

## مکان یابی کشت گسترده صنعتی جلبک: مطالعه موردی

### درسواحل خلیج فارس و دریای عمان

دریافت مقاله: ۹۵/۸/۲۳ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۱/۱۳

صفحات: ۲۳۹-۲۲۷

عبدالمجید لباب پور: استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی شهدای هوپزه<sup>۱</sup>.

lababpour@shhut.ac.ir

#### چکیده

دست‌یابی به مقدار کافی زیست‌توده ریزجلبکی، برای کاربری‌های گوناگون مانند غذا، دارو و انرژی ضروری است. منابع تولید زیست‌توده مانند زمین، آب، مواد غذایی و کربن‌دی‌اکسید در امکان‌سنجی تولید و بهای تمام شده نقش اساسی دارند. این پژوهش با هدف تعیین مکان‌های مناسب کشت ریزجلبک و منابع کربن‌دی‌اکسید و نیز میزان آب مورد نیاز برای تولید ریزجلبک انجام شده است. برای دست‌یابی به این هدف، فراوانی و پراکندگی جغرافیایی مکان‌های مناسب کشت و منابع کربن‌دی‌اکسید با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در محیط نرم‌افزاری GIS برای سواحل خلیج فارس و دریای عمان بررسی شده است. داده‌های مکانی ۵۷ نقطه مناسب کشت ریزجلبک با وسعت حدود ۱۸۰۰۰ کیلومتر مربع نشان می‌دهد که امکان گسترش صنعت ریزجلبک در سواحل خلیج فارس و دریای عمان وجود دارد. افزون بر آن وجود حداقل ۳۸ نقطه تولید گاز کربن‌دی‌اکسید عمدتاً در استان‌های خوزستان و بوشهر شناسایی و گزارش شده است. با فرض ۵، ۶ و ۷ کیلوگرم تبخیر آب در مترمربع در روز در مناطق گوناگون، آب موردنیاز معادل با ۸۴۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۸۹۰۰۰ مترمکعب در دوره کشت در هر واحد برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد که با فناوری کشت ریزجلبک در استخرهای روباز، امکان تولید بیش از ۵۴۰۰۰۰ تن زیست‌توده ریزجلبک در هر دوره کشت در سواحل خلیج فارس و دریای عمان امکان‌پذیر است. افزون بر تولید زیست‌توده، کاستن آلاینده‌گی گاز کربن‌دی‌اکسید توسط ریزجلبک‌ها و امکان تامین مواد غذایی ریزجلبک از پساب‌های شهری و تصفیه پساب برای پیشگیری از مخاطرات زیست‌محیطی نیز میسر خواهد شد.

کلمات کلیدی: زیست‌توده ریزجلبک، ارزیابی منابع، میزان نیاز به آب، مکان‌یابی، کشت ریزجلبک.

۱. مسئول مقاله: سوسنگرد، دانشگاه صنعتی شهدای هوپزه، دانشکده فنی و مهندسی.

## مقدمه

تولید انواع زیست توده ریزجلبکی<sup>۱</sup> به دلیل پتانسیل های فراوان برای به کارگیری در حوزه های گوناگون به ویژه انرژی و غذا و نیز ارزش افزوده اقتصادی، مورد توجه روزافزون قرار دارد (Spolaore et al. 2006). زیست توده ریزجلبکها مانند کلرلا ولگاریس<sup>۲</sup>، اسپیرولینا<sup>۳</sup>، هماتوکوکوس<sup>۴</sup> و دونالیلا<sup>۵</sup> پتانسیل بسیار زیادی برای کاربری های گوناگون مانند تولید ترکیب های گوناگون غذایی انسان و خوراک دام و آبزیان دارند. افزون بر آن در تولید فراورده های دارویی و بهداشتی و نیز انرژی به کار می روند. برخی از ریزجلبکها چربی زیادی دارند و به همین دلیل برای تولید سوخت های زیستی به کار می روند. برخی ریزجلبکها مانند هماتوکوکوس ترکیبات کاروتنوئیدی دارند که مصارف غذایی و دارویی فراوان دارند (Pienkos and Darzins 2009). در سال های اخیر از ریزجلبکها در حفاظت از محیط زیست مانند تثبیت ریزگردها نیز بهره گرفته شده است (Lababpour et al. 2016). به دلیل مزایای فراوانی که ریزجلبکها دارند، تولید زیست توده ریزجلبکی در یک دهه از سال ۲۰۰۴ تا ۳۵۰۰ تن در سال به بیش از ۱۰۰۰۰ تن در سال افزایش یافته است (Spolaore et al. 2006; Wigmosta et al. 2011; Lababpour 2012; Béchet et al. 2013). صنعت تولید انواع ریزجلبک سبب سود اقتصادی فراوان و به تبع آن گسترش روزافزون صنعت ریزجلبکی شده است. برای تامین زیست توده ریزجلبک مورد نیاز برای مصارف گسترده و گوناگون، بررسی منابع تولید ریزجلبک یعنی زمین، آب، مواد غذایی و کربن دی اکسید الزامی است. اگرچه تولید ریزجلبکها در استخرهای روباز<sup>۶</sup> راندمان کمتری در مقایسه با فوتوبیوراکتورهای بسته<sup>۷</sup> دارد و اغلب غلظت زیست توده در استخرهای کشت به کمتر از ۱ گرم در لیتر می رسد، اما در تولید صنعتی، رایج ترین شیوه کشت ریزجلبکها هستند زیرا ساخت استخرها آسان تر و کار کردن با استخرهای روباز بسیار ساده تر از فوتوبیوراکتورهای بسته است (Molinuevo-Salces et al. 2010). از آنجایی که حجم استخرهای کشت اغلب چند هزار متر مکعب است و آب و مواد غذایی بسیار زیادی در کشت ریزجلبک در استخرهای روباز مصرف می شود، کاهش نیاز به تامین منابع کشت مانند زمین، آب و مواد غذایی در هزینه و کیفیت فراورده ریزجلبکی، اهمیت زیادی دارد (Venteris et al. 2014; Blaas and Kroeze 2014; Moore et al. 2015).

