پترودیزل، پاک و قابل اتکا نیز باشد. بیودیزل، سوخت نوبنیادی است که تقریباً ۹۰ سال پس از پترودیزل مورد استفاده قرار گرفته است. ایده‌ی استفاده از بیودیزل بعنوان سوخت به سال ۱۹۸۱ برمی‌گردد (Xu, 2010). تری‌گلیسرید (TG)، گلیسریدی است که در آن یک بدنه‌ی گلیسرولی با سه اسید چرب استری شده است، جز اصلی تشکیل‌دهنده‌ی روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی است (شکل ۱-۸). در واقع

[1]Rudolf Christian Karl Diesel

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

بیودیزل، همین تری‌گلیسریدهایی است که استری شده و به متیل‌استرهای‌اسیدچرب (FAMEs) تبدیل شده‌اند (Xu, 2010).



شکل (۸–۸) ساختار کلی تری‌گلیسرید (Xu, 2010)

بطورکلی مواد اولیه‌ی تولید بیودیزل نسل اول را می توان در سه گروه روغن‌های گیاهی، روغن‌های منشأ حیوانی و روغن‌های مصرف‌شده طبقه‌بندی کرد.روغن سویا، روغن پالم[1]، روغن آفتابگردان، روغن آشپزی مصرف‌شده و کلزا نمونه‌هایی از منابع تأمین بیودیزل هستند. روش‌ها و تکنولوژی‌های متداول تولید بیودیزل نیز شامل اختلاط و استفاده‌ی مستقیم، پیرولیز و ترانس‌استریفیکاسیون است (Chisti, 2007).

۸-۱۱-۱- مزایای بیودیزل

تجدیدپذیر بودن مهم‌ترین ویژگی بیودیزل است. برخلاف منابع نفتی، بیودیزل به دلیل زوال ناپذیر بودن می‌تولند زنجیره‌ی سوختی پایدار را در سراسر جهان بوجود آورد. همانطور که قبلا گفته شد، بیودیزل دوستدار طبیعت است و از آنجاییکه همه‌ی کربن بیودیزل از CO_2 اتمسفری که طی احتراق آزاد شده، مشتق می‌شود، می‌توان چرخه‌ی حیات بیودیزل را نزدیک به فرایندهای کربن–خنثی درنظرگرفت. استفاده از آن همچنین می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، هیدروکربن‌ها، ذرات معلق سرطان‌زا،منواکسیدکربن، ذرات دوده‌ای، اکسیدهای سولفوری و ترکیبات سولفاتی کمک کند(Chisti, 2007: Xu, 2010).

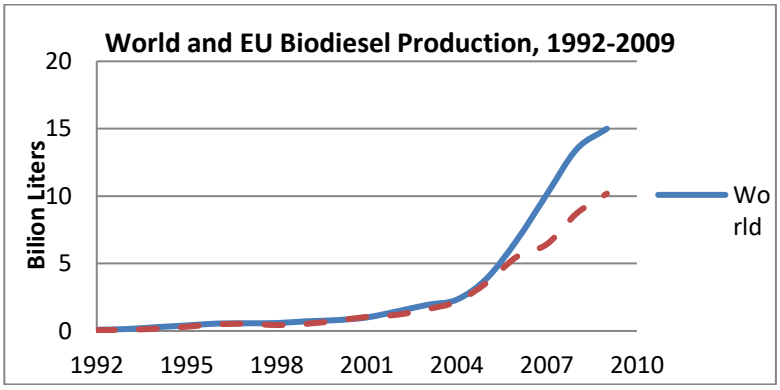
بیودیزل می‌تواند در موتورهای دیزلی کنونی بدون هیچ نوع اصلاحاتی در موتور بکار برده شود. خاصیت روان‌کاری و حلالیت بهتر و عدم ایجاد رسوب و حتی قابلیت پاک‌سازی این رسوبات و رفع گرفتگی فیلترهای سوختی از مزایای آن است. مزیت دیگر بیودیزل خواص زیست‌تخریب‌پذیری[2] و غیرسمی و نقطه اشتعال نسبتاً بالای آن است. درصورت نشت بیودیزل به محیط‌زیست، چهار بار سریعتر از دیزل نفتی تخریب می‌شود. توان حرارتی بیودیزل تنها ۱۰٪ کمتر از دیزل نفتی است (Xu, 2010).

[1]Palm oil
[2]Biodegradable

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

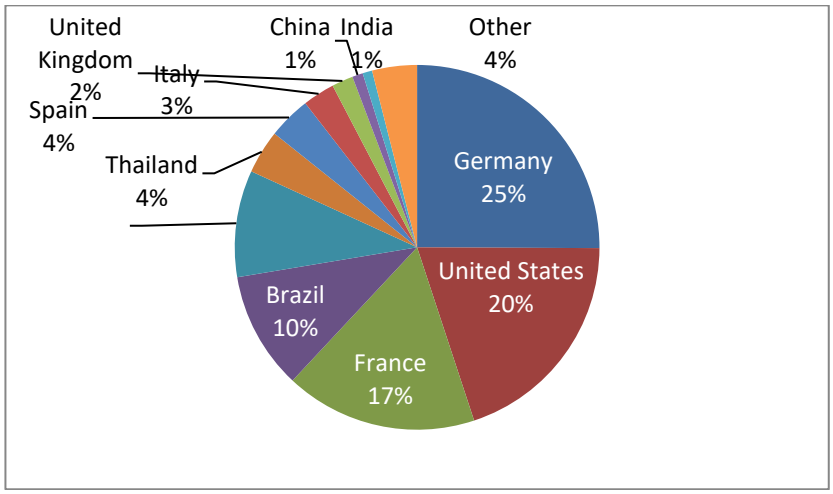
۸-۱۱-۲- تولید جهانی بیودیزل

بیودیزل بطور تجاری از انواع دانه‌های روغنی تولید شده و تولید جهانی این سوخت سبز از سال ۲۰۰۲ روندی رو به رشدی دارد (شکل ۱-۹) (Demirbas, 2006).



شکل (۸-۹) روند تولید جهانی بیودیزل از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۹ (Martinot *et al*. 2009)

شکل (۱-۱۰) سهم تولیدکنندگان بیودیزل را در جهان در سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود آلمان در بین ۲۸ کشـــور، بزرگترین تولیدکننده جهانی بوده و پس از آن ایالات متحده آمریکا، فرانســـه، برزیل و آرژانتین بیشترین تولید را داشته‌اند. در بین کشورهای آسیایی نیز تایلند، بیشترین میزان تولید را دارد و چین و هند در رده‌های بعدی هستند.



شکل (۸-۱۰) ۲۸ کشور در تولید جهانی بیودیزل در سال ۲۰۰۹ (Martinot *et al*. 2009)

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-۱۲- چالش‌های پیش‌روی تولید سوخت‌های بیولوژیکی

اگرچه فرایندهای تولید سوخت‌های بیولوژیکی پتانسیل زیادی را جهت فراهم آوردن مسیر کربن خنثی در تولید سوخت دارند، اما سیستم‌های تولید سوخت‌های بیولوژیکی نسل اول با چالش‌های جدی محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه شده است. بر همین اساس، تولید بیودیزل حاصل از محصولات کشاورزی نیز مورد انتقاد بین‌المللی قرار گرفته است. همگام با افزایش سوخت‌های زیستی که از منابع کشاورزی بدست می‌آیند، رقابت شدیدی با محصولات کشاورزی در استفاده از زمین‌های زراعتی در تولید محصولات غذایی بوجود خواهد آمد. افزایش فشار بر زمین‌های زراعتی عواقبی چون برهم‌خوردن توازن در استفاده از زمین‌های کشاورزی، کمبود شدید موادغذایی و صدمات زیست‌محیطی در اثر استفاده مفرط از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در مزارع و همچنین مصرف آب‌شیرین دارد (Chisti, 2007; Schenk *et al*. 2008; Meira *et al*. 2015; Rodionova *et al*. 2017).

۸-۱۳- نسل دوم پاسخگوی چالش‌های تولید سوخت بیولوژیکی

طیفی از سیستم‌های نسل دوم تولید سوخت‌های بیولوژیکی که دارای NEBs بسیار بالاتر و مصرف بهینه آب بوده و زمین زراعتی بسیار کمتری نیاز دارند، در حال توسعه هستند. در این راستا تکنولوژی‌های لیگنوسلولزی و میکروجلبکی بطور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. گزارشات نشان می‌دهند که میکروجلبک‌های مورد استفاده جهت تولید بیودیزل، ۱۵–۳۰۰ برابر روغن بیشتری در واحد سطح نسبت به محصولات کشاورزی مرسوم تولید می‌کنند (Chisti, 2007: Schaub et al. 2007). علاوه براین محصولات کشاورزی مرسوم معمولا یک یا دو بار در سال برداشت محصول دارند، درحالیکه میکروجلبک‌ها دوره‌ی برداشت محصول بسیار کوتاهی (۱تا۱۰ روز بسته به نوع فرایند) دارند که همین مزیت اجازه برداشت پیوسته محصول را داده و منجر به افزایش چشمگیر در بازده تولید می‌شود (جدول ۱–۴) (Chisti, 2007).

توانایی دریافت انرژی نوری بیشتر و بازده تبدیل بالاتر نهایتا به کاهش کودشیمیایی و مواد مغذی موردنیاز منتهی شده و درنتیجه موجب ایجاد آلودگی و ضایعات کمتری می‌شود. استفاده از فاضلاب‌ها در کشت میکروجلبک‌ها نیز گزینه قابل اتکایی بشمار می‌رود (Munoz and Guieysse, 2006).

جدول (۸–۴) راندمان تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی در قیاس با روغن ریزجلبکی (Chisti, 2007)

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Plant source	Biodiesel (L/ha/year)	Area to produce global oil demand (hectares × 10^6)	Area required as percent global land mass	Area as percent global arable land
Cotton	325	15,002	100.7	756.9
Soybean	446	10,932	73.4	551.6
Mustard seed	572	8,524	57.2	430.1
Sunflower	952	5,121	34.4	258.4
Rapeseed/canola	1,190	4,097	27.5	206.7
Jatropha	1,892	2,577	17.3	130 (0^a)
Oil palm	5,950	819	5.5	41.3
Algae (10 g m^{-2} day^{-1} at 30% TAG)	12,000	406	2.7	20.5 (0^a)
Algae (50 g m^{-2} day^{-1} at 50% TAG)	98,500	49	0.3	2.5 (0*)

مضاف بر این موارد درصورتیکه هدف از کشت میکروجلبک تولید سوخت بیولوژیکی باشد، می‌توان این کشت را در زمین‌های لم‌یزرع انجام داد که این موضوع می‌تواند درطول زمان موجب کاهش رقابت برای زمین‌های زراعتی شده و فرصت اقتصادی جدیدی را برای زمین‌های بایر، خشک یا نمکزارها فراهم آورد. درحالی که محصولات کشاورزی مرسوم جهت تولید سوخت‌های بیولوژیکی نیازمند مقدار قابل توجهی آب شیرین هستند، با استفاده از جنس‌های میکروجلبکی دریایی و یا آب شور و نیز با استفاده از سیستم‌های بسته بیورآکتوری می‌توان صرفه‌جویی بسیار زیادی در مصرف خالص آب شیرین انجام داد. بیومس میکروجلبکی بوجود آمده در بیورآکتورها را نیز می‌توان تبدیل به گاز کرده و یا پیرولیز نمود تا گستره‌ای از سوخت‌های بیولوژیکی را بعنوان بخشی از استراتژی حبس CO_2 تولید کرد. در این روش زائدات بیولوژیکی GMO را نیز می‌توان با روشی ایمن برای محیط‌زیست دفع کرد. بقایای بیومس غنی از کربن را نیز می‌توان بعنوان بخشی از استراتژی توقیف کربن ذخیره کرد (Schenk *et al*. 2008). از دیگر جنبه‌های جالب‌توجه سیستم‌های میکروجلبکی نسل دوم این است که این سیستم‌ها می توانند جایگاه بسیار مناسبی در روند نوین بیوتکنولوژی داشته باشند چراکه گونه‌های میکروجلبکی قابلیت بهبود و ارتقای سریعی دارند. این جنبه از میکروجلبک‌ها می‌تواند تضمین کننده افزایش بازدهی آنها توسط مهندسی متابولیک باشد. پیشرفت‌های چشمگیر در سال‌های اخیر در بسیاری از زمینه‌ها انجام شده است و مثال‌هایی از افزایش بازده فتوسنتزی و تحمل رشد در محیط های شور یا در فاضلاب در قسمت‌های بعدی شرح داده خواهد شد. با اینهمه برخی از محدودیت‌های سیستم‌های میکروجلبکی نسل دوم در فرایند برداشت محصول و تغذیه CO_2 جهت بازده تولید بالاتر شناسایی شده‌اند (Schenk et al. 2008).

۸-۱٤- بالانس خالص انرژی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جهت ارزیابی ارزش و قابل اتکا بودن فرایند تولید سوخت‌های بیولوژیکی برآورد بالانس خالص انرژی[1](NEB) آن ضروری است. هرچندکه مقادیر دقیق NEB به جزئیات موارد و آنالیز چرخه حیات بستگی دارد، با وجوداین ادعا می‌شود که هزینه‌های انرژی بکاربرده شده در کودهای شیمیایی، ماشین‌آلات کشاورزی و تأسیسات فرآوری موجب منفی شدن میزان NEB برای سوخت بیولوژیکی می‌شود (Béchet *et al*. 2013: Schenk *et al*. 2008). فرایند تولید سوخت‌های بیولوژیکی از محصولات کشاورزی بعنوان فرایندهایی نزدیک به فرایند کربن–خنثی درنظرگرفته می‌شود؛ چراکه تقریبا تمام کربن این سوخت‌های بیولوژیکی مشتق از CO_2 اتمسفری است که در حین احتراق سوخت آزاد می‌شود. جهت برقراری بالانس دقیق انتشار CO_2 در تولید سوخت‌های بیولوژیکی می بایست فرایندهای منتشر کننده‌ی CO_2 نظیر استفاده از ماشین‌آلات در کشت و فرآوری و نیز حمل و نقل نیز مورد ارزیابی قرار داد (Schenk *et al*. 2008).

۸-۱٤-۱- حذف CO_2

گرمایش جهان یک نگرانی و معضل جهانی است که موضوع مطالعات بی‌شماری است (Pachauri *et al*. 2014; Cheah *et al*. 2015; Assunção *et al*. 2017a). عامل اصلی گازهای گلخانه‌ای، CO2، یک چالش بزرگ برای گرمایش جهان است. به منظور کاهش غلظت CO2 در اتمسفر، تکنولوژی‌های پیشرفته‌ی جذب و ذخیره‌سازی آن به کار گرفته می‌شود. با این‌حال، این فناوری‌ها نیازمند مواد شیمیایی و هزینه‌های انرژی بالایی هستند. علاوه‌براین، باید از تبدیل CO2 ذخیره شده به فرم اتمسفری ممانعت بعمل آید (Bilanovic *et al*. 2009). از مهمترین پیشرفت‌هایی که نه تنها بالانس خالص CO_2 فرایندهای سوخت‌بیولوژیکی را بسیار بهبود بخشیده بلکه در کاهش CO_2 اتمسفری مشارکت دارد، ادغام تولید سوخت‌های بیولوژیکی با سیستم‌های توقیف CO_2 است (Schenk *et al*. 2008). گزینه‌های مختلفی مانند بهبود بازده انرژی، منابع انرژی تجدید پذیر باعث کاهش CO2 متصاعد شده می‌شود.

جذب کربن (CCS) بعنوان یک راه حل بالقوه برای تخفیف تغییرات اقلیم از طریق جذب CO2 از منابعی مانند نیروگاه‌ها و ذخیره CO2 جذب شده به اشکال مناسب می‌باشد. روش جایگزین، تثبیت زیستی CO2 توسط ریزجلبک‌ها می‌باشد که یک تکنولوژی بالقوه طبیعی تثبیت کربن بشمار می‌رود (Zhou et al. 2017). ریزجلبک‌ها میکروارگانیسم‌هایی با رشد سریع هستند که می‌توانند بیومس خود را در کمتر از یک روز دو برابر کنند (Tredici 2010) که این امر به دلیل ساختار سلولی ساده با سطح تماس زیاد آن‌هاست که ظرفیت جذب مناسب مواد غذایی از منابع آبی و بنابراین افزایش سرعت رشد را به دنبال دارد (Khan et al. 2009).

ریزجلبک‌ها متعلق به گروه میکروارگانیسم‌های فتوسنتزی تک سلولی و پرسلولی می باشند که توانایی تثبیت CO2 از منابع مختلف و گازهای خروجی صنعتی را دارند. در روش های بیولوژیکی برپایه جلبک‌ها، این موجودات می‌توانند گازهای آلاینده را حذف و از دی اکسید کربن (مهمترین گاز گلخانه‌ای) به عنوان منبع کربن جهت رشد خود استفاده نمایند. بنابراین در این شیوه نه تنها آلاینده‌ها حذف می‌شود بلکه گاز دی اکسید کربن به ترکیبات آلی با ارزش که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل می شود.

[1]Net Energy Balance

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

سوخت‌های زیستی از فراورده‌هایی است که از جلبک‌ها قابل استحصال است. جلبک‌ها با توجه به داشتن پتانسیل بالای جذب دی اکسیدکربن و خواص منحصر به فردی که در جذب دی اکسیدکربن دارند و اکسیژن بیشتری نسبت به سایر گیاهان تولید می‌کنند، در سطح دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. ریزجلبک‌ها به عنوان گونه‌هایی با رشد سریع دارای توانایی تثبیت CO2 بسیار سریع‌تر از گیاهان خاکی هستند و کارایی تثبیت CO2 آنها ۱۰-۵۰ بار بیشتر است. با این‌حال، به عنوان یک نوآوری "فناوری سبز" ریزجلبک‌ها دارای پتانسیل مشابهی برای تثبیت CO2 از سه منبع متفاوت، CO2 از اتمسفر، CO2 از گازهای حاصله از فلزات سنگین صنعتی، و CO2 از کربنات‌های محلول می‌باشند.

علاوه بر این، در مقایسه با گیاهان، ریزجلبک‌ها محتوای لیپید نسبتا بالایی دارند (می‌تواند بیشتر از ۸۰ درصد وزن بیومس خشک باشد)، دارای ضریب رشد بالایی هستند، در زمین‌های غیر زراعی و آب‌های غیر قابل آشامیدنی کشت می‌شوند، و محدودیت کشت فصلی ندارند، دارای ترکیبات ارزشمندی هستند و می‌توانند به سادگی بصورت روزانه برداشت شوند. همچنین، ریزجلبک‌ها می‌تواند بسیار دورتر از زمین‌های زراعی و جنگل‌ها چون تالاب‌ها، واحدهای تخمیری و حتی فاضلاب‌ها رشد کنند، بنابراین صدمات سیستم زنجیره غذایی را به حداقل می‌رسانند و می‌توانند در هکتار ۱۰۰- ۳۰ بار بیشتر انرژی تولید کنند. محققان در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که ریز جلبک کلرلا قابلیت حذف ۶۰٪ از دی اکسید کربن با غلظت ۲۵٪ در هوای آلوده را دارا می باشد (Bitog *et al*. 2011).

ریز جلبک ها قابلیت بالایی در تحمل مقادیر بالای آلاینده دی اکسید کربن و همچنین پتانسیل بالا در حذف این آلاینده را دارند (Béchet *et al*. 2013: Ugwu *et al*. 2008). در حقیقت ریزجلبک در راس انتخاب‌ها، بخاطر کارایی بالا و استثنائی آن در تبدیل انرژی، حذف CO2 و لندازه و مفید بودن دیگر ترکیبات جانبی، قرار دارد. این فناوری، که سازگار با محیط زیست است، در شرایطی با غلظت محدود O2، دامنه گسترده‌ای از دما و شرایط نور کار می‌کند. این نیازمند انتخاب نوع مناسبی از ریزجلبک و همین‌طور سازگاری به CO2 بالا می‌باشد که می‌تواند پتانسیلی برای تولید محصولات جانبی مفید و عملکرد چند منظوره باشد (جدول ۱-۵). جلبک‌ها توانایی استفاده از غلظت‌های بسیار بالای CO2 حاصل از گازهای خروجی نیروگاه‌ها و منابع مشابه دیگر را دارند. گازهای خروجی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی عموما دارای غلظت‌های CO2 بالایی بیش از ۱۰٪ هستند که بطور قابل توجهی بیش از میزانی است که در اتمسفر یافت می‌شود، است (Mondal *et al*. 2017Tang *et al*. 2011a;).

از آنجائی که بعضی از گونه‌های دونالیلا قادر به زندگی در شرایط محیطی سخت (اکستریموفیل)[1] می‌باشند، بنابراین بخاطر این مقاومت قوی در مقابل شرایط محیطی نامطلوب متفاوت مورد توجه جدی قرار دارند. سلول‌های *Dunaliella sp.* می‌توانند ساختار و حالت عملکردی دستگاه فتوسنتزی را تحت تنش CO2 تغییر دهند. این امکان فتوسنتز کارآمدتر در سازگاری با این شرایط را فراهم می‌آورد (Muradyan et al. 2004). بنابراین، ضروری است تا استفاده از گونه‌های صنعتی اکستریموفیل که دارای مزایای فراوانی بخاطر نگهداری راحت‌تر محیط کشت و امکان پایین آلودگی زیستی درسطح بالای تولیدی آن‌ها، بررسی شود (Huntley and Redalje 2007; Griffiths and Harrison 2009; Chen *et al*. 2011).

جدول (۸-۵) ظرفیت تحمل CO_2 و دما در ریزجلبک‌های مقاوم

[1] extremophiles

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Algae	CO_2 tolerance capacity (%)	Temperature tolerance (°C)	Reference
Cyanidium caldarium	100	60	Seckbach et al. 1971
Eudorina sp. K17	20	30	Hanagata et al. 1992
Chlorella sp. K35	50	45	Hanagata et al. 1992
Scenedesmus sp. K34	80	30	Hanagata et al. 1992
Chlamydomonas sp. MGA 161	15	35	Miura et al. 1993
Nannochloropsis salina NANNP-2	10	25	Hamasaki et al. 1994
Chlorella sp. T-1	100	35	Maeda et al. 1995
Synechococcus elongatus	60	60	Miyairi 1995
Monoraphidium minutum	13.6	25	Zeiler et al. 1995
Chlorella sp.	40	42	Sakai et al. 1995
Chlorella sp. UK001	40	45	Hirata et al. 1996
Euglena gracilis	45	-	Nakano et al. 1996
Chlorella vulgaris	15	27	Yun et al. 1997
Dunaliella tertiolecta	15	-	Nagase et al. 1998
Cyanidium sp.	100	-	Graham and Wilcox 2000
Chlorella sp.ZY-1	70	-	Yue and Chen 2005
Spirulina sp.	12	30	De Morais and Costa 2007a
Scenedesmus obliquus	18	30	De Morais and Costa 2007a
Chlorella kessleri	18	30	de Morais and Costa 2007b
Chlorococcum littorale	70	-	Ota et al. 2009
Chlorella minutissima	15	-	Sankar et al. 2011
Desmodemus sp.	100	-	Kativu et al. 2012
Eudorina sp. K17	20	30	Hanagata et al. 1992
Chlorella sp. K35	50	45	Hanagata et al. 1992
Scenedesmus sp. K34	80	30	Hanagata et al. 1992
Chlamydomonas sp. MGA 161	15	35	Miura et al. 1993

از طرفی با افزایش روزافزون صنعت و نیاز به تامین انرژی، سوخت زیستی حاصل از روغن‌های گیاهی و جانوری، یک سوخت مهم است که به صورت فزاینده‌ای در دهه گذشته رواج یافته است و در این برهه زمانی بیش از هر زمانی اهمیت مطالعه و بررسی جایگزینی برای سوخت‌های خام و فراوری نشده‌ای چون دیزل و گازوئیل احساس می‌شود (Sudhakar and Premalatha 2012b). بنابراین ریزجلبک‌ها این توانایی را دارند که CO2 را به سوخت‌های زیستی بالقوه، مواد غذایی، خوراک دام و ترکیبات بسیار ارزشمند زیست فعال با استفاده از نور خورشید تبدیل کنند. کاهش CO2 و تولید بیودیزل می تواند یک سود دو طرفه هم از لحاظ امکان پذیری اقتصادی و هم پایداری زیست محیطی باشد. امکان‌پذیری این راهبرد می‌تواند با تثبیت گازهای خروجی از صنعت مانند گازهای سوختی و با دخالت کشت ریزجلبکی بیشتر بهبود یابد (Dhyani *et al*. 2015).

به همین خاطر جذب زیستی CO2 توسط ریزجلبک‌ها از نیروگاه‌ها و منابع مشابه دیگر بعنوان یک جایگزین برای کاهش مشکل انتشارات کربن در نظر گرفته می‌شود (Ho *et al*. 2011: Kumar *et al*. 2010). علاوه‌بر این، یاخته‌های ریزجلبکی تخمین زده می‌شود که تقریبا دارای ۵۰٪ کربن باشند، که با این حساب ۱/۸ کیلوگرم CO2 تثبیت شده ۱ کیلوگرم بیومس ریزجلبکی تولید می‌کند (Chisti 2007: Chagas *et al*. 2015). بیومسی که از این جلبک‌ها باقی می‌ماند علاوه بر استفاده در سوخت‌های زیستی، پتاسیل استفاده در تولید کود، محصولات غذایی،

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

فرآورده‌های دارویی، بهداشتی و آرایشی و پلاستیک‌های زیستی با ارزش اقتصادی بالا دارند. شایان ذکر است که تثبیت و حذف دی اکسیدکربن در جلبک ها برخلاف دیگر گیاهان و درختان به فصل خاصی محدود نیست و حتی در فصل پاییز و زمستان هم انجام می شود. در دوران مدرن و زندگی صنعتی در بسیاری از شهرهای بزرگ با پدیده وارونگی هوا مواجه هستیم. در فصل های پاییز و زمستان که درختان برگ ندارند این پدیده و پیامدهای ناشی از آن تشدید می شود؛ اما در صورتی که شرایط مساعد باشد جلبک ها حتی در این فصول نیز قادر به انجام فتوسنتز هستند، بنابراین می توانند دی اکسیدکربن موجود در هوا را به دام اندازند و در کاهش پیامدهای ناشی از وارونگی نیز تاثیرگذار باشد.

براساس بررسی های آماری، هر درخت به طور متوسط می تواند سالانه ۵۰۰ کیلوگرم دی اکسیدکربن جذب کند. در صورتی که در زمین به ازای هر نفر یک درخت وجود داشته باشد. به این ترتیب تقریبا ۳/۵ میلیارد تن دی اکسیدکربن در سال جذب می شود؛ اما تولید سالانه دی اکسیدکربن در سطح دنیا حدود ۳۲ میلیارد تن است؛ یعنی میزان دی اکسیدکربن تولید شده تقریبا ده برابر مقدار دی اکسیدکربنی است که درختان می توانند به دام اندازند. پس فقط با کاشت درخت نمی توان با اثر گلخانه ای مبارزه کرد. به همین دلیل در سطح دنیا استفاده از جلبک‌ها به عنوان راهکاری برای کاهش پیامدهای گلخانه ای مورد توجه قرار گرفته و برنامه ریزی هایی برای استفاده هر چه بیشتر از جلبک ها انجام شده است.

۸-۱۵- پتانسیل تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها

ریزجلبک‌ها خواصی از خود نشان داده‌اند که جهت تولید بیودیزل در مقیاس انبوه مناسب است (Sheehan, *et al*. 1998; Arcigni *et al*. 2019). مزیت اصلی ریزجلبک‌ها رشد سریع آن‌هاست. درصورت فراهم شرایط مناسب محتوای روغن ریزجلبک‌ها می‌تواند تا ۹۰٪ وزن خشک بیوماس نیز برسد (Benemann *et al*. 1982). نرخ رشد و محتوای روغن ریزجلبک تعیین‌کننده میزان روغن تولیدی در هر روز است. نرخ تولید روغن ریزجلبک‌ها بصورت جرم روغن تولیدی در حجم محیط کشت محاسبه می‌شود (Chisti, 2007). جدول ۱-۶ محتوای روغن گونه‌های چند ریزجلبک مختلف را نشان می‌دهد. مطالعات انجام یافته اخیر مشخص نموده است که تولید تجاری بیودیزل ریزجلبکی تنها زمانی می‌تواند ماندگار باشد که هزینه تولید آن در قیاس با بهای نفت خام کمتر باشد. در این راستا دو قسمت از فرایند تولید بیودیزل یعنی جداسازی بیوماس از محیط‌کشت و استخراج روغن از بیوماس نیازمند توجه بیشتری هستند (Chisti, 2008). بهبود طراحی راکتور، تکنیک‌های برداشت و استخراج می‌تواند به منجر به کاهش هزینه تولید بیوماس و در نهایت حل معضل منبع مناسب برای تولید سوخت‌های بیولوژیکی شود.

جدول (۸-۶) جدول ۱-۶ محتوای روغن جنس‌های ریزجلبکی مختلف (Ugwu *et al*. 2008)

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Microalga	Oil content (% dry wt)
Botryococcus braunii	25–75
Chlorella sp.	28–32
Crypthecodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16–37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25–33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20–35
Nannochloropsis sp.	31–68
Neochloris oleoabundans	35–54
Nitzschia sp.	45–47
Phaeodactylum tricornutum	20–30
Schizochytrium sp.	50–77
Tetraselmis sueica	15–23

۸-۱۵-۱- مزایای ریزجلبک‌ها بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل

ریزجلبک‌ها مزایای زیادی نسبت به محصولات کشاورزی متداول بعنوان مواد اولیه تولید بیودیزل دارند.اول اینکه ریزجلبک‌ها جهت کشت و تکثیر به زمین کشاورزی نیاز نداشته و اورگانیسم‌هایی بسیار ساده و اولیه دارند. آنها قادر به حیات در شرایط آبی اکولوژیک مختلف نظیر آب‌شیرین، آب شور (شوری کمتر از ٪۳/۵)، آب دریا (شوری ٪۳/۵) و آب بسیار شور (شوری بالاتر از ٪۳/۵) و نیز در محیط‌هایی با گستره‌ی دمایی (°C ۴۰–۱۰) و pH نسبتا وسیع (۱۰–۳) هستند. این گستره‌ی وسیع تحمل ریزجلبک‌ها در انواع محیط‌ها، منجر به عدم نیاز به شرایط استریل شده و در نتیجه به تسهیل در کشت ریزجلبک‌ها جهت تولید صنعتی بیودیزل منتهی می‌شود. دوم اینکه ریزجلبک‌ها انرژی خورشیدی را با راندمان بالایی جذب و آن را تبدیل می‌کنند. آنها قادر به تبدیل فتوسنتزی بیش از ٪۱۵ از تشعشع خورشیدی دردسترس، یا تقریباً ٪۶ از کل نور تابشی به داخل بیوماس هستند. درحالیکه نیشکر (پرمحصول‌ترین گیاه کشاورزی روی کره زمین) در شرایط یکسان تنها قادر به تبدیل فتوسنتزی با راندمانی بین ۳/۵ تا ۴ درصد است. توانایی بالا در تبدیل انرژی خورشیدی منجر به مشارکت ۵۰ درصدی ریزجلبک‌ها در تثبیت کربن جهانی دارد؛ این درحالیست که ریزجلبک‌ها تنها ۰/۲ درصد از بیوماس فتوسنتزی جهان را به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت، ریزجلبک‌ها دارای محصول‌دهی روغن بسیار بالایی در هر هکتار نسبت به دانه‌های روغنی هستند. علت این مزیت این است که سلول ریزجلبک‌ها یک کارخانه‌ی تولید لیپید ۳۰ میکرونی است، در حالیکه محصولات کشاورزی تنها قادر به تولید روغن به اندازه گنجایش دانه‌های‌شان هستند (Huang *et al*. 2010; Makareviciene *et al*. 2013; Chen *et al*. 2018).

۸-۱۵-۲- سابقه‌ی تاریخی تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰، دو محقق بنام‌های می‌یر[1] (۱۹۵۵) و گولوئک[2] (۱۹۶۰) اســـتفاده از کربوهیدرات جلبکی را جهت تولید گاز متان طی فرایند تخمیر بی‌هوازی ارائه کردند. اما پروپوزال آن‌ها ۱۰ ســـال بعد، یعنی اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ که بهای انرژی دســت‌خوش تغییرات شـد، مورد توجه قرار گرفت. در میان تمام تحقیقات و فعالیت‌های انجام شـــده بر روی ســـوخت ریزجلبکی، مهمترین تلاش تحقیقاتی انجام شـــده طی برنامه‌ی گونه‌های آبزی (ASP)[3] با حمایت دپارتمان انرژی آمریکا (DOE[4]) از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۶ است. این برنامه‌ی تحقیقاتی با هزینه‌ای بالغ بر ۲۵ میلیون دلار انجام شـد. طرح ASP در سـال ۱۹۹۶ به علت تخمین عدم رقابت بهای بیودیزل جلبکی با بهای دیزل نفتی در آن زمان، متوقف شد (Sheehan *et al.* 1998).

