

- 13- Selvakumar, P. and A. Pandey, *Solid state fermentation for the synthesis of inulinase from Staphylococcus sp. and Kluyveromyces marxianus*. Process Biochemistry, 1999. **34**(8): p. 851-855.
- 14- Ayyachamy, M., et al., *Production of inulinase by Xanthomonas campestris pv phaseoli using onion (Allium cepa) and garlic (Allium sativum) peels in solid state cultivation*. Letters in applied microbiology, 2007. **45**(4): p. 439-444.
- 15- Dilipkumar, M., M. Rajasimman, and N. Rajamohan, *Enhanced inulinase production by Streptomyces sp. in solid state fermentation through statistical designs*. 3 Biotech, 2013. **3**(6): p. 509-515.
- 16- Kapilan, R., *Solid state fermentation for microbial products: A review*. Arch Appl Sci Res, 2015. **7**(8): p. 21-25.
- 17- Chen, H., *Modern solid state fermentation*. Netherlands: Springer, 2013.
- 18- Mitchell, D.A., N. Krieger, and M.M. Berovic, *Solid-state fermentation bioreactors*. 2006: Springer.
- 19- Mazutti, M.A., et al., *Kinetics of inulinase production by solid-state fermentation in a packed-bed bioreactor*. Food Chemistry, 2010. **120**(1): p. 163-173.
- 20- Fernandes, M. and B. Jiang, *Fungal inulinases as potential enzymes for application in the food industry*. Food Science and Technology, 2013. **5**: p. 1031-1042.
- 21- Singh, R.S. and K. Chauhan, *Production, purification, characterization and applications of fungal inulinases*. Current Biotechnology, 2018. **7**(3): p. 242-260.
- 22- Kango, N. and S.C. Jain, *Production and properties of microbial inulinases: recent advances*. Food Biotechnology, 2011. **۲۵**(۳): p. 165-212.
- 23- Cho, Y.J. and J.W. Yun, *Purification and characterization of an endoinulinase from Xanthomonas oryzae No. 5*. Process Biochemistry, 2002. **37**(11): p. 1325-1331.
- 24- Singh, R.S., R. Dhaliwal, and M. Puri, *Partial purification and characterization of exoinulinase from Kluyveromyces marxianus YS-1 for preparation of high-fructose syrup*. Journal of microbiology and biotechnology, 2007. **17**(5): p. 733-738.
- 25- Manan, M. and C. Webb, *Design aspects of solid state fermentation as applied to microbial bioprocessing*. J Appl Biotechnol Bioeng, 2017. **4**(1): p. 91.
- 26- Krishna, C., *Solid-state fermentation systems—an overview*. Critical reviews in biotechnology, 2005. **25**(1-2): p. 1-30.
- 27- Leelaram, S., et al., *Effect of feeding strategies on inulinase production analyzed in a biocalorimeter*. Process Biochemistry, 2016. **51**(6): p. 692-703.

## مروری بر استفاده از جلبک‌ها به عنوان سوخت زیستی و بهینه‌سازی آن

نیلوفر خیاطی<sup>۱</sup>، مریم عابدینی<sup>۱</sup> و سید محسن دهنوی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم و فناوری زیستی، گروه زیست‌شناسی گیاهی

<sup>۲</sup> تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم و فناوری زیستی، گروه زیست‌شناسی سلولی-مولکولی

### چکیده

محدود بودن منابع سوخت فسیلی در کنار آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از احتراق آن‌ها جستجوی منابع جایگزین تجدیدپذیر و پاک را ضروری می‌سازد. بیشتر توجه در تولید سوخت زیستی معطوف به استفاده از بیومس گیاهی، ضایعات کشاورزی، پسماندهای جامد و لجن تصفیه‌های دفعی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بوده است. امروزه منابع تجدیدپذیر جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی مثل سوخت‌های زیستی-گیاهی وجود دارد؛ با این حال در دهه اخیر کشت میکروجلبک‌ها به عنوان گزینه‌ای دیگر برای تولید بیومس مطرح شده است. بهره‌وری از زیست‌توده‌های جلبکی از نظر مصرف آب و مساحت زیر کشت به صرفه‌تر از محصولات زراعی گیاهی بوده و باعث کاهش هزینه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق جایگزینی با سوخت‌های فسیلی می‌شود. بسیاری از گونه‌های میکروجلبک‌ها با توجه به توانایی بالا در مصرف کربن آلی و نیتروژن غیرآلی و فسفر، قادر به رشد در محیط‌های آبی مختلف از جمله فاضلاب‌های شهری و صنعتی و کشاورزی و فاضلاب‌های حاوی فضولات حیوانی است که در آن‌ها مقادیر زیادی کربن آلی و غیرآلی و نیتروژن و فسفر و دیگر عناصر وجود دارد که به عنوان یک تصفیه‌کننده‌ی زیستی عمل می‌کنند. با بررسی و مطالعات گسترده و ابداع روش‌های جدید می‌توان به تولید مقرون‌به‌صرفه سوخت‌های زیستی-جلبکی دست یافت. در این مقاله مروری، مطالعات صورت‌گرفته در زمینه سوخت‌های زیستی، استفاده از جلبک‌ها به عنوان سوخت زیستی و روش‌های بهینه‌سازی تولید آن به صورت جامع ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سوخت زیستی، میکروجلبک، بیومس گیاهی، تصفیه فاضلاب

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [mo\\_dehnavi@sbu.ac.ir](mailto:mo_dehnavi@sbu.ac.ir)

## مقدمه

بهبودسازی آن‌ها پرداخته شود. در ابتدا، استفاده از مواد اولیه مختلف برای تولید سوخت‌های زیستی در طی نسل‌های مختلف مورد بحث قرار خواهد گرفت؛ سپس، بهینه‌سازی تولید سوخت‌های زیستی جلبکی با تصفیه فاضلاب‌ها شرح داده می‌شود.