در زمینه بررسی منابع برای کشت و تولید گسترده ریزجلبک، پژوهش های متعددی به ویژه در ایالات متحده آمریکا انجام شده است. اما در کشور ایران تنها یک گزارش مقدماتی یافت شد (Lababpour 2012). ویگموستا و همکارانش (۲۰۱۱) با استفاده از داده های جغرافیایی پتانسیل منابع زمین و آب در ایالات متحده برای تولید روغن از ریزجلبک را بررسی کرده اند و نتیجه گرفته اند که پتانسیل تولید ۲۲۰ میلیارد لیتر روغن ریزجلبکی در سال در آمریکا وجود دارد. این مقدار تولید نیاز به کارگیری ۵/۵ درصد از زمینها در ایالات متحده و ۱۴۲۰ لیتر آب به ازای هر لیتر روغن جلبکی دارد (Wigmosta et al. 2011). پیت و همکارانش (۲۰۱۱) مکانها را براساس هزینه منابع محلی در تولید سوخت جلبکی اولویت بندی کردند و نتیجه گرفتند که سواحل خلیج

<sup>1</sup> Algal biomass

<sup>2</sup> *Chlorella vulgaris*

<sup>3</sup> *Spirulina*

<sup>4</sup> *Haematococcus*

<sup>5</sup> *Dunaliella*

<sup>6</sup> Open ponds

<sup>7</sup> Closed photobioreactors

مکزیک بیشترین اولویت را دارند، اما در بقیه نواحی ایالات متحده نیز پتانسیل تولید سوخت جلبکی وجود دارد (Pate et al. 2011). بنیمن و اسوالد (۱۹۹۶) هزینه همه مراحل تولید سالانه ریزجلبک در استخرهای روباز برای تامین سوخت جلبکی در ایالات متحده را بررسی کردند و دریافتند که با فناوری کشت در استخرهای روباز امکان تولید روغن جلبکی با هزینه کم‌تر از هزینه نفت خام وجود ندارد. افزون بر آن گزینه‌هایی مانند انتخاب سویه‌های جلبکی پربازده‌تر و ارتقای استخرهای کشت را برای افزایش راندمان تولید پیشنهاد کردند (Benemann, J.R., Oswald 1996; Lundquist et al. 2010). وایزمن (۱۹۸۷) تولید تجربی زیست توده جلبکی در مزرعه با وسعت ۸۰۹۴ مترمربع را بررسی کردند و برآن اساس، بهای زیست توده در مزرعه با وسعت ۴۰۴۷ کیلومتر مربع را ۰/۲۰۵ دلار در هر کیلوگرم برآورد کردند (Weissman and Goebel 1987). در مطالعه‌ای دیگر ونتریس (۲۰۱۳) کشت ریزجلبک در استخرهای روباز با آب شیرین، لب شور و آب دریا از نظر فنی و اقتصادی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که امکان تولید سوخت زیستی به مقدار ۹۴/۶ میلیون مترمکعب در سال در ایالات متحده وجود دارد (Venteris et al. 2013). در کشور ایران، لباب پور (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای مقدماتی، امکان کشت ریزجلبک در سواحل خلیج فارس و دریای عمان را بررسی کرده است. پژوهش عمدتاً با بررسی ویژگی‌های کیفی به این نتیجه رسیده است که سواحل خلیج فارس و دریای عمان پتانسیل زیادی برای گسترش صنعت تولید ریزجلبک دارند و پیشنهاد کرده است که پژوهش بیش‌تری در زمینه مکان یابی با شاخص‌های دقیق‌تر انجام شود (Lababpour 2012).