۸-۱۶- رویکرد طلایی به ریزجلبک‌ها

دو سـال پس از خاتمه کار ASP، گزارشـی از آن توسـط DOE منتشـر شـد. شـیهان[5] و همکاران نتیجه گرفتند که ASP زیربنای محکمی برای تحقیقات جلبک به ســـوخت فراهم آورد، و مهمتر اینکه به این گزارش نه بعنوان پایان‌کار بلکه می بایسـت بعنوان یک شـروع نگریسـته شـود. امروزه تغییرات شـدید بهای جهانی نفت از یک سـو و نگرانی‌های جهانی در مورد حذفCO_2 از سـوی دیگر رویای جایگزین شـدن دیزل نفتی با یک سـوخت "سـبز" را بیش از پیش تهییج کرده است. با توجه به زوایای تکنیکی، شکوفایی در بیوتکنولوژی، بویژه در مهندسی متابولیکی ابزار قدرتمندی جهت ســـاختن ویا اصـــلاح گونه‌های جدید ریزجلبکی با صـــفات مورد نظر فراهم کرده اســـت. پیشرفت‌های عظیم در طراحی بیورآکتور نیز راه‌حل‌های جالب توجهی را در راستای تجاری‌سازی کشت ریزجلبک‌ها ارائه کرده است. بنابراین، در حقیقت رقابت گسترده جهانی برای تولید بیودیزل ریزجلبکی در راه است. در حال حاضر بیش از ۲۰۰ شرکت در تلاش برای یافتن روشهای مقرون‌به‌صرفه و پایدار جهت تبدیل ریزجلبک به بیودیزل هستند. این همان زمان طلایی رویکرد به ریزجلبک هاست (Tang et al. 2015;).

۸-۱۶-۱- شکاف تحقیقاتی در زمینه تولیدبیودیزل از ریزجلبک‌ها

در حال حاضـر مهمترین چالش در راسـتای تولید انبوه بیودیزل از ریزجلبک‌ها، توجیه‌ناپذیر بودن اقتصـادی این فرایند اسـت که بیشـتر به گران قیمت بودن و مشـکلات توسـعه بیورآکتورهای اسـتریل در مقیاس وسـیع مزبوط می‌شـود. بیورآکتورهای استریل برای کشت بسیاری از گونه‌های ریزجلبکی (نظیـــــــر NanochloropsisTetraselmis ,suesisa,Scenedesmus) که قادر به تولید مقادیر بالایی لیپید هسـتند، ضـروری اسـت. اسـتفاده از حوضـچه‌های ریزجلبکی وسیع در فضای باز که نسبت به بیورآکتورها کم هزینه‌تر هستند، یک راه‌کار مناسب برای تولید اقتصادی بیودیزل ریزجلبکی در مقیاس انبوه است. به همین دلیل، کشت ریزجلبک‌ها در فضای باز در چهار دهه گذشته مورد

[1]Meier
[2]Golueke
[3]Aquatic Species Program
[4]Departmet of Energy
[5]Sheehan

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مطالعات گسترده قرار گرفته و حوضچه‌هایی که منجر به حداکثر رشد ریزجلبک‌ها می‌شوند، توسعه یافته‌اند (Weldy and Huesemann, 2007). اما کشت انبوه در حوضچه‌های باز غیراستریل تنها برای سه گونه ریزجلبکی*Spirulina planensis*،*Dunaliella salina* و انواع خاصی از *Chlorella* امکان پذیر است (Weldy and Huesemann, 2007). این موضوع به علت توانایی این گونه در رشد و زندگی در شرایط محیطی حداکثری[1] است؛ بعنوان مثال اسپیرولینا پلاتنسیس قادر به رشد محیط‌های بسیار قلیایی تا pH=10 و دونالیلا قادر به رشد در سطوح شوری بالاتر از $gNaCl.\ L^{-1}$ ۲۰۰ است. به همین دلیل هیچ آلودگی میکروبی و حتی‌گونه ریزجلبکی نامطلوبی در این محیط‌ها قادر به رشد نبوده و درنتیجه حداکثر میزان نرخ تولید بیوماس برای گونه ریزجلبکی مطلوب حاصل می‌شود. با این وجود تحقیقات بسیار اندکی برروی قابلیت تولید لیپید توسط گونه‌های فوق‌الذکر صورت گرفته است. در این میان بعنوان مثال یک شکاف تحقیقاتی بر روی جنس ریزجلبک دونالیلاگونه که قابلیت صنعتی در فضای باز را دارد، احساس می‌شود. در نتیجه با توجه به تعریف این تحقیق در راستای طرح صنعتی تولید بیودیزل ریزجلبکی، این تحقیق درصدد پرکردن این شکاف تحقیقاتی برآمده و تأثیر شرایط استرس محیطی مختلف نظیر شدت نور و سطوح مختلف شوری را بر تولید لپید مورد بررسی قرار دادیم.

۸-۱۶-۲- وضعیت کنونی انرژی‌های بیولوژیکی در ایران

طبق اسناد و مدارک موجود، تاکنون منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران بطور کارآمدی مورد استفاده قرار نگرفته و سوخت بیولوژیکی جهت پاسخگویی به نیازهای گوناگون انرژی نظیر سوخت وسائل نقلیه، تولید الکتریسیته و غیره مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. مدیریت ضایعات محصولات کشاورزی جهت تولید انرژی از آنها (نظیر بیواتانول، بیوگاز و غیره) و همچنین سرمایه‌گذاری روی محصولات غیرغذایی نظیر جاتروفا و همچنین ریزجلبک‌ها برای تولید بیودیزل از آنها راهکارهای مناسبی در این زمینه به‌شمار می‌روند. با این‌همه بدلیل عدم تطابق شرایط بهینه رشد جاتروفا با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، و عدم قابلیت بومی‌سازی آن، ریزجلبک‌ها بهترین گزینه هستند (Tabatabaei *et al*. 2011). گونه‌های مختلفی از ریزجلبک‌های غنی از روغن که قابلیت تبدیل به بیودیزل را دارا می‌باشند، در ایران وجود داشته و به عنوان گونه‌های بومی مناطق مختلف ایران به شمار می‌روند. صرف نظر از بیودیزل، ریزجلبک‌ها می‌توانند بعنوان منابعی برای تولید سایر سوخت‌های بیولوژیکی تجدیدپذیر نظیر بیومتان نیز بشمار روند. بیومتان از تخمیر بی‌هوازی بیومس میکروجلبک حاصل می‌شود. وجود انواع دریاچه‌های آب‌شور در ایران نظیر دریاچه‌ی ارومیه، سومین دریاچه‌ی آب شور بزرگ کره زمین، که دارای گستره وسیع و متمایزی از گونه‌های ریزجلبکی است از یک سو و امکان راه‌اندازی حوضچه‌های کشت وسیع ریزجلبک در مناطق مختلف ایران بویژه در مناطق جنوبی از سوی دیگر باعث می‌شود تا تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها در ایران رویایی دست‌یافتنی و کاملا امکان پذیر باشد (Tabatabaei *et al*. 2011).

۸-۱۶-۳- چشم‌انداز آینده بیودیزل در ایران

[1] Extream Condition

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جایگزین کردن تمام سوخت دیزل مصرفی در ایران با بیودیزل مستلزم تولید سالانه‌ی ۳۶/۵ میلیون مترمکعب بیودیزل با درنظرگرفتن نرخ کنونی مصرف است. اما واقعیت این است که منابع اولیه تولید بیودیزل قادر نیستند جوابگوی این نیاز گسترده باشند (Tabatabaei *et al*. 2011). در جدول ۱-۷، با درنظرگرفتن متوسط محصول‌دهی روغن در هر هکتار از دانه‌های روغنی مختلف، سطح زمین زراعتی موردنیاز برای جوابگویی به ٪۵۰ از نیاز ایران به سوخت دیزلی در ستون۳ و درصدی که این سطح زمین از کل سطح زمین‌های زراعتی ایران ($۱،۶۳۶،۰۰۰km^2$) به خود اختصاص می‌دهد، در ستون۴ جدول محاسبه شده است. براساس داده‌های این جدول، تنها ۰/۰۸ تا ۰/۱۹ درصد از کل زمین‌های کشاورزی ایران جهت تولید بیومس جلبکی به منظور تأمین ٪۵۰ از نیاز کشور به سوخت دیزلی کفایت می‌کند. بنابراین ریزجلبک‌ها تنها منبع قابل اتکا برای تولید بیودیزل در ایران هستند که پتانسیل جایگزینی کامل بجای دیزل نفتی را دارند (Tabatabaei *et al*. 2011: Chisti, 2007). بنابراین با توجه به مزایای ذاتی ریزجلبک‌ها و نیز محدودیت‌های کنونی موجود در استفاده از سایر محصولات کشاورزی روغنی، مهندسی ژنتیک میکروجلبک‌ها می‌تواند به اقتصادی شدن تولید بیودیزل در ایران کمک شایانی کند.

جدول (۸-۷) مقایسه قابلیت منابع مختلف در تولید بیودیزل در ایران (Tabatabaei *et al*. 2011)

Crop	Oil yield (L/ha)[a]	Land area needed (M ha)[b]	Percent of existing Iran cropping area[b]
Corn	172	106	65
Soybean	446	41	25
Canola	1190	15.3	9
Jatropha	1892	9.6	6
Microalgae[c]	136,900[d]	0.13	0.08
Microalgae[e]	58,700[d]	0.31	0.19

[a] Chisti, 2007.
[b] For meeting 50% of all transport fuel needs of Iran.
[c] 70% oil (by weight) in biomass.
[d] Oil yields based on biomass productivity in photobioreactors.
[e] 30% oil (by weight) in biomass.

وجود دریاچه‌های آب شور متعدد در ایران (نظیر دریاچه ارومیه، دریاچه قم، دریاچه گاوخونی و مهارلو)، دسترسی آسان به این دریاچه‌ها و وفور تابش نور خورشید منجر به رشد و تکثیر انواع مختلف گونه‌های ریزجلبکی در ایران شده که می‌توانند منابع خوبی برای تولید روغن باشند.

۸-۱۷- بیوسنتز لیپیدها در ریزجلبک‌ها

لیپیدها از لحاظ شیمیایی از تنوع بسیاری برخوردارند و بسته به لحاظ ساختاری و عملیاتی تعاریف و دسته‌بندی‌های متفاوتی را دربرمی‌گیرند. در یک تعریف ساختاری رایج، به اسیدهای چرب و مشتقات حاصل از آن‌ها و تمام موادی که بنحوی از لحاظ بیوسنتزی یا عملکردی، با این ترکیبات مرتبط هستند، لیپیدها اطلاق می‌شود. این تعریف

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

کلسترول را شامل می‌شود. اما سایر استروئیدها، ویتامین‌های محلول در چربی، کاروتنوئیدها یا روغن معدنی را بجز در موارد خاص در برنمی‌گیرد. با این وجود گاه عبارت "لیپید" بعنوان مترادفی برای چربی‌هایی که معمولا تحت عنوان تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها[1] شناخته می‌شوند، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تعاریف عملیاتی، لیپیدها عبارت از مواد غیرفراری هستند که بتوان آن‌ها را با استفاده از حلال‌هایی با قطبیت کم تا متوسط از منابع بیولوژیکی استخراج کرد. به لیپید استخراج شده توسط حلال‌ها "چربی‌خام[2]" یا "چربی قابل‌استخراج[3]" گفته می‌شود. چربی‌خام در واقع ماده‌ی ناهمگنی متشکل از تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها، فسفولیپیدها، اسیدهای چرب، استرول‌ها، واکس‌ها و رنگدانه‌هاست. معمولا میزان لیپیدهای خام اندازه‌گرفته شده به روش وزنی تحت عنوان "لیپید کل[4]" خوانده می‌شود. سازمان غذایی و دارویی آمریکا چربی‌کل را بعنوان مجموع همه‌ی اسیدهای‌چرب حاصل از استخراج لیپید کل که بصورت تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها بیان شده‌اند تعریف کرده‌است. جهت جلوگیری از اشتباه گرفتن چربی‌کل با لیپیدکل حاصل از استخراج با حلال از عبارت "اسیدهای‌چرب‌کل" برای مجموع اسیدهای‌چرب بیان شده بصورت تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها که متعاقبا متیله خواهند شد، استفاده می‌شود. تری‌گلیسریدها (تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها) در واقع زیرمجموعه‌ای از لیپیدهای خنثی هستند که مواد اصلی در تولید بیودیزل به شمار می‌روند. ریزجلبک‌ها نیز همانند گیاهان و حیوانات قادر به بیوسنتز تری‌گلیسریدها جهت ذخیره مواد و انرژی هستند. مسیر سنتز تری‌گلیسریدها در ریزجلبک‌ها شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

- تشکیل استیل‌کوآنزیم A (استیل‌کوآ)[5] در سیتوپلاسم
- طویل‌شدن[6] و غیراشباع شدن زنجیره‌ی کربنی اسیدهای چرب
- بیوسنتز تری‌گلیسرید

دونالیلا سالینا در پاسخ به استرس شوری، نور بالا، دمای بالا و فقر غذایی نیتروژن، لیپید بالایی تولید می‌کند. شناخته شده‌ترین گونه دونالیلا، دونالیلا سالینا است که حاوی مشتقات هگزادکان منشعب است. هگزادکان ترکیبی مدل برای سوخت دیزل است.اخیرا برنامه تحقیقی در مورد قابلیت دونالیلا در تولیدسوخت‌زیستی در دپارتمان علوم‌زیستی دانشگاه‌کالگری[7]کانادا انجام‌گرفته‌است. گونه هایی از جنس دونالیلا که قابلیت بالایی از نظر تولید لیپید دارند موضوع مطالعات توالی یابی ژنومی و بررسی بیان ژنی هستند تا ژن های با نقش موثر در تولید لیپیدها شناسایی شوند. ازاین نتایج می توان در فرایندهای مهندسی ژنتیک و مهندسی متابولیک به منظور افزایش تولید لیپید استفاده نمود.

۸-۱۸- اصول حاکم بر استخراج لیپیدها

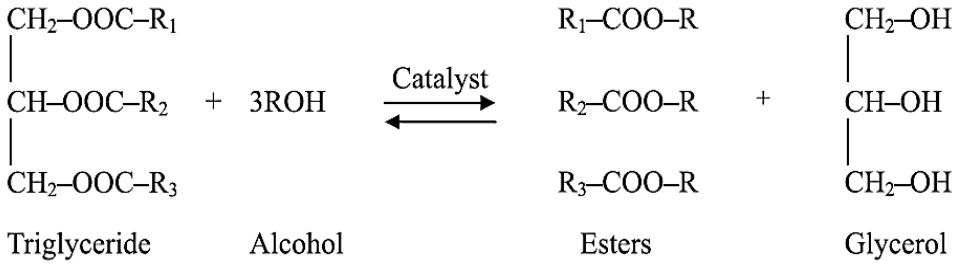
[1]Triacylglycerols
[2]Crude fat
[3]Extractable fat
[4]Total lipid
[5]Acetyl coenzyme A (acetyl-coA)
[6]Elongation
[7]Calgeri

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

استخراج لیپیدها از بافت‌ها از سه منظر اصلی قابل بررسی است. اول، استخراج کامل و حلالیت لیپیدها در حلال آلی؛ دوم، حذف آلودگی‌های غیرلیپیدی از ماده‌ی استخراج شده و سوم، پتانسیل سمیت حلال. لیپیدهای خالص در حلال‌های گوناگونی حل می‌شوند. این انحلال بستگی به برهم‌کنش‌های کشش نسبی بین حلال با نواحی آبدوست و آبگریز مولکول لیپیدی دارد. لیپیدهایی که گروه‌های عاملی‌شان قطبیت کمی دارند، نظیر تری‌اسیل‌گلیسرول‌ها و کلسترول استرها، در حلال‌های هیدروکربنی مانند هگزان، سیکلوهگزان یا تولوئن و نیز در حلال‌هایی با قطبیت نسبتا بیشتر نظیر کلروفرم و اترها حلالیت بالایی دارند. این لیپیدها در حلال‌های قطبی نظیر الکل‌ها و بویژه متانول نسبتا انحلال ناپذیرند. حلالیت آن‌ها در حلال‌های قطبی با کاهش طول زنجیره‌ی اسیدهای چرب و یا افزایش طول زنجیر حلال الکلی افزایش می‌یابد. لیپیدهای غیراشباع با سهولت بیشتری نسبت به لیپیدهای اشباع در اغلب حلال‌ها حلمی‌شوند، در مقابل لیپیدهای پیچیده‌ی قطبی تنها به مقدار ناچیزی در حلال‌های هیدروکربنی حل شده و تمایل به انحلال در حلال‌های قطبی نظیر کلروفرم و متانول و اتانول دارند. در راستای استخراج لیپیدها از بافت‌ها، یافتن حلال‌هایی که علاوه بر سهولت انحلال لیپیدها در آن‌ها منجر به ازهم گسیختن برهمکنش بین لیپیدها و ماتریکس بافت شوند، ضروری است. تراوایی[1] دیواره‌ی سلولی برخی از اورگانیسم‌ها برای حلال‌ها نسبت به سایر اورگانیسم‌ها کمتر است؛ دراین صورت آب با متورم کردن بیوپلیمرهای موجود در ساختار سلولی به استخراج کمک می‌کند و در واقع آب اساسی‌ترین جز بسیاری از سیستم‌های استخراجی محسوب می‌شود. در برخی موارد جهت افزایش راندمان استخراج و گاه حتی برای امکان‌پذیر شدن استخراج لیپیدها، شکستن دیواره‌ی سلولی ضروری است. لیپیدهای استخراجی از سلول‌ها می‌تواند حاوی آلودگی‌های غیرلیپیدی نظیر قندها، امینواسیدها یا نمک‌ها باشد. از اینرو جهت حذف این ناخالصی از لیپید استخراجی نیاز به شستشو و انجام مراحل خالص‌سازی بعدی وجود دارد.

۸-۱۹- تبدیل لیپید به بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون

تولید بیودیزل از لیپید به وسیله ترنس‌استریفیکاسیون انجام می‌شود. ترنس‌استریفیکاسیون فرایند تبادل گروه آلی Rیک استر با گروه R یک الکل است که واکنش عکس آن جهت تبدیل چربی‌ها (تری‌گلیسریدها) به بیودیزل استفاده می‌شود (شکل۱-۱۱).



[1]Permeability

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۸-۱۱) فرایند تبدیل کاتالیستی تری‌گلیسرید به بیودیزل طی ترانس استریفیکاسیون

جهت تبدیل شیمیایی لیپید به بیودیزل دو روش تبدیل کاتالیستی بازی و اسیدی مرسوم است. البته اخیراً تبدیل آنزیمی نیز مطرح شده است که هنوز در مراحل تحقیق قرار دارد. هریک از روش‌های کاتالیستی اسیدی و بازی دارای مزایا و معایبی هستند که به طور خلاصه در جدول ۱-۸ نشان داده شده است.

جدول (۸-۸) مقایسه ویژگی‌های ترانس‌استریفیکاسیون بازی و اسیدی

	اسیدی	بازی
دما	بالا (حدود ۹۰°C)	پایین
زمان	چند دقیقه تا چند ساعت	چند ثانیه تا چند دقیقه
قدرت استریفای کردن	متوسط تا بالا	–
قدرت ترانس‌استریفیکاسیون	پایین	بالا
ریسک صابونی شدن	پایین	بالا
امکان مزاحمت آب	پایین	بالا

۸-۲۰- روش‌های کشت جلبک

از دغدغه‌های اصلی در کشت صنعتی میکروجلبک‌ها می‌توان از طراحی و ساخت سیستم‌ها و روش‌های کشت و شناسایی گونه‌های متعدد که توانایی افزایش راندمان در استفاده از انرژی خورشید و کربن دی‌اکسید را دارند نام برد. با وجود انجام تحقیقات متعدد در مورد افزایش راندمان، تاکنون بیوراکتوری با سیستم کاملاً بهینه معرفی نشده است که بتولند حداکثر تولید را با حداقل مقدار هزینه نتیجه دهد (Carvalho *et al.* 2006). تلاش در جهت ساخت بستری مناسب برای رشد و پرورش جلبک‌ها از حدود ۵۰ سال قبل آغاز گردید که در نهایت منجر به ساخت فتوبیوراکتورها شد و تحقیقات در این زمینه هنوز ادامه دارد.

۸-۲۰-۱- سیستم‌های باز

کشت میکروجلبک در بسترهای متفاوت انجام می شود که عمده‌ترین آن که از دیر باز مورد استفاده قرار می‌گیرد، کشت باز دریاچه‌ای می‌باشد. کشت باز دریاچه‌ای یک استخر حاوی میکروارگانیسم‌های زنده با واکنش‌های بیولوژیکی است (Raja et al. 2007). نمونه‌ای از کشت باز دریاچه‌ای در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. جهت طراحی این سیستم ابتدا می‌بایست زمین صاف و مسطح شود. جهت حصول راندمان بهینه پهنای این سیستم می‌بایست از ۲ متر کمتر و عمق محیط کشت می‌بایست از ۱۵ سانتیمتر کمتر و از ۱۰ سانتی‌متر بیشتر باشد. انتهای

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

حوضچه به شکل بیضی طراحی می‌شود. یک حوضچه باز دریاچه‌ای با طول ۱۰۰ متر و عرض ۲ متر و عمق ۱۵ سانتی‌متر محیط کشتی بالغ بر ۳۰ هزار لیتر را در خود جای می‌دهد. یک دیوار ساده و باریک حوضچه را جهت گردش مناسب‌تر از وسط نصف می‌کند. باید در نظر داشت که مواد به کار برده شده در ساخت حوضچه در برابر شتشوی مکرر مقاوم باشد. سرعت جریان محیط کشت در این سیستم به طور متوسط ۲۰–۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و جهت تسهیل در سرعت محیط کشت در دو انتهای آن بافل‌هایی طراحی شده تا از ایجاد نقاط کور ممانعت شود. الک‌هایی با مش ۲–۳ سانتی متر در کانال‌ها جهت جدا کردن لاشه حشرات یا اجسام خارجی بزرگتر که در محیط کشت افتاده اند بکار می‌رود. نکته مورد توجه در مورد این سیستم آن است که این حوضچه‌ها می‌بایست در جهت شمال– جنوب طراحی شود (Ugwu *et al.* 2008). اگر چه تمام تلاش‌ها در حال حاضر جهت تولید و کشت میکروجلبک در سیستم‌های بسته صورت می‌گیرد، اما اغلب سیستم‌های تجاری به صورت کشت باز دریاچه‌ای می باشد. علت این امر مسائل اقتصادی و همچنین ارزان بودن این سیستم در مقایسه با سیستم‌های بسته است (Carvalho *et al.* 2006).



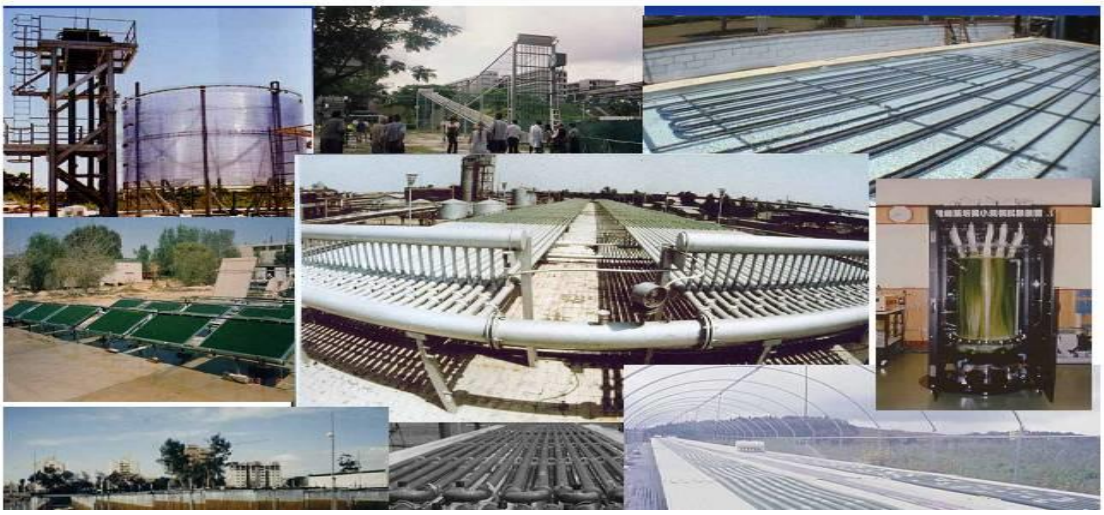
شکل (۸–۱۲) نمونه‌ای از کشت باز دریاچه‌ای

۸-۲۰-۲- سیستم‌های بسته

در این نوع سیستم، محیط کشت در یک محیط بسته گردش می‌کند. از این روش عموماً برای کشت میکروجلبک‌های خاص و در جهت تولید مواد شیمیایی گران قیمت و حساس به آلودگی از قبیل آنزیم‌ها، سیتو کروم‌ها، سموم، مواد نشان‌دار به رادیواکتیو و مواد دارویی استفاده می‌شود. به این منظور انواع بیوراکتورها با لوله‌های شیشه‌ای، پلی‌اتیلن، پی‌وی‌سی شفاف و مقاوم به اشعه ماوراء بنفش و فایبرگلاس طراحی کرده‌اند (شکل ۱–۱۳). بیوراکتورها سیستم‌های کنترل شده‌ای هستند که در آن‌ها واکنش‌های بیولوژیک صورت می‌گیرند. طبق تعریف به سیستم‌های کنترل‌شده (بسته) مورد استفاده جهت تولید میکروجلبک‌ها، باکتری‌های فتوسنتز کننده و بافت‌های گیاهی فتوبیوراکتیو گفته می‌شود. درسال‌های اخیر پیشرفت‌های متعددی در طراحی و عملکرد فتوبیوراکتورهای بسته

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برای کشت میکروجلبک‌ها صورت گرفته است و احتمالا سیستم‌های متعددی در آینده نزدیک به صورت تجاری بکار برده شوند.



شکل (۸-۱۳) شمایی از انواع فتوبیوراکتورهای بسته

فتوبیوراکتورها بر اساس شکل (لوله ای و تخت)، شیب آن‌ها نسبت به زمین (افقی، عمودی، زاویه‌دار و مارپیچی)، نحوه همزنی و جابجایی مواد توسط پمپ یا هوا، تک فازی یا دو فازی بودن و جنس (شیشه‌ای و پلاستیکی) طبقه‌بندی می‌شوند. اصول این راکتورها، کاهش ضخامت فتوبیوراکتور و در نتیجه افزایش میزان نورعبوری و در دسترس برای هر سلول استوار است. این راکتورها برای اطمینان از اپتیمم دسترسی سلول‌ها به نور و نیز افزایش تبادل گاز به خوبی بهم زده می‌شوند. از مزایای سیستم‌های بسته، کاهش آلودگی، افزایش راندمان بیومس، عدم افت دی اکسید کربن، شرایط تکرار پذیر کشت، قابلیت کنترل همه پارامترهای مهم بیوتکنولوژی و قابلیت انعطاف تکنیک‌های طراحی می‌باشند. بنابراین این سیستم‌ها می‌توانند تحت شرایط آب و هوایی مختلف عمل کنند. از جمله معایب سیستم‌های کشت بسته، هزینه بالای این سیستم‌هاست. زیرا اکثر سیستم‌های بسته تحت نور مصنوعی قرار می‌گیرند و این امر باعث هزینه بالای انرژی در این سیستم‌ها می‌شود (Spektorova *et al*. 1997: Pushparaj *et al*. 1997).

۸-۲۱- انواع فتوبیوراکتورها

در زیر برخی از انواع فتوبیوراکتورهای مورد استفاده در دنیا آورده شده است.

- بیوراکتور لوله‌ای
- بیوراکتور لوله‌ای عمودی
- بیوراکتور لوله‌ای افقی

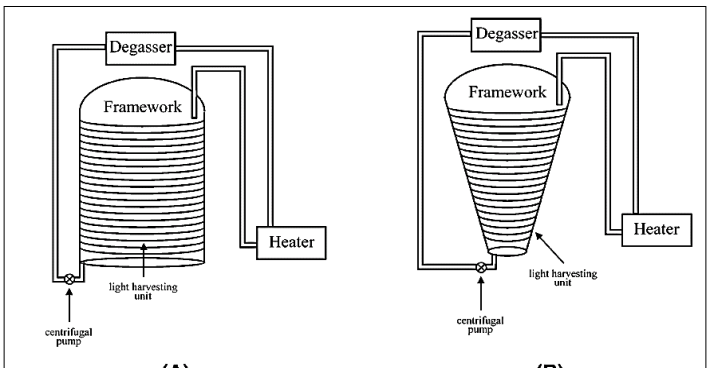
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

- بیوراکتور لوله‌ای حلزونی (پیچی شکل)
- بیوراکتور α شکل
- بیوراکتور تخمیری
- بیوراکتور صفحه تخت

جهت افزایش نسبت سطح به حجم و کاهش کمبود نور تا کنون سه نوع فتوبیوراکتور پیشنهاد شده است: Fermenter-type Rectors یا راکتور تخمیری و Flat plate Reactors یا صفحه تخت وTubular reactors یا لوله‌ای. لوله‌ای و صفحه تخت طراحی ویژه ای جهت بکارگیری حداکثر نور دارند. در نوع لوله‌ای جهت استفاده از حداکثر نور، قطر لوله‌ها به طور متوسط ۳۲ سانتی متر و با طول ۲۵۰ سانتی متر در نظر گرفته می‌شود. این دو نوع (لوله‌ای و صفحه تخت) بدون شک بدلیل منبع انرژی رایگان و سهولت تامین انرژی بیشتر مورد توجه می‌باشند. اما دارای معایبی نیز می‌باشند. اگر چه کشت میکروجلبک‌ها در سیستم‌های مطرح شده ساده و رایج است اما این سیستم ها بدلیل تکنولوژی اولیه، شکنندگی، عدم انطباق پذیری دارای محدودیت‌هایی هستند. با آنکه ابتدا افزایش مقیاس این سیستم‌ها ساده به نظر می‌رسید اما آزمایشات نشانگر این بودند که با افزایش مقیاس حجم محصول تولیدی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مشکلات اصلی در بعضی از راکتورهای لوله‌ای بلند کنترل دما می‌باشد (Carvalho *et al*. 2006).

۸-۲۱-۱- بیوراکتورهای لوله‌ای

این راکتورها از لایه‌های زیاد و پیچیده‌ای تشکیل شده است که اولین بار توسط آقای رابینسون پیشنهاد شده‌اند (شکل ۱-۱۴). راکتور شامل لوله‌های پلی اتیلن به قطر داخلی ۳ سانتی متر که در یک بدنه مدور پیچیده شده است، می‌باشد (Robinson *et al*. 1988). افزایش نسبت سطح به حجم آن از یک طرف و از طرف دیگر کاهش نیاز به فضای بزرگ نسبت به حجم زیاد آن موجب رجحان این بیوراکتور نسبت به بیوراکتورهای پیشین شده است. اما این بیوراکتور نیز دارای معایبی در سیستم کنترل دما است. همچنین با افزایش رشد مقدار نور دریافتی توسط میکروجلبک به شدت کاهش می‌یابد (Morita et al. 2001).



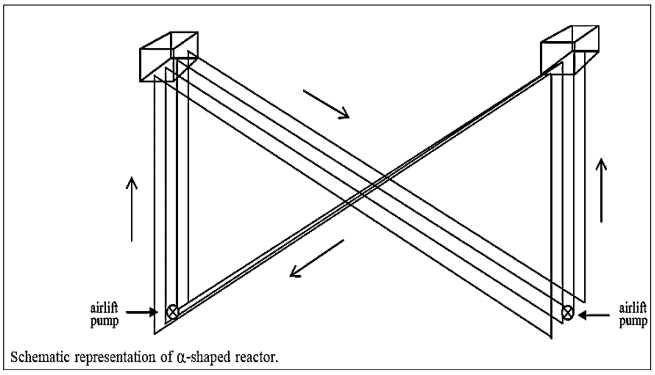
representation of helical tubular reactors: Biocoil (A) and conical framework (B).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۸-۱۴) بیوراکتور لوله‌ای

۸-۲۱-۲- بیوراکتور به شکل آلفا

در این بیوراکتور که نمایی از آن در ۱-۱۵ آمده است جهت به حرکت درآوردن و هم‌زدن محیط کشت از پمپ airlift استفاده می‌گردد. قطر لوله‌های پی وی سی در این راکتور ۲/۵ سانتی متر با طول ۲۵ متر در نظر گرفته می‌شود. این راکتور دارای مزیت‌های فراوانی است که از آن جمله می‌توان به صعود و نزول مایع در زاویه ۴۵ درجه اشاره کرد که در این حالت نور به مقدار کافی به آن برخورد می‌کند. در این سیستم سرعت بالای جریان موجب کاهش در استفاده از نیروی هوا جهت بالا بردن مایع می‌گردد (Lee *et al*. 1995).

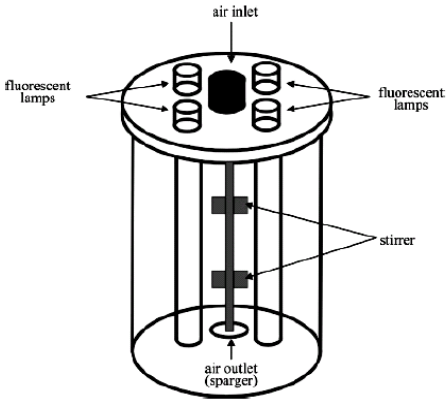


شکل (۸-۱۵) بیوراکتور به شکل آلفا

۸-۲۱-۳- بیوراکتورهایی به شکل فرمانتور

در این نوع از بیوراکتورها (شکل ۱-۱۶) که با حجم متوسط ۲۵۰ لیتر برای کشت میکروجلبک مورد استفاده قرار می‌گیرند، به علت پایین بودن نسبت سطح به حجم و همچنین پایین بودن کارائی نور راندمان تولید پایین است. برای غالب شدن به این مشکل اصلی، یک سیستم مصنوعی جهت تامین نور در داخل آن تعبیه شده است که سیستم را قادر به توزیع یکنواخت نور می‌سازد (Eriksen *et al*. 1996).