## سوخت‌های زیستی

سوخت‌های زیستی به عنوان سوخت سبز جایگزین و تجدیدپذیر تولیدشده از منابع مختلف بیولوژیکی تعریف شده است (۲). محتوای انرژی سوخت زیستی از منابع زیستی و موادآلی که بدن موجودات زنده را می‌سازند به وجود آمده است. در واقع سوخت زیستی نوعی از سوخت است که از منابع زیست‌توده (بیومس) به وجود می‌آید. این بدان معنا است که ماهیت سوخت زیستی به گیاهان برمی‌گردد و همین امر موجب تجدیدپذیر بودن آن می‌شود (۲). سوخت‌های زیستی را بر اساس مواد اولیه مورد استفاده در تولید آن‌ها، به سه نسل طبقه بندی کرده‌اند: نسل اول، دوم و سوم (۲، ۱۰، ۱۱).

## نسل اول سوخت‌های زیستی (FGF)

سوخت‌های نسل اول<sup>۳</sup> یا سوخت‌های زیستی معمولی، سوخت‌های تولید شده از محصولات غذایی و زراعی‌اند. نسل اول سوخت‌های زیستی از قند، نشاسته، روغن و چربی حیوانی و گیاهی به دست می‌آیند. این سوخت‌ها شامل دیزل زیستی، الکل زیستی، اتانول و گازهای زیستی مانند متان‌اند. شامل محصولات خوراکی مانند دانه‌های روغنی، سویا، گندم، تخم شلغم روغنی، سیب‌زمینی، نارگیل، جو، نیشکر، چغندر قند، ذرت و...، اتانول ذرت در آمریکا، اتانول نیشکر در برزیل و سایر سوخت‌های زیستی در جاهای دیگر، از اولین نسل موادخام برای برآوردن تقاضای انرژی جهانی در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ بوده است (۲، ۱۲-۱۵). در این نسل، مواد غذایی با ارزش فقط برای تولید سوخت زیستی باید کشت شود که این امر موجب به خطر انداختن امنیت چرخه‌غذایی می‌شود و

عدم ثبات و فرسودگی مداوم سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر اهمیت منابع سوخت تجدیدپذیر را بنیاد نهاده است (۱، ۲). بحران انرژی، آلودگی‌ها و آثار زیست‌محیطی ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی باعث شده است تا بشر به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورد. علاوه بر این، افزایش نگرانی‌ها در مورد گرم شدن کره زمین به دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت سوخت باعث شده است تا انرژی جایگزین و تجدیدپذیر کشف شود (۲-۴). یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر سوخت زیستی<sup>۱</sup> است. در سال‌های اخیر محبوبیت سوخت‌های زیستی به دلیل افزایش قیمت نفت، جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به تأمین امنیت انرژی افزایش یافته است. سوخت‌های زیستی غیرسمی، جایگزین، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست‌اند که از ذخایر مختلف غذایی تولید می‌شوند (۲، ۵-۷). در میان مواد خام، میکروجلبک‌ها<sup>۲</sup> پتانسیل عظیمی در جایگزینی سوخت‌های فسیلی نشان می‌دهند. این ارگانیسم‌ها مسئولیت نزدیک به ۵۰٪ از فرآیند فتوسنتز موجود در کره زمین را بر عهده دارند و عمدتاً در بسیاری از سیستم‌های آبی توزیع می‌شوند (۸). جلبک‌ها گروه متنوعی از موجودات آبی با بهره‌وری و توانایی در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و تولید روغن با بازده بالا هستند که کاربردهای بالقوه زیادی در تولید سوخت‌های زیستی دارند. این می‌تواند به دلیل توانایی تولید زیست‌توده زیاد میکروجلبک‌ها نسبت به محصولات زراعی زمینی باشد و همچنین میکروجلبک‌ها در مقایسه با محصولات زراعی نیاز به فضای کم‌تری دارند (۲، ۹). میکروجلبک‌ها از سه ماکرومولکول اصلی یعنی کربوهیدرات، پروتئین و لیپید تشکیل شده‌اند و از همین رو مدتی است که به عنوان ماده بیولوژیکی امیدوارکننده برای تولید انواع مختلف محصولات صنعتی مهم مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، می‌توان از میکروجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب‌ها، تولید سوخت زیستی و کاهش CO<sub>2</sub> جوی برای حفظ پایداری محیط‌زیست استفاده کرد (۲). از این رو، در این مطالعه مروری سعی شده است تا به طور گسترده به جنبه‌های سوخت زیستی-جلبکی و

<sup>3</sup> First generation feedstocks<sup>1</sup> Biofuel  
<sup>2</sup> Microalgae