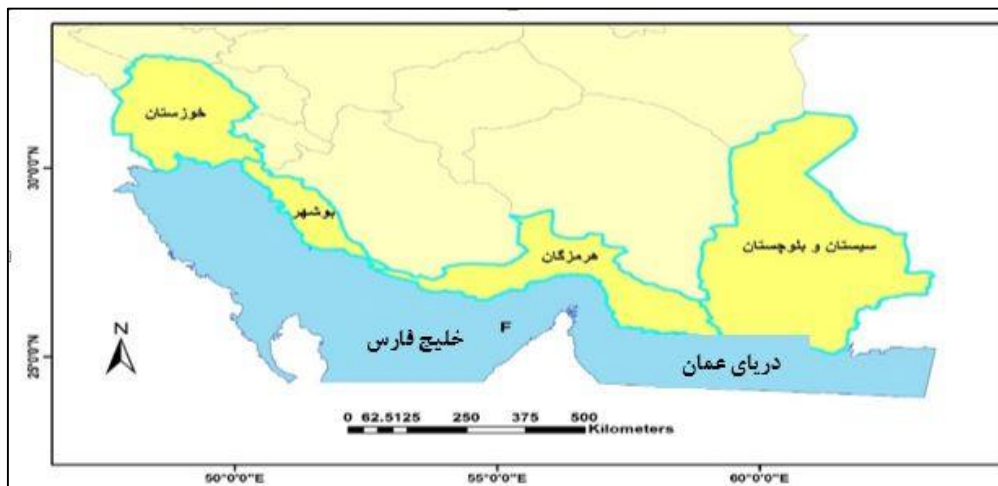
با توجه به اهمیت اساسی بررسی منابع برای کشت و تولید ریزجلبک و نیز نبود اطلاعات در این زمینه، این پژوهش تعیین مکان‌های مناسب در سواحل خلیج فارس و دریای عمان را به منظور کشت و تولید گسترده زیست‌توده ریزجلبکی مورد بررسی قرار داده است. به عبارت دیگر، براساس تفاوت‌های تبخیر آب و وجود گاز کربن دی اکسید در مناطق گوناگون، مکان‌های مناسب برای تولید گسترده ریزجلبک تعیین می‌شود.

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه با طول جغرافیایی از ۴۸/۴۱۲ تا ۶۱/۶۲۹ در سواحل خلیج فارس و دریای عمان واقع است و طولی حدود ۲۴۳۷ کیلومتر دارد. این محدوده، مناطق ساحلی و حاشیه جنوبی چهار استان سیستان و بلوچستان، هرمزگان، بوشهر و خوزستان را شامل می‌شود (شکل ۱). طول خط مرز آبی ایران با خلیج فارس با در نظر گرفتن جزایر حدود ۱۸۰۰ کیلومتر و طول خط ساحلی در مجاورت دریای عمان حدود ۶۳۷ کیلومتر است. در طول ساحل شمالی دریای عمان، سواحل را می‌توان در سه دسته، گروه بندی کرد که عبارت اند از: رشته‌های ماسه‌ای طولانی که در پشت آن‌ها زمین‌های هموار جلگه‌ای قرار دارند و پهنای آن‌ها گاه تا ۵/۱ کیلومتر می‌رسد، پهنه‌های گلی با دلتاهای وسیع و زمین‌های هموار با شیبی کمتر از ۱ درصد، و پادگان‌های ساحلی. کرانه خلیج فارس، بیش‌تر کرانه‌ای کوهستانی است و با واسطه یک دشت ساحلی باریک، با دریا در ارتباط است. بارش باران در این سواحل ناچیز و نرخ میانگین بارندگی حدود ۱۱۵ میلی‌متر در سال است (Salah et al. 2016). دما و تابش زیاد نور خورشید از عوامل موثر در انجام بسیاری از فعالیت‌های انسانی در منطقه ساحلی است. میزان درجه حرارت در تابستان به ۴۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد و در زمستان تا ۷ درجه سلسیوس

(دی ماه) کاهش می یابد. فعالیت‌های کنونی آبی پروری در این سواحل منحصر به پرورش میگو است که از سال ۱۳۶۹ شمسی آغاز شده و رو به گسترش است (Molinuevo-Salces et al. 2010).



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، سواحل خلیج فارس و دریای عمان.