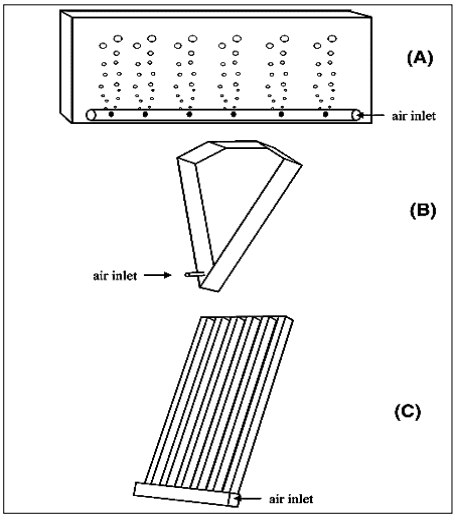
DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۸–۱۶) راکتور به شکل فرمانتور

۸-۲۱-٤- بیوراکتور صفحه تخت

این بیوراکتور به تصور استفاده از حداکثر نور خورشید در ابعاد ۲ در ۱ متر در ۱۰ سانتی متر و به طور متوسط حجم ۲۰۰ لیتر طراحی شده است. بنابراین صفحه‌هایی با عمق کم و نسبت سطح به حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. محیط کشت در یک سرعت آرام در بین صفحات به جریان در می‌آید (شکل ۱–۱۷).



شکل (۸–۱۷) بیوراکتور صفحه صاف

اما با گذشت زمان و افزایش رشد نیز کاهش در میزان نوردهی مشاهده می‌گردد که باید صفحات باریک طراحی شود که این خود نیز عیب به شمار می‌رود چون نیازمند فضای بیشتر جهت تولید است (Tredici, 2004).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۸-۲۲- مزیت استفاده از فتوبیوراکتورهای تخت

فتوبیوراکتورهای صفحه تخت معمولاً از یک محفظه مستطیل شکل با عمق ۱-۱۰ سانتی متر و ارتفاع و عرضی که عملاً بیش از ۱ متر نمی باشد تشکیل می شود (Tamburic *et al*. 2011: Enzing *et al*. 2014). طول و ارتفاع واقعی فتوبیوراکتورهای صفحه تخت بر اساس اختلاط محیط داخل آن تعیین می شود. ابعاد این سیستم ها طوری باید طراحی شود که الگوی اختلاط مناسبی در بیوراکتور برقرار شود تا مواد مغذی و خود ریز جلبک ها توزیع متوازنی داشته باشند(Tamburic *et al*. 2011) این گونه فتوبیوراکتورها بر مبنای نسبت بالای سطح به حجم (S/V) که منجر به افزایش راندمان فتوسنتز خواهد شد طراحی می شوند (Enzing *et al*. 2014). مزیت استفاده از فتوبیوراکتورها تخت در مقایسه با سیستم های باز و سایر فتوبیوراکتورهای بسته فضای کمتر و هزینه برداشت پایین می باشد. در سالهای اخیر تلاش عمده جهت افزایش کارایی فتوسنتتیک ریزجلبک ها تحت نور بالا (شرایط عادی در یک روز آفتابی) انجام شده است. استراتژی مهم جهت اینکار افزایش میزان نور در سطح راکتورمی باشد که این امر با انباشته سازی واحدهای فتوبیوراکتور بصورت عمودی (فتوبیوراکتورهای صفحه تخت) امکانپذیر خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۹- فصل نهم : راه‌اندازی، ارزیابی و رفع مشکلات احتمالی کارکرد سامانه پرورش و برداشت ریزجلبک‌ها

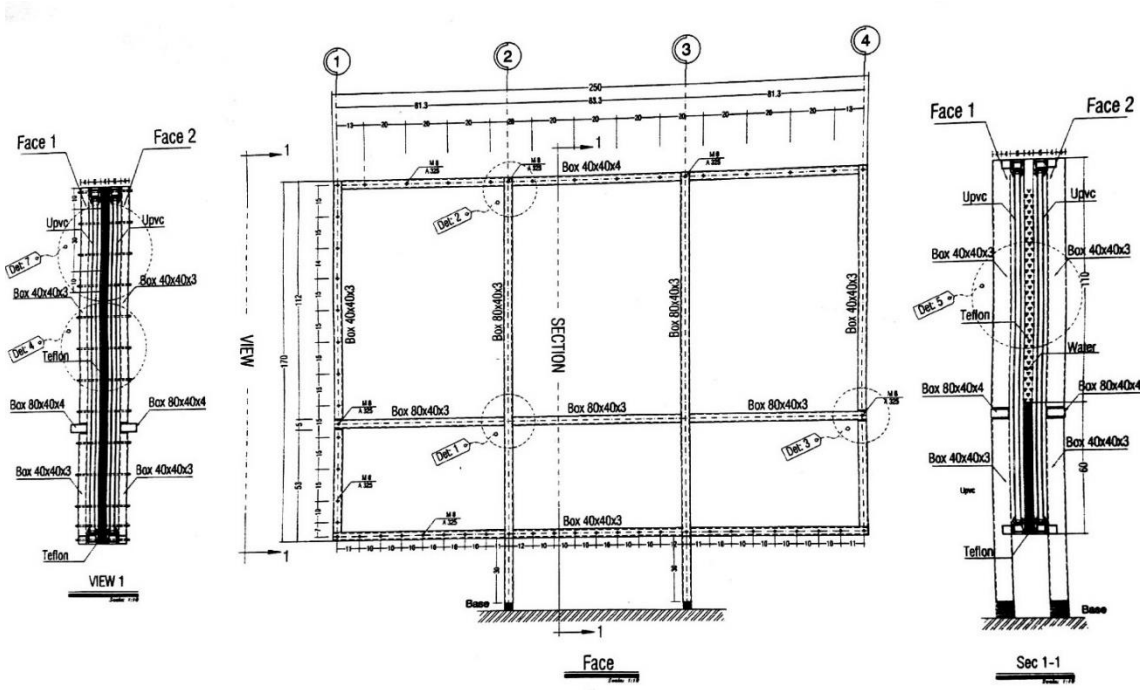
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۹-۱- مقدمه

در این فصل، طراحی، ساخت و پارامترهای مؤثر بر عملکرد فتوبیوراکتورها از جمله زمان اختلاط و انباشتگی گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۹-۲- طراحی فتوبیوراکتور

ظرفیت بالای فتوبیوراکتور تخت (طول و ارتفاع بالا) باعث افزایش مضاعف فشار استاتیکی در قسمت های پایینی و جداره سیستم خواهد شد. بنابرین برای ساخت این سیستم محاسبات سازه‌ای جهت تعیین مصالح مورد نیاز با مقاومت مطلوب لازم بود که این کار به صورت کاملاً دقیق به انجام رسید. شکل ۲-۱ جزئیات اجرایی سازه فتو بیوراکتور را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۱) جزئیات سازه‌ای فتوبیوراکتور طراحی شده

با توجه به کاربری فتوبیوراکتور که سیستمی پژوهشی بوده و داخل آن با مایع پر خواهد شد و لزوم آب بندی سازه مذکور، در طراحی آن به کاهش تغییر شکل‌های خمشی، آب‌بندی، قابلیت اجرایی و زیبایی ظاهری توجه شده است. بر این اساس برای چهارچوب اصلی این دستگاه المان‌های فولادی قوطی شکل و برای بقیه قسمت‌ها المان‌های صفحه‌ای از جنس پلکسی گلاس که شفاف بوده و قابلیت تحمل تغییر شکل‌های خمشی را دارند انتخاب شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

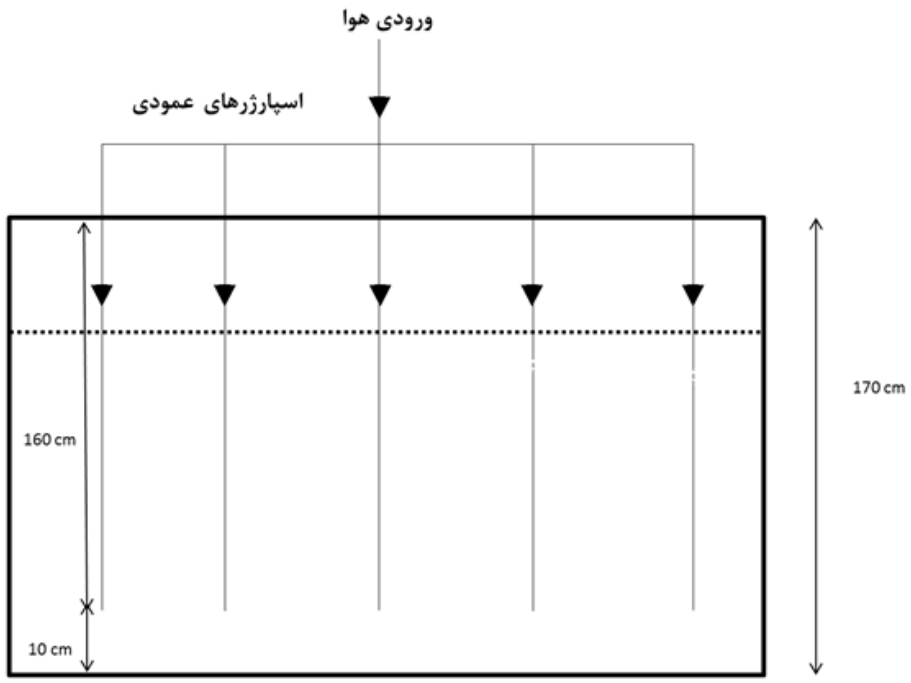
همچنین به عنوان یک نوآوری برای آب‌بندی، آب‌بندهای (واتراستاپ) هیدروفیلی در نظر گرفته شد. در طرح نهایی سازه فتوبیوراکتور جهت آب‌بندی از چهارچوب های upvc و واشر آب بند کننده آن‌ها در کناره های دستگاه استفاده گردید و در عوض ضخامت المان‌های فولادی به کار رفته در چهارچوب کناری کاهش داده شد. همچنین جهت محاسبه بارهای وارد شده به ساز فتوبیوراکتور از مبحث ششم مقررات ملی و دو ترکیب بار DL و DL+LL استفاده شد. طراحی سازه مذکور با استفاده از مبحث دهم مقررات ملی و همچنین آیین نامه طراحی سازه‌های فولادی (AICS- ACD89) و آیین نامه جوشکاری سازه‌های فولادی (ASW) انجام شده است.

۹-۳- مصالح و ساخت

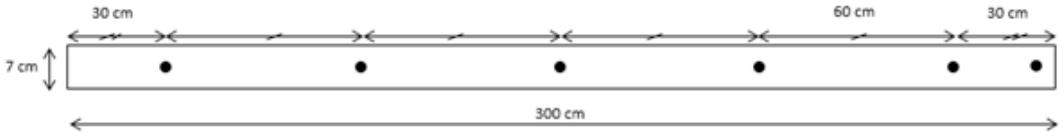
فتوبیوراکتور ساخته شده در این پروژه فتوبیوراکتور صفحه تخت مسطح با ابعاد ۱/۷*۳ متر می‌باشد. نوع مصالح استفاده شده در این فتوبیوراکتور به گونه‌ای است مقاوم بالایی در مقابل مواد خورنده دارند. فتوبیوراکتورهای عمودی موجود در دنیا در حال حاضر تا ارتفاع ۱ متر استفاده می‌شوند (Tamburic et al. 2011: Enzing et al. 2014). که در این پروژه ارتفاع فتوبیوراکتور عمودی ۱/۷ متر با ارتفاع کاری ۱/۵ متر انتخاب شد تا رلندمان تولید در واحد سطح افزایش یابد. همچنین جهت افزایش عمر دستگاه و نیز راحتی در تمیزکاری آن و تعویض قطعات، فتوبیوراکتور به نحوی طراحی گردید که بخش‌های مختلف آن بدون آسیب رساندن به بخش‌های دیگر قابل تعویض و تمیز کردن باشد.

در ساخت این فتوبیوراکتور از ۵ اسپارژر عمودی استفاده شد که با این کار هوا ورودی به طور مساوی و توزیع مناسب وارد فتوبیوراکتور می‌گردد. شکل ۲-۲ نمای روبر از فتوبیوراکتور و شکل ۲-۳ نمای از بالای فتوبیوراکتور و محل قرار گیری اسپارژرها را نشان می‌دهد. هر اسپارژر شامل ۸ سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر می‌باشد که در قسمت تحتانی اسپارزرها تعبیه شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۹-۲) نمای روبرو از فتوبیوراکتور طراحی‌شده



شکل (۹-۳) نمای از بالای فتوبیوراکتور

۹-٤- زمان اختلاط (mixing time)

زمان اختلاط به صورت زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۹۵ درصد اختلاط کامل تعریف می‌شود. برای اندازه‌گیری زمان اختلاط از روش ردیابی pH استفاده شد (de Araújo, 2014). زمان اختلاط در این روش با انحراف ۵ درصد انحراف از همگنی کامل ثبت شد.

۹-۵- انباشتگی گاز (gas holdup)

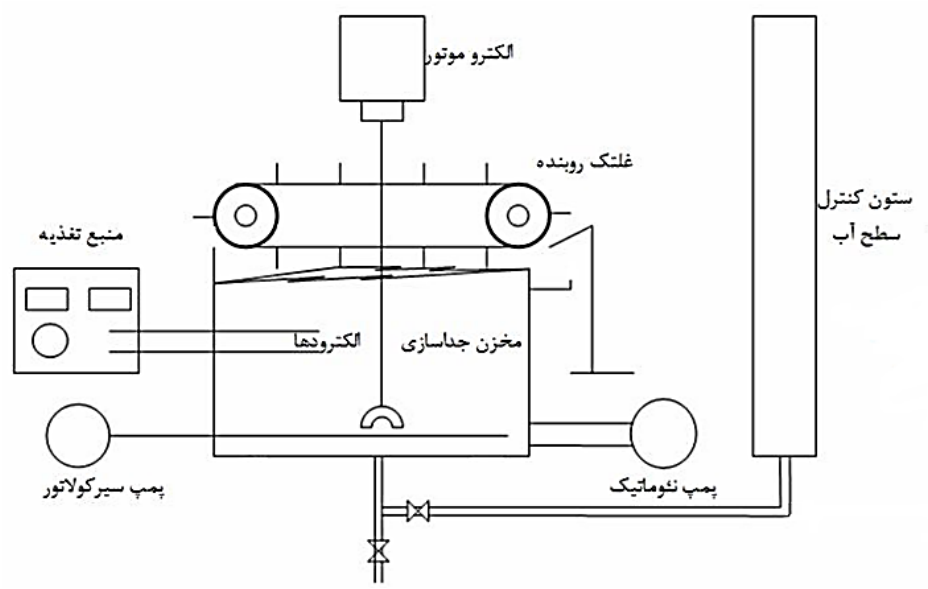
DOI: 10.30503/nripress.2020.290

انباشتگی گاز بر حسب انبساط حجمی به صورت رابطه زیر محاسبه شد. در این رابطه HL و HG به ترتیب ارتفاع مایع قبل و بعد از هوادهی می‌باشد (Pirouzi *et al*. 2014).

$$\varepsilon = \frac{H_G - H_L}{H_G} \qquad (۹-۲۲)$$

۹-۶- برداشت میکروجلبک با روش انعقاد الکتریکی

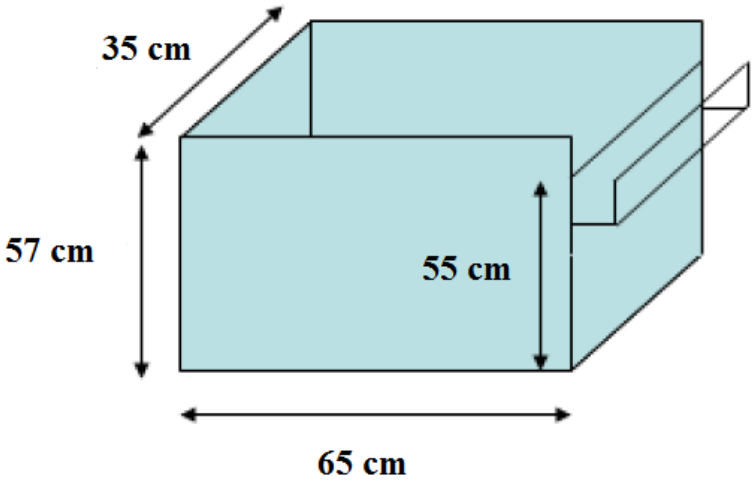
روش‌های مختلفی برای جداسازی ریزجلبک‌ها در جهان به کار می‌روند که هر یک دارای معایب و مزایایی می‌باشند. در این پروژه تحقیقاتی برای جداسازی ریزجلبک‌ها از روش الکتریکی با استفاده از دستگاه برداشت استفاده شد. با توجه به انواع روش‌های جداسازی میکروجلبک‌ها از محیط کشت و با در نظر گرفتن تجربیات حاصل از کارهای قبلی صورت گرفته در پژوهشکده صنایع غذایی، طراحی دستگاهی جدید که کنجایش برداشت ۱۲۰ لیتر از میکروجلبک را در هر مرتبه از ران داشته باشد، هدف‌گذاری شد (شکل ۲-۴).



شکل (۹-۴) نمای کلی از دستگاه طراحی شده هیبرید جداساز میکروجلبک از محیط کشت

بدین منظور مخزنی مکعبی با ابعاد ۶۵ سانتی‌متر (طول)، ۳۵ سانتی‌متر (عرض) و با ارتفاع ۵۷ سانتی‌متر ساخته شد. همچنین برا اینکه آب از لبه‌های مخزن سرریز نکند، ارتفاع سه وجه جانبی مخزن ۵۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و فقط ارتفاع یکی از وجه‌ها ۵۵ سانتی‌متر تعیین شد تا عمل سر ریز میکروجابک‌ها فقط از طریق یکی از وجه‌ها بر روی ناودانی جانبی صورت پذیرد (شکل ۲-۵).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۹–۵) ابعاد مخزن مکعبی جدید طراحی شده در این پروژه

برای تامین جریان الکتریسیته از یک منبع DC با مدل PS-305D ساخت شرکت Dazheng چین استفاده گردید (شکل ۲–۶). بیشینه ولتاژ تولیدی این منبع تغذیه ۳۰ ولت و حداکثر جریان آن ۵ آمپر می‌باشد. میزان ولتاژ و جریان توسط چهار پتانسیومتر با دقت ۰/۰۱ آمپر و ۰/۱ ولت تنظیم در دو نمابشگر این منبع تغذیه نشان داده شده‌اند.کابل‌های مثبت و منفی منبع تغذیه به دو الکترود آلومنیومی وصل شده و شدت جریان بر روی ۰/۳ آمپر تنظیم گردید.



شکل (۹–۶) منبع تغذیه DC

همچنین برای برداشت پیوسته میکروجلبک‌های منعقد شده از سطح آب یک نوار نقاله موازی با سطح آب نصب گردید. این نوار نقاله دارای پره‌های لاستیکی می‌باشد که از یکطرف وارد آب شده و با حرکت رو به جلو و بالا،

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

میکروجلبک‌های منعقد شده را به لبه انتهایی مخزن رسانده و از آنجا به داخل ناودانی مورب می‌ریزد و به این ترتیب به طور پیوسته میکروجلبک‌ها را از محیط کشت جدا می‌نماید. برای چرخاندن نوار نقاله از موتور گیربکس سه فاز استفاده گردید که دور آن توسط اینوتر قابل کنترل بود.

۹-۷- سویه‌های دونالیلای مورد استفاده

در این تحقیق از ۱۱ سویه ریزجلبک سبز دونالیلا که در بانک میکروبی پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز نگهداری می‌شد برای انجام آزمایشات و غربالگری استفاده شد (شکل ۲-۷).



شکل (۹-۷) محل نگهداری سویه‌های جمع‌آوری شده دونالیلا در فیتوترون پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی

پس از تحویل سویه‌های مورد نظر از بانک میکروجلبک پژوهشکده، ابتدا سویه‌ها به محیط کشت جدید انتقال یافتند. بهترین محیط کشت برای کشت ریزجلبک دونالیلا سالینا، محیط کشت اصلاح شده جانسون[1] است. این محیط که بصورت آب دریاچه مصنوعی[2] بود، شامل ترکیبات موجود در جدول ۲-۱ است. منبع غذایی نیترات یک مولار و فسفات ۰/۱ مولار بصورت محلول استوک[3] تهیه می‌شود. از سوی دیگر نیز تمام مواد مورد نیاز برای تأمین مواد کم‌مصرف[4] در محیط کشت دونالیلا بصورت استوک در حجم یک لیتر تهیه گردید. پس از توزین مواد اولیه، ۵ سی‌سی از استوک تهیه‌شده از مواد کم‌مصرف و ۵ سی‌سی از محلول یک نرمال نیترات به محیط افزوده‌شده و pH

[1]Jonson
[2]ASW: Artificial Sea Water
[3]Stock
[4]Trace elements

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

نهایی با اسـید HCl ۲مولار در حدود ۷/۵ تنظیم می‌شـود. محلول ۰/۱ مولار فسـفات بطور جداگانه اتوکلاو شـده و پس از استریل شدن به میزان ۵ سی‌سی به ۹۹۵ سی‌سی محیط استریل اضافه شد. افزودن جداگانه محلول فسفات، برای جلوگیری از رسوب محلول فسفات در تداخل با سایر یون‌های موجود در محیط کشت در حین اتوکلاو است.

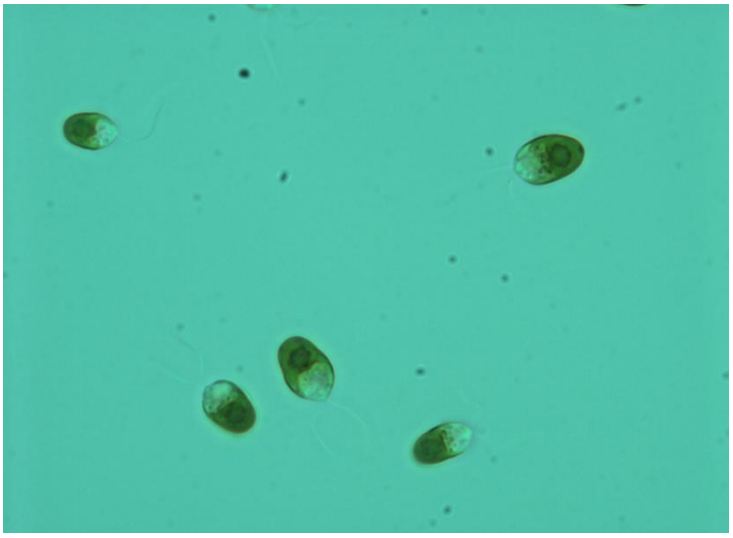
جدول (۹-۱) محیط کشت اصلاح شده جانسون برای کشت دونالیلا

	ترکیب شیمیایی مواد مصرفی	مقدار در لیتر
	NaCl	87.75 g
	$MgCl_2.\ 6H_20$	9.8 g
	$CaCl_2.\ 2H_2o$	0.53 g
	Na_2SO_4	3.2 g
	K_2SO_4	0.85 g
	Tris- Base	6 g
محلول مواد کم مصرف		5cc (پس از اتوکلاو)
A	KNO_3-solution(1M)	101.11 g
B	KH_2PO_4-solution(0.1M)	13.609 g
	$CoCl_2.6H_2o$	4 mg
	$MnCl_2.4H_2o$	0.72 mg
	$NaMo_4.2H_2o$	0.25 mg
C	Na_2EDTA	4.578 mg
	$FeCl_3.6H_2o$	1.259 mg
	$CuSo_4.7H_2o$	10.4 mg
	$ZnSo_4.7H_2o$	17 mg

۹-۸- واکشت سویه‌ها

با توجه به غنی بودن محیط کشت این ریزجلبک‌ها از مواد غذایی و رشد سریع آن‌ها در محیط، به منظور دستیابی به نمونه‌های عاری از آلودگی باکتریایی و به حداقل رساندن لاشه سلولی، واکشت سویه‌ها به صورت منظم انجام گردید تا کشـت‌های عاری از آلودگی و شـاداب به دسـت آید (شـکل ۲-۸). در ادامه با اسـتفاده از کیت تشـخیص آلودگی میکروبی، کشت‌های عاری از آلودگی اتخاب و از طریق بررسی میکروسکوپی نیز وضعیت سلول‌ها نیز چک شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۹-۸) تصویری از وضعیت ریزجلبک دونالیلا در زیر میکروسکوپ

۹-۹- ساخت و راه‌اندازی Set up کشت و غربالگری سویه‌ها

جهت عملی کردن طراحی آزمایش انجام‌شده نیاز به راه‌اندازی یک سیستم کشت مخصوص بود. این سیستم کشت می‌بایست با جا دادن ۱۱ عدد ارلن‌مایر ۲۵۰ml در خود، شرایط کشت مناسب اعم از دمای مناسب، اختلاط کافی و جریان گاز CO_2 را در کنار نورسانی با شدت نور ثابت را به محیط‌های کشت فراهم می‌کرد. نمایی کلی از سیستم کشت طراحی شده در این پژوه، در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. اجزای سیستم کشت طراحی شده به شرح زیر می‌باشد:





DOI: 10.30503/nripress.2020.290

شکل (۹–۹) نمای کلی از سیستم کشت راه‌اندازی شده برای غربالگری ایزوله‌های مقاوم به درصدهای بالای گاز CO_2

۹-۹-۱- حمام آب شیکردار

به منظور کنترل دمای اطراف محیط کشت‌ها و همچنین ایجاد اختلاط یکسان و بطور مداوم از یک حمام شیکردار دیجیتالی استفاده گردید. این دستگاه می‌توانست ۱۵ ارلن ۲۵۰ml را در خود جای دهد.

۹-۹-۲- لامپ LED

جهت نور رسانی به محیط کشت از لامپ های LED خاصی که طیف نور سفیدی از خود منتشر کرده و هریک متشکل از سه لامپ کوچک ۱W بودند، استفاده شد. این لامپ‌های LED در عین تأمین شدت نور بالا حرارت ناچیزی تولید می‌کردند. این ویژگی برای سیستم کشت مورد نظر از لحاظ سهولت کنترل دما، نکته بسیار مهمی بود. ۱۸عدد از این لامپ‌ها در ۳ ردیف ۸ تایی بر روی سقف محفظه تعبیه شدند.

۹-۹-۳- محفظه

برای ساخت محفظه از جنس پلکسی‌گلاس استفاده شد که بر روی حمام شیکردار نصب گردید. بدین ترتیب با این کار یک محیط بسته‌ای فراهم شد. همچنین لامپ‌های LED در چند ردیف روی سقف متحرک آن تعبیه شدند که این سقف قابلیت تغییر مکان (در جهت بالا و پایین) داشته و به این ترتیب امکان تنظیم شدت نور دلخواه را برای اهداف مختلف به محیط کشت را می‌داد.

۹-۹-٤- تأمین گاز CO_2

همچنین در این سیستم جهت تأمین گاز CO2 مورد نیاز برای رشد ریزجلبک از یک کپسول CO2 استفاده شد. همچنین برای کنترل دبی جریان گاز ورودی به سیستم از یک فلومتر گازی با محدوده سنجش ml/min ۱۰۰۰–۱۰۰ استفاده شد و برای جلوگیری از ورود آلاینده‌ها نیز از یک میکروفیلترگازی بهره برده شد.

۹-۱۰- غربالگری سویه‌های دونالیلای حساس و مقاوم به CO_2

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برای انجام غربالگری میکروجلبک‌های دونالیلا از لحاظ میزان مقاومت و حساسیت به CO2 در این پروژه، ابتدا ۱۱ سویه‌ی دونالیلا تحت تیمار با غلظت‌های مختلف گاز CO2 (غلظت‌های ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) قرار گرفتند. بعد از تیمار سویه‌های مورد نظر با غلظت‌های مختلف گاز CO2، میزان رشد آن‌ها در مدت ۱۴ روز و با رعایت فاصله‌های دو روزه اندازه‌گیری شد.

۹-۱۱- اندازه‌گیری دانسیته نوری[1] (OD)

یکی از روش‌های مرسوم بررسی رشد سلولی، اندازه‌گیری OD محیط‌کشت است. OD در واقع میزان طیف جذب نور با طول موج مشخص را توسط محیط‌کشت مورد آزمایش نشان می‌دهد و معیاری از رشد سلولی در محیط است. اندازه‌گیری OD محیط کشت ریزجلبکی بطور روزانه با اندازه‌گیری طیف جذبی نور مرئی در طول ۶۸۰nm توسط اسپکتروفوتومتر انجام شد. با توجه به اینکه ریزجلبک‌ها بویژه ریزجلبک‌های سبز دارای کلروفیل هستند و بیشترین میزان طیف جذبی کلروفیل در ۶۸۰nm است، طیف جذبی در این طول موج معیاری از میزان کلروفیل ریزجلبک و آن هم بیانگر میزان رشد سلول ریزجلبک است. جهت افزایش دقت اندازه‌گیری درصورتیکه OD نمونه از مقدار ۰/۷ تجاوز می‌کرد، نمونه با محیط کشت خالی۲ از ریزجلبک رقیق می‌شد و در نهایت عدد حاصل به نسبت رقت ضرب می‌شد تا OD واقعی بدست آید. به منظور اندازه‌گیری میزان رشد سویه‌ها و همچنین میزان آلودگی نمونه‌ها، از دستگاه اسپکتروفوتومتر با طول موج‌های ۶۸۰ و ۵۵۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۲-۱۰).



شکل (۹-۱۰) نمای کلی از دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد استفاده در این پروژه

[1]Optical density (OD)
[2] Blank medium

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۹-۱۲- برآورد AFDW یاخته‌های ریزجلبک

رشد سلول با استفاده از چگالی نوری (OD) هر دو روز یکبار با استفاده از روش اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. رابطه بین OD680 و وزن خشک بدون خاکستر۱ (AFDW) بر اساس رسم منحنی محاسبه شد (Liu and Yildiz, 2018) و میزان آن برای زیتوده سویه‌های های مورد مطالعه ریزجلبک (mg l-1) محاسبه شد. برای این منظور حجم مشخصی از کشت ریزجلبک از طریق فیلترهای شیشه ای واتمن فیلتر شد. پس از شستشو با محلول ایزوتونیک کلرید سدیم، توده ریزجلبکی حاوی فیلتر در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و در نهایت در کوره ۵۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه خاکستر شد. وزن خشک بدون خاکستر زیتوده سپس با کم کردن مقدار وزن جرم حاوی فیلتر از وزن اولیه اندازه‌گیری شد. بر اساس معادله رگرسیون، غلظت زیتوده برای هر دو سویه مورد مطالعه با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$Biomass\ \left(\frac{mg}{l}\ AFDW\right) = OD680 \times 411.7, R = 0.95 \qquad (۹-۲۳)$$

۹-۱۳- برآورد وزن تر یاخته‌های ریزجلبک

در ادامه محتوای کربن آلی (دی‌اکسید کربن تثبیت شده) ۵۰ درصد زیتوده ریزجلبک براورد شد (Chisti 2007Chagas et al. 2015; Herzog and Golomb 2004;) نهایتاً یاخته‌های جلبکی برداشت شده و بعد از سانتریفیوژ در ۶۰۰۰ rpm بمدت ۱۵ دقیقه و شستشو در محلول ایزوتونیک، وزن تر یاخته‌ای توسط ترازوی بسیار حساس اندازه گیری و در ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

۹-۱۴- اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید

برای سنجش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید مفادیر مشخصی از ریزجلبک برداشت و در دور ۵۰۰۰rpm و به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوژ روشناور۲ حذف شده و به هر فالکون ۳ میلی‌لیتر از حلال استون اضافه گردید. سپس فالکون‌ها به خوبی ورتکس گردید تا رنگدانه‌ها کاملا استخراج شدند. پس از آن که بیومس رنگ خود را کاملا از دست داد و سفید رنگ شد، فالکون‌ها دوباره در دور ۵۰۰۰rpm و به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد و میزان جذب سوپرناتانت هر نمونه بین طول موج‌های ۳۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. بر اساس جذب در طول موج های مشخص، مقادیر کلروفیل a و کلروفیلb و کاروتنوئید کلی طبق روابط زیر محاسبه می‌شود (Porra, 2002; Arnon, 1949; Hiscox and Israelstam; 1979).