مطالعات امکان‌سنجی برای دستیابی به عملکرد بالا صورت گرفته‌است. تولید سوخت‌های نسل سوم باعث کاهش تولید مواد غذایی نمی‌شود و همچنین نیازی به زمین‌های کشاورزی وسیع و آب شیرین نیست (۱۷). هدف از طرح NREL<sup>۱</sup> (آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر) ارزیابی مکانیسم سنتز چربی (لیپید) در جلبک‌های تولیدکننده چربی بالا و استفاده از روش مهندسی ژنتیک برای بهبود سویه‌های میکروجلبکی بود. TGF دارای چندین مزیت، یعنی زمان تولید کمتر، بازده فتوسنتزی بالا، سرعت رشد بالا، حاصلخیزی چربی بالا و مواد مغذی ارزان قیمت برای رشد، به سمت تولید سوخت پایدار و مقرون به صرفه شدن است (۲، ۱۸-۲۰).

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، زیست‌توده جلبک می‌تواند برای چندین محصول مهم صنعتی یا محصولات ارزشمند مانند رنگدانه‌ها، خوراک دام، کودآلی، مواد آرایشی، شیمیایی، مواد غذایی و حتی برای تولید برق از طریق احتراق مورد استفاده قرار گیرند.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مزیت اصلی و مهم میکروجلبک‌ها نسبت به دانه‌های روغنی دیگر رشد بسیار سریع آن‌ها است؛ به طوری که به‌طور متوسط می‌توانند در طول ۲۴ ساعت بیومس خود را ۲ برابر کنند. همین موضوع سبب شده است که میکروجلبک‌ها مقدار تولید روغن بیشتری نسبت به دانه‌های روغنی دیگر داشته باشند.

### بهینه‌سازی تولید

#### سوخت‌های زیستی جلبکی با تصفیه فاضلاب‌ها

استفاده از پساب فاضلاب شهری به عنوان مواد اولیه در کشت جلبک یک روش امیدوارکننده برای افزایش دوام تجاری تولید سوخت‌های زیستی جلبک است. تولید سوخت‌های زیستی جلبک همچنین می‌تواند در کنار سایر فرآیندهای ارزشمند صنعتی، از جمله تصفیه فاضلاب ادغام شود (۲۷، ۲۸). استفاده از پساب فاضلاب به عنوان مواد اولیه در تولید زیست توده می‌تواند منبع کم‌هزینه‌ای برای مواد مغذی باشد (۲۹، ۳۰)، در عین حال به فاضلاب نیز کمک می‌کند. تولید زیست توده‌ی جلبکی و تصفیه

هم‌چنین کشت محصولات برای تولید سوخت زیستی لزوماً اقتصادی نیست (۲).

### نسل دوم سوخت‌های زیستی (SGF)

FGF با وجود تجدیدپذیر بودن نمی‌تواند یک گزینه عملی برای تأمین نیاز انرژی جهانی باشد. از این رو نسل دوم سوخت زیستی<sup>۱</sup> (SGF)، شناسایی شدند که شامل محصولات غیر غذایی یا ضایعات کشاورزی، به ویژه زیست‌توده‌های لیگنوسلولوزی<sup>۲</sup> هستند. مواد اولیه این نسل از سوخت‌ها، جزء مواد غذایی محسوب نمی‌شوند. مواد لیگنوسلولوز، کاه غلات، باگاس (تفاله) نیشکر، گیاه کاساوا<sup>۳</sup>، گیاه میساتوس<sup>۴</sup> (علف نقره‌ای)، بقایای (تفاله‌های) جنگلی، ضایعات جامد شهرداری، چمن‌های گیاهی، گیاه جاتروفای<sup>۵</sup> و چوب مثال‌هایی از سوخت نسل دوم هستند (۲، ۱۲، ۱۵، ۱۶). در حال حاضر، استفاده از SGF برای تولید سوخت‌های زیستی در مراحل مختلف با سرعت کامل انجام می‌شود. با وجود مزایای فراوان این نسل از سوخت‌ها، ممکن است استخراج سوخت از مواد اولیه ذکر شده دشوار باشد. تولید سوخت‌های زیستی نسل دوم به فناوری‌های گران‌قیمت و پیشرفته‌ای نیاز دارد (۲، ۱۲).

### نسل سوم سوخت زیستی (TGF)

#### میکروجلبک‌ها -

#### مواد اولیه سوخت‌های زیستی نسل سوم

آزمایشات فراوانی بر روی جلبک‌ها به عنوان منبع غنی از چربی برای تولید سوخت‌های زیستی انجام شده‌است. با استخراج چربی و هم‌چنین استفاده مستقیم از این جلبک‌ها، سوخت‌های زیستی نسل سوم<sup>۶</sup> تولید شده‌اند (۲). پرورش و کشت جلبک‌ها به عنوان منبع غنی از چربی برای اولین بار در سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۶ در آمریکا مورد آزمایش قرار گرفته است. ایده پرورش این جلبک‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب نیز توسط محققان آمریکایی پیشنهاد شده است. تولید جلبک برای تولید سوخت به دلیل گران‌قیمت بودن هنوز در مقیاس تجاری، جایگاه خود را نیافته است، اما