#### گزینش مکان تولید ریزجلبک

این پژوهش براساس فناوری تولید ریزجلبک در استخرهای روباز و با فرض بیشترین میزان تولید ۰/۷ کیلوگرم زیست‌توده در مترمکعب از محیط کشت در دوره کشت انجام شده است. برای تعیین وسعت و پراکندگی جغرافیایی مکان‌های مناسب کشت ریزجلبک در سواحل خلیج فارس و دریای عمان، از داده‌های بررسی‌های میدانی سازمان شیلات کشور برای کشت آبزیان و ارزیابی‌های ماهواره‌ای و سایر گزارش‌ها و منابع علمی بهره گرفته شده است. گزینش مکان‌های مناسب برای تاسیس واحدهای تولید ریزجلبک با شاخص‌های متعدد معین شده است (جدول (۱)). در بررسی مکان‌های مناسب فرض شده است که هر واحد تولیدی زیست‌توده ریزجلبکی حداقل ۲ کیلومترمربع وسعت دارد. ۱/۶ کیلومترمربع از مکان گزینش شده برای ساخت استخرهایی به کار می‌رود که عمق آب در آن‌ها ۰/۳ متر است و ۰/۴ کیلومترمربع دیگر برای بخش‌های وابسته به تولید دراستخر و سایر مکان‌های واحد تولیدی، به کار می‌رود. ابعاد هر استخر ۰/۱ کیلومترمربع فرض شده است. در انتخاب زمین، مکان‌های بدون کاربری کشاورزی، صنعتی و مسکونی با شیب کم‌تر از ۱ در صد گزینش شده‌اند. محل‌های گزینش شده جزو مناطق حفاظت شده نبوده و جاده و فرودگاه از میان آن‌ها عبور نمی‌کند. همچنین مالکیت و محدودیت‌های امنیتی برای کاربری زمین در نظر گرفته نشده است. در گزینش مکان‌ها، فاصله آب و مواد غذایی از محل استخر کشت در نظر گرفته نشده است. افزون بر آن، تنها تولید زیست‌توده ریزجلبکی در مکان گزینش شده بررسی و محل‌های بعدی فرایندهای مربوط به زیست‌توده در پژوهش بررسی نشد. برای نمایش مکان‌ها بر روی نقشه، نخست با نرم افزار ArcGIS 10.2 (ESRI, USA) نقشه‌های استان‌های ساحلی خلیج فارس و دریای عمان تهیه و سپس داده‌های مکانی گزینش شده به صورت لایه‌های رستری بر روی نقشه‌ها ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از شناسایی مکان‌های مناسب برای کشت ریزجلبک، میزان آب مورد نیاز برآورد

شد و وجود کربن دی اکسید و نور برای تولید ریزجلبک با استفاده از داده های وزارت نفت، منابع علمی و مطالعات میدانی بررسی شده است (Soltanieh et al. 2016). با به کارگیری داده های بانک اطلاعاتی تهیه شده در مرحله قبل، در محیط ArcGIS لایه های مکان نما، آب نما، کربن دی اکسید و نور تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

جدول (۱). شاخص های بررسی مکان های مناسب برای کشت ریزجلبک و تولید زیست توده ریزجلبکی.

شاخص های در نظر گرفته شده	شاخص های در نظر گرفته نشده*
زمین شیب کمتر از ۱ درصد دارد زمین کشاورزی نیست	مالکیت و محدودیت های امنیتی برای کاربری زمین محل های فرایندهای بعدی بر روی زیست توده تولیدی که بیرون از محل تولید هستند
پوشش گیاهی ندارد یا ناچیز است زمین مسکونی نیست تاسیسات صنعتی در آن وجود ندارد کاربری اداری ندارد جاده و فرودگاه از میان محل واحد تولیدی عبور نمی کند منطقه حفاظت شده و تالاب نیست هر واحد تولیدی ۲ کیلومترمربع وسعت و سطح هر استخر ۰/۱ کیلومترمربع و حجم مایع هراستخر ۳۰۰۰ متر مکعب در نظر گرفته شد. تولید بهینه زیست توده دراستخر، ۰/۷ گرم در لیتر در دوره کشت فرض شد.	فاصله آب از محل واحد تولیدی و روش انتقال آب فاصله مواد غذایی از محل واحد تولیدی و روش انتقال مواد غذایی فاصله انرژی از محل واحد تولیدی و روش انتقال انرژی

\* (عمده این شاخص ها در گزینش ابتدایی مکان های مناسب کشت پیش بینی شده است اما به دلیل پیچیدگی پارامترها در گزارش گنجانده نشده است).

میزان تولید زیست توده در هر واحد تولیدی به عوامل گوناگون مانند نوع ریزجلبک بستگی دارد. میزان تولید محلی به طور معمول با پیش بینی مدل های رشد و داده های کشت پایلوت معین می شود. در این پژوهش بر وجود زمین کافی، آب، گاز کربن دی اکسید، نور کافی و دمای مناسب برای رشد ریزجلبک تمرکز شده است. دمای هوا در ماه ها و فصل های گوناگون تغییر می کند و این تغییر سبب تغییر در رشد ریزجلبک ها و تولید زیست توده می شود. رابطه میان میزان تولید زیست توده و عوامل جوی دما و نور را می توان با روابط ریاضی مدل کرد. براساس روابط ریاضی می توان میزان تولید را برای تک تک واحدهای گزینش شده محاسبه و تفاوت میان میزان تولید را پیش بینی کرد (Jacob-Lopes et al. 2009).