1 Ash Free Dry Weight
2 Supernatant

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

$$Ch1\ a\ \left(\frac{\mu g}{mL}\right) = 11.24\ (A_{662}) - 2.04\ (A_{645}) \quad (۹-۲۴)$$

$$Ch1\ b\ \left(\frac{\mu g}{mL}\right) = 20.13\ (A_{645}) - 4.19\ (A_{662}) \quad (۹-۲۵)$$

$$CAR\ \left(\frac{\mu g}{mL}\right) = (1000\ A_{470} - 1.90\ Chl\ a - 63.14\ Chl\ b)/214 \quad (۹-۲۶)$$

۹-۱۵- نرخ تثبیت زیستی CO_2

نرخ تثبیت زیستی CO_2 (mg l-1 d-1) از معادله زیر محاسبه شد.

$$CO_2\ fixation\ rate = \frac{P_{overall} \times C_{carbon} \times M_{CO_2}}{M_C} \quad (۹-۲۷)$$

که در آن P بهره‌وری زیست‌توده (mg/L/d)، C مقدار کربن در زیست‌توده (g/g)، که بر اساس فرمول مولکولی معمول از زیست‌توده ریزجلبک تخمین زده شده است CO0.48 H1.83 N0.11P0.01. MCO_2 و MC به ترتیب توده مولی CO_2 و کربن هستند (Chisti 2007; Singh *et al*. 2015).

۹-۱۶- استخراج پروتئین

برای استخراج پروتئین مقدار حدود ۰/۲ گرم از زیتوده ریزجلبک را در فالکون ریخته و درون یخ قرار داده شد. به هر نمونه مقدار ۰/۰۵ گرم pvp (پلی وینیل پیرولیدون) اضافه شد. در ادامه بافر فسفات ۵۰ میکرومول به هر فالکون ۵ میلی‌لیتر اضافه شد. نمونه‌ها بمدت ۳۰ دقیقه در صفر درجه سانتیگراد در ۱۰۰۰۰ دور سانتریفیوژ، و سپس محلول رویی جهت آنالیزهای زیمایه‌ای به میکروتیوب‌ها منتقل شده بلافاصله در ازت مایع قرار داده شدند و سپس به فریزر ۸۰- درجه منتقل شدند. به منظور سنجش پروتئین بر اساس روش برادفورد، از محلول رویی مقدار ۱۰ میکرولیتر جهت سنجش پروتئین کل به ویال‌های ۲ میلی‌لیتر منتقل و ۲ میلی‌لیتر محلول برادفورد اضافه شد و بعد چند ریپتاژ بعد از ۲۵ دقیقه در طول موج ۵۹۵ نانومتر با اسپکتروفومتر میزان جذب قرائت شد.
نمونه شاهد حاوی ۱۰ میکرولیتر بافر فسفات همراه با ۲ میلی‌لیتر برادفورد بود. تمام مراحل در داخل یخ انجام گرفت. با کمک منحنی استاندارد غلظت پروتئین موجود در هر نمونه بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر محاسبه شد (Bradford 1976).

۹-۱۷- استخراج لیپید

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

برای استخراج لیپید از روش تغییر یافته‌ی بلای و دایر (۱۹۵۹) استفاده شد (Bligh and Dyer 1959). این روش در سال ۲۰۱۳ دوباره مورد تایید قرار گرفته است. برای انجام کار، ابتدا فالکون‌ها بدون درپوش وزن شدند. حدود ۲۵۰ میلی‌لیتر جلبک در فالکون‌هایی با وزن مشخص ریخته و با دور ۳۵۰۰ بمدت ۱۰ دقیقه ترجیحاً در سانتریفیوژ یخچال‌دار سانتریفیوژ شد (ترسیب). روشناور رویی دور ریخته شده و آب مقطر به منظور شستشوی نمک اضافه شد. ورتکس انجام گرفت و دوباره ۱۰ دقیقه در دور ۳۵۰۰ سانتریفیوژ شد. پلیت حاصل وزن شد و با کم کردن وزن فالکون وزن تر جلبک به دست آمد.

در مرحله‌ی بعدی ۴ گرم آب مقطر اضافه شد و به مدت ۲ دقیقه ورتکس شد، بعد ۱۰ میلی‌لیتر متانول و دو دقیقه ورتکس، سپس ۵ میلی‌لیتر کلروفرم و دو دقیقه ورتکس شد. در نهایت درب فالکون را بسته و پارافیلم دورش پیچیده و در روی شیکر بمدت ۱۸ ساعت ماند تا تک فاز شود. در ادامه ۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و ورتکس و بعد ۵ میلی‌لیتر کلروفرم افزوده و ورتکس انجام گرفت و سانتریفیوژ ۳۵۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. پس از خارج‌سازی فالکون‌ها از سانتریفیوژ که حاوی دو فاز رویی روشن و فاز زیرین سبز تیره لیپید است، فاز زیرین توسط سمپلر به فالکون‌هایی با وزن مشخص انتقال یافت و تا بخار شدن کامل کلروفرم، فالکون‌ها در زیر هود باقی ماندند. نهایتاً پس از خشک شدن کامل وزن لیپید با وزنه اندازه‌گیری شد و با فرمول زیر، درصد لیپید محاسبه شد.

$$\text{درصد لیپید} = \frac{\text{وزن لیپید}}{\text{وزن تر}} \times 100 \qquad (۹-۲۸)$$

همچنین به منظور محاسبه‌ی بهره‌وری لیپید[1] محتوای لیپید بر لیتر در وزن خشک، بر مدت زمان ۱۲ روز تقسیم شد تا میزان بهره‌وری لیپید بدست آید.

۹-۱۸- بررسی GC نیمرخ اسیدهای چرب

برای بررسی نیمرخ اسیدهای چرب استخراج شده از میکروجلبک‌های تیمار شده با گاز خروجی سیستم طراحی شده از روش Cheng و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. به این منظور، ۰/۰۲۵ گرم ماده خشک داخل ویال ۲ میلی‌لیتری ریخته شد و به آن ۵۰۰ میکرولیتر از محلول متانول اسیدی اضافه گردید. سپس درب ویال‌ها با پارافیلم پوشانده شد تا از تبخیر متانول جلوگیری گردد. ویال‌ها به مدت ۲۰ ثانیه ورتکس شدند، سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از آن نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای اتاق، سرد شدند. در مرحله‌ی بعد، ۳۰۰ میکرولیتر از محلول سدیک کلرید ۰/۹ درصد و ۱۵۰ میکرولیتر n–هگزان اضافه و به مدت ۲۰ ثانیه ورتکس شدند. در ادامه کار نمونه‌ها ۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۳۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد تا دو فاز تشکیل گردد. از فاز رویی نمونه‌های حاوی هگزان و FAME یک میکرولیتر برای کروماتوگرافی گازی (GC:Gass ABRIINW-CH2 Chromatography) با دستگاه Varian CP-3800 GC "Varian Inc., Palo Alto,

[1] Lipid Productivity

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

”CA با تجهیزات CP-Sil88 با ستون سیلیکای ۱۰۰ m, ۰/۲۵ mm I.D و ضخامت فیلم ۰/۲۵ µm تزریق شد و محتوای اسیدهای چرب با مقایسه زمان نگهداری (retention time) اسیدهای چرب استاندارد شناسایی شدند (Guan *et al*. 2011).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰- فصل دهم : راه‌اندازی کل سامانه و بررسی کارکرد آن و جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوطه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰-۱- مقدمه

در این فصل، راه‌اندازی کل سامانه و کارکرد آن مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های تجربی جمع‌آوری و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱۰-۲- راه‌اندازی سیستم DG-CHP در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز

در این پروژه علاوه بر بررسی روش‌های پرورش جلبک و بررسی تاثیرات گازهای مختلف بر روی آن‌ها و استحصال جلبک جهت مصراف گوناگون، سعی بر این شد تا پایلوتی برای بکار بردن نیروگاهای برق مقیاس کوچک در گلخانه‌ها و بازیافت حرارت و دود در جهت پرورش گیاهان برای اولین‌بار در مجموعه گلخانه مرکز بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریزراه‌اندازی گردد. در این راستا پروژه فوق در دو مرحله به اجرا در آمد:

۱- ساخت و اجرای سیستم پرورش و استحصال جلبک و آزمایش بروی انواع جلبک و تاثیر گازهای مختلف خروجی دود موتور بروی آن

۲- تولید برق و بازیافت حرارت موتور جهت تامین گرمای گلخانه و استفاده از CO_2 دود خروجی جهت تزریق به جلبک‌ها و کمک به پرورش آن‌ها

شایان ذکر است که قسمت اول پروژه توسط مرکز بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز انجام و اجرای بخش دوم به شرکت آسیا توانیر سهند واگذار گردید که مراحل انجام کارهای انجام شده در زیر آورده شده است.

۱۰-۳- طراحی و ساخت فتوبیوراکتور صفحه تخت (فاز اول کار)

با توجه به کاربری فتوبیوراکتور که داخل آن با مایع پر می‌شود، لزوم آب بندی سازه مذکور از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این در طراحی این سیستم سعی شد به کاهش تغییر شکل‌های خمشی، آب بندی، قابلیت اجرایی و زیبایی ظاهری توجه شود. بر این اساس برای چهارچوب اصلی این سیستم از المان‌های فولادی قوطی شکل و برای سایر قسمت‌ها از المان‌های صفحه‌ای از جنس پلکسی گلاس شفاف با قابلیت تحمل تغییر شکل‌های خمشی استفاده شد. شکل ۳-۱ نمایی کلی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی طراحی و ساخته شده پژوهشکده بیوتکنولوژی را در این پروژه نشان می‌دهد. بمنظور آشنایی بیشتر با خصوصیات مختلف این فتوبیوراکتور در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۱) نمایی از فتوبیوراکتور و سیستم کنترلی طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز

۱۰-۳-۱- راندمان تولید در واحد سطح و جذب دی اکسید کربن

فتوبیوراکتور ساخته شده در این پروژه دارای ارتفاع و طول بیشتر نسبت به گونه‌های مشابه خود می‌باشد. با افزایش ابعاد فتوبیوراکتور از یک سو حجم محیط کشت در واحد سطح افزایش می‌یابد و از سوی دیگر فرصت بیشتری جهت تبادل گاز و انتقال جرم بین محیط کشت و گاز ورودی ایجاد شود (Kunjapur and Eldridge, 2010). همچنین ارتفاع بالای فتوبیوراکتورمنجر به افزایش میزان انتقال جرم بین فازی (gas-liquid mass transfer) و افزایش نرخ جذب گاز کربن دی‌اکسید (CO2 capturing) خواهد شد (Soman and Shastri, 2015). در حقیقت با افزایش ارتفاع فتو بیوراکتور زمان ماند گاز ورودی (هوا – کربن دی اکسید) به سیستم بیشتر شده و در نهایت میزان حذف کربن دی‌اکسید به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

۱۰-۳-۲- دریافت نور

با در نظر گرفتن ابعاد فتوبیوراکتور ومقایسه آن با موارد مشابه نسبت (S/V) در فتوبیوراکتور ساخته شده علی رغم افزایش ارتفاع نه تنها کاهش نیافته بلکه به مقدار بسیار جزئی بهبود یافته است (Enzing et al. 2014) این مسئله بیانگر آنست که به افزایش تولید در واحد سطح امیدوار بود.

۱۰-۳-۳- مقاومت سازه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با افزایش ارتفاع و حجم محیط کشت در راکتور، فشار استاتیکی وارد شده به کف و سطوح جانبی فتوبیوراکتور افزایش می‌یابد که در صورت عدم انجام محاسبات مهندسی سازه، فتوبیوراکتور دچار تغییر فرم شده و شکستن قطعات فتوبیوراکتور اتفاق می‌افتد. به این منظور محاسبات فنی لازم برای برآورد میزان مقاومت مصالح در مقابل خمش و کرنش مصالح به کار رفته انجام گردید.

۱۰-۳-٤- خوردگی و دوام مصالح بکار رفته

کیفیت آب در فتوبیوراکتورها به گونه‌ای است که موجب خوردگی مصالح در تماس با آن می‌شود. بنابراین بنابر تجربیات پیشین جنس مواد بکار رفته در قسمت‌های داخلی (قسمت‌هایی که در تماس مداوم با محیط کشت قرار دارند) طوری انتخاب شد که دارای خصوصیات مطلوب از نظر مقاومت به خوردگی و دوام باشند.

۱۰-۳-٥- کاهش هزینه‌های استهلاک

افزایش طول عمر فتوبیوراکتور باعث کاهش هزینه‌های استهلاک شده و هزینه‌های کلی را کاهش می‌دهد. این امر به دو طریق انتخاب مصالح با دوام و نیز طراحی مناسب به نحوی که قطعات به راحتی قابل تعویض باشند می‌تواند اتفاق بیفتد که هر دو مسئله مورد توجه قرار گرفت. فتوبیوراکتور ساخته شده در این طرح به گونه‌ای طراحی شد که در صورت بروز مشکلاتی ازقبیل شکستگی و تغییر شکل هر یک از قطعات می‌توان بدون آسیب رساندن به قسمت‌های دیگر قطعه مورد نظر را به راحتی جدا کرده و تعمیر یا تعویض کرد.

۱۰-۳-٦- الگوی اختلاط

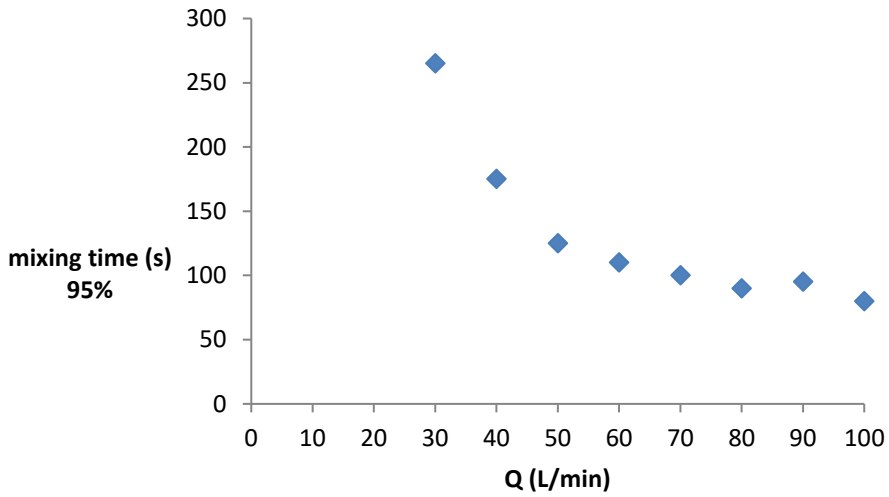
اختلاط مناسب نقش مهمی را در افزایش بازده فتوبیوبیوراکتورها دارد (Eriksen, 2008). برای انجام اختلاط در فتوبیوراکتورهای صفحه مسطح از سیستم‌های هوادهی استفاده می‌شود. برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی باید هوادهی به گونه‌ای باشد که زمان اختلاط به کمترین میزان خود برسد. زمان اختلاط نشان دهنده زمان مورد نیاز برای همگن سازی بیش از ۹۵٪ از محیط در طی یک چرخه از گردش مواد در داخل راکتور می‌باشد (Ojo, 2015). سیستم‌های هوادهی در فتوبیوراکتورهای عمودی معمولاً از قسمت تحتانی این سیستم‌ها انجام می‌شود. مشکل عمده این سیستم‌ها توزیع نامتوازن هوا در قسمت‌های مختلف آن و رسوب مواد بر روی سوراخ‌های هوادهی و گرفتی آن‌هاست. برای رفع این مشکل در این پروژه از لوله‌های عمودی استفاده شده است که باعث توزیع یکنواخت هوا در کلیه قسمت‌های فتوبیوراکتور می‌شود. در صورت گرفتی هر یک از این لوله‌ها، بدون نیاز به متوقف کردن فرایند، لوله گرفته شده به راحتی از سیستم جدا شده و بعد از رفع عیب مجدداً در سیستم نصب می‌شود.

۱۰-۳-۷- زمان اختلاط

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

یکی از مهمترین پارامترهای رشد اختلاط می‌باشد که منجر به توزیع یکنواخت میکروجلبک در محیط کشت شده و گرادیان نور، غلظت مواد غذایی و درجه حرارت را حذف می‌کند. زمان اختلاط به صورت زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۹۵ درصد اختلاط کامل تعریف می‌شود (Mendoza et al. 2013). زمان اختلاط طولانی و مصرف انرژی زیاد از مشکلات عمده در طراحی فتوبیوراکتورها می‌باشند. زمان اختلاط در بیوراکتور ساخته شده در این طرح در شدت‌های مختلف هوادهی با نصب یکنواخت اسپارژرها عمودی محاسبه شد.

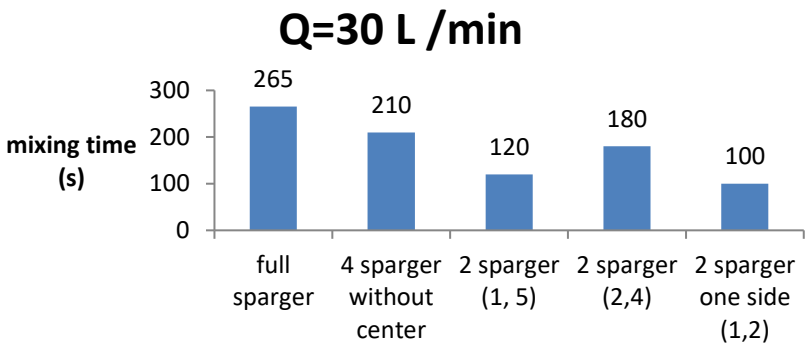
همان طور که از شکل ۳-۲ مشخص است با افزایش شدت هوادهی زمان اختلاط کاهش پیدا می‌کند. تحت این شرایط در شدت هوادهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه زمان اختلاط ۸۰ ثانیه محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای زمان اختلاط در این بیوراکتور با استفاده از اسپارژرهای عمودی همخوانی بالایی با موارد مشابه موجود در مراجع دارد. Mariana de (زمان اختلاط ۳۳.۹ ثانیه را برای بیوراکتور ستون حبابی ۵۰ لیتری و با شدت هوادهی ۲۲.۹ لیتر بر دقیقه به دست آورد Araújo, 2014). در تحقیق دیگری زمان اختلاط ۵۰ تا ۱۲۰ ثانیه برای شدت‌های هوادهی مختلف در بیوراکتور ستون حبابی ۶۰ لیتری بدست آمد (Mirón et al. 2004). در مطالعه دیگری که علی پیروزی و همکاران بر روی بیوراکتور ایرلیفت با حجم ۶۳ لیتری انجام دادند مقادیر ۶۰ تا ۸۰ ثانیه را برای زمان اختلاط در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز بدست آوردند (Mirón et al. 2004).

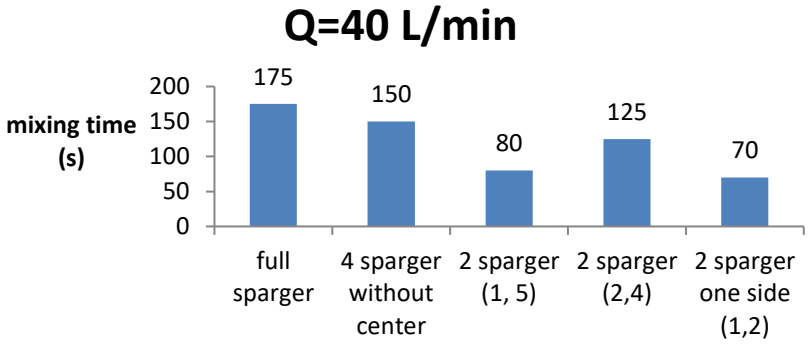


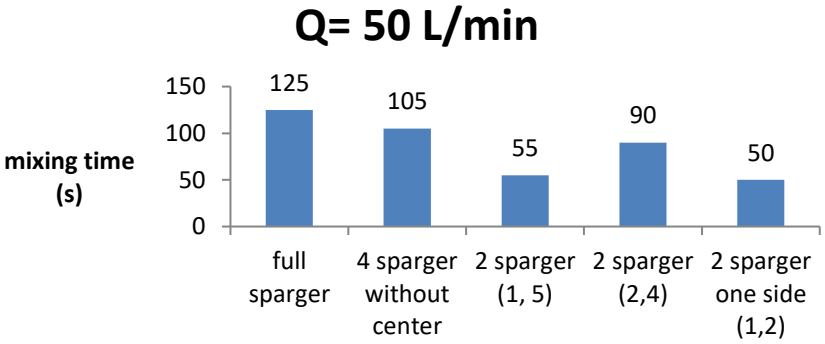
شکل (۱۰-۲) تغییرات زمان اختلاط بر حسب شدت هوادهی

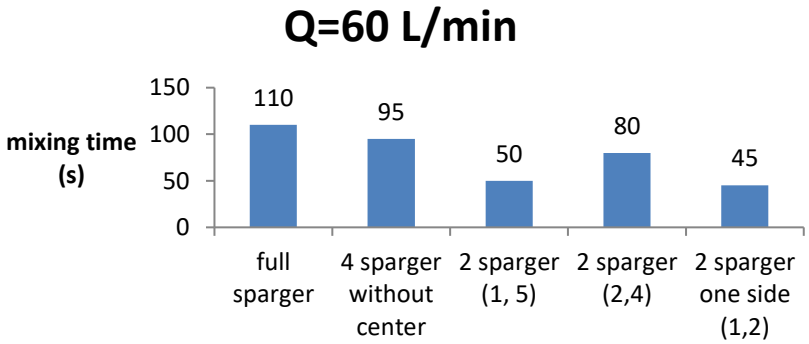
در راکتور صفحه تخت مشابه با حجم کاری ۲۵۰ لیتر مقادیر ۱۰۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای زمان اختلاط در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز گزارش شده است (Oncel and Kose, 2014). با توجه به مقادیر گزارش شده در مراجع بیوراکتور طراحی شده با اسپارژرهای عمودی با توجه به حجم کاری بالا زمان اختلاط مناسبی نسبت به موارد مشابه دارد. برای بهینه سازی و کاهش زمان اختلاط چیدمان متفاوتی از اسپارژرها در شدت‌های هوادهی ثابت به کار گرفته شد. همان طور که از شکل ۳-۳ نمایان است تفاوت چشمگیری در زمان اختلاط در چیدمان های مختلف اسپارژرها به چشم می‌خورد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

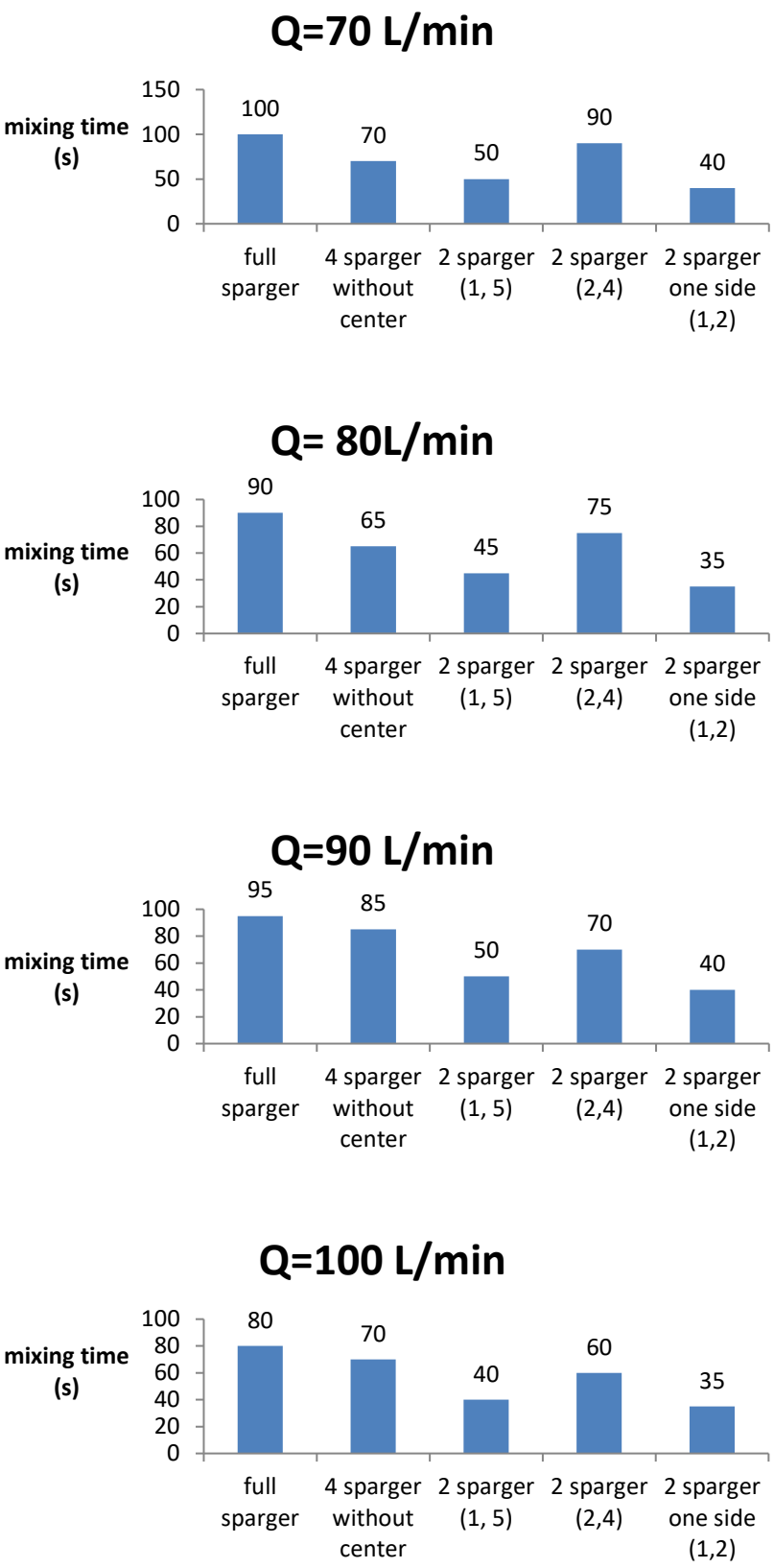








DOI: 10.30503/nripress.2020.290



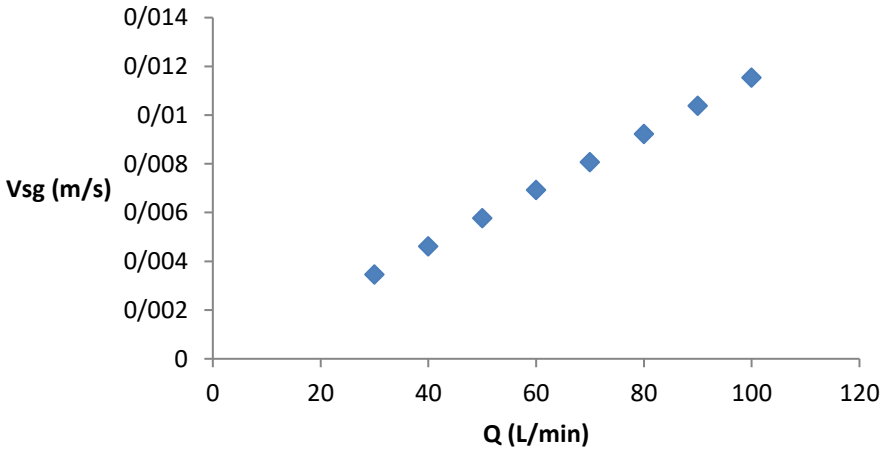
شکل (۱۰-۳) زمان اختلاط در شدت‌های هوادهی مختلف و تعبیه متنوع اسپارژرها

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با توجه به شکل ۳-۳ بهترین زمان اختلاط در شدت هوادهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه (۳۵ ثانیه) با تعبیه ۲ اسپارژر در یک جهت بیوراکتور بدست آمد. البته با محدود کردن تعداد اسپارژرها در شدت هوادهی ثابت میزان سرعت گاز ورودی از سوراخ‌های اسپارژرها افزایش یافته و در نتیجه با افزایش میزان تنش برشی موجب آسیب‌رسانی به سلول‌ها خواهد شد. عمل تنش در فتوبیوراکتورهای اسپارژردار همانند فتوبیوراکتورهای ستون -حبابی (bubble columns) و صفحه تخت به دلیل انتقال جرم و نور، اختلاط و انتقال حرارت ضروری می‌باشد که در مقیاس بالا اهمیت آن افزایش می‌یابد. اگرچه اعمال تنش بیش از حد منجر به رشد ناقص سلول، آسیب سلولی و در نهایت مرگ سلولی می‌شود.

۱۰-۳-۸- انباشتگی گاز (Holdup)

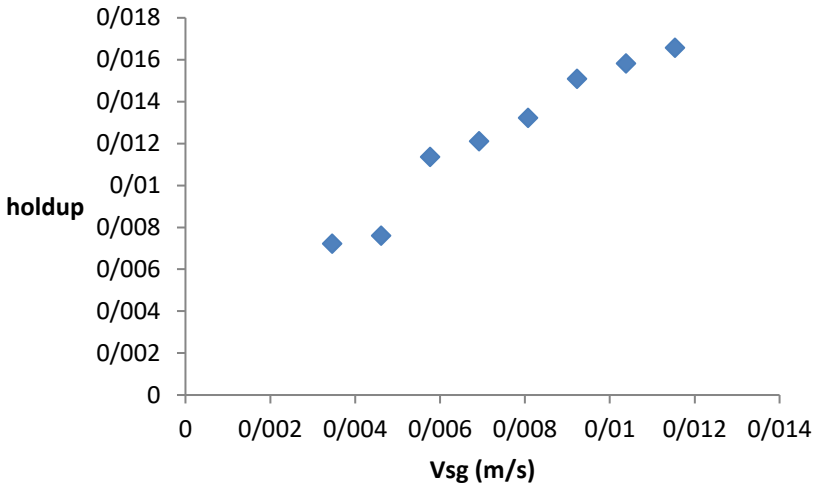
انباشتگی گاز پارمتر کلیدی بعدی در طراحی فرآیند می‌باشد که پدیده‌های انتقال در سیستم بیوراکتور ستون-حبابی را مشخص می‌کند. انباشتگی گاز به عنوان سرعت حجم گاز اشغال شده توسط حباب‌های هوا تعریف می‌شود. انباشتگی گاز با افزایش سرعت گاز افزایش می‌یابد. بیشترین انباشتگی در بالاترین سرعت‌های گاز و برای حداقل سطح مایع در راکتورها ثبت شده است. افزایش شدت هوادهی منجر به افزایش سرعت ظاهری گاز شده و در نتیجه افزایش انباشتگی گاز را در پی خواهد داشت. سرعت ظاهری بالای گازها در کشت میکروجلبک‌ها به منظور ایجاد درجه بالایی از اختلاط که منجر به گردش سلول‌ها از نقطه تاریک بیوراکتور به قسمت روشن آن می‌شود حائز اهمیت می‌باشد. میزان سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز در بیوراکتور طراحی شده در شدت‌های هوادهی مختلف محاسبه شد. همان طور که در شکل ۳-۴ دیده می‌شود با افزایش شدت هوا دهی سرعت ظاهری گاز افزایش یافته است.



شکل (۱۰-۴) تغییرات سرعت ظاهری گاز بر حسب شدت هوادهی

همچنین در سرعت های ظاهری بالا میزان انباشتگی گاز بیشتر شده است (شکل ۳-۵). مقادیر سرعت ظاهری گاز و انباشتگی گاز در شدت های هوادهی مختلف در محدوده مقادیر گزارش شده در مراجع می باشد. مقدار ۰/۰۱۶۶ به عنوان بیشترین مقدار انباشتگی گاز در شدت هوا دهی ۱۰۰ لیتر در دقیقه به دست آمد که با عدد به دست آمده (۰/۰۱۸) در بیوراکتور مشابه که با اسپارژرهای افقی مطابقت دارد (Oncel, S. and A. Kose, 2014).