<sup>1</sup> Second generation feedstocks

<sup>2</sup> Lignocellulosic

<sup>3</sup> Cassava

<sup>4</sup> Miscanthus

<sup>5</sup> Jatropha

<sup>6</sup> Third generation feedstocks

<sup>7</sup> National Renewable Energy Laboratory

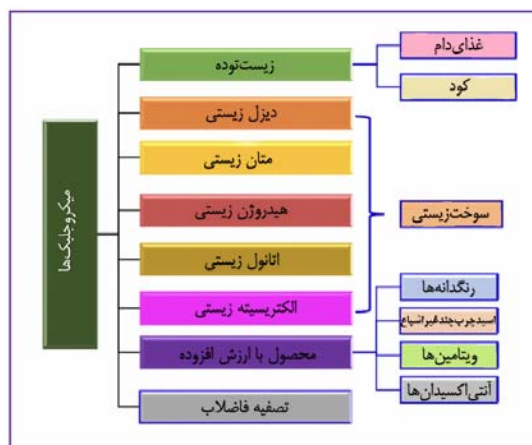
میکروجلبک‌ها قادر به از بین بردن مواد مغذی از فاضلاب‌ها و به صورت همزمان قادر به تولید زیست‌توده برای سوخت‌های زیستی هستند (۲، ۳۲). فاضلاب به دلیل فراوانی و غنی بودن از مواد مغذی می‌تواند به عنوان واسطه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای کشت میکروبی مورد استفاده قرار بگیرد (۳۲). غلظت نیترژن و فسفر در فاضلاب شهری ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در محل کشاورزی آن ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است (۲ و ۳۳). محققان زنجیره‌های مختلفی از جلبک‌های غنی از روغن را در مخازن رو باز حاوی فاضلاب شهری پرورش می‌دهند. آن‌ها دریافته‌اند رسوبات و لجنی که در چنین فاضلابی وجود دارد حاوی مقادیر قابل توجهی فسفر و نیترات است که برای رشد و تکثیر و عملکرد هرچه بهتر جلبک‌ها بسیار موثر است. پس از یک بازه زمانی ۱۴ هفته‌ای، نه تنها جلبک‌ها همچنان با طراوت هستند، بلکه بیش از ۹۰٪ نیترات و ۵۰٪ فسفات فاضلاب را مصرف کرده‌اند که بدین ترتیب فرآیند تصفیه‌سازی آن به مراتب راحت‌تر و کم هزینه‌تر از قبل می‌شود.

جلبک‌ها با انجام فرایند فتوسنتز، اکسیژن آزاد می‌کنند و اکسیژن آزادشده به باکتری‌های هوازی کمک می‌کند تا در تجزیه مواد خام فاضلاب‌ها فعال باشند. از جلبک *اسپایرولینا* در تصفیه فاضلاب و جذب فلزات سنگین مانند مس استفاده می‌شود. جلبک *سارگاسوم* که به فراوانی در آب‌های گرم وجود دارد، بهترین جاذب برای دو فلز سنگین سرب و کادمیوم در پساب‌های صنعتی هستند. همچنین این جلبک‌ها را می‌توان به آسانی جمع‌آوری و در شرایط آزمایشگاهی پرورش داد (۲۸). برای تولید سوخت‌های زیستی بسیاری از میکروجلبک‌ها در فاضلاب کشاورزی غنی از مواد مغذی قابل رشد هستند (۲).

تلفیق سیستم جلبکی با سیستم‌های تصفیه سنتی پساب باعث بهتر شدن کیفیت آب از طریق تثبیت موادغذایی حاوی ازت و فسفر به ترکیباتی مانند چربی و کربوهیدرات در سلول‌های میکروجلبکی می‌شود و در نتیجه منجر به کاهش آلودگی، حذف بوی نامطبوع و افزایش اکسیژن در پساب خواهد شد. میکروجلبک‌ها دارای رشد سریع و توانایی سازش با شرایط سخت محیطی می‌باشند و قادر هستند در محیط‌های غنی از موادغذایی مانند پساب شهری و صنعتی به‌خوبی رشد کنند (۲۸).

فاضلاب شهری می‌تواند با هم انجام شود که در آن به جای به‌کارگیری محیط‌کشت مصنوعی، فاضلاب به عنوان منبع غذایی میکروجلبک به کار می‌رود (۲۸). کشت میکروجلبک در فاضلاب، مرحله‌ای با اهمیت در تصفیه فاضلاب محسوب می‌شود که افزون بر تصفیه فاضلاب، تولید هم‌زمان زیست‌توده نیز انجام می‌شود که می‌تواند برای مصارف متعدد به کاررفته و ارزش زیادی داشته باشد. گروهی از محققان دریافته‌اند که با پرورش جلبک‌ها در مخازن فاضلاب شهری نه تنها می‌توان از آن‌ها به عنوان عامل تصفیه‌سازی آب استفاده کرد، بلکه منبعی ارزشمند برای تولید سوخت زیستی خواهند بود (۲۸). گیاه‌پالایی فاضلاب و جداسازی کربن‌دی‌اکسید با استفاده از میکروجلبک‌ها از مهم‌ترین مزایا در استفاده از جلبک‌ها در محیط‌زیست است؛ بخصوص گونه کلرلا، تصفیه فاضلاب‌ها همراه با تجمع هم‌زمان لیپیدها برای مصارف سوخت‌های زیستی را نشان می‌دهد (۲، ۳۱).