تبخیر آب از سطح استخرهای کشت ریزجلبک به طور عمده تابع دمای هوا و آب، سرعت باد، تابش خورشید، فشار هوا، کیفیت آب استخر و رطوبت نسبی است. میزان نیاز سالانه به آب برای تولید ریزجلبک رابطه مستقیمی با تبخیر آب دارد. میزان تبخیر آب را می توان با روش های تجربی مانند تشتک تبخیر کلاس A یا مدل های ریاضی پیش بینی کرد (Berger and Finkbeiner 2010). پارامترهای عمده مدل برای پیش بینی میزان تبخیر عبارتند از: تعداد روزهای کاری استخر کشت، آب بازیافت شده از فرایند، مدت زمان متوسط ماند آب در استخر،

حجم کاری استخر، سطح استخر و عمق آب در استخر (Guieysse et al. 2013). به منظور بررسی آب مورد نیاز تولید زیست توده ریزجلبکی، همه پارامترهای موثر در تولید به استثنای میزان تبخیر آب برای واحدهای گزینش شده مشابه در نظر گرفته شده است. میزان تبخیر، تابش نور و دما از داده‌های ۷ ایستگاه هواشناسی با طول دوره آماری مناسب جمع آوری و پس از پردازش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (بانک داده های سازمان هواشناسی کشور). موازنه آب مورد نیاز در کشت ریزجلبک با تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های آب به سامانه و با رابطه (۱) محاسبه شده است (McJannet et al. 2013).

$$Q_{in} + P_g - \Delta S = Q_{out} + E + L \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن،  $Q_{in}$  کل آب ورودی،  $P_g$  میزان بارش باران،  $\Delta S$ ، تغییر در حجم آب ذخیره شده،  $Q_{out}$ ، آب خروجی از استخر،  $E$ ، میزان تبخیر آب از استخر و  $L$ ، نشت آب در زمین است.

گاز کربن دی‌اکسید ماده غذایی اصلی برای رشد فوتوتروفی ریزجلبک‌هاست که به صورت محلول در آب توسط ریزجلبک‌ها مصرف می‌شود. ارزان ترین و مناسب ترین منبع رایج کربن دی‌اکسید در کشت ریزجلبک‌ها به کارگیری منابع ثابت کربن دی‌اکسید مانند پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های سیمان‌سازی و نیروگاه‌ها است که گاز کربن دی‌اکسید را در اثر سوزاندن منابع سنگواره‌ای تولید می‌کنند. اگر چه غلظت کربن دی‌اکسید در گاز خروجی، وجود دیگر گازهای سمی همراه با کربن دی‌اکسید و دمای گاز از چالش‌های عمده در به کارگیری این منابع کربن دی‌اکسید است، پژوهش‌های متعدد، پتانسیل به کارگیری این گازها را در کشت‌های ریزجلبکی اثبات کرده اند (Jansson et al. 2010; Sayre 2010). داده‌های وزارت نفت و منابع علمی، بررسی‌های میدانی و اطلاعات ماهواره‌ای، در تعیین مکان‌های ثابت تولید کننده گاز کربن دی‌اکسید در استان‌های ساحلی خلیج فارس و دریای عمان به کار رفت. داده‌های مکانی گاز کربن دی‌اکسید بر روی نقشه به صورت نقطه‌ای نمایش داده شده است.

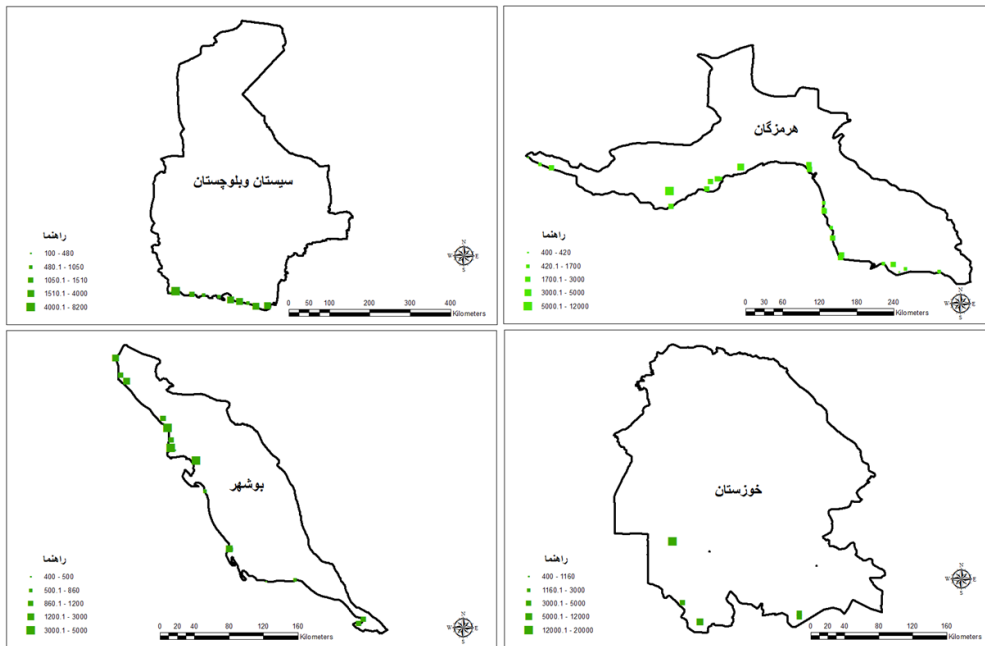
نور به عنوان منبع مهم انرژی در عمل فتوسنتز در ریزجلبک‌ها به کار می‌رود. اگرچه کیفیت نور از نظر شدت، مدت تابش و طوج موج نور تابانیده شده تاثیر زیادی بر کارایی فتوسنتز دارند (Jacob-Lopes et al. 2009)، در این پژوهش با فرض مناسب بودن شدت بیش‌تر نور، متوسط شدت نور از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی استخراج و در سواحل خلیج فارس و دریای عمان در ۳ سطح ۱۰۰ تا ۳۰۰، ۳۰۱ تا ۵۰۰ و ۵۰۱ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع دسته بندی شد.