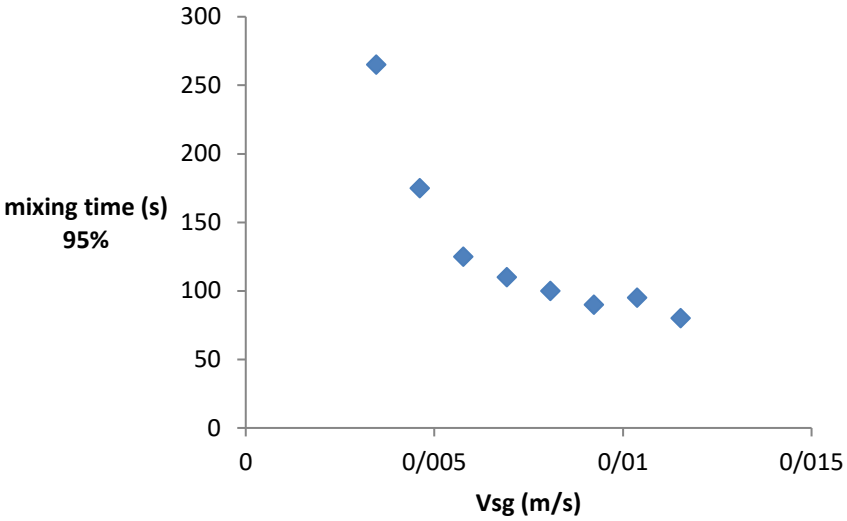
DOI: 10.30503/nripress.2020.290



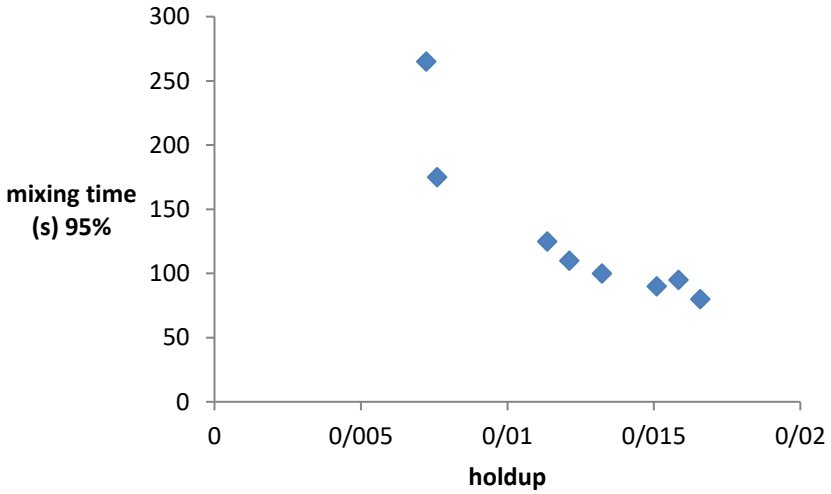
شکل (۱۰–۵) تغییرات انباشتگی گاز بر حسب سرعت ظاهری

همچنین مقدار بیشـــینه ۰/۰۱۱۵ برای ســـرعت ظاهری گاز در شـــدت هوادهی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه به‌دســـت آمد که در محدوده قابل قبول ارائه شـده در منابع می‌باشـد. در سـرعت‌های ظاهری ۰/۰۷۶ برای جلبک D. tertiolecta و ۰/۰۸۵ برای جلبک C. reinhardtii هیچ گونه آسیب سلولی مشاهده نشده است (Barbosa et al. 2003). کاماچو و همکاران اعلام کردند که مقادیر ســـرعت ظاهری گاز بین ۰/۰۱ و ۰/۰۵ برای ریزجلبک Phaeodactylum tricornutum که نسبت به تنش هیدرودینامیکی حساس است مناسب می‌باشد (Camacho et al. 1999). در پژوهشی دیگر سوزوکی و همکاران گزارش کردند ســـرعت ظاهری بالای ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه میزان مرگ و میر ســـلول‌ها افزایش می‌دهد (Suzuki et al. 1995). برای نگه داشـــتن ســـرعت گاز کمتر از مقدار بحرانی باید تعداد نازل‌ها و یا قطر ســـوراخ‌ها را افزایش داد. تغییرات زمان اختلاط بر مبنای سـرعت ظاهری گاز و انباشـتگی گاز در شـکل‌های ۳–۶ و ۳–۷ آورده شـده اسـت. همان‌طور که ملاحظه می‌شـود با افزایش میزان سـرعت ظاهری گاز و انباشـتگی گاز زمان اختلاط کاهش پیدا می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰–۶) تغییرات زمان اختلاط بر حسب سرعت ظاهری



شکل (۱۰–۷) تغییرات زمان اختلاط بر حسب انباشتگی گاز

۱۰-٤- موتور ژنراتور دوگازسوز تولید برق و تابلوی برق کنترل ژنراتور

برای راه‌اندازی فاز دوم پروژه به منظور تولید برق از یک دستگاه موتور ژنراتور ۲۵۰ کیلو وات موجود در مجموعه استفاده شد. موتور ژنراتور بصورت کامل در محل نصب قبلی دمونتاژ شده و سر سیلندر و رینگ و پیستون‌ها جهت تغییرات به کارگاه تهران ارسال و یکسری از قطعات که اسیب دیده بودن از قبیل یاتاقان‌ها و واشر سرسیلندر تعویض یا تعمیر شدند

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

.موتور از محل قبلی خارج و به محل جدید منتقل شد و پس از نفت شویی قطعات و تعمیرات لازم دوباره مونتاژ گردید (شکل ۳-۸).





شکل (۱۰-۸) مراحل خارج سازی و انتقال موتور ژنراتور به محل اصلی

موتور مورد استفاده از نوع ژنراتور دیزل بود که با توجه به نوع تامین گاز ساختگاه به مدل دوگانه‌سوز تبدیل گردید تا با توجه به استفاده از موتور ، بعنوان برق اضطراری مجموعه و وجود آزمایشگاه های حساس، تصمیم بر این شد که هم با سوخت دیزل (استارت کار) و هم با گاز شهری توان تولید برق را داشته باشد (شکل ۳-۹).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



، (۱۰-۹) نمای کلی از موتور ژنراتور راه‌اندازی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی تبریز بمنظور بهره مندی از جریان برق، بازیافت حرارت و استفاده از دود خروجی در کشت میکروجلبک

به طورکلی ژنراتورهایی که در نیروگاه‌ها و یا در سیستم های برق آماده به کاراستفاده می‌شوند، به هنگام تغییر بار ژنراتورها از تنظیم کننده‌های ولتاژ اتوماتیک (AVR) را برای تثبیت ولتاژ خود استفاده می‌کنند. بنابراین برد AVR ژنراتور موجود برای سنکرون کردن باید تعویض گردد ولی بعلت گمنام بودن مدل ژنراتور و نبود اطلاعات در مورد سیم پیچ تحریک آن AVR موجود به کارگاهی جهت تست و بدست آوردن مشخصات آن ارسال شد. پس از مشخص شدن اطلاعات مجهول در مورد مدل ژنراتور و برد AVR، جهت سنکرون کردن ژنراتور و حفاظت‌های لازم برای اتصال به شبکه تابلوی کنترلی طراحی و نصب گردید (شکل ۳-۱۰) که اولا بتواند ژنراتور را با شبکه سنکرون و مدیریت بار نماید و ثانیا خطاهای شبکه و موتور را تشخیص و در صورت لزوم اتصال را قطع نمایید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۱۰) تابلو برق نصب شده برای بکار اندازی ژنراتور و مدیریت سیستم به منظور استفاده از برق تولیدی

همچنین جهت کابل کشی و اتصال سیستم برق ژنراتور به سیستم برق مجموعه (گلخانه تحقیقاتی و همچنین ساختمان اصلی پژوهشکده بیوتکنولوژی)، با توجه به عدم وجود نقشه تاسیسات برق مجموعه، این نقشه تهیه و بهترین مکان از لحاظ ایمنی و کاهش هزینه ها برای اتصال ژنراتور به شبکه انتخاب گشت. همچنین نقشه تغییر سیستم حفاظت با توجه به شرایط جدید مشخص گردید (شکل ۳-۱۱).





شکل (۱۰-۱۱) تهیه نقشه و بهترین مکان از لحاظ ایمنی و کاهش هزینه ها برای اتصال ژنراتور به شبکه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با توجه به انتقال موتور ژنراتور و جابجایی‌های انجام گرفته برای استقرار این سیستم در زیرزمین گلخانه، بمنظور انتقال گاز شهری کنار سیستم فوق، با توجه به عدم امکان تامین گاز از انشعاب فعلی، مورد توسط پیمانکار در اداره گاز پیگیری گردید. با توجه به مذاکرات انجام شده در نهایت اعلام شد که حداکثر گاز 30 پوند قابل تحویل به موتور می‌باشد که با بررسی‌های فنی و ایجات تغییرات در سیستم گاز این موضوع مرتفع و گاز کشی 30 پوند انجام گردید و انشعاب جدیدی برای سیستم فوق در نظر گرفته شد و لوله کشی‌های لازم نیز انجام گردید. همچنین با مشخص شدن مکان نصب موتور ژنراتور دو کانال برای تهویه هوای محیط و خروج باد گرم رادیاتور طراحی شد. برای این منظور کنده‌کاری‌های لازم جهت نصب کانال‌ها صورت پذیرفت و کانال‌های تهویه در محل‌های تعیین شده نصب گردیدند (شکل ۳-۱۲).



شکل (۱۰-۱۲) محل کنده‌کاری‌های انجام گرفته جهت نصب کانال‌های تهویه

شایان ذکر است، باتوجه به اینکه دود خروجی حاصل از ژنراتور دمای نزدیک به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد داشت، بنابراین برای استفاده در سیستم‌های کشت فتوبیوراکتور طراحی شده، سرد شدن دود خروجی ژنراتور امری حیاطی محسوب می‌شد، برای همین در این پروژه برای خنک کردن دمای دود خروجی ژنراتور از مبدل حرارتی (سیستم بازیافت حرارت) استفاده گردید که دمای دود خروجی ژنراتور را تا ۴۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهد. در شکل ۳-۱۳ تصویر مربوط به مبدل حرارتی مورد استفاده در این پروژه آورده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290




شکل (۱۰-۱۳) مبدل حرارتی ساخته شده برای کاهش دمای دود خروجی حاصل از ژنراتور

سپس دود خروجی حاصل از مبدل حرارتی طراحی شده (با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد) توسط سیستم خنک کننده جانبی (شکل ۳-۱۴) تا دمای قابل استفاده ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد خنک شده و در صورت نیاز و بسته به نوع طراحی آزمایش توسط کمپروسور وارد سیستم‌های فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری طراحی شده می‌گردد. همچنین برای استفاده از حرارت تولید شده از دود خروجی ژنراتور، بکارگیری مبدل حرارتی طراحی شده در این پروژه باعث شد که بتوان از توان حرارتی دود خروجی ژنراتور در تامین سیستم گرمایشی سازه‌های موجود از طریق اتصال به موتورخانه پژوهشکده بیوتکنولوژی استفاده نمود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۱۴) طراحی سیستم خنک کننده جانبی به منظور کاهش بیشتر دمای خروجی از ژنراتور

برای بازیافت حرارت دود خروجی و با توجه به سیستم گرمایش گلخانه لوله کشی‌های لازم جهت اتصال مبدل به سیستم گرمایش انجام و تدابیر لازم جهت مواقع اضطراری اندیشیده شد. همچنین مبدل حرارت و ولوله‌های کنترل دود نصب گردیده است و به کلکتور آب گرم مجموعه متصل گشته و آماده به کار می باشد (شکل ۳-۱۵).



شکل (۱۰-۱۵) مراحل آماده‌سازی اتصال مبدل به سیستم گرمایش موتورخانه

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

هچنین بمنظور استفاده از دود خروجی حاصل از موتور ژنراتور سیستم استحصال CO_2 راه اندازی شد. برای این منظور ابتدا لوله کشی سیستم تخلیه دود پس از لوله کشی تاسیسات مکانیکی و نصب مبدل آغاز گردید و کاتالیست‌های دود سفارش داده شده نیز در محل نصب شدند (۳-۱۶).

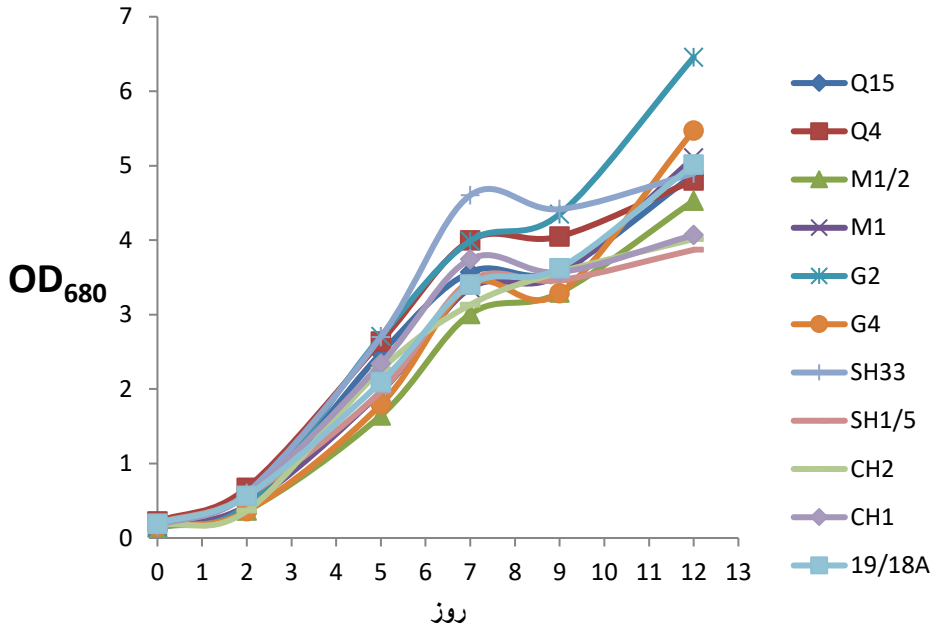


شکل (۱۰-۱۶) لوله کشی سیستم استحصال CO_2 و نصب کاتالیست‌های سفارشی بر روی ژنراتور

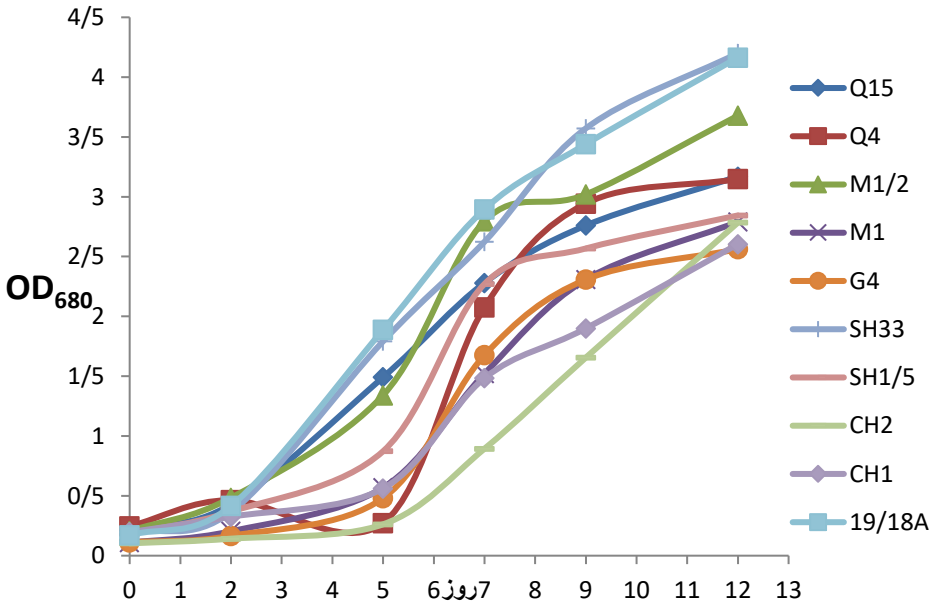
۱۰-۵- غربالگری سویه‌های دونالیلای مقاوم و حساس به دی‌اکسیدکربن

غلظت‌های مختلف CO_2 بر روی ۱۱ سویه‌ی دونالیلا جهت غربالگری سویه‌ها از لحاظ میزان مقاومت و حساسیت به CO_2 مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب که ۱۱ سویه تحت تیمار غلظت‌های ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ CO_2 قرار گرفته و میزان رشد آن‌ها در فاصله‌های دو روزه و به مدت ۱۲ روز مورد پایش قرار گرفت. منحی رشد بر اساس دانسیته نوری در طول موج ۶۸۰ نانومتر (OD680) در درصدهای متفاوت کربن دی‌اکسید رسم شد. بر این اساس بیشترین میزان رشد در غلظت CO_2 ۱۰٪ مشاهده شد که روند افزایشی رشد در غلظت بسیار بالای CO_2 ۲۰٪ و ۳۰٪ به روند کاهشی تبدیل شد اما با این وجود باز هم از میزان رشد در هوای معمولی بیشتر بود (شکل ۳-۱۷ تا ۳-۱۹).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

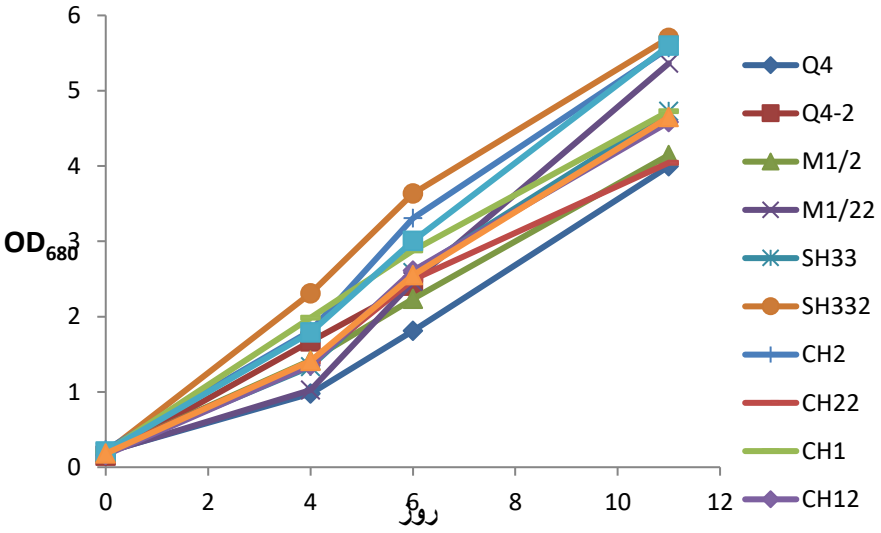


شکل (۱۰–۱۷) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۱۰ ٪



شکل (۱۰–۱۸) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۲۰ ٪

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰–۱۹) منحنی رشد ۱۱ سویه دونالیلای مورد مطالعه در کربن دی اکسید ۳۰٪

در مطالعه‌ای اثرات غلظت‌های متفاوت CO_2 ۰/۰۱ ، ۰/۰۳ ، ۳ ، ۹ و ۱۲ درصد در تولید زیست توده، تجمع لیپید و پروفایل اسید چرب و همین طور خواص بیودیزل در ریزجلبک *D. salina* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان CO_2 اثرات بارزی در ترکیب اسید چرب دونالیلا داشت. لینولنیک اسید و پالمیتیک اسید، اسیدهای چرب عمده در سلول‌های این جلبک بودند. بر اساس این نتایج *D. salina* می‌تواند برای تولید زیست توده در دریاچه‌ها و مرداب‌ها، بعنوان جایگزینی جهت استراتژی کاهش CO_2 و بعنوان یک مواد اولیه برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرد (El Baky and El-Baroty, 2014).

در مطالعه‌ای دیگری که توسط Hanaa و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام گردید گزارش کردند که رشد *D. salina* با نرخ بالای CO_2، از ۳ تا ۱۲ درصد در مقایسه با کشت‌هایی که با نرخ پایین CO_2 (۰/۰۱ یا ۰/۰۳ درصد) هوادهی می شدند افزایش می‌یابد. این نتایج توسط داده‌های به دست آمده از Oat و همکاران (۲۰۰۹) و Chiu و همکاران (۲۰۰۹) نیز مورد تایید قرار گرفتند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که ریز جلبک‌های *D. salina* و *N. oculata* در اتمسفری با CO2 غنی شده در مقایسه به CO_2 ۰/۰۳٪ بهتر رشد می‌کنند و منحنی رشد مشابهی در غلظت‌های CO2 ۲ تا ۱۰ درصد به دست آمد. همچنین زیست‌توده بصورت آشکارا با افزایش تراز CO_2 از ۰/۰۳ تا ۹ درصد افزایش یافته و در ۱۲ درصد کاهش نشان داد. بنابراین، در بین تمام کشت‌ها، کشت هوادهی شده با ۹ درصد CO_2 بیشترین مقدار زیست‌توده را در مقایسه با کشت‌های با ۰/۰۳، ۳ و ۱۲ درصد CO_2 نشان داد. در این مطالعه، در میان تمام کشت‌های *D. salina*، بیشترین نسبت رشد در کشت‌های با ۳ یا ۹ درصد CO_2 مشاهده شد (Tang *et al*. 2011: Cheng *et al*. 2006: Ota *et al*. 2009).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰-۶- اندازه‌گیری نرخ تثبیت[1] و مقدار CO_2 تثبیت شده[2] و میزان زیست‌توده کل در تیمار با غلظت‌های مختلف CO_2

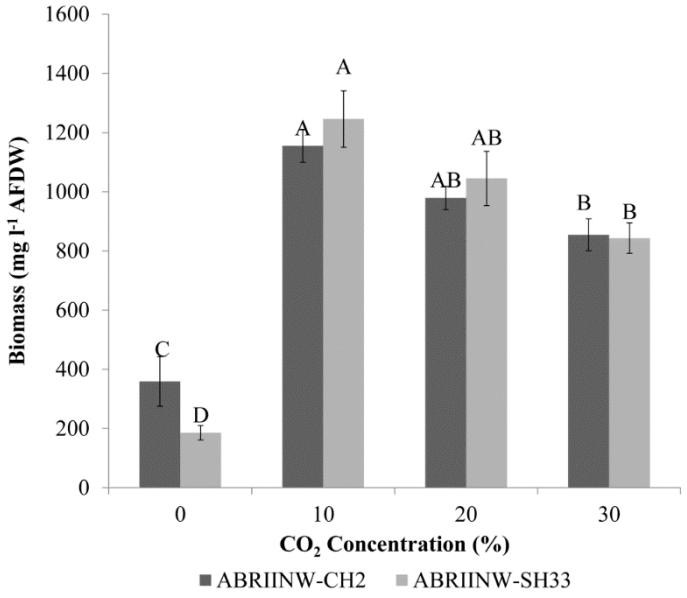
بیشترین نرخ تثبیت CO_2 تحت شرایط ۱۰٪ CO_2 می‌باشد که میزان آن در سویه‌هایABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 به ترتیب برابر با ۴۲۳/۱۹ و ۴۵۵/۷۴ $mg\ l^{-1}day^{-1}$ محاسبه شد که افزایش ۲۴/۴۵ و ۸/۸۸ برابری در مقایسه با هوای معمولی به عنوان شاهد نشان می‌دهد. بیشترین مقدار CO_2 تثبیت شده تحت شرایط ۱۰٪ CO_2 می‌باشد که مقدار آن در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 به ترتیب برابر با ۵/۴۶۹ و ۵/۰۷۸ g l-1 محاسبه شد که افزایش ۲۴/۴۲ و ۸/۸۸ برابری در مقایسه با هوای معمولی نشان می‌دهد. همچنین بیشترین میزان تولید بیومس کل در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 به ترتیب ۲/۹۸۳ و ۲/۷۷ g l -1 DW (۲۴/۴۵ و ۱۰ برابر شرایط هوای معمولی کنترل) در ۱۰٪ CO_2 بود (شکل۳-۲۰ و جدول ۳-۱).

جدول (۱۰-۱) میزان حداکثری نرخ رشد ویژه، نرخ رشد ویژه، بهره‌وری بیومس، بیومس تولید شده، نرخ تثبیت CO_2 و میزان CO_2 تثبیت شده سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2

	strain	CO_2 Aeration %			
		0.03%	10%	20%	30%
Maximum Specific Growth Rate (μmax) (h^{-1})	SH33	0.0062	0.023	0.022	0.02
	CH2	0.0079	0.022	0.0228	0.02
Specific Growth Rate (μ) (h^{-1})	SH33	0.0029	0.01	0.0089	0.009
	CH2	0.0047	0.009	0.0089	0.009
Biomass Productivity (P) ($mg^{l-1}d^{-1}$)	SH33	10.17	248.6	173.08	152.6
	CH2	26.83	230.8	173.08	148.7
Produced Biomass (gl^{-1})	SH33	0.122	2.983	2.077	1.831
	CH2	0.277	2.77	2.077	1.784
CO_2 fix. Rate ($mgl^{-1}d^{-1}$)	SH33	18.64	455.7	317.32	279.7
	CH2	47.67	423.2	317.32	272.6
CO_2 fixed (gl^{-1})	SH33	0.224	5.469	3.808	3.357
	CH2	0.572	5.078	3.808	3.271

[1] CO_2 fixation rate
[2] CO_2 fixed

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۲۰) تغییرات زیست‌توده سویه‌های ریزجلبک بومی در غلظت‌های مختلف CO_2

۱۰-۷- تغییرات محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکسایندده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل در غلظت‌های مختلف CO_2

نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مورد اندازه‌گیری (محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکسایندده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل) برای سویه‌های مورد مطالعه در جدول ۳-۲ آورده شده است. براین اساس (جدول ۳-۲) تغییرات در سطح سویه، در آلفاتوکوفرول، کربوهیدرات کل، لیپید کل، پروتئین کل و کاروتنوئید معنی‌دار ($P<0.01$) و میزان تغییرات در کلروفیل a و b و زیست‌توده غیرمعنی‌دار می‌باشند. شایان ذکر است که در سطوح مختلف تیمار با CO_2، تغییرات در تمام صفات شامل رنگیزه‌های فتوسنتزی، قند، پروتئین، لیپید و پاداکسایندده‌های چربی‌دوست معنی‌دار می‌باشند ($P<0.01$). اثرات متقابل سویه و تیمار غلظت‌های بالای CO_2 نیز برای صفات آلفاتوکوفرول، کربوهیدرات کل و پروتئین کل معنی‌دار در سطح ($P<0.01$) و برای لیپید کل، زیست‌توده، کاروتنوئید و کلروفیل a معنی‌دار در سطح ($P<0.05$) بدست آمد (جدول ۳-۲).

DOI:

جدول (۱۰-۲) جدول تجزیه‌ی واریانس (ANOVA) برای بررسی تغییرات ایجاد شده در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2

		MS							
Source	**df**	**Chl a**	**Chl b**	**CAR**	**Biomass**	**Total L**	**Total P.**	**Total C**	**α-Tocopherol**
strain	**1**	**25319.62**	**265119.71**	**127165.61**	**0.002**	**96**	**7271.05**	**1459.15**	**0.012**
treatment	**3**	**2970834.14**	**4331246.52**	**379986.64**	**5.705**	**883.83**	**24786.45**	**1489.99**	**0.025**
strain * treatment	**3**	**444298.93**	**337568.88**	**42423.33**	**0.126**	**29.44**	**3371.74**	**456.42**	**0.006**
Error	**16**	**105836.82**	**191452.39**	**12111.65**	**0.039**	**8**	**355.23**	**59.64**	**0.001**
		F							
strain	**1**	**.239 ns**	**1.385 ns**	**10.499****	**.046 ns**	**12.00****	**20.46****	**24.46****	**20.20****
treatment	**3**	**28.070****	**22.623****	**31.374****	**146.047****	**110.47****	**69.77****	**24.98****	**43.10****
strain * treatment	**3**	**4.198***	**1.763 ns**	**3.503***	**3.226***	**3.68***	**9.49****	**7.65****	**11.04****
Error	**16**								

****، * و ns بترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد و ۵ درصد و عدم معنی‌داری**

مقایسه‌ی میانگین تغییرات ایجاد شده برای صفات مورد مطالعه (محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل) بر روی سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 در غلظت‌های مختلف CO_2 در جدول ۳-۳ آورده شده است. همانطورکه از داده‌های جدول مقایسه‌ی میانگین (جدول ۳-۳) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت‌های CO_2 تا ۱۰٪ تغییرات در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل افزایشی می‌باشند. بررسی جدول زیر به ما نشان می‌دهد که با بالا رفتن غلظت‌های CO_2 تا ۲۰٪ و ۳۰٪ ما همچنان شاهد روند افزایشی تغییرات نسبت به هوای معمولی (شاهد) هستیم، اما این روند نسبت به CO_2 ۱۰٪، حالت کاهشی نشان می‌دهد که در زیر به تفکیک برای هر کدام از پارامترها متعاقباً با نمودارهای جداگانه نشان داده شده است. همچنین با توجه به جدول زیر مشاهده می‌شود میزان لیپید کل برای هر دو سویه‌ی ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 مورد مطالعه در سطح ۱۰ درصد CO_2 بیشترین مقدار را شامل می‌شود و کمترین میزان لیپید مربوط به نمونه شاهد (۰/۰۳ درصد CO_2) می‌باشد.

DOI:

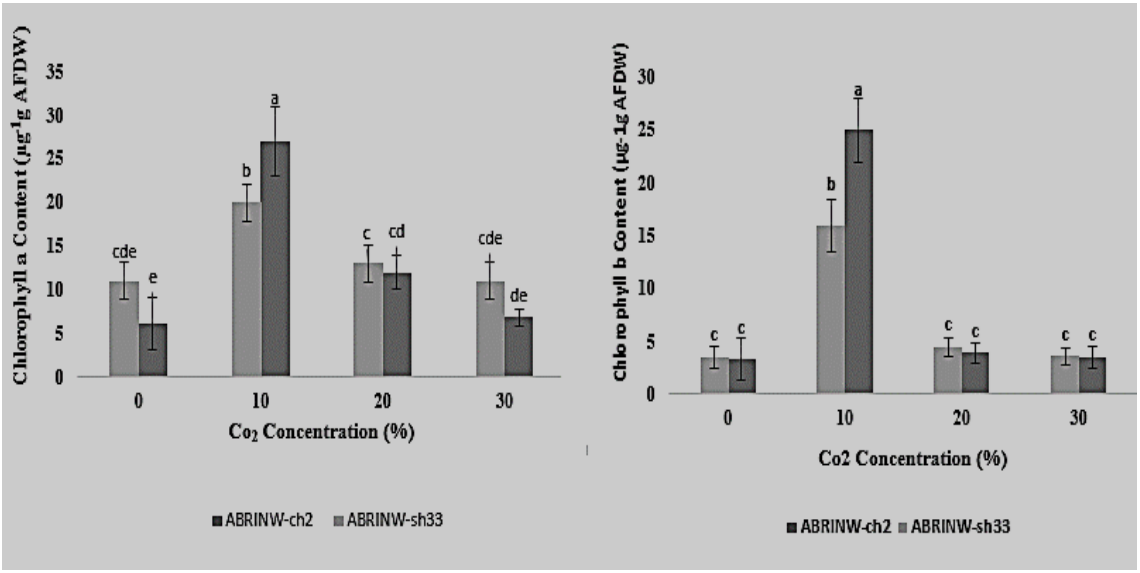
جدول (۱۰-۳) جدول مقایسه میانگین تغییرات ایجاد شده در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پاداکساینده‌های چربی‌دوست، پروتئین و لیپید کل سویه‌های بومی در غلظت‌های مختلف CO_2

		Duncan's Multiple Range Test							
strain	CO_2 concentration	Total L.	Total C.	Total P.	Chla	Chl b	Car.	α-Tocopherol	Biomass
CH2	0.03	14.3333^{f}	99.08^{a}	41.39^{e}	6.2× 10$^{2\ e}$	3.36× 10$^{2\ c}$	2.8× 10$^{2\ d}$	.2066^{cd}	.8733^{e}
	10	42.0000^{b}	51.53^{cd}	1.7× 10$^{2\ b}$	2.7× 10^{3a}	2.5× 10^{3a}	1.0× 10^{3a}	.3904^{a}	2.8107^{ab}
	20	28.3333^{cd}	72.87^{b}	87.79^{cd}	1.2× 10^{3cd}	3.9× 10$^{2\ c}$	5.2× 10$^{2\ bc}$	.2931^{b}	2.3820^{cd}
	30	27.0000^{cd}	94.51^{a}	31.12^{e}	6.8× 10^{2de}	3.5× 10$^{2\ c}$	3.0× 10$^{2\ d}$	.1894^{cd}	2.0790^{d}
H33	0.03	20.3333^{e}	73.36^{b}	91.8^{c}	1.1× 10^{3cde}	3.5× 10$^{2\ c}$	2.7× 10$^{2\ d}$	.1681^{a}	.4510^{f}
	10	50.6667^{a}	61.76^{bc}	2.1× 10$^{2\ a}$	2.01× 10^{3b}	1.6× 10^{3b}	6.3× 10$^{2\ b}$	.2574^{b}	3.0310^{a}
	20	31.3333^{c}	46.27^{d}	55.9^{de}	1.3× 10^{3c}	4.5× 10$^{2\ c}$	3.4× 10$^{2\ cd}$	.2635^{b}	2.5420^{bc}
	30	25.3333^{d}	74.22^{b}	1.1× 10$^{2\ c}$	1.1× 10^{3cde}	3.6× 10$^{2\ c}$	2.9× 10$^{2\ d}$	.2138^{c}	2.0517^{d}

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

۱۰-۸- میزان محتوای کلروفیل a و b درغلظت‌های مختلف CO_2

میزان کلروفیل a و b در دو سویه ABRIINW-CH2 و ABRIINW-SH33 در غلظت‌های مختلف CO_2 مورد اندازه‌گیری قرار گرفت تا تغییرات رنگیزه‌های فتوسنتزی را در پاسخ به غلظت‌های بالای CO_2 در مدت ۱۲روز مورد ارزیابی قرار گیرد. همانطور که در نمودارها مشخص است، همانطور که در شکل ۳-۲۱ دیده می‌شود میزان کلروفیل a و b با افزایش غلظت CO_2 تا ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ در مقایسه با هوای معمولی (۰/۰۳ درصد CO_2) به عنوان کنترل کاهش یافته است. بعبارت دیگر تیمار با غلظت‌های مختلف CO_2 نسبت به نمونه شاهد باعث کاهش رنگریزه‌های کلروفیل a و b در دو سویه ABRIINW-CH2 و ABRIINW-SH33 مورد مطالعه شده است (شکل ۳-۲۱).