اما میکروجلبک‌ها کاربردهای دیگری نیز دارند. استفاده به عنوان مکمل‌های غذایی و حتی عنصری مهم در صنایع تولید لوازم‌آرایشی از جمله کاربردهای دیگر این ساختارهای طبیعی به شمار می‌آیند. نکته مهم اینجاست که فاضلاب شهری به طور بالقوه غنی از کودهای شیمیایی ارزان است و از آن گذشته رشد جلبک‌ها در چنین محیطی به تصفیه فاضلاب کمک زیادی می‌کند (۲۸).



شکل ۱- طرحی ساده از کاربردهای مختلف بالقوه جلبک‌ها (۸)

کاهش غلظت CO<sub>2</sub>

*tertiolecta*)، کلرلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*)، اسپایرولینا پلنتسیس (*Spirulina platensis*) و بتری کوکوس براونی (*Botryococcus braunii*) مورد بررسی قرار گرفت. در بین سویه‌های مورد آزمایش، بتری کوکوس براونی میزان تثبیت کربن دی‌اکسید بالاتر از ۹۸/۴۹۶ میلی‌گرم بر لیتر در هر روز را نشان داد، در حالی که اسپایرولینا پلنتسیس، دونالیلا تریولکتا و کلرلا ولگاریس به ترتیب ۶۱/۳۱۸، ۴/۲۷۲ و ۶۴/۲۵۱ میلی‌گرم بر لیتر در هر روز را نشان دادند (۲). (۳۶)

میکرو جلبک‌ها می‌توانند دی‌اکسید کربن را از جو و یا از گازهای صنعتی یا CO<sub>2</sub> یا از کربنات‌های محلول مانند NaHCO<sub>3</sub> و Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> تثبیت کنند (۲، ۳۴). مطالعات مختلفی توسط محققان مختلف در مورد جداسازی CO<sub>2</sub> با استفاده از میکرو جلبک‌ها انجام شده است. مشخص شد که میکرو جلبک دریایی کلروکوکام‌لیتورال (*Chlorococcum littorale*) غلظت بالاتر CO<sub>2</sub> را تا ۴۰٪ تحمل می‌کند (۲) و (۳۵). در آزمایشی که صورت گرفت، طیف میزان کربن دی‌اکسید تثبیت شده در دونالیلا تریولکتا (*Dunaliella*)

جدول ۱- نسل‌های متفاوت از مواد اولیه سوخت‌های زیستی (۲، ۱۶، ۲۱، ۲۲)

نسل مواد خام سوخت زیستی	مواد خام استفاده شده	مضرات
نسل اول	گندم، جو، ذرت، سیب زمینی، نیشکر، چغندر، سویا، نارگیل، آفتابگردان و کلزا <sup>۱</sup>	بحث و جدال مواد غذایی در مقابل سوخت، استفاده از زمین و آب، قیمت بالای پردازش و تولید
نسل دوم	مواد لیگنوسلولزی، گیاه کاساوا، گیاه جاتروفا، چمن میسکانوس، زیست توده آبی، سنبل آبی و سایر زیست توده‌های غیر خوراکی	محدودیت‌های فنی، نیاز به تجهیزات گران قیمت و پیشرفته
نسل سوم	جلبک	گران قیمت

جدول ۲- محصولات ارزش افزوده به دست آمده از سویه‌های جلبک (۲، ۲۳-۲۶)

کاربرد	نژاد	محصولات
سلامت، آرایشی-بهداشتی، آنتی‌اکسیدان، آرتوسپیریا <sup>۲</sup> ، گونه اسپایرولینا <sup>۳</sup>	فیکوسیانین <sup>۴</sup> ، پروتئین، ویتامین B <sub>۱۲</sub> ، زیست توده کپسول	زیست توده
تغذیه حیوانات، نوشیدنی سالم، مکمل غذایی، جانشین‌های غذایی	گونه کلرلا <sup>۵</sup>	زیست توده، کربوهیدرات
سلامتی، مکمل غذایی، خوراک	دونالیلا سالینا <sup>۶</sup>	کاروتنوئید <sup>۷</sup> ، β کاروتن <sup>۸</sup>
سلامتی، دارویی، مواد افزودنی خوراک	هماتوکوکوس پلویالیس <sup>۹</sup>	کاروتنوئید، آستازانتین <sup>۱۱</sup>
تغذیه، سوخت‌های زیستی	فیداکتیلوم تریکوماتوم <sup>۱۱</sup>	لیپید، اسید چرب
تغذیه، تغذیه لاروها و ماهیان دریایی	نانوکلروپسیس اوکالاتا <sup>۱۲</sup> ، گونه نانوکلروپسیس <sup>۱۳</sup>	زیست توده، ایکوزاپنتانوئیک اسید <sup>۱۴</sup>
داروسازی، آرایشی و بهداشتی	پورفیریوم کرونتوم <sup>۱۵</sup>	پلی ساکارید
مکمل غذایی، تغذیه	فیداکتیلوم تری کورنتوم <sup>۱۶</sup> ، نانوکلروپسیس، نیتز سچیا <sup>۱۷</sup>	ایکوزاپنتانوئیک اسید