پتانسیل میزان تولید ریزجلبک در مکان‌های گزینش شده با توجه به تفاوت در دمای آب و نور محلی (تابعی از شرایط جوی)، با مدل‌های ترکیبی رشد ریزجلبک و اقلیمی به ترتیب در ۳ سطح ۲۴، ۲۸/۸ و ۳۳ تن برواحد تولیدی در دوره کشت گروه بندی و میزان مصرف آب با توجه به میزان تبخیر آب در مکان‌های گوناگون و با فرض ۵، ۶ و ۷ لیتر بر مترمربع در روز به ۳ سطح ۷۲۰۰۰، ۷۶۸۰۰ و ۸۱۰۰۰ مترمکعب در ماه گروه بندی شده است.

## نتایج

براساس داده‌های منابع دولتی و داده‌های میدانی انجام شده توسط شرکت پیاب نوین، مکان‌های مستعد کشت ریزجلبک در ۴ استان ساحلی خلیج فارس و دریای عمان معین و سپس مکان‌های گزینش شده در محیط نرم افزاری ArcGIS و در قالب نقشه نمایش داده شده است. شکل (۲) داده‌های مکان‌های جغرافیایی گزینش شده

مناسب کشت ریزجلبک و وسعت آن‌ها را در سواحل خلیج فارس و دریای عمان نشان می‌دهد. برخی از این مکان‌ها پتانسیل کاربری چندگانه برای کشت دیگر آبزیان مانند استخرکشت میگو را دارند. پراکندگی جغرافیایی این واحدها در ۴ استان ساحلی شامل خوزستان، ۵ مکان؛ بوشهر، ۲۰ مکان؛ هرمزگان، ۲۴ مکان؛ و سیستان و بلوچستان، ۱۲ مکان است. در مجموع، تعداد ۹۰۰۰ مکان با وسعت ۲ کیلومترمربع که مستعد کشت ریزجلبک بودند، شناسایی شدند. مجموع وسعت این مناطق ساحلی حدود ۱۸۰۰۰ کیلومتر مربع پیش بینی شده است. بیش‌ترین تعداد مناطق مستعد برای کشت در استان هرمزگان (۲۴ مکان) و کم‌ترین تعداد مناطق مستعد در استان خوزستان (۵ مکان) قرار دارد. با توجه به سواحل طولانی دریای عمان و خلیج فارس با حدود ۲۴۳۷ کیلومتر، امکان یافتن مکان‌های متعدد برای ایجاد مزرعه ریزجلبک وجود دارد اما بخشی از سواحل، صخره ای و یا دارای پستی و بلندی‌های زیاد هستند، بخشی از سواحل منطقه عسلویه در استان بوشهر به تاسیسات نفت و گاز اختصاص یافته است، افزون بر آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از سواحل استان‌های ساحلی جنوب در محدوده شهرها و مناطق مسکونی قرار دارند. این شرایط، امکان کاربری بخش عمده ای از سواحل برای تولید ریزجلبک را نامناسب می‌کند. گزینش مکان‌ها با شاخص‌های بیش‌تر و دقیق‌تر مانند نوع خاک و ویژگی‌های آب و شرایط اقلیمی محلی به ارزیابی کامل‌تر مکان‌های ساحلی برای کشت ریزجلبک می‌انجامد. جدول (۲) و شکل (۳) موازنه میزان آب موردنیاز واحدهای تولید ریزجلبک براساس تفاوت در میزان میانگین تبخیر از سطح استخر کشت ریزجلبک را نشان می‌دهد. میانگین آب مورد نیاز واحدهای تولیدی از مجموع آب به کاررفته در آغاز کشت برای پرکردن استخر و آب به کاررفته برای جبران آب تبخیر شده در مدت کشت به مدت یک ماه محاسبه شده است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی نشان می‌دهد که تبخیر در سواحل استان خوزستان بیش‌ترین و در سواحل استان سیستان و بلوچستان کم‌ترین مقدار را دارند. در استان خوزستان به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تبخیر آب برابر با ۱۲/۸۹ و ۳/۰۴ کیلوگرم برمترمربع در روز و در استان بوشهر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تبخیر آب برابر با ۱۲ و ۲/۳۴ کیلوگرم برمترمربع در روز است. در استان هرمزگان به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تبخیر آب برابر با ۱۱/۱۱ و ۲/۷۱ کیلوگرم برمترمربع در روز و در استان سیستان و بلوچستان به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تبخیر آب برابر با ۱۲ و ۲/۳۴ کیلوگرم برمترمربع در روز است. با در نظر گرفتن میزان تبخیر متوسط روزانه ۵، ۶ و ۷ کیلوگرم برمترمربع از استخر کشت به ترتیب ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۱۰۰ مترمکعب آب، در دوره کشت یک ماهه در هر واحد کشت تبخیر می‌شود. میزان آب مورد نیاز در آغاز کشت برابر با ۵۶۰۰۰ مترمکعب در هر واحد است. این داده‌ها نشان می‌دهد که هر واحد تولیدی بین ۵۸۱۰۰ و ۵۹۱۰۰ مترمکعب در هر دوره کشت به آب نیاز دارد. بیش‌ترین تبخیر آب در تیرماه و کم‌ترین مصرف آب در دی ماه و متوسط ۷/۳ کیلوگرم برمترمربع در روز برآورد شده است. براین اساس کشت در ماه‌های سردتر سبب کاهش تا ۷۹/۲ درصدی آب تلف شده ناشی از تبخیر می‌شود.