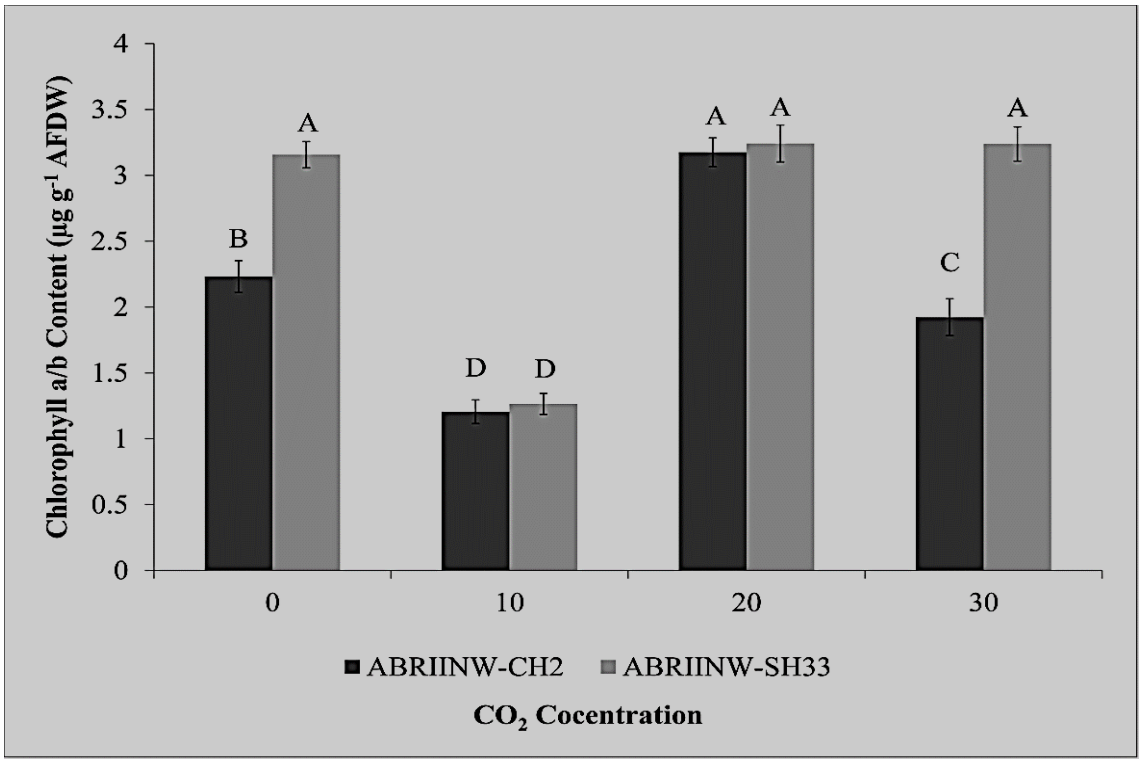
شکل (۱۰-۲۱) تغییرات محتوای کلروفیل a و کلروفیل b در پاسخ به غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی روز ۱۲ تیمار

۱۰-۹- مقدار نسبت کلروفیل a/b درغلظت‌های مختلف CO_2

همانطور که از شکل ۳-۲۲ مشخص است، نسبت کلروفیل a/b در دو سویه تحت غلظت CO_2 ۱۰٪ کاهش و در غلظت CO_2 ۲۰٪ میزان آن در هر دو سویه افزایش نشان داد. همچنین همانطور که از شکل زیر پیداست، میزان نسبت کلروفیل a/b در غلظت‌های ٪ ۰/۰۳ و ۳۰٪ CO_2 در هر دو سویه ABRIINW-CH2 و ABRIINW-

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

SH33 متفاوت بود، بطوریکه میزان آن در هر دو غلظت در سویه‌ی ABRIINW-SH33 بیشتر از سویه‌ی ABRIINW-CH2 بدست آمد (شکل ۳-۲۲).

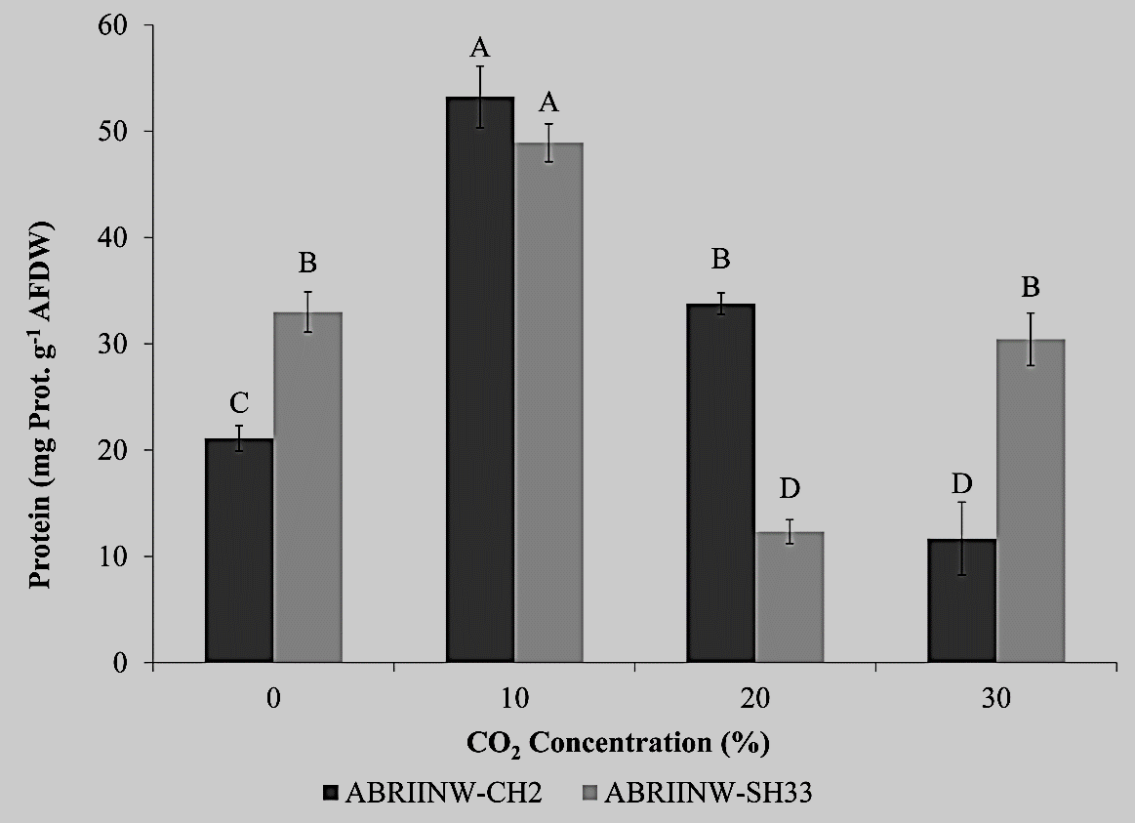


شکل (۱۰-۲۲) تغییرات نسبت کلروفیل a/b در غلظت‌های مختلف CO_2 دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

۱۰-۱۰- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر پروتئین کل

بررسی‌های بیوشیمیایی دو سویه‌ی بومی مورد مطالعه (ABRIINW-CH2 and ABRIINW-SH33) تحت شرایط غلظت ۱۰٪ CO_2، نشان دادکه افزایش معنی‌داری را در میزان پروتئین در مقایسه با هوای معمولی (شاهد) داشته است. بطوریکه میزان پروتئین در دو سویه‌ی ABRIINW-CH2 و ABRIINW-SH33 به ترتیب ۱۷۷/۸ و ۲۱۸/۷۶ $mg\ g^{-1}$ FW در شرایط غلظت ۱۰٪ CO_2 بدست آمد (جدول ۳-۳). با توجه به شکل ۳-۲۳ همانطور که دیده می‌شود در سویه ABRIINW-CH2 افزایش میزان پروتئین با افزایش غلظت CO_2 تا ۱۰٪، روند افزایشی داشته اما در ادامه با افزایش میزان غلظت CO_2 به ۲۰٪ و ۳۰٪ روند تولید پروتئین در سویه کاهش یافته است. ولی در مورد سویه ABRIINW-SH33 روند تولید میزان پروتئین در سویه حالت متغیری از خود نشان داد، بطوریکه میزان تولید پروتیین در غلظت ۲۰٪ CO_2 کاهش یافته ولی با افزایش میزان غلظت CO_2 تا ۳۰٪ دوباره باعث افزایش میزان پروتئین نسبت به غلظت ۲۰٪ CO_2 شد (شکل ۳-۲۳).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

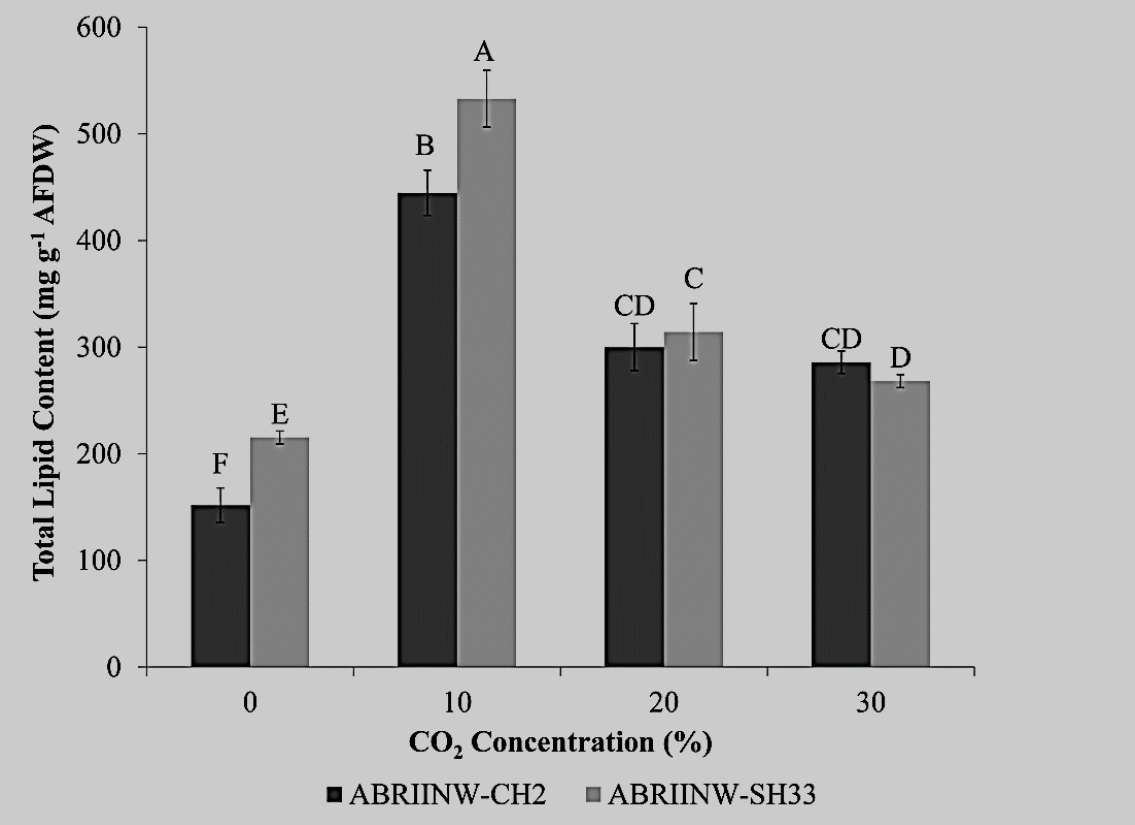


شکل (۱۰-۲۳) تغییرات محتوای پروتئین در غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

۱۰-۱۱- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر میزان لیپید کل

جدول ۳-۲ نتایج حاصل از تغییرات مقدار لیپید کل را در پاسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، میزان لیپید در هر دو سویه ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 با افزایش غلظت CO_2 تا ۱۰٪ افزایش معنی‌داری را نشان داد اما در ادامه با افزایش غلظت CO_2 تا ۲۰٪ و ۳۰٪ میزان آن روند کاهشی به خود گرفت ولی در عین حال میزان آن از میزان نمونه کنترل بیشتر بود. بیشترین میزان لیپید در غلظت CO_2 ۱۰٪ بود. بر اساس جدول ۳-۲ تجزیه واریانس ANOVA اختلاف میزان لیپید در سطوح مختلف تیمار CO_2 معنی‌دار ولی این اختلاف در بین سویه‌ها معنی‌دار می‌باشد ($P<0.01$). اثرات متقابل بین سویه‌ها و سطوح مختلف CO_2 نیز معنی‌دار می‌باشد ($P<0.05$). طبق جدول ۳-۳ دانکن بیشترین مقدار لیپید (۵۰/۷٪) مربوط به تیمار با غلظت ۱۰ درصد CO_2 می‌باشد و کمترین میزان آن (۱۴/۳۳٪) مربوط به تیمار شاهد و یا صفر درصد CO_2 و تیمار۲۰٪ و ۳۰٪ نیز ما بین این دو سطح قرار دارند. شکل ۳-۲۴ تغییرات محتوای لیپید دراسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 را در دو سویه بومی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۲۴) تغییرات محتوای لیپید کل در پاسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی

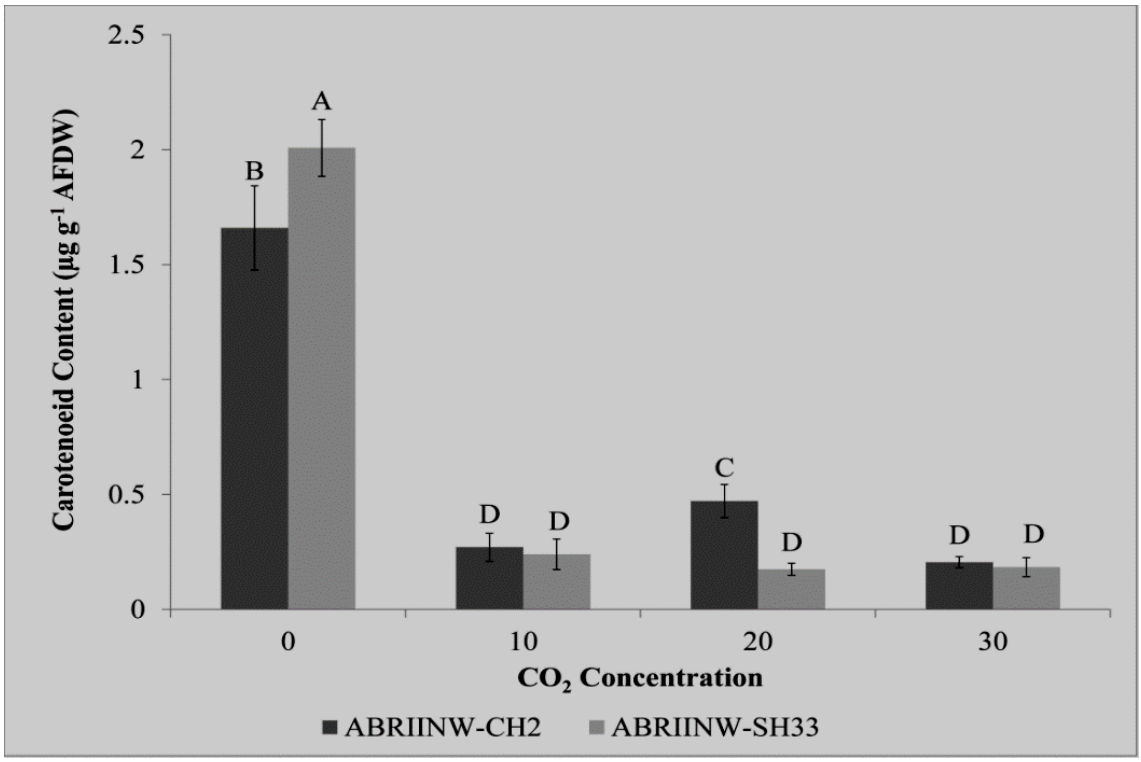
میزان لیپید در سویه‌ی ABRIINW-SH33، یک افزایش ۲/۴۶, ۱/۵۲ و ۱/۳ برابری حالت هوای معمولی (شرایط کنترل) به ترتیب در غلظت ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ را نشـــان می‌دهد. همچنین در ســـویه‌ی ABRIINW-CH2 این میزان ۳/۳، ۲/۲۲ و ۲/۰۹ برابری حالت هوای معمولی را به ترتیب در غلظت ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ نشان می‌دهد (شکل ۳-۱۶).

۱۰-۱۲- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر کاروتنوئید کل

برای بررسی اثرات غلظت‌های بالای CO_2 بر پاداکساینده‌های چربی‌دوست، میزان کاروتنوئید کل آنالیز شد. با توجه به آنالیز داده‌های بدســت آمده از آزمایش، خروجی نتایج نشـان داد که میزان کاروتنوئید کل با افزایش غلظت CO_2 روند کاهشـــی داشـــته اســـت (جداول ۳-۲ و ۳-۳). بطوریکه با افزایش غلظت CO_2 از میزان کاروتنوئید تولید شـــده کاسته شده است تا حدی که بیشترین میزان کاروتنوئید ثبت شده مربوط به نمونه شاهد (بدون تزریق CO_2) برای هر دو سویه ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 مورد مطالعه می‌باشد ($P<0.01$). بطورکلی مهار آمایش رنگیزه‌ها، افزایش فروزینگی رنگیزه‌ها ناشـــی از تشـــکیل انواع فعال اکســـیژن در مکان‌های مختلف زنجیره ترابری

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

الکترون در طی تنش و تخریب شامه تیلاکوئید به‌واسطه‌ی تنش اکسایشی از جمله دلایل کاهش رنگیزه کاروتنوئید می‌باشد (شکل ۳-۲۵).

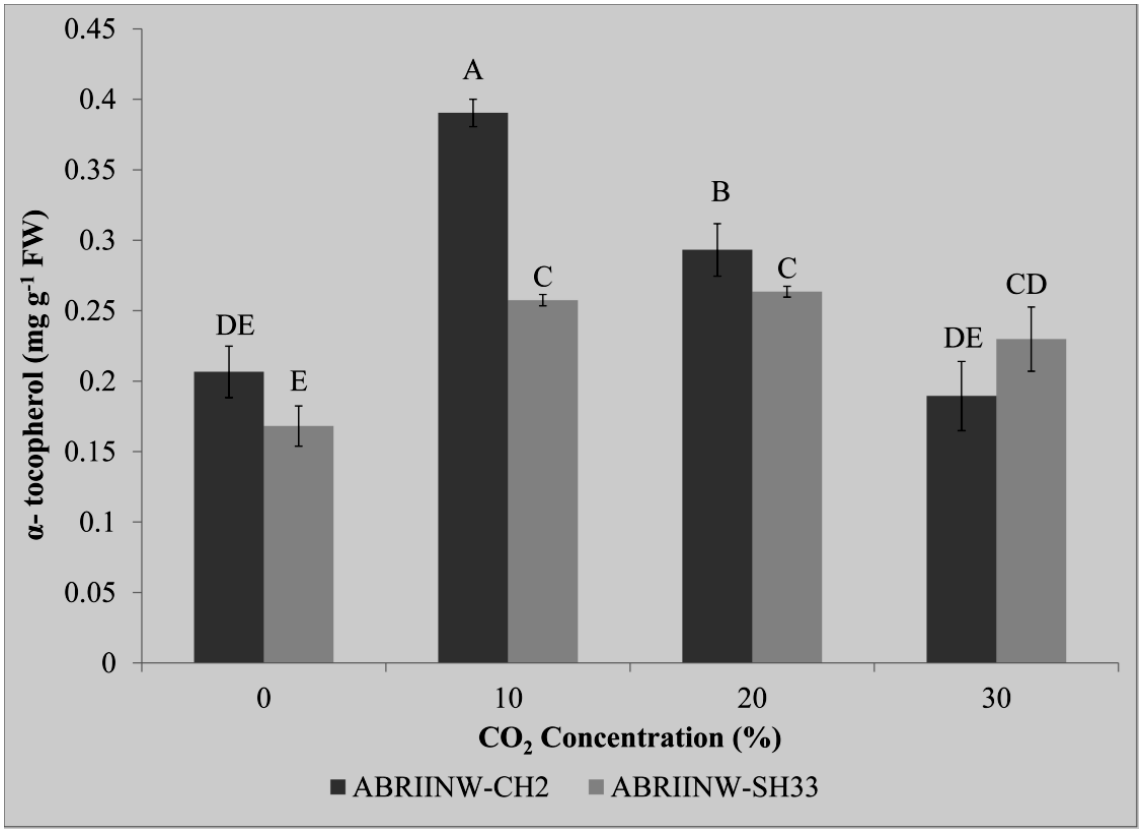


شکل (۱۰-۲۵) تغییرات محتوای کاروتنوئید در غلظت‌های متفاوت CO_2 دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

۱۰-۱۳- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر میزان آلفاتوکوفرول

مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه‌گیری محتوای آلفا توکوفرول در سویه‌های مورد مطالعه BRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 در (جدول ۳-۲) نشان داده شده است. بر اساس داده‌ها و آنالیزهای آماری، محتوای آلفاتوکوفرول در غلظت‌های بالای CO_2 روند افزایشی داشته است، بطوریکه در سویه BRIINW-SH33 بیشترین مقدار ثبت شده (۰/۲۶ mg tocopherol g-1 FW) در غلظت‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ CO_2 و در سویه ABRIINW-CH2 بیشترین مقدار ثبت شده (۰/۳۹ mg tocopherol g-1 FW) در غلظت ۱۰٪ CO_2 به دست آمد ($P<0.01$) (شکل ۳-۲۶).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۲۶) تغییرات محتوای آلفاتوکوفرول در غلظت‌های متفاوت CO_2 بر دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

۱۰-۱٤- بهره‌وری لیپید[1] تحت تاثیر غلظت‌های مختلف CO_2

بر اساس غلظت زیتوده و میزان لیپید تولیدی سویه‌ها، می‌توان میزان بهره‌وری لیپید را محاسبه کرد. بر این اساس و با توجه به داده‌های بدست آمده از آزمایش، لیپید تولیدی با افزایش غلظت CO_2 تا غلظت ۱۰٪ افزایش شدیدی را نشان داد، بطوریکه این افزایش برای سویه ABRIINW-SH33 به میزان ۱۷/۴ برابر و برای سویه ABRIINW-SH33 به میزان ۱۱/۳ برابر نسبت به شرایط هوای معمولی بود (جدول ۳-۴). مقدار لیپید تولیدی در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 مورد مطالعه به ترتیب ٪۶۷/۳۹ و ٪۵۰/۵۳ بدست آمد. علاوه براین میزان لیپید تولیدی در غلظت‌های ۲۰٪ و ۳۰٪ CO_2 نیز نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش نشان داد (جدول ۳-۴). همچنین نتیجه تجزیه واریانس دو نمونه نشان داد که مقدار لیپید تولید شده توسط سویه ABRIINW-SH33 از نظر میزان تولید اختلاف معنی‌داری با میزان تولید لیپید توسط سویه ABRIINW-CH2 داشت ($P<0.05$).

[1] Lipid Productivity

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۱۰-۴) میزان و بهره‌وری لیپید و پاداکساینده‌های چربی‌دوست در غلظت‌های متفاوت CO_2 بر روی دو سویه بومی

CO_2 Aeration (%)	Lipid content (%)		Total lipid Productivity ($mg l^{-1} d^{-1}$)		Lipophilic antioxidant			
					Total carotenoids ($mg\ g^{-1}$ FW)		α-Tocopherol ($mg\ g^{-1}$ FW)	
	SH33	CH2	SH33	CH2	SH33	CH2	SH33	CH2
0.03% CO_2	20.60	12.30	3.87	4.47	0.28	0.28	0.17	0.21
10% CO_2	50.70	40.70	67.39	50.53	0.63	1	0.26	0.39
20% CO_2	31.30	27.30	29.73	25.93	0.34	0.53	0.26	0.29
30% CO_2	26.70	25.70	26.37	23.54	0.28	0.3	0.21	0.19

۱۰-۱۵- اثر غلظت‌های مختلف CO_2 بر نیمرخ اسیدهای چرب

نتایج حاصل از بررسی نیمرخ متیل استراسیدهای چرب دو سویه بومی دونالیلا ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 مورد مطالعه در تحت تیمار غلظت‌های مختلف CO_2 در جدول (۳-۵) آورده شده است. همانطور که در جدول زیر مشاهده می‌شود بیشینه مقدار اسیدچرب پالمتیک اسید (C16:0) با ٪۲۴/۱۷ برای ایزوله ABRIINW-CH2 در غلظت ٪۳۰ CO_2 مشاهده شد و کمترین میزان آن در غلظت ٪۲۰ CO_2 برای هر دو ایزوله ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 بترتیب ٪۱۷/۶۴ و ٪۱۸/۳۷ اندازه‌گیری شد.

همچنین با توجه به جدول زیر بررسی تغییرات مربوط به اسید چرب چندغیراشباع امگا۳ (C18:3) نشان داد که این اسید چرب با تغییر غلظت‌های CO_2 تقریبا روند ثابتی داشته هرچند که بیشینه مقدار ثبت شده برای این اسیدچرب در غلظت ٪۲۰ CO_2 برای هر دو ایزوله‌ی ABRIINW-SH33 وABRIINW-CH2 بترتیب با ٪۳۴/۹ و ٪۳۴/۵ مقدار ثبت شده است. همچنین اسید چرب Nervonic acid (C24:1) با زنجیره بسیار بلند در غلظت ٪۲۰ CO_2 در هر دو ایزوله‌ی ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 قابل اندازه‌گیری بود که اندازه آن در ایزوله CH2 در مقایسه با نمونه شاهد روند کاهشی داشت ولی در غلظت ٪۳۰ CO_2 مقداری برای این اسید چرب مشاهده نشد (جدول ۳-۵).

همچنین بررسی پروفیل اسیدچرب ایزوله‌های مورد مطالعه نشان داد که در ایزوله ABRIINW-SH33 میزان اسید چرب بسیار بلند چندغیره اشباع Docosahexanoic acid (22:6n3) نشان می‌دهد با افزایش میزان غلظت CO_2 مقادیر این اسیدچرب نیز روند افزایشی داشته است، اما در مورد ایزوله ABRIINW-CH2 این روند یکنواخت افزایش مشاهده نشد بطوریکه بیشینه میزان اسیدچرب Docosahexanoic acid ثبت شده برای این سویه در

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

غلظت ۱۰٪ CO_2 مشـــاهده گردید که در ادامه آزمایش با افزایش غلظت CO_2 به ۲۰٪ از میزان این اســـیدچرب کاسته شده و روند کاهشی داشته است (جدول ۳–۵).

جدول (۱۰–۵) نیمرخ اسیدهای چرب در پاسخ به غلظت‌های متفاوت CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

Fatty acids[a]	Relative content (%)[b]							
	0.03% CO_2		10% CO_2		20% CO_2		30% CO_2	
	SH_{33}	CH_2	SH_{33}	CH_2	SH_{33}	CH_2	SH_{33}	CH_2
C12:0	0.49	0.47	0.53	0.61	0.7	0.57	0.68	0.58
C14:0	0.62	0.61	0.46	0.49	0.28	0.37	0.65	0.62
C15:0	0.39	0.50	0.17	0.45	0.28	0.44	0.36	0.33
C15:1	0.88	1.32	2.32	1.87	2.33	1.66	1.85	1.08
C16:0	23.98	21.97	22.79	22.33	17.64	18.37	19.17	24.17
C16:1	3.03	4.14	2.76	3.04	3.37	2.97	4.35	4.03
C18:0	10.35	8.32	7.83	6.43	4.68	5.08	6.46	7.26
C18:1 C18:1n9c	3.11	3.50	7.22	6	7.7	6.82	8.5	6.25
C18:2 (ω-6)	17	18.24	23.61	21.68	22.09	21.24	21.53	18.72
Y-C18:3n6	2.93	3.32	2.87	3.39	4.43	3.97	3.79	2.73
C18:3 (ω-3)	32.01	32.16	28.32	32.35	34.9	34.4	31.45	31.14
Methyl cis-5,8,11,14, Eicosatrienoic acid-20:4n6	1.52	1.38	0.39	0.52	0.54	0.52	0.44	0.84
cis8-11-14-Eicosatrienoic acid-C20:3n6	ND	0.29	ND	0.15	0.12	0.14	0.08	ND
cis-11-14-17-Eicosatrienoic acid-C20:3n3	ND	ND	0.12	ND	0.12	ND	0.17	ND
Methyl cis-5,8,11,14, Eicosatrienoic acid-20:4n6	3.63	2.90	0.71	0.71	0.25	0.47	0.38	0.72
cis-13,16,Docosadienoic acid-C22:2	ND	ND	ND	0.03	ND	1.22	ND	ND
cis-5,8,11,14, 17, Eicosapentanoic acid-C20:5n3	ND	ND	ND	0.34	0.072	0.07	0.04	0.27
Nervonic acid-C24:1	ND	3.14	ND	0.08	1.02	0.27	ND	ND
cis-4,7,10,13,16,19,Docosahexanoic acid-22:6n3	ND	ND	ND	0.12	0.09	0.08	0.11	ND

a: Fatty acid was identified based on the retention time of standard fatty acids

b: The amount of the fatty acid was evaluated through the peak area

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

همانطور که در جدول ۳-۶ مشاهده می‌شود، میزان اسیدهای چرب اشباع نشده در غلظت‌های بالای CO_2 بطور معنی‌داری افزایش نشان داد و بیشترین میزان آن ٪۷۵/۹۶ و ٪۷۶ درغلظت CO_2 ٪۲۰ به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-CH_2 و ABRIINW-SH33 مشاهده گردید ($P<0.01$). همچنین میزان اسیدهای چرب اشباع نشده در ۱۰٪ و۳۰٪ تقریباً مشابه بود. بر اساس این داده‌ها میزان اسیدهای چرب چند اشباع نشده در هر چهار غلظت متفاوت CO_2 بالا بود ولی با افزایش غلظت CO_2 تا ۲۰٪ میزان آن بطور معنی‌داری افزایش یافت و به میزان ٪۶۱/۵۸ و ٪۶۴/۲۴ به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 رسید ($P<0.01$) اما اختلاف معنی‌داری در میزان اسیدهای چرب چند اشباع نشده در غلظت‌های کنترل، ۱۰٪ و ۳۰٪ دیده نشد (جدول ۳-۶).

اسیدهای چرب اشباع نشده با یک پیوند دوگانه تا غلظت CO_2 ٪۳۰ افزایش نشان داد و بیشترین محتوای آن به مقدار ٪۱۴/۴۲ و ٪۱۴/۷ در سویه ABRIINW-SH33 در ٪۲۰ CO_2 مشاهده گردید. در سویه ABRIINW-CH_2، بیشترین محتوای اسیدهای چرب اشباع نشده با یک پیوند دوگانه به مقدار ٪۱۱/۷۲ و ٪۱۱/۳۶ در ٪۳۰ CO_2 مشاهده گردید. لازم به ذکر است که اسیدهای چرب با یک پیوند دوگانه به عنوان پیش‌سازهای بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند (Neves et al. 2018: Gimple et al. 2015: Eboka and Inambao, 2017).

بر اساس داده‌ها درجه اشباع نشدگی در غلظت‌های بالای CO_2 افزایش نشان داد و بیشترین میزان آن در سویه های بومی ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 به ترتیب ۱۳۷/۵۸ و ۱۴۰/۲ در غلظت CO_2 ٪۲۰ بود اما تفاوت معنی‌داری در میزان درجه اشباع نشدگی در غلظت‌های کنترل، ۱۰٪ و ۳۰٪ مشاهده نشد ($P<0.01$). بر خلاف اسیدهای چرب اشباع نشده، محتوای اسیدهای چرب اشباع بطور پیوسته با افزایش غلظت CO_2 کاهش نشان داد و کمترین میزان اسیدهای چرب اشباع به میزان ٪۲۳/۵۸ و ٪۲۴/۸۳ به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 در غلظت CO_2 ٪۲۰ مشاهده گردید ($P<0.01$). همچنین نسبت اسیدهای چرب اشباع نشده به اسیدهای چرب اشباع با افزایش غلظت CO_2 تا ٪۲۰ افزایش یافت ($P<0.01$) و در ادامه با افزایش غلظت CO2 تا ٪۳۰ این مقدار کاهش یافت. بنابراین، طبق جدول مقایسه‌ی میانگین (جدول ۳-۶) بیشترین میزان این نسبت در غلظت CO2 ٪۲۰ به میزان ٪۳/۲۲ و ٪۳/۰۶ به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 مشاهده شد. همچنین میزان کل اسیدهای چرب اشباع نشده نیز با افزایش میزان CO2 افزایش می‌یابد و به بیشترین حد خود در غلظت ۲۰٪ (٪۴۸/۹۱ و ٪۴۹/۷۵) و درغلظت ۳۰٪ (٪۴۷/۸ و ٪۴۹/۸) به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 می‌رسد.