<sup>1</sup> Rapeseed  
<sup>2</sup> Arthrospira  
<sup>3</sup> Spirulina sp  
<sup>4</sup> Phycocyanin  
<sup>5</sup> Chlorella sp.  
<sup>6</sup> Dunaliella salina  
<sup>7</sup> Carotenoids  
<sup>8</sup> β-carotene  
<sup>9</sup> Haematococcus pluvialis  
<sup>10</sup> Astaxanthin  
<sup>11</sup> Phaeodactylum tricornutum  
<sup>12</sup> Nannochloropsis oculata  
<sup>13</sup> Nannochloropsis sp.  
<sup>14</sup> Eicosapentaenoic acid (EPA)  
<sup>15</sup> Porphyridium cruentum  
<sup>16</sup> Phaeodactylum tricornutum  
<sup>17</sup> Nitzschia

## نقش بیورژوشیمیایی جلبک‌ها

در میان میکروارگانیسم‌های مختلف، جلبک‌ها برای میلیاردها سال عملکرد مهمی در بیورژوشیمی<sup>۱</sup> زمین ایفا کرده‌اند و امروزه نیز به این کار ادامه می‌دهند. در میان تمام گونه‌های جلبکی شناخته‌شده، سیانوباکتری‌ها<sup>۲</sup> به عنوان یکی از موجودات باستانی که بر روی پوسته‌ی زمین زندگی می‌کنند در نظر گرفته می‌شوند و اکسیژن مورد نیاز در زمین را تولید می‌کنند (۸، ۴۰). در مقایسه با جلبک‌های باستانی، جلبک‌های مدرن همانند گیاهان نیمی از اکسیژن را تولید می‌کنند و همچنین مسئول چرخه عناصر اصلی مثل گوگرد (S)، فسفر (P)، کربن (C)، نیتروژن (N) و دیگر عناصر کمیاب هستند. از این رو در طبیعت نیز این عناصر نقشی حیاتی در تعاملات مختلف و کنترل شرایط جوی ایفا می‌کنند (۸، ۴۱).

## عوامل دخیل در رشد جلبک‌ها

چندین عامل وجود دارد که برای اندازه‌گیری کشت زیست‌توده جلبک لازم است. برخی از این عوامل شامل شدت نور، منبع ویتامین C و منابع غذایی مانند نیترات‌ها، فسفات‌ها، کربوهیدرات‌ها و سایر عناصر کمیاب مانند منگنز، کبالت، روی، مولیبدن و غیره است (۸، ۴۲). پارامترهای دیگر شامل دمای بهینه، pH بهینه، حذف O<sub>2</sub> و جذب CO<sub>2</sub> به نسبت مساوی است (۱۸). نور، دما، N و P ارتباط نزدیکی با سرعت رشد و محتوای چربی میکروجلبک‌ها دارند. از این رو باید این پارامترها حفظ و کنترل شوند تا در تولید مثل مجموعه نتایج مورد نظر مؤثر واقع شود (۸، ۴۳).

## نتیجه‌گیری

جلبک‌ها گروه متنوعی از موجودات با بهره‌وری و توانایی در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و تولید روغن با بازده بالا هستند که کاربردهای بالقوه زیادی در تولید سوخت‌های زیستی دارند. میکروجلبک‌ها به دلیل توانایی تولید مواد ارزشمند با استفاده از دی‌اکسیدکربن، نیازهای اندک غذایی شامل نیتروژن و فسفر، سرعت رشد بالا، استفاده از منابع مغذی موجود در فاضلاب‌ها و نیز عدم نیاز به استفاده از زمین‌های وسیع حاصلخیز و قابل کشت گزینه مناسبی

جدول ۳- مقایسه مقدار روغن قابل استخراج از چند منبع تولید

بیودیزل (۲۶)

نوع گیاه	حجم روغن گرفته شده در هر متر مربع (ml/m <sup>2</sup> × 10 <sup>-5</sup> )
ذرت	۶۸۲۸۱۱/۱
سویا	۴۸۷۴۹۶/۴
آفتابگردان	۵۳۵۹۲۹/۹
کانولا	۲۴۷۰۰۱/۱۲
جاتروفا	۴۷۱۷۵۱/۱۹
روغن خرما	۳۶۵۷۰۹/۵۹
میکروجلبک	۳/۴۶۹ - ۹/۱۴۰۷

## متابولیسم جلبک‌ها

روند واکنش متابولیک تقریباً در تمام موجودات فتوسنتزی یکسان است. مهم‌ترین عامل، جذب ماده‌غذی از محیط اطراف از طریق فرایندهای مختلف بیوشیمیایی و انتقال آن‌ها است (۸، ۳۷). کربن (C) و نیتروژن (N) عناصر مهم در مسیرهای متابولیکی فتوسنتزی به حساب می‌آیند. عمده تغییرات ایجادشده در مسیرهای متابولیک، توده سلول‌ها، حجم، تراکم، پروتئین، کلروفیل، RNA و ویتامین است (۳۸، ۳۹). جلبک‌ها به وفور در محیط‌های مختلف (آب تازه، دریایی و ...) یافت می‌شوند و سرعت ۲ برابر شدن آن‌ها سریع است. از میکروجلبک‌ها برای تولید محصولات زیستی استفاده می‌شود. همچنین گونه‌های میکروجلبکی می‌توانند از مواد مغذی موجود در فاضلاب استفاده کنند و به طور مناسب زندگی کنند؛ بنابراین به راحتی جایگزین استفاده از مواد اولیه با هزینه بالا یا مواد شیمیایی می‌شوند و این امر باعث کاهش هزینه‌های تولید نیز می‌شود. این روش می‌تواند یک فناوری بسیار مؤثر، پایدار، تمیزتر و دوست‌دار محیط‌زیست باشد. جدای از نقش آن‌ها در تولید بیولوژیکی، جلبک‌ها همچنین در جذب بیولوژیکی فاضلاب، از بین بردن فلزات سنگین سمی، از بین بردن سموم دفع آفات و جداسازی CO<sub>2</sub> استفاده می‌شوند. استفاده سیستمیک از جلبک‌ها برای تولید زیست‌توده برای محصولات با ارزش افزوده، امکان رویکرد زیست زراعی را ارتقا می‌بخشد (۸).