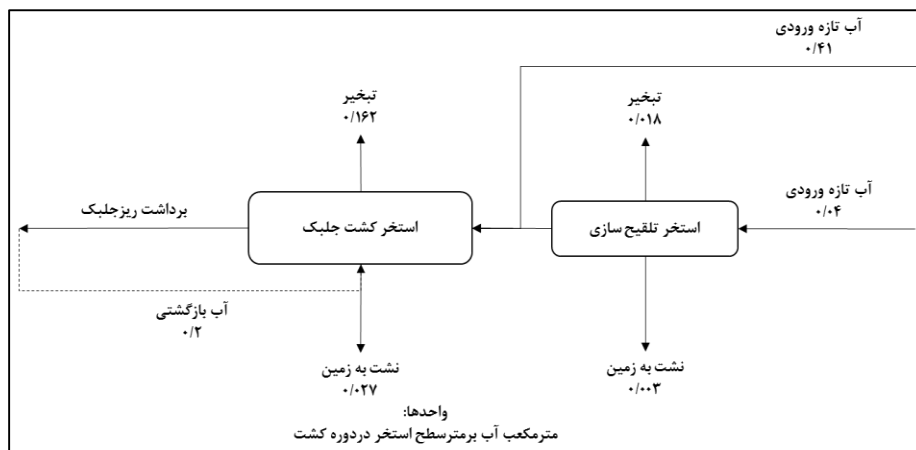


شکل (۲) توزیع و وسعت مکان‌های جغرافیایی گزینش شده برای تاسیس واحد تولید زیست توده ریز جلبکی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان (ماخذ: نگارنده).

جدول (۲). آب مورد نیاز کشت در استان‌های ساحلی خلیج فارس و دریای عمان

استان	آب مورد نیاز (مترمکعب/واحد تولیدی/دوره کشت)
خوزستان	۸۹۰۰۰
بوشهر	۸۴۰۰۰
هرمزگان	۸۴۰۰۰
سیستان و بلوچستان	۸۰۰۰