جدول (۱۰-۶) ارزیابی خصوصیات اسیدهای چرب در غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی در روز ۱۲ تیمار

Lipid criteria	0.03% CO2		10% CO_2		20 % CO_2		30 % CO_2	
Strain	SH33	CH2	SH_{33}	CH_2	SH_{33}	CH_2	SH_{33}	CH_2
Total saturated fatty acids (SFA)	35.83	31.87	31.78	30.31	23.58	24.83	27.32	32.96
Total monounsaturated fatty acids (MUFA)	7.02	12.1	12.3	10.99	14.42	11.72	14.7	11.36

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

Total polyunsaturated fatty acids (PUFA)	**51.94**	**53.72**	**54.8**	**57.91**	**61.58**	**64.24**	**56.92**	**52.86**
Total unsaturated fatty acids (UFA)	**58.96**	**65.82**	**67.1**	**68.9**	**76.00**	**75.96**	**71.62**	**64.22**
DU	**110.9**	**119.54**	**121.9**	**126.81**	**137.58**	**140.2**	**128.54**	**117.08**
TU/TS	**1.64**	**2.06**	**2.11**	**2.27**	**3.22**	**3.06**	**2.62**	**1.95**
MUFA/SFA	**0.19**	**0.38**	**0.39**	**0.36**	**0.61**	**0.47**	**0.54**	**0.34**
PUFA/SFA	**1.34**	**1.49**	**1.6**	**1.74**	**2.29**	**2.3**	**1.8**	**1.43**
PUFA/MUFA	**7.39**	**4.44**	**4.45**	**5.27**	**4.27**	**5.48**	**3.87**	**4.65**
T (ω-3)	**32.01**	**32.16**	**28.32**	**32.81**	**35.06**	**34.55**	**31.6**	**31.41**
T (ω-6)	**19.93**	**21.56**	**26.48**	**25.07**	**26.52**	**25.21**	**25.32**	**21.45**
ω-3/ω-6	**1.6**	**1.49**	**1.07**	**1.31**	**1.32**	**1.37**	**1.25**	**1.46**
LC PUFAs	**5.15**	**7.71**	**1.22**	**1.95**	**2.21**	**2.77**	**1.22**	**1.83**

TU/TS: Total unsaturated: Total saturated

DU: Degree of Unsaturation = MUFA + (2 ×PUFA)

میزان نسبت مقدار کل اسیدهای چرب اشباع نشده به اشباع نیز با افزایش میزان CO_2 افزایش پیدا کرده و در غلظت ۲۰٪ CO_2 به میزان ۲/۵۱٪ و ۲/۱۷٪ به ترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 می‌رسد. در مقابل، میزان اسیدهای چرب اشباع با افزایش غلظت CO_2 کاهش یافته است. محتوای لیپید کل نیز با افزایش میزان CO2 افزایش قابل توجهی یافته است و در CO_2 ۱۰٪ به مقدار ۵۰/۷٪ و ۴۰/۷٪ بترتیب در سویه‌های ABRIINW-SH33 وABRIINW-CH2 مشاهده شده است.

همچنین مقایسه نیمرخ اسیدهای چرب دو سویه از دونالیلا در غلظت CO2 هوای معمولی به عنوان شاهد و غلظت‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ CO2 در جداول ۳-۷ نشان می‌دهد که اسید چرب امگا-۳ بیشترین مقدار نیمرخ را تشکیل می‌دهد و درغلظت ۲۰٪ بیشترین مقدار امگا-۳ (۳۴/۱۳٪ و ۳۲/۷۴٪) در سویه‌های ABRIINW-SH33 و ABRIINW-CH2 به ترتیب مشاهده شد.

جدول (۱۰-۷) مقایسه میانگین اسیدهای چرب اشباع و اشباع نشده در پاسخ به غلظت‌های مختلف CO_2 در دو سویه بومی

CO_2 Concentration%	**Mean**							
	SFA	**MUFA**	**PUFA**	**UFA**	**DU**	**TU/TS**	**T (ω-3)**	**LCFAs**
0.03% CO_2	**33.69^{a}**	**8.51^{c}**	**57.59^{b}**	**66.107^{c}**	**123.7^{b}**	**1.98^{d}**	**32.08^{b}**	**4.96^{a}**
10% CO_2	**31.09^{b}**	**10.91^{bc}**	**57.7^{b}**	**68.62^{bc}**	**126.33^{b}**	**2.21^{c}**	**31.15^{b}**	**1.38^{b}**

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

20% CO_2	**24.07^{d}**	**12.2^{ab}**	**61.76^{a}**	**73.97^{a}**	**133.43^{a}**	**3.7^{a}**	**34.7^{a}**	**1.75^{b}**
30% CO_2	**28.89^{c}**	**14.68^{a}**	**56.5^{b}**	**71.19^{ab}**	**127.69^{b}**	**2.47^{b}**	**31.32^{b}**	**1.29^{b}**

۱۰-۱۶- بررسی شاخص‌های بیودیزلی سویه‌های بومی مورد مطالعه در غلظت‌های مختلف CO_2

پارامترهایی که کیفیت سوخت بیودیزل را برآورد می‌کنند، مانند عدد ستان (CN1)، ارزش یدی (IV2)، نقطه انسداد فیلتر (CFPP3)، میزان صابونی شده (SV4) و طول رنجیره اشباع (LCSF5) به ساختار مولکولی متیل‌استراسیدهای چرب موجود در آن بسیار وابسته می‌باشند. این ساختار مولکولی با توجه به طول زنجیره کربنی، همچنین تعداد و موقعیت پیوندهای دوگانه موجود، می‌تواند بسیار متفاوت باشد. پس از آنالیز و استخراج مشخصات اسیدهای چرب تولیدی توسط کروماتوگرافی گازی، ساختار مولکولی، مقدار و نوع اسیدهای چرب به دست آمده به منظور برآورد خواص سوختی لیپید تولیدی به وسیله ریزجلبک دونالیلا با استفاده از روابط ارائه شده در منابع معتبر (Ramos et al. 2009; Francisco et al. 2010) مورد محاسبه قرار گرفته و بصورت خلاصه شده در جدول زیر آورده شده است (جدول ۳-۸).

LCSF یک شاخص مناسب برای اندازه گیری محتوای LC-SFA اسید چرب است که به دلیل وجود نقاط ذوب زیاد نامطلوب می‌باشد. از آنجا که بیودیزل باید فرم مایع خود را در دماهای پایین حفظ کند، بنابراین مقدار کم LCSFو در نتیجه CFPP کم می‌تواند یک ویژگی ایده آل برای کاربرد سوخت بیودیزل بشمار آید. همانطور که در جدول ۳-۸ مشخص هست کم‌ترین میزان این دو شاخص برای هر سویه دونالیلای بومی مورد مطالعه در غلظت ۲۰ درصد گاز CO_2 و بیشترین مقادیر ثبت شده برای این شاخص‌ها نیز برای نمونه شاهد ثبت شده است.

جدول (۱۰-۸) بررسی خواص فیزیکی بیودیزل تولیدی در سویه‌های دونالیلای بومی در غلظت‌های مختلف CO_2

Index	**0.03% CO2**		**10% CO_2**		**20 % CO_2**		**30 % CO_2**	
	SH33	**CH2**	**SH_{33}**	**CH_2**	**SH_{33}**	**CH_2**	**SH_{33}**	**CH_2**
LCSF	**7.6**	**6.357**	**6.194**	**5.448**	**4.104**	**4.377**	**5.147**	**6.047**
CFPP	**7.3**	**3.495**	**2.983**	**0.639**	**-3.58**	**-2.73**	**-0.31**	**2.5209**
SV	**192.4**	**190.7**	**195**	**195.5**	**193.1**	**188.5**	**194.4**	**192.1**
IV	**247.7**	**252**	**239.3**	**257.1**	**273.2**	**265.3**	**253.5**	**237.78**
CN	**11.5**	**10.66**	**13.26**	**8.672**	**4.89**	**7.6**	**9.733**	**14.079**

[1] Cetane number
[2] Iodine value
[3] Cold filter plugging point
[4] Saponification Value
[5] Long Chain Saturated Factor

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

همچنین برآورد شاخص میزان صابونی شدن برای سویه‌های مورد مطالعه در غلظت‌های مختلف CO_2 در محدوده ۱۸۸/۵–۱۹۵ در نوسان بود، بطوریکه سویه ABRIINW-CH2 در غلظت ۲۰ درصد CO_2 با شاخص صابونی شدن ۱۸۸/۵ کمترین و سویه ABRIINW-SH33 در غلظت ۱۰ درصد CO2 با شاخص صابونی شدن ۱۹۵ بیشترین عدد را به خود اختصاص دادند (جدول ۳–۹). Ramos و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی بر روی گیاه آفتابگردان، شاخص صابونی شدن را برای این گیاه ۱۹۳ گزارش کردند. مقادیر بالای ید نشان دهنده پایین بودن پایداری اکسیداتیو ایزوله‌ها می‌باشد. که طبق استاندارد اروپا (EN 14214)، الگوی اسیدهای چرب سویه‌های مورد مطالعه در این تحقیق در هیچ یک از غلظت‌های CO_2 بکار رفته، استاندارد مورد نظر بیودیزل (۱۲۰)را برآورد نمی‌کند. معیار CNنیز شاخصی از کیفیت احتراق در سوخت بیودیزل است، که آمادگی سوخت موتور برای احتراق خودکار و روانتر شدن موتور را مشخص می‌کند (فخری و المغربی ، ۲۰۱۳) که طبق استاندارد اروپا این شاخص نیایستی کمتر از ۵۱ برای سوخت‌های بیودیزل باشد که با توجه به مقادیر بدست آمده برای دو شاخص فوق، پروفیل اسیدچرب سویه‌های مورد مطالعه در این پژوهش برای تولید بیودیزل مناسب نمی‌باشند (جدول ۳–۹).

۱۰-۱۷- بررسی میزان تغییرات رشد ریزجلبک در استفاده از منابع و شرایط مختلف CO_2 در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری

بعد از حصول اطمینان از کارایی و سنجش تولنایی جذب بالای CO_2 توسط ریزجلبک بومی دونالیلا، طراحی آزمایشی بمنظور بررسی تاثیر استفاده از دود خروجی حاصل از ژنراتور بر میزان رشد ریزجلبک کشت شده در سیستم فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری طراحی شده بصورت زیر انجام گردید (جدول ۳–۹). شرایط عملیاتی در این آزمایش‌ها شامل مراحل زیر بود:

۱- آزمایش اول شامل استفاده از CO_2 خالص برای کنترل pH محیط هنگام رشد ریز جلبک در سیستم فتوبیوراکتور و اختلاط محیط کشت با استفاده از هوا

۲- آزمایش دوم شامل استفاده از دود خروجی ژنراتور بمنظور کنترل pH محیط هنگام رشد ریز جلبک در سیستم فتوبیوراکتور و اختلاط محیط کشت با استفاده از هوا

۳- آزمایش سوم شامل استفاده از دود خروجی ژنراتور بمنظور کنترل pH و هم بمنظور اختلاط محیط کشت در سیستم فتوبیوراکتور

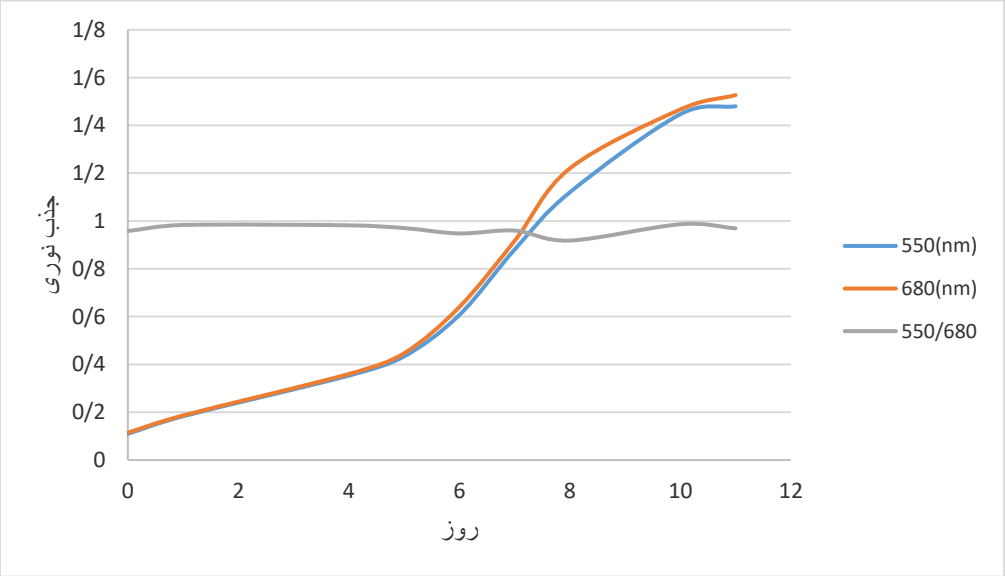
جدول (۱۰–۹) خلاصه‌ای از مراحل انجام ازمایش مربوط به رشد ریزجلبک در سیستم ۵۰۰ لیتری فتوبیوراکتور

		تنظیم pH سیستم فتوبیوراکتور	اختلاط سیستم فتوبیوراکتور
آزمایش ۱	CO_2 خالص	✓	
	دود خروجی ژنراتور		
	هوا		✓
آزمایش ۲	CO_2 خالص		

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

	دود خروجی ژنراتور	✓	
	هوا		✓
آزمایش ۳	CO_2 خالص		
	دود خروجی ژنراتور	✓	✓
	هوا		

نتایج حاصل از خروجی آزمایش اول (میزان رشد جلبک را در شرایطی که pH محیط رشد با CO_2 خالص بر روی ۸/۲ کنترل گردیده و همچنین اختلاط محیط کشت ریزجلبک درون فتوبیوراکتور با هوادهی کنترل می‌گردد) که مربوط به بررسی روند رشد نمونه‌ها طی ۱۱ روز آزمایش، در داخل فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری می‌باشد، در شکل ۳-۲۷ آورده شده است. همانطور که در شکل زیر مشخص هست، ملاحظه می‌شود در آزمایش ۱ فاز ایستایی ریز جلبک مورد مطالعه ۴ روز طول کشید و بعد از آن وارد فاز لگاریتمی شده و تا روز ۱۰ شدت رشد قابل توجهی داشت است. نتایج حاصل از بررسی میزان جذب در طول موج ۵۵۰ و ۶۸۰ نانومتر در روز پایانی آزمایش (روز ۱۱) به ترتیب اعداد ۱/۴۸ و ۱/۵۰ نشان داد (شکل ۳-۲۷). همچنین شاخص دیگری که طی ۱۱ روز آزمایش اندازه‌گیری و کنترل شد افزایش نسبت جذب ۵۵۰ به ۶۸۰ نانومتر بود که نشان‌دهنده‌ی افزایش آلودگی باکتریایی در محیط می‌باشد. با توجه به شکل زیر نسبت OD550/OD680 نیز تا روز پایانی از مقدار ۱ بالاتر نرفت که نشانگر عدم آلودگی محیط رشد و انجام صحیح آزمایش بود.

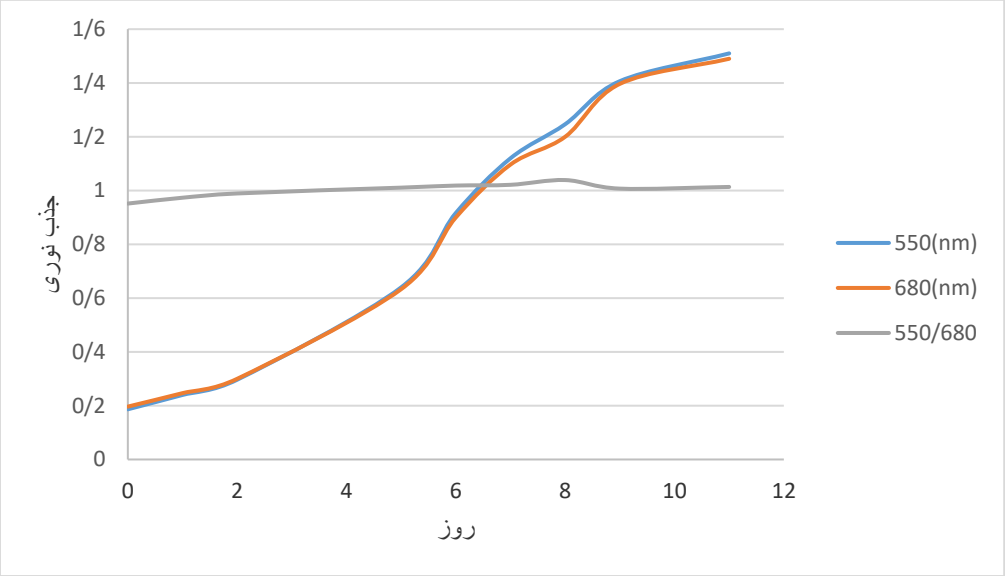


شکل (۱۰-۲۷) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH محیط کشت با CO_2 خالص کنترل و اختلاط با هوا صورت گیرد

در مورد آزمایش ۲، شکل ۳-۲۸ میزان رشد جلبک را طی ۱۱ روز آزمایش در شرایطی نشان می‌دهد که pH محیط رشد با دود خروجی حاصل از ژنراتور بر روی ۸/۲ کنترل گردید. همچنین اختلاط محیط کشت ریزجلبک درون فتوبیوراکتور نیز همانند آزمایش ۱ با هوادهی کنترل گردید. همان طور که از شکل ۳-۲۸ ملاحظه می‌شود در آزمایش ۲ فاز ایستایی ریز جلبک مورد مطالعه همانند آزمایش اول ۴ روز طول کشید و بعد از آن وارد فاز لگاریتمی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

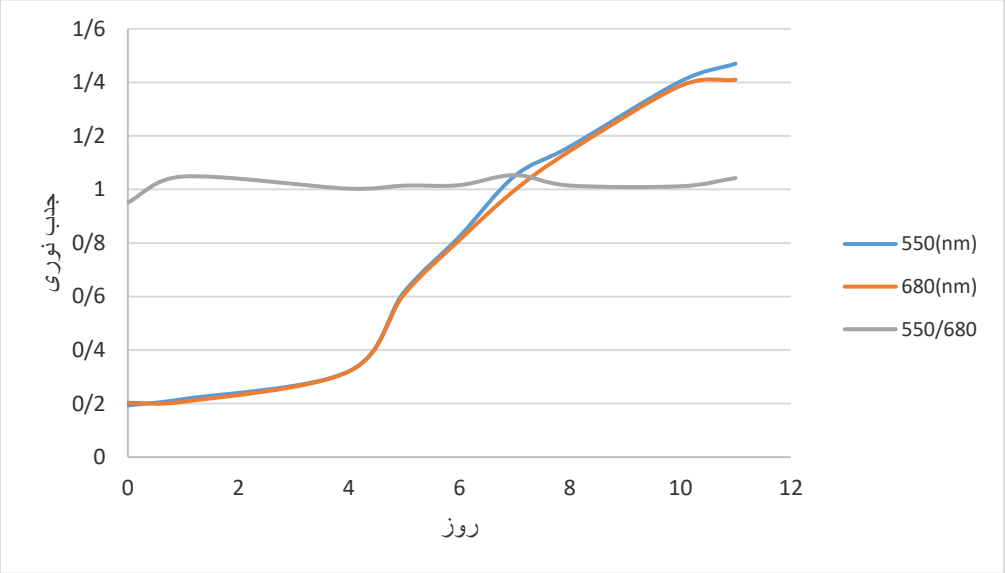
شـده و تا روز ۹ شـدت رشـد قابل توجهی را از خود نشـان داد. همانند آزمایش اول در روز پایانی آزمایش (روز ۱۱) میزان جذب در طول موج ۵۵۰ و ۶۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شـــده که به ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۴۸ بدســـت آمد. همچنین شاخص آلودگی نیز (نسبت OD550/OD680) نیز تا روز پایانی اندازه‌گیری شد که همانطورکه در شکل زیر دیده می‌شود در محدوده‌ی قابل قبول (نزدیک به ۱) بود که نشانگر عدم آلودگی محیط رشد می‌باشد (شکل ۳-۲۸).



شکل (۱۰-۲۸) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH محیط با دود خروجی ژنراتور کنترل و اختلاط با هوا صورت گیرد

شکل ۳-۲۹ میزان رشد جلبک را در شرایطی که هم pH محیط رشد و هم هوادهی سیستم فتوبیوراکتور توسط دود خروجی ژنراتور کنترل می‌گردد را طی ۱۱ روز آزمایش، نشـان می‌دهد. همان طور که از شـکل ملاحظه می‌شـود در آزمایش ۳ فاز ایستایی ریز جلبک تقریبا ۴ روز طول کشید و بعد از آن وارد فاز لگاریتمی شد و تا روز ۱۱ شدت رشد بالایی نشـــان داد و در روز پایانی آزمایش (روز ۱۱) میزان جذب در طول موج ۵۵۰ و ۶۸۰به ترتیب ۱/۴۷ و ۱/۴۴ بدسـت آمد. همچنین شـاخص آلودگی نیز (نسـبت OD550/OD680) نیز تا روز پایانی در محدوده قابل قبولی قرار داشت. شـایان ذکر اسـت که اسـتفاده مسـتقیم از دود خروجی بمنظور کنترل pH و هم اختلاط محیط کشـت جلبک باعث کاهش pH محیط تا محدوده ۷/۱۸ گردید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

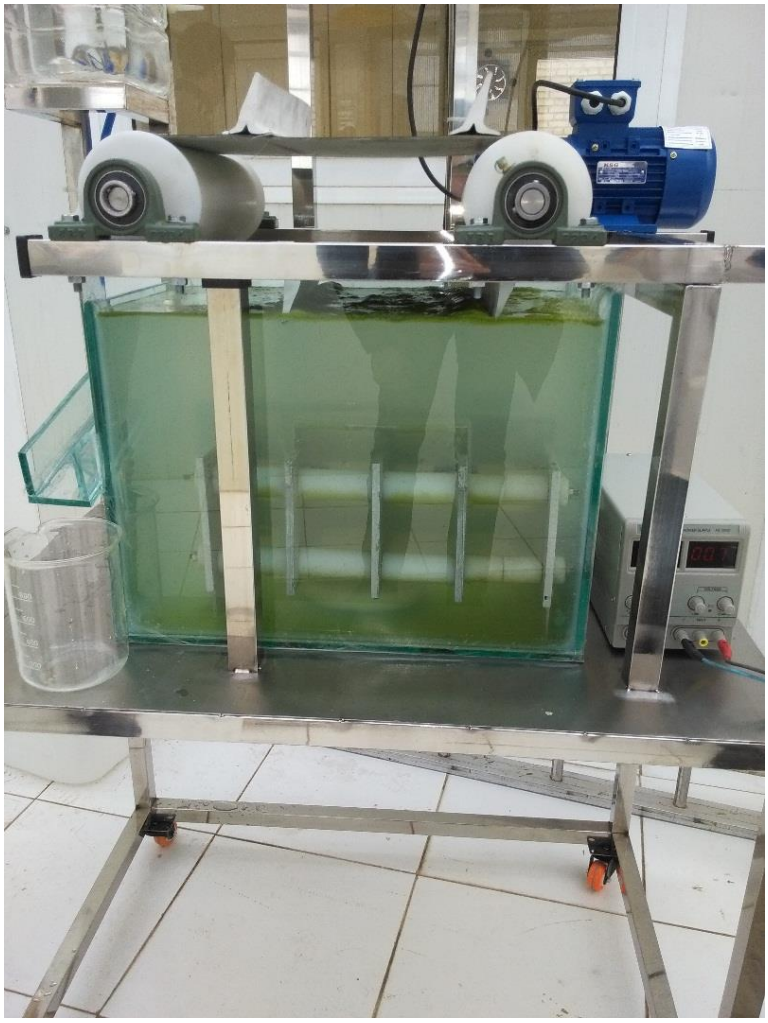


شکل (۱۰-۲۹) روند رشد ریز جلبک در شرایطی که pH و هم اختلاط محیط کشت با دود خروجی ژنراتور صورت‌گیرد

۱۰-۱۸- ساخت دستگاه برداشت جلبک به روش انعقاد الکتریکی

در این پروژه تحقیقاتی برای جداسازی ریزجلبک ها از روش الکتریکی دستگاه برداشت با حجم ۱۲۰ لیتر ساخته شد. شکل ۳-۳۰ نشان دهنده دستگاه برداشت ریزجلبک در مقیاس پایلوت می باشد که در این پروژه با توجه به تجربیات قبلی ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه قابلیت جداسازی و برداشت ۱۲۰ لیتر محلول حاوی جلبک در عرض ۴۰ دقیقه را دارا می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۳۰) دستگاه برداشت جلبک طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی

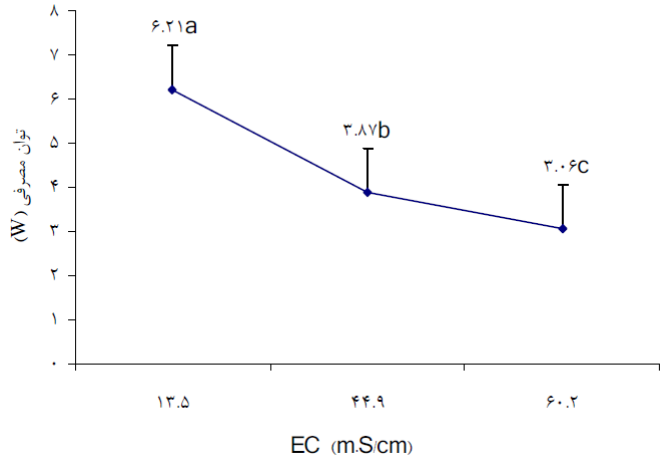
کابل های مثبت و منفی منبع تغذیه به دو سری الکترود آلومنیومی وصل شده و شدت جریان مناسب تنظیم می گردد. در اثر این جریان یون های $Al3^+$ از الکترودهای آلومنیومی جدا می شوند. با توجه به اینکه بار موجود در سلول های ریزجلبک منفی و یا به عبارتی دیگر آنیونی می باشد با اضافه شده کاتیون ها ($Al3^+$)، بار منفی سطح سلول ها خنثی شده و به این ترتیب سلول ها به خاطر خاصیت آب گریزی (هیدروفوبیک) تمایل به چسبیدن به همدیگر را پیدا کرده و منعقد می شوند (شکل ۳-۳۱).

DOI: 10.30503/nripress.2020.290



شکل (۱۰-۳۱) کیک میکروجلبک حاصل از دستگاه برداشت جلبک

شایان ذکر است که در این روش با افزایش شدت جریان میزان اختلاف پتاسیل بوجود آمده مابین الکترودها افزایش می‌یابد، لذا توان مصرفی که از حاصل ضرب شدت جریان و اختلاف پتاسیل الکتریکی محاسبه می‌شود نیز افزایش می‌یابد که امری بدیهی می‌باشد. برای جداسازی جلبک‌های آب شور مثل دونالیلا که هدایت الکتریکی محیط کشت آن بالا می‌باشد، میزان توان مصرفی کمتر از جلبک‌های آب شیرین می‌باشد زیرا اختلاف پتاسیل بوجود آمده بین الکترودها در آب شور که دارای هدایت الکتریکی بالایی است، کمتر می‌باشد (شکل ۳-۳۲).

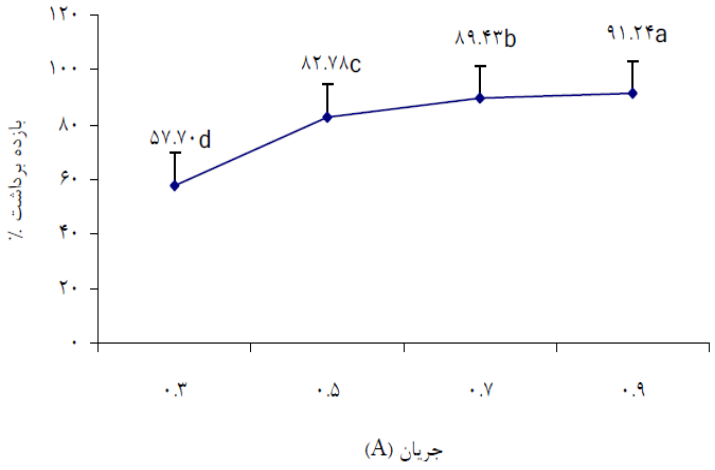


(۱۰-۳۲) تاثیر هدایت الکتریکی بر توان مصرفی الکترودها در دستگاه برداشت میکروجلبک طراحی شده در پژوهشکده بیوتکنولوژی صنایع غذایی

همچنین برای محاسبه بازده برداشت میزان OD بعد از اعمال جریان الکتریسیته به محلول را از مقدار OD_0 قبل از اعمال جریان الکتریسیته تفریق نموده و نتیجه تقسیم بر OD_0 قبل از اعمال جریان الکتریسیته گردید. مشاهده

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

می‌شـود که بازده برداشـت با افزایش شـدت جریان الکتریسـیته، به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش شدت جریان اختلاف پتاسیل بین الکترودها زیاد شده و میزان کاتیون‌های بیشتری وارد محیط می‌گردند. در نتیجه خنثی‌سازی بار آنیونی روی سطح سلول‌ها بیشتر شده و بازده برداشت افزایش می‌یابد (شکل ۳-۳۳).



شکل (۱۰-۳۳) نمودار بازده برداشت میکروجلبک نسبت به جریان در هدایت الکتریکی ۶۰/۲ m.S/cm

۱۰-۱۹- اندازه‌گیری نرخ تثبیت[1] و مقدار CO_2 تثبیت شده و میزان بیومس کل در تیمار با CO_2 و دود خروجی در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری

نتیجه حاصل از محاسبه نرخ رشد ویژه، بهره‌وری بیومس، بیومس تولید شده، نرخ تثبیت CO_2 و میزان CO_2 تثبیت شـده سـویه بومی در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری در جدول ۳-۱۰ آورده شـده اسـت. همانطور در جدول زیر مشـخص می‌باشـد بیشـترین نرخ تثبیت CO_2 تحت شـرایط آزمایش اول (اسـتفاده از CO_2 خالص برای کنترل pH محیط و اسـتفاده از هوا برای اختلاط محیط داخل فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری) می‌باشـد که میزان آن در سـویه‌ی بومی مورد مطالعه برابر با ۹۶/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر بر روز محاسبه شد که نسبت به آزمایش دوم (استفاده از دود خروجی ژنراتور برای تنظیم pH محیط و استفاده از هوا برای اختلاط محیط داخل فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری) ۹۴/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر بر روز و آزمایش سـوم (اسـتفاده از دود خروجی ژنراتور هم برای تنظیم pH و هم برای اختلاط محیط داخل فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری) ۹۱/۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بر روز از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نشـان نداد (جدول ۳-۱۰).

[1] CO2 fixation rate

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

جدول (۱۰-۱۰) نرخ رشد ویژه، بهره‌وری زیست‌توده، زیست‌توده تولیدشده، نرخ تثبیت CO_2 و میزان CO_2 تثبیت شده سویه بومی در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری

	تنظیم pH : دود خروجی ژنراتور اختلاط سیستم : دود خروجی ژنراتور	تنظیم pH : دود خروجی ژنراتور اختلاط سیستم : هوا	تنظیم pH : CO_2 خالص اختلاط سیستم : هوا
Specific Growth Rate (μ)(h-1)	**0.007**	**0.007**	**0.007**
Biomass Productivity (P) ($mgl^{-1}d^{-1}$)	**49.80**	**51.40**	**52.50**
Produced Biomass (gl^{-1})	**0.59[a]**	**0.61[a]**	**0.63[a]**
CO_2 fix. Rate ($mgl^{-1}d^{-1}$)	**91.30[a]**	**94.24[a]**	**96.25[a]**
CO_2 fixed (gl^{-1})	**1.004[a]**	**1.032[a]**	**1.064[a]**

همچنین طبق داده‌های جدول ۳-۱۰ بیشترین مقدار CO_2 تثبیت شده نیز همانند نرخ تثبیت CO_2 با مقدار عددی ۱/۰۶۴ گرم در لیتر مربوط به آزمایش اول می‌باشد که با مقادیر CO_2 تثبیت شده در شرایط تیماری آزمایش‌های دوم و سوم انجام شده در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری اختلاف معنی‌داری نشان نداد. به عبارت دیگر هر سه آزمایش انجام شده در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری با شرایط متفاوت از لحاظ تنظیم pH و اختلاط محیط داخل فتوبیوراکتور، از لحاظ آماری توان یکسانی در میزان CO_2 تثبیت شده داشتند. همچنین بیشترین میزان بیومس کل تولیدی توسط سویه‌ی بومی مورد استفاده در آزمایش نیز با ۵۲/۸ میلی‌گرم بر لیتر در روز نیز مربوط به آزمایش اول می‌باشد. همچنین بررسی آنالیز و مقایسه نتایج حاصل از داده‌های مربوط به رشد هر ۳ آزمایش انجام گرفته در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سرعت رشد جلبک مورد مطالعه وجود ندارد. به عبارت دیگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سه آزمایش (با شرایط تیماری مختلف) طراحی شده در فتوبیوراکتور ۵۰۰ لیتری مجهز به منبع تغذیه از دود خروجی ژنراتور نشان داد که سیستم فوق از کارایی لازم برای جایگزینی دود خروجی ژنراتور به جای CO_2 خالص هم به عنوان عاملی برای تنظیم pH محیط و هم به عنوان عاملی برای هوادهی محیط بمنظور اختلاط بهتر محیط کشت در سیستم ۵۰۰ لیتری فتوبیوراکتور برخوردار می‌باشد (جدول ۳-۱۰).