<sup>1</sup> Biogeochemical

<sup>2</sup> Cyanobacteria

زیستی ناشی از جلبک‌های مهندسی ژنتیک‌شده رفت، اما باید توجه داشت که ریسک و خطرات بالقوه زیادی ممکن است در این روش وجود داشته باشد؛ جلبک‌های مهندسی ژنتیک‌شده ممکن است به جلبک‌های مضر مهارنشده تبدیل شوند و باعث از بین رفتن صنعت ماهیگیری و منابع تامین آب آشامیدنی شوند. اما در چند سال آینده با محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و رشد روزافزون قیمت آن‌ها از یک سو و با بهینه‌سازی فرآیندهای تولید سوخت‌های زیستی جلبکی از سوی دیگر، شرایط تغییر خواهد کرد و به زودی زمانی فرا خواهد رسید که سوخت های زیستی جلبکی مقرون به صرفه خواهند شد.

برای سرمایه‌گذاری شرکت‌ها و کارخانجات تولید سوخت زیستی هستند. به علاوه کشت جلبک‌ها به منظور تولید سوخت می‌تواند به نحوی مدیریت شود که به صورت همزمان باعث تصفیه آلاینده‌های جوی و فاضلاب‌های شهری نیز بشود. اگر چه ممکن است استفاده از میکروجلبک‌ها به‌عنوان سوخت به دلیل گران‌قیمت بودن هنوز در مقیاس تجاری جایگاه خود را پیدا نکرده باشد، سوخت‌های زیستی خروجی انرژی پایین‌تری نسبت به سوخت‌های سنتی دارند و برای ساخت کارخانه‌های تولیدی لازم برای افزایش مقدار سوخت‌های زیستی، سرمایه‌گذاری اولیه بالایی مورد نیاز است. همچنین گروهی معتقدند که باید سراغ نسل چهارم، یعنی سوخت‌های

### منابع

- Chiappe, C., et al., Development of cost-effective biodiesel from microalgae using protic ionic liquids. *Green Chemistry*, 2016. 18(18): p. 4982-4989.
- Mathimani, T. and A. Pugazhendhi, Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 2019. 17: p. 326-330.
- Mathimani, T., L. Uma, and D. Prabakaran, Homogeneous acid catalysed transesterification of marine microalga *Chlorella* sp. BDUG 91771 lipid-an efficient biodiesel yield and its characterization. *Renewable energy*, 2015. 81: p. 523-533.
- Subsamran, K., et al., Potential use of vetiver grass for cellulolytic enzyme production and bioethanol production. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 2019. 17: p. 261-268.
- Chi, N.T.L., et al., Evaluating the potential of green alga *Chlorella* sp. for high biomass and lipid production in biodiesel viewpoint. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 2019. 17: p. 184-188.
- Gupta, J., M. Agarwal, and A. Dalai, Optimization of biodiesel production from mixture of edible and nonedible vegetable oils. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2016. 8: p. 112-120.
- Sharma, J., et al., Enhancement of lipid production from algal biomass through various growth parameters. *Journal of Molecular Liquids*, 2018. 269: p. 712-720.
- Enamala, M.K., et al., Production of biofuels from microalgae-A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 94: p. 4-
- Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae. Biotechnology advances*, 2007. 25(3): p. 294-306.
- Baldev, E., et al., Unveiling algal cultivation using raceway ponds for biodiesel production and its quality assessment. *Renewable Energy*, 2018. 123: p. 4.۴۹۸-۸۶
- Prabakar, D., et al., Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: outlook and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 96: p. 306-324.
- Alam, F., S. Mobin, and H. Chowdhury, Third generation biofuel from Algae. *Procedia Engineering*, 2015. 105: p. 763-768.
- de Vries, S.C., et al., Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. *Biomass and Bioenergy*, 2010. 34(5) :p. 588-601.
- Fei, H., A. Abudurehman, and J.K. Vessey, Improving a "Generation 1.5" biofuel feedstock crop: Colonization and growth enhancement of energy beet (*Beta vulgaris* L. Beta 5833R) by inoculation with *Glucanacetobacter* spp. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 2017. 10: p. 247-255.
- Sims, R.E., et al., An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*, 2010. 101(6): p. 1570-1580.
- Maiti, J.P., et al., Microalgae for third generation biofuel production ,mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives-A mini review. *Energy*, 2014. 78: p. 104-113.
- Sheehan, J., et al., Look back at the US department of energy's aquatic species program: biodiesel from algae; close-out report. 1998, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
- 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. 21.۳۳۲-۷
- Mathimani, T., et al., Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: process evaluation and knowledge gaps. *Journal of cleaner production*, 2019. 208: p. 1053-1064.
- Shimako, A.H., et al., Environmental assessment of bioenergy production from microalgae based systems. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 139: p. 51-60.
- Hemaiswarya, S. and I. Rathinam Raja, S. Carvalho, R. Ravikumar, Vasudeo Zambare & Debmalya Barh. *Appl Microbiol Biotechnol*, 201۱. ۹۶. ۲p. 1125-1135.
- Saravanan, A.P., et al., Biofuel policy in India: a review of policy barriers in sustainable marketing of biofuel. *Journal of cleaner production*, 2018. 193: p. 734-747.

23. Mobin, S. and F. Alam, Some promising microalgal species for commercial applications: A review. *Energy Procedia*, 2017. 110: p. 510-517.
24. Pulz, O. and W. Gross, Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 2004. 65(6): p. 635-648.
25. Winwood, R.J., Recent developments in the commercial production of DHA and EPA rich oils from micro-algae. *Ocl*, 2013. 20(6): p. D604.
26. Bajhaiya, A., et al., Algal biodiesel The next generation biofuel for India. *Asian J. Exp. Biol. Sci*, 2010. 4: p. 728-739.
27. Pittman, J., Dean, AP, Osundeko. O.(2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*. 102(1): p. 17-25.
28. Kern, J.D., et al., Multiobjective Optimal Siting of Algal Biofuel Production with Municipal Wastewater Treatment in Watersheds with Nutrient Trading Markets. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019. 145(2): p. 04018092.
29. Lundquist, T.J., et al., A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy Biosciences Institute*, 2010: p. 1.
30. Huntsinger, L.F., N.M. Roupail, and P. Bloomfield, Trip generation models using cumulative logistic regression. *Journal of urban planning and development*, 2013. 139(3): p. 176-184.
31. Gupta, S.K., et al., Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 115: p. 255-264.
32. Chen, G., L. Zhao, and Y. Qi, Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: a critical review. *Applied Energy*, 2015. 137: p. 282-291.
33. de la Noüe, J., G. Laliberté, and D. Proulx, Algae and waste water. *Journal of applied phycology*, 1992. 4(3): p. 247-254.
34. Wang, B., et al., CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 2008. 79(5): p. 707-718.
35. Iwasaki, I., et al., Effect of extremely high-CO<sub>2</sub> stress on energy distribution between photosystem I and photosystem II in a 'high-CO<sub>2</sub>' tolerant green alga, *Chlorococcum littorale* and the intolerant green alga *Stichococcus bacillaris*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1998. 44(3): p. 184-190.
36. Sydney, E.B., et al., Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource technology*, 2010. 101(15): p. 5892-5896.
37. Miazek, K., et al., Effect of organic solvents on microalgae growth, metabolism and industrial bioproduct extraction: a review. *International journal of molecular sciences*, 2017. 18(7): p. ۴۲۹.
38. Martinez, F., C. Ascaso, and M. Orus, Morphometric and stereologic analysis of *Chlorella vulgaris* under heterotrophic growth conditions. *Annals of botany*, 1991. 67(3): p. 239-245.
39. Endo, H., et al., Growth characteristics and cellular components of *Chlorella regularis*, heterotrophic fast growing strain. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1974. 38(1): p. 9-18.
40. Holloway, J.M. and R.A. Dahlgren, Nitrogen in rock: occurrences and biogeochemical implications. *Global Biogeochemical Cycles* :۴)۱۶ .۲۰۰۲ .p. 65-1-65-17.
41. Graham, L.E. and L.W. Wilcox, *Algae*; Linda E. Graham, Lee W. Wilcox. 2000.
42. Keller, M.D., et al., Media for the culture of oceanic ultraphytoplankton 1, 2. *Journal of phycology*, 1987. 23(4): p. 633-638.
43. Junying, Z .R. Junfeng, and Z. Baoning, Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis*, 2013. 34(1): p. 80-100.

## بوم‌سازگان مانگروی ایران؛ اهمیت، وضعیت فعلی و تهدیدات

مهدی قدرتی شجاعی<sup>۱\*</sup>، رضا ندرلو<sup>۲</sup>، نسترن دلفان<sup>۱</sup>، مهدی بلوکی کورنده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> گروه زیست‌شناسی، دانشکده زیست‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> معاونت محیط زیست دریایی و تالاب‌ها، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران

### چکیده

بوم‌سازگان مانگرو در طول سواحل جنوبی ایران از بندر ماهشهر در استان خوزستان (دست‌کاشت) تا باهوکلالت در استان سیستان و بلوچستان پراکنش دارند. دو گونه درخت مانگرو با نام حرّاء (*Avicennia marina*) و چنّدل (*Rhizophora mucronata*) در سواحل ایران وجود دارد. این در حالی است که بیش از ۹۷٪ پوشش در ایران مربوط به گیاه حرّاء است. گونه حرّاء همچنین تنها گونه موجود در حاشیه جنوبی خلیج فارس است. در این مقاله وضعیت فعلی جنگل‌های مانگرو ایران با تأکید بر اهمیت زیست‌شناختی و اقتصادی-اجتماعی آن‌ها در کنار تهدیداتی که این بوم‌سازگان حساس با آن مواجه هستند مورد بررسی قرار است.

واژگان کلیدی: بوم‌سازگان مانگرو، حرّاء، چنّدل، تهدیدات، خلیج فارس و دریای عمان

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mshojaei@modares.ac.ir