افزایش روز افزون غلظت گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن در جو زمین باعث افزایش نگرانی و فشار جوامع بین المللی جهت کاهش و کنترل انتشار این گاز شده است. همچنین تغییرات اقلیمی و اثرات سوء مرتبط با آن به تبع استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی و افزایش گرمایش جهانی به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال‌های اخیر به مقدار زیاد افزایش یافته که در این بین بخش نیروگاهی به دلیل میزان انتشار زیاد و داشتن نقشی مؤثر در گرم شدن زمین از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی با توجه به سیاست‌های اقتصادی دولت به منظور هدفمند کردن یارانه‌ها و افزایش قیمت حامل‌های انرژی و از طرفی اهمیت بیش از پیش هزینه سوخت درقیمت تمام شده کلیه محصولات تولید داخل و همچنین حمایت وزارت نیرو از احداث واحد های تولید برق در مقیاس کوچک توسط اشخاص حقیقی یا حقوقی موجب شده تا مدیران صنایع نسبت به صرفه جویی بیشتر در مصرف انرژی اهتمام ورزیده و بعضاً اقدام به احداث نیروگاه‌های برق با مقیاس کوچک نمایند که این سیستم‌های کوچک نیز به نوبه خود باعث تولید گازهای آلاینده هوا بویژه CO_2 که در بین گازهای گلخانه‌ای بیشترین سهم را دارا می‌باشد، می‌شوند. بنابراین بکارگیری سیستم‌های تلفیقی که در آن حداکثر بهره‌وری از انرژی صورت پذیرد و در کنار آن حداقل آلایندگی

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

زیست محیطی وجود داشته باشد (DG-CHP)، می‌تواند از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار باشد. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، در این پروژه ما از یک سیستم تلفیقی تولید همزمان انرژی برق و تولید بیومس جلبک با استفاده از خروجی دود ژنراتور رونمایی کردیم که توان حذف گازهای آلاینده توسط سیستم فتوبیوراکتور ریزجلبک از دود خروجی ژنراتور قابل تامل می‌باشد (جدول ۳- ۱۱).

جدول (۱۰-۱۱) نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت گازهای موجود در خروجی دود ژنراتور و خروجی گاز مازاد از فتوبیوراکتور پس از فیلتر توسط ریزجلبک دونالیلا

محل نمونه برداری	فاکتورهای مورد سنجش و نتایج آزمایش					
	O_2 %	CO_2 %	CO ppm	NO ppm	NO_X ppm	SO_2 ppm
خروجی اگزوز ژنراتور	۱۶	۲/۷۷	۸۱۰	۱۱۶/۲	۱۲۲	۰
خروجی گاز از فتوبیوراکتور	۲۰/۶۰	۰/۲۳	۳۶	٤	٤	۱

با توجه به جدول ۳-۱۱ کاملا مشخص می‌باشد که سیستم تولید ریزجلبک بسته به غلظت بیومس تولیدی از توان بالایی در استفاده از دود خروجی ژنراتور دارد به طوریکه از ۲/۷۷ درصد CO_2 موجود در دود خروجی ژنراتور تنها ۰/۲۳ درصد گاز CO_2 باقی مانده است. همچنین ۱۶ درصد گاز O_2 موجود در خروجی دود ژنراتور، پس از تصفیه در سیستم فتوبوراکتور تولیدی ریزجلبک به ۲۰/۶۰ درصد افزایش یافته است که نشانگر توان و قدرت خوب زیست پالایی ریزجلبک انتخاب شده و همچنین سیستم طراحی شده در پروژه تلفیقی بکار رفته می‌باشد.

۱۰-۲۰- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش اولیه نشان داد که تثبیت CO_2 در غلظت‌های بسیار بالای CO_2 با مطالعه گونه‌های بومی Dunaliella sp. با افزایش قابل ملاحظه‌ای تا ۳۰٪ بهبود یافت اما بیشینه رشد در غلظت CO_2 ۱۰٪ مشاهده شد. همچنین محتوای لیپید سویه‌های تیمار شده با CO_2 به طور قابل توجهی بیشتر از میزان آن در شرایط هوای معمولی بود. همچنین خروجی داده‌های حاصل از آزمایشات نشان داد که سویه‌های بومی مورد مطالعه توان تثبیت میزان بالای CO_2، تجمع لیپید، بهره‌وری لیپید و محتوای امگا ۳ را دارند که نشان دهنده‌ی پتانسیل و ظرفیت بالا برای جذب زیستی CO_2 می‌باشد. همچنین در آزمایشات انجام شده بر روی فتوبیوراکتوری طراحی شده با ظرفیت ۵۰۰ لیتر، پارامترهای عملیاتی، فنی و اقتصادی مانند راندمان تولید در واحد سطح، جذب دی اکسید کربن، الگوی مناسب اختلاط، دریافت نور، مقاومت سازه، مقاومت مصالح بکار رفته در برابر خوردگی و کاهش هزینه‌های استهلاک تعیین شدند. در این آزمایش شرایط مختلف هوادهی برای یافتن الگوی اختلاط بهینه مورد بررسی قرار گرفت که طراحی راکتور جدید بطور قابل توجهی منجر به کاهش زمان اختلاط شد. بعبارت دیگر کاهش زمان اختلاط منجر به کاهش انرژی مصرفی می‌گردد که با توجه به مقادیر گزارش شده در مراجع بیوراکتور طراحی شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

با اسپارژرهای عمودی با توجه به حجم کاری بالا زمان اختلاط مناسبی نسبت به موارد مشابه دارد که یکی از نقاط قوت فتوبیوراکتور طراحی شده می‌باشد. همچنین بررسی نتایج حاصل از روند رشد میکروجلبک مورد مطالعه در شرایط تیماری (استفاده از CO_2 خالص و دود خروجی ژنراتور بمنظور تنظیم pH محیط و هم بعنوان عامل اختلاط محیط) در فتوبیوراکتور طراحی شده نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سرعت رشد جلبک، نرخ تثبیت CO_2 و همچنی میزان CO_2 تثبیت شده در شرایط مختلف تیماری وجود ندارد که نشان از کارایی سیستم در جایگزینی دود خروجی ژنراتور به جای CO_2 خالص و هوادهی در فتوبیوراکتور طراحی شده دارد. همچنین خروجی داده‌ها حاکی از آن بود که سیستم تولید ریزجلبک در غلظت بیومسی مناسب از توان بالایی در استفاده از دود خروجی ژنراتور دارد که نشانگر عملکرد زیست پالایی مناسب سیستم تلفیقی بکار رفته دراین پروژه می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

مراجع

[1] Abd El Baky, H., El-Baroty, G., Bouaid, A. Lipid induction in Dunaliella salina culture aerated with various levels CO2 and its biodiesel production. J Aquacult Res Dev, 2014. 5:1-6.
[2] Agrawal, M. Agrawal. T. Algae as the Sources of Food and the Other Nutrients. Madhu Agrawal. Biomed J Sci & Tech Res. 2018. 6(1): 4976-4978.
[3] Amotz, A. and M. Avron, potential use of Dunaliella for the production of glycerol, beta-carotene and high-protein feed. Environmental science research, 1982.
[4] Ana R. Circuncisão, Marcelo D. Catarino, Susana M. Cardoso, Artur M. S. Silva. Minerals from Macroalgae Origin: Health Benefits and Risks for Consumers. Mar Drugs. 2018. 16(11): 400.
[5] Apurav, K. Koyandea, K. Wayne, Ch. Krishnamoorthy, R. Yang, T. Dinh-Toi, Ch. Pau-Loke, Sh. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. Food Science and Human Wellness. 2019. 8(1); 16-24.
[6] Arcigni, F., Friso, R., Collu, M., & Venturini, M. Harmonized and systematic assessment of microalgae energy potential for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 101, 614-624.
[7] Arora, N., S. Agarwal, and R. Murthy, Latest technology advances in cosmaceuticals. Int. J. Pharm. Sci. Drug Res, 2012. 4(3): p. 168-182.
[8] Ashfaq, A. Fawzi, B. Habiba A. Shadi, W. H. Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts. Sci Total Environ. 2021. 1;806(2):150585.
[9] Azachi, M., Salt induction of fatty acid elongase and membrane lipid modifications in the extreme halotolerant alga Dunaliella salina. Plant physiology, 2002. 129(3): p. 1320-1329.
[10] Barbosa, M.J., M. Albrecht, and R.H. Wijffels, Hydrodynamic stress and lethal events in sparged microalgae cultures. Biotechnology and bioengineering, 2003. 83(1): p. 112-120.
[11] Béchet, Q., A. Shilton, and B. Guieysse, Modeling the effects of light and temperature on algae growth: state of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. Biotechnology advances, 2013. 31(8): p. 1648-1663.
[12] Ben-Amotz, A. and M. Avron, Dunaliella: physiology, biochemistry, and biotechnology. 1992: CRC press.
[13] Benemann, J., Microalgae as a source of liquid fuels. Final technical report.[200 references]. 1982, EnBio, Inc., Fairfield, CA (USA).
[14] Bitog, J., Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 2011. 76(2): p. 131-147.
[15] Bleakley, S. Hayes, M. Algal Proteins: Extraction, Application, and Challenges Concerning Production. Foods. 2017. 6(5): 33.
[16] Camacho, F.G., Use of concentric-tube airlift photobioreactors for microalgal outdoor mass cultures. Enzyme and microbial technology, 1999. 24(3): p. 164-172.
[17] Carvalho, A.P., L.A. Meireles, and F.X. Malcata, Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. Biotechnology progress, 2006. 22(6): p. 1490-1506.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[18] Chen, J., Li, J., Dong, W., Zhang, X., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Surampalli, R. Y. The potential of microalgae in biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 90, 336-346.
[19] Chen, M., Tang, H., Ma, H., Holland, TC., Ng, KS., Salley, SO. Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae Dunaliella tertiolecta. Bioresource technology, 2011. 102 (2):1649-1655.
[20] Cheng LH, Zhang L, Chen HL, Gao CJ (2006) Carbon Dioxide Removal from Air by Microalgae Cultured in a Membrane Photobioreactor. Sep Purif. Technol 50: 324–329.
[21] Cheng, L., Zhang, L., Chen, H., Gao, C. Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. Separation and purification technology, 2006. 50 (3):324-329.
[22] Chisti, Y., Biodiesel from microalgae beats bioethanol. Trends in biotechnology, 2008. 26(3): p. 126-131.
[23] Chisti, Y., Biodiesel from microalgae. Biotechnology advances, 2007. 25(3): p. 294-306.
[24] Chiu, S-Y., Kao, C-Y., Tsai, M-T., Ong, S-C., Chen, C-H., Lin, C-S. Lipid accumulation and CO2 utilization of Nannochloropsis oculata in response to CO2 aeration. Bioresource technology, 2009. 100 (2):833-838.
[25] de Araújo, M.S., Characterization and validation of a new photobioreactor, bubble column type with axial mixing, for production of single cell oil for biodiesel from microalgae. 2014.
[26] De Morais, MG., Costa, JAV. Biofixation of carbon dioxide by Spirulina sp. and Scenedesmus obliquus cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. Journal of biotechnology, 2007a. 129 (3):439-445.
[27] de Morais, MG., Costa, JAV. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide. Energy Conversion and Management, 2007b. 48(7):2169-2173.
[28] Demirbas, A., Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. Energy conversion and Management, 2006. 47(15): p. 2271-2282.
[29] Deshpande, A., Optimization of Growth of Dunaliella Salina for Carotenoid production. 2005, Thesis of MS faculty of the school of engineering. University of Southern California.
[30] Dhyani, V., Singh, A., Chaurasia, S. A Review on Microalgae Based Biofuels. Int J Sci Eng Res, 2015 3:1-22.
[31] Diplock, A., et al., The European comission concerted action on functional foods science in Europe (FUFOSE). Scientific concepts of functional foods in Europe. Consensus document. Br J Nutr, 1999. 81: p. S1-S27.
[32] Ebhodag, S.O. Imanahb, O.E. & Ndibeb, H. Biofuels from microalgae biomass: A review of conversion processes and procedures. 2022. 15(2): 1-21.
[33] Einspahr, KJ., Peeler, TC., Thompson, j. Rapid changes in polyphosphoinositide metabolism associated with the response of Dunaliella salina to hypoosmotic shock. Journal of Biological Chemistry, 1988. 263 (12):5775-5779.
[34] El Baky, H.H.A., G.S. El-Baroty, and A. Bouaid, Lipid induction in Dunaliella salina culture aerated with various levels CO2 and its biodiesel production. Journal of Aquaculture Research & Development, 2014. 5(3): p. 1.
[35] Elkhateeb, W.A. Mosbah Daba, G. El-Sayed, H. Hm, K. Algae Therapy: Highlights on the Pharmaceutical Potentials of Algae. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2021. 5(1):1-8.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[36] Eloka-Eboka, AC., Inambao, FL. Effects of CO2 sequestration on lipid and biomass productivity in microalgal biomass production. Applied Energy, 2017. 195:1100-1111.
[37] Elwi, M.S. María, C. Anderson, M. Abraham, G. Yani, A.D. Microalgae: Potential for Bioeconomy in Food Systems. Appl. Sci. 2021. 11, 11316.
[38] Enzing, C., Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. IPTS Institute for Prospective technological Studies, JRC, Seville, 2014.
[39] Eriksen, N.T., T. Geest, and J.L. Iversen, Phototrophic growth in the lumostat: a photo-bioreactor with on-line optimization of light intensity. journal of applied phycology, 1996. 8(4-5): p. 345-352.
[40] Eriksen, N.T., The technology of microalgal culturing. Biotechnology letters, 2008. 30(9): p. 1525-1536.
[41] Ferdouse, F. Løvstad, S. Rohan, H. Pedro, S. Zhengyong Yang, M. The global status of seaweed production, trade and utilization. FAO Globefish Research Programme. 2018. VOL. 124.
[42] Foote, C.S., Y.C. Chang, and R.W. Denny, Chemistry of singlet oxygen. X. Carotenoid quenching parallels biological protection. Journal of the American Chemical Society, 1970. 92(17): p. 5216-5218.
[43] Francisco, E.C., Neves, D.B., Jacob-Lopes, E., Franco, T.T. Microalgae as feedstock for biodiesel production: carbon dioxide sequestration, lipid production and biofuel quality. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010. 85, 395-403.
[44] Gimpel, JA., Henríquez, V., Mayfield, SP. In metabolic engineering of eukaryotic microalgae: potential and challenges come with great diversity. Frontiers in microbiology, 2015. 6:1376.
[45] Goettsch, W.G. and J. Enzing, Review: report of the ISPOR 2012 Budget Impact Analysis Good Practice II Task Force. Value in Health, 2014. 17(1): p. 1-2.
[46] Gordillo, F.J., et al., Effects of light intensity, CO2 and nitrogen supply on lipid class composition of Dunaliella viridis. Journal of Applied Phycology, 1998. 10(2): p. 135-144.
[47] Goulder, L.H. and W.A. Pizer, The economics of climate change. 2006, National Bureau of Economic Research.
[48] Gouveia, L., et al., Chlorella vulgaris and Haematococcus pluvialis biomass as colouring and antioxidant in food emulsions. European Food Research and Technology, 2006. 222(3-4): p. 362-367.
[49] Graham, L., Wilcox, L. Introduction to the Algae. Algae Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, 2000. NJ:468-469.
[50] Griffiths, MJ., Harrison. ST. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. Journal of Applied Phycology, 2009. 21 (5):493-507.
[51] Hahn-Hägerdal, B., Bio-ethanol–the fuel of tomorrow from the residues of today. Trends in biotechnology, 2006. 24(12): p. 549-556.
[52] Halim, R., M.K. Danquah, and P.A. Webley, Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. Biotechnology advances, 2012. 30(3): p. 709-732.
[53] Hamasaki, A., Shioji, N., Ikuta, Y., Hukuda, Y., Makita, T., Hlrayama, K., Matuzaki, H., Tukamoto, T., Sasaki, S. Carbon dioxide fixation by microalgal photosynthesis using actual flue gas from a power plant. Applied biochemistry and biotechnology, 1994. 45 (1):799-809.
[54] Hammouda, O., A. Gaber, and N. Abdelraouf, Microalgae and wastewater treatment. Ecotoxicology and Environmental safety, 1995. 31(3): p. 205-210.
[55] Hankamer, B., Photosynthetic biomass and H2 production by green algae: from bioengineering to bioreactor scale-up. Physiologia Plantarum, 2007. 131(1): p. 10-21.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[56] Hemaiswarya, S. Raja, R. Ravikumar, R. Isabel, S. Carvalho, S. Microalgae Taxonomy and Breeding. Biofuel Crops: Production, Physiology and Genetics. 2013. 44-53.
[57] Hemmi, H., Fusion-type lycopene β-cyclase from a thermoacidophilic archaeon Sulfolobus solfataricus. Biochemical and biophysical research communications, 2003. 305(3): p. 586-591.
[58] Ho, S-H., Chen, C-Y., Lee, D-J., Chang, J-S. Perspectives on microalgal CO2-emission mitigation systems—a review. Biotechnology advances, 2011. 29 (2):189-198.
[59] Horincar, V.-B., P. Parfene, and G. Bahrim, Evaluation of bioactive compounds in extracts obtained from three Romanian marine algae species. Romanian Biotechnological Letters, 2011. 16(6): p. 71-78.
[60] Hu, Q., 5 Environmental Effects on Cell Composition. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology, 2004: p. 83.
[61] Huang, G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X., & Chen, G. Biodiesel production by microalgal biotechnology. Applied energy, 2010. 87(1), 38-46.
[62] Huntley, ME., Redalje, DG. CO 2 mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2007. 12 (4):573-608.
[63] Janelt, G., The lamellar settler–a low-cost alternative for separating the micro-alga Chlorella vulgaris from a cultivation broth? Applied microbiology and biotechnology, 1997. 48(1): p. 6-10.
[64] Kamal-Eldin, A. and L.-Å. Appelqvist, The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols. Lipids, 1996. 31(7): p. 671-701.
[65] Kativu, E., Hildebrandt, D., Matambo, T., Glasser, D. Effects of CO2 on South African fresh water microalgae growth. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2012. 31 (1):24-28.
[66] Kumar, A. Bera, S. Revisiting nitrogen utilization in algae: A review on the process of regulation and assimilation. Bioresource Technology Reports. 2020. Volume 12, 100584.
[67] Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, FX., Van Langenhove, H. Enhanced CO2 fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. Trends in biotechnology, 2010. 28 (7):371-380.
[68] Kunjapur, A.M. and R.B. Eldridge, Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. Industrial & engineering chemistry research, 2010. 49(8): p. 3516-3526.
[69] Lari, Z. Abrishamchi, P. Ahmadzadeh, H. Soltani, N. Differential carbon partitioning and fatty acid composition in mixotrophic and autotrophic cultures of a new marine isolate Tetraselmis sp. KY114885 , Journal of Applied Phycology , Volume (31) , 2018-7, Pages 201-210.
[70] Lee, Y.-K., Design and performance of an α-type tubular photobioreactor for mass cultivation of microalgae. Journal of Applied Phycology, 1995. 7(1): p. 47-51.
[71] Maeda, K., Owada, M., Kimura, N., Omata, K., Karube, I. CO 2 fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. Energy Conversion and Management, 1995. 6 (36):717-720.
[72] Maizatul Azrina, Y. Radin, M. Saphira, Radin, M. Ravishankar, A.G. Ranga Rao, A. Influence of Nitrogen and Phosphorus on Microalgal Growth, Biomass, Lipid, and Fatty Acid Production: An Overview. Cells. 2021. 10, 393.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[73] Makareviciene, V., Skorupskaite, V., & Andruleviciute, V. Biodiesel fuel from microalgae-promising alternative fuel for the future: a review. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2013. 12(2), 119-130.
[74] Manian, R., The antioxidant activity and free radical scavenging potential of two different solvent extracts of Camellia sinensis (L.) O. Kuntz, Ficus bengalensis L. and Ficus racemosa L. Food Chemistry, 2008. 107(3): p. 1000-1007.
[75] Marano, F. Etude ultrastructural e de la division chez Dunaliella. Journal de microscopie et de biologie cellulaire, 1976.
[76] Martinot, E., Renewables 2005: Global status report. REN21 Renewable Energy Policy Network/Worldwatch Institute, 2005: p. 14.
[77] Martinot, E., Renewables global status report-2006 Update. 2009.
[78] Masyuk, N., Mass culture of the carotene containing alga Dunaliella salina Teod. Ukr Bot Zh, 1965. 23: p. 12-19.
[79] Mata, T.M., A.A. Martins, and N.S. Caetano, Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. 14(1): p. 217-232.
[80] Meira, M., Quintella, C. M., Ribeiro, E. M. O., Silva, H. R. G., & Guimarães, A. K. (2015). Overview of the challenges in the production of biodiesel. Biomass Conversion and Biorefinery, 5(3), 321-329.
[81] Mendoza, J., Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. Biomass and Bioenergy, 2013. 54: p. 267-275.
[82] Mimouni, V., The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. Current pharmaceutical biotechnology, 2012. 13(15): p. 2733-2750.
[83] Mirón, A., Mixing in bubble column and airlift reactors. Chemical Engineering Research and Design, 2004. 82(10): p. 1367-1374.
[84] Miura, Y., Yamada, W., Hirata, K., Miyamoto, K., Kiyohara, M. Stimulation of hydrogen production in algal cells grown under high CO 2 concentration and low temperature. Applied biochemistry and biotechnology, 1993. 39 (1):753.
[85] Miyairi, S. CO2 assimilation in a thermophilic cyanobacterium. Energy conversion and management, 1995. 36 (6-9):763-766.
[86] Mohsenpour, S.F. Hennigeb, S. Willoughby, N. Adeloyec, A. Gutierrezd. A. Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review. Science of The Total Environment. 2021. 752, 142168.
[87] Mondal, M., Goswami, S., Ghosh, A., Oinam, G., Tiwari, O., Das, P., Gayen, K., Mandal, M., Halder, G. Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review. 3 Biotech, 2017. 7 (2):99.
[88] Morita, M., Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactors incorporating Chlorella sp. under various culture medium flow conditions. Biotechnology and bioengineering, 2001. 74(2): p. 136-144.
[89] Munoz, R. and B. Guieysse, Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. Water research, 2006. 40(15): p. 2799-2815.
[90] Muradyan, E., Klyachko-Gurvich, G., Tsoglin, L., Sergeyenko, T., Pronina, N. Changes in lipid metabolism during adaptation of the Dunaliella salina photosynthetic apparatus to high CO 2 concentration. Russian Journal of Plant Physiology, 2004. 51 (1):53-62.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[91] Nagase, H., Eguchi, K., Yoshihara, K-I., Hirata, K., Miyamoto, K. Improvement of microalgal NOx removal in bubble column and airlift reactors. Journal of fermentation and bioengineering. 1998. 86 (4):421-423.
[92] Nakano Y, Miyatake K, Okuno H, Hamazaki K, Takenaka S, Honami N, Kiyota M, Aiga I, Kondo J Growth of photosynthetic algae Euglena in high CO2 conditions and its photosynthetic characteristics. In: International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems 440, 1996. pp 49-54.
[93] Neves, FdF., Hoinaski, L., Rörig, LR., Derner, RB., de Melo Lisboa, H. Carbon biofixation and lipid composition of an acidophilic microalga cultivated on treated wastewater supplied with different CO2 levels. Environmental technology (just-accepted), 2018. 1-31.
[94] Nuzzo, G., Composition and quantitation of microalgal lipids by ERETIC 1H NMR method. Marine drugs, 2013. 11(10): p. 3742-3753.
[95] Ojo, E.O., Design and parallelisation of a miniature photobioreactor platform for microalgal culture evaluation and optimisation. Biochemical Engineering Journal, 2015. 103: p. 93-102.
[96] Ojo, E.O., Photobioreactor Technologies for High-throughput Microalgae Cultivation. 2015, UCL (University College London).
[97] Oncel, S. and A. Kose, Comparison of tubular and panel type photobioreactors for biohydrogen production utilizing Chlamydomonas reinhardtii considering mixing time and light intensity. Bioresource technology, 2014. 151: p. 265-270.
[98] Oren, A. A hundred years of Dunaliella research: 1905–2005. Saline systems, 2005. 1 (1):2.
[99] Ota M, Kato Y, Watanabe H, Watanabe M, Sato Y, Smith R, Inomata H (2009) Fatty Acid Production From a Highly CO2 Tolerant Alga, Chlorocuccum littorale, in the Presence of Inorganic Carbon and Nitrate. Bioresource Technol 100: 5237–5242.
[100] Ota, M., Kato, Y., Watanabe, H., Watanabe, M., Sato, Y., Smith, Jr, RL., Inomata, H. Fatty acid production from a highly CO2 tolerant alga, Chlorocuccum littorale, in the presence of inorganic carbon and nitrate. Bioresource Technology, 2009. 100 (21):5237-5242.
[101] Pirouzi, A., Improvement of mixing time, mass transfer, and power consumption in an external loop airlift photobioreactor for microalgae cultures. Biochemical Engineering Journal, 2014. 87: p. 25-32.
[102] Pushparaj, B., As integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria. Journal of Applied Phycology, 1997. 9(2): p. 113-119.
[103] Raja, R., PCR-identification of Dunaliella salina (Volvocales, Chlorophyta) and its growth characteristics. Microbiological Research, 2007. 162(2): p. 168-176.
[104] Ramos, M.J., Fernández, C.M., Casas, A., Rodríguez, L., Pérez, Á. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. Bioresource technology, 2009. 100, 261-268.
[105] Richmond, A., Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. 2008: John Wiley & Sons.
[106] Riisgard, H., Randløv, A. Energy budgest, growth and filtration rates in Mytilus edulis at different algal concentrations. Marine Biology, 1981. 61 (2-3):227-234.
[107] Robinson, L., A. Morrison, and M. Bamforth, Improvements relating to biosynthesis. European patent, 1988. 261: p. 872.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[108] Rodionova, M. V., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zharmukhamedov, S. K., Nam, H. G., ... & Allakhverdiev, S. I. Biofuel production: challenges and opportunities. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. 42(12), 8450-8461.
[109] Saadaoui, I. Rihab, R. Ana. A. Maroua, Ch. Hareb, A.J. Sami, S. Schonna, R M. Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production. Journal of Animal Science and Biotechnology. 2021. 12: 76.
[110] Sakai, N., Sakamoto, Y., Kishimoto, N., Chihara, M., Karube, I. Chlorella strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO2. Energy Conversion and Management, 1995. 36 (6-9):693-696.
[111] Sankar, V., Daniel, D.K., Krastanov, A. Carbon dioxide fixation by Chlorella minutissima batch cultures in a stirred tank bioreactor. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2011. 25(3):2468-2476.
[112] Sathasivam, R. Radhakrishnan, R. Hashem, A. .Abd_Allah. F. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. Saudi Journal of Biological Sciences. 2019. 26(4): 709-722.
[113] Schaub, G., T. Kolb, and W. Steiger, Biofuels. Second-generation biofuels. Chemie Ingenieurtechnik, 2007. 79: p. 1325-1326.
[114] Schenk, P.M., Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. Bioenergy research, 2008. 1(1): p. 20-43.
[115] Schmidt, C.W., Biodiesel: cultivating alternative fuels. Environmental health perspectives, 2007. 115(2): p. A86.
[116] Seckbach, J., Gross, H., Nathan, M. Growth and photosynthesis of Cyanidium caldarium cultured under pure CO2. Israel J Bot. 1971.
[117] Sheehan, J., A look back at the US Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae. National Renewable Energy Laboratory, 1998. 328.
[118] Singh, J. and S. Gu, Commercialization potential of microalgae for biofuels production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14(9): p. 2596-2610.
[119] Soman, A. and Y. Shastri, Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics. Applied Energy, 2015. 140: p. 246-255.
[120] Spektorova, L., R. Creswell, and D. Vaughn, Closed tubular cultivators: an innovative system for commercial culture of macroalgae. WORLD AQUACULTURE-BATON ROUGE-, 1997. 28: p. 39-44.
[121] Spolaore, P., Commercial applications of microalgae. Journal of bioscience and bioengineering, 2006. 101(2): p. 87-96.
[122] Stengel, D.B., S. Connan, and Z.A. Popper, Algal chemodiversity and bioactivity: sources of natural variability and implications for commercial application. Biotechnology advances, 2011. 29(5): p. 483-501.
[123] Stewart, B. and C.P. Wild, World cancer report 2014. World, 2016.
[124] Sudhakar, K., Premalatha, M. Theoretical assessment of algal biomass potential for carbon mitigation and biofuel production. Iranica Journal of Energy & Environment, 2012b. 3 (3):232-240
[125] Suzuki, T., Gas-Sparged bioreactors for CO2 fixation by Dunaliella tertiolecta. Journal of chemical technology and biotechnology, 1995. 62(4): p. 351-358.
[126] Tabatabaei, M., et al., Biodiesel production from genetically engineered microalgae: future of bioenergy in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(4): p. 1918-1927.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

[127] Takagi, M. and T. Yoshida, Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae Dunaliella cells. Journal of bioscience and bioengineering, 2006. 101(3): p. 223-226.
[128] Tamburic, B., Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production. international journal of hydrogen energy, 2011. 36(11): p. 6578-6591.
[129] Tang, D., CO 2 biofixation and fatty acid composition of Scenedesmus obliquus and Chlorella pyrenoidosa in response to different CO 2 levels. Bioresource Technology, 2011. 102(3): p. 3071-3076.
[130] Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., Zhong, J. CO2 biofixation and fatty acid composition of Scenedesmus obliquus and Chlorella pyrenoidosa in response to different CO2 levels. Bioresource technology, 2011a. 102 (3):3071-3076.
[131] Tang, H., Abunasser, N., Garcia, M., Chen, M., Ng, KS., Salley, SO. Potential of microalgae oil from Dunaliella tertiolecta as a feedstock for biodiesel. Applied Energy, 2011b. 88 (10):3324-3330.
[132] Tang, Y., Rosenberg, J. N., Bohutskyi, P., Yu, G., Betenbaugh, M. J., & Wang, F. Microalgae as a feedstock for biofuel precursors and value-added products: green fuels and golden opportunities. BioResources, 2015. 11(1).
[133] Tiwari, A. & Kiran, T. Biofuels from Microalgae. Adv. Biofuels Bioenergy, 2018. 73012(10.5772).
[134] Tokuşoglu, Ö. and M. Üunal, Biomass nutrient profiles of three microalgae: Spirulina platensis, Chlorella vulgaris, and Isochrisis galbana. Journal of food science, 2003. 68(4): p. 1144-1148.
[135] Tredici, M.R., Mass production of microalgae: photobioreactors. Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology, 2004. 1: p. 178-214.
[136] Ugwu, C., H. Aoyagi, and H. Uchiyama, Photobioreactors for mass cultivation of algae. Bioresource technology, 2008. 99(10): p. 4021-4028.
[137] Weldy, C.S. and M. Huesemann, Lipid production by Dunaliella salina in batch culture: effects of nitrogen limitation and light intensity. US Department of Energy Journal of Undergraduate Research, 2007. 7(1): p. 115-22.
[138] Xu, R., Downstream processing of microalgal biodiesel production. 2010.
[139] Yue, L., Chen, W. Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO2 tolerant fresh water microalgae. Energy conversion and management, 2005. 46 (11-12):1868-1876.
[140] Yun, YS., Lee, SB., Park, JM., Lee, CI., Yang, JW. Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients. Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology, 1997. 69 (4):451-455.
[141] Zeiler, KG., Heacox, DA., Toon, ST., Kadam, KL., Brown, LM. The use of microalgae for assimilation and utilization of carbon dioxide from fossil fuel-fired power plant flue gas. Energy Conversion and Management, 1995. 36 (6-9):707-712.

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

DOI: 10.30503/nripress.2020.290

پیوست

کارا کوش آزمایش	**فرم اعلام نتایج آزمایشگاه معتمد** **بخش سنجش آلودگی هوا – منابع ثابت**	کد مدرک: KKAM-0101/01 ۰۲ / ۰۲-۵-۴ / ف

نام مشتری: پژوهشکده بیوتکنولوژی	کد پروژه: ۱۳۹۹۰۲۴

ردیف	تاریخ نمونه برداری	نام دستگاه	محل نمونه برداری	فاکتورهای مورد سنجش و نتایج آزمایش																
				O_2	CO_2	CO	NO	NOx	SO_2	H_2S	HCl	NH_3	H_2	E-air	Eff g	Dk	Vg	Ta	Tg	Fuel
				%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	Cm	m/s	°C	°C	-
۱	۱۳۹۹/۱۱/۲۷	testo 350	اگزوز ژنراتور	16.0	2.77	810	116.2	122.0	0	-	-	-	-	320.2	68.6	-	-	14.2	166.5	-
۲			دستگاه تصفیه	20.60	0.23	36	4.00	4.00	1	-	-	-	-	-	-	-	-	14.8	17.4	-
۳																				

طول جغرافیایی: | عرض جغرافیایی: | ارتفاع دودکش از محل ورود گازها: | ارتفاع محل نمونه برداری از محل ورود گازها:

نتیجه آزمون:
این سنجش جهت پایش در طرح خوداظهاری میباشد و نتایج اندازه گیری گازهای خروجی استحصالی مطابق استاندارد مصوب سازمان متبوعه میباشد.

نام و نام خانوادگی کارشناسان: سامان متین فر | نام و نام خانوادگی مسئول فنی: صونا جمشیدی | مدیر ارشد: صونا جمشیدی | امضاء:

آدرس مشتری: تبریز، پژوهشکده بیوتکنولوژی

آدرس آزمایشگاه معتمد (کارا کوش آرارات): تبریز، میدان جهاد، بلوار آذربایجان، روبروی شهرداری منطقه ۴، برج مهدیه، طبقه ۱۴ تلفن: ۰۴۱۳۴۴۰-۸۲۸۶ فکس: ۰۴۱۳۴۴۳۵۷۳۳

www.nri.ac.ir

تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید دادمان (پونک باختری) - صندوق پستی ۵۱۷-۱۴۶۶۵
تلفن : ۸۸۰۷۹۴۰۰ - فاکس : ۸۸۰۷۸۲۹۶