\* ماخذ: نگارنده



شکل (۳). نمودار موازنه جرم آب در فرایند کشت ریز جلبک

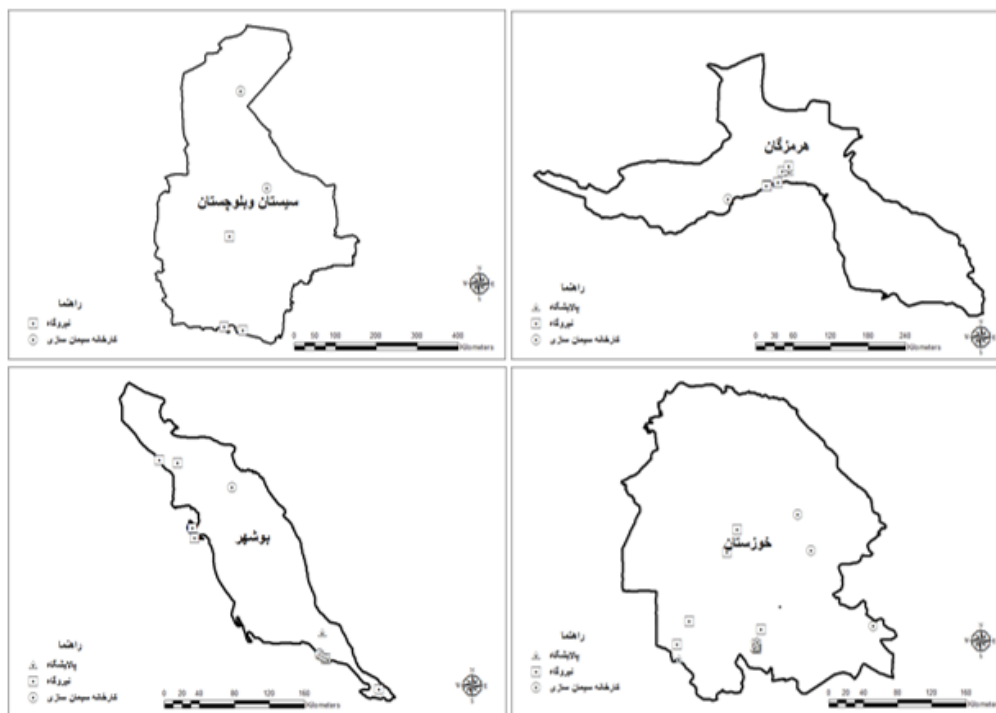


شکل (۴)، تعداد ۳۸ مکان ثابت تولیدکننده گاز کربن دی‌اکسید در مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای عمان به تفکیک استان را نشان می‌دهد، اگرچه منابع متعدد دیگری برای تامین گاز کربن دی‌اکسید نیز وجود دارد. در این پژوهش مکان‌های ثابت پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های سیمان‌سازی و نیروگاه‌های تولید برق در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که این منبع غذایی برای رشد ریزجلبک در استان‌های بوشهر و خوزستان بیشترین فراوانی و در استان هرمزگان و سیستان و بلوچستان کم‌ترین فراوانی را دارد. مطالعات مستقل دیگری لازم است تا میزان پراکندگی و فراوانی میزان گاز کربن دی‌اکسید و نیز امکان به کارگیری منابع کربن در استخرهای کشت ریزجلبک را مورد ارزیابی قرار دهد. به کارگیری گازهای آلاینده حاصل از سوختن به عنوان منبع کربن در کشت ریزجلبکی نه تنها سبب کاهش هزینه تولید ناشی از تولید و تهیه گاز کربن دی‌اکسید می‌شود بلکه هم‌چنین سبب کاهش آلاینده‌گی این گازها در هوا نیز می‌شود. منابع کربن دی‌اکسید بررسی شده، خالص نیستند و بخشی از گازهای خروجی (حدود ۱۰ درصد) از دودکش صنایعی مانند کارخانه‌های سیمان‌سازی، پالایشگاه‌های نفت و گاز، نیروگاه‌های برق هستند که در هوا انتشار می‌یابند. ترکیب در صد گاز کربن دی‌اکسید دودکش صنایع متفاوت و اغلب با دیگر آلاینده‌هایی مانند کربن مونوکسید همراه هستند که برای رشد ریزجلبک مضرند. از سوی دیگر با تامین گاز کربن دی‌اکسید از صنایع، افزون بر تامین کربن مورد نیاز برای رشد ریزجلبک، کاهش آلاینده‌گی گازهای گلخانه‌ای نیز فراهم می‌شود (Xiong et al. 2018).

پیش‌بینی‌های فنی با مدل‌های ترکیبی رشد ریزجلبک و شرایط جوی نشان دادند که نواحی ساحلی خلیج فارس و دریای عمان به دلیل وجود منابع نسبتاً مشابه، تولید زیست‌توده تقریبی مشابه دارند، اگرچه شرایط رشد در سواحل دریای عمان به دلیل کیفیت آب و تغییرات کم‌تر جوی مناسب‌تر است. عوامل گوناگون دیگری مانند زیرساخت‌های محلی در تعیین میزان تولید اهمیت دارند که اثر دیگر عوامل تولید بایستی به صورت مستقل ارزیابی شود.

جایابی مکانی برای تولید ریزجلبک، بر مدیریت منابع آبی کشور و بهای تمام شده زیست‌توده اثر گذاشته و با بهره‌گیری از منابع طبیعی مانند زمین، نور کافی و آب دریا در سواحل خلیج فارس و دریای عمان، امکان گسترش صنعت تولید زیست‌توده ریزجلبکی فراهم می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی محل‌گزینش شده برای تولید، پتانسیل تولید ۵۴۰ هزار تن ریزجلبک در هر دوره کشت در سواحل خلیج فارس و دریای عمان وجود دارد. هم‌چنین با کشت ریزجلبک در مکان‌های بهینه ساحلی، نیاز به منابع آب شیرین در کشت زیست‌توده ریزجلبکی منتفی می‌شود. افزون بر آن، به کارگیری پساب‌های شهری و کشاورزی از دیگر گزینه‌ها برای تامین آب و مواد غذایی مورد نیاز کشت ریزجلبک است که نقش آن‌ها در گسترش صنعت ریزجلبک کشور در حال بررسی است. به دلیل وجود آب دریا، تابش خورشید و زمین بایر فراوان، سواحل جنوبی حاشیه خلیج فارس و دریای عمان به عنوان مکان‌های مناسب کشت ریزجلبک شناخته شده‌اند (Lababpour 2012). نتایج این پژوهش مناسب بودن این مکان‌ها را تایید می‌کند. اما متغیرهای متعدد دیگری نیز وجود دارند که در بررسی این پژوهش گنجانیده نشده‌اند. برای نمونه نوع سویه‌های ریزجلبکی در کشت و تولید ریزجلبک به صورت موردی بررسی نشده‌اند. ارزیابی تولید سویه‌های جلبکی خاص با داده‌های تجربی پایلوت انجام می‌شود که تاکنون در سواحل خلیج فارس و دریای عمان گزارش نشده است. نوع ریزجلبک‌ها با توانایی‌ها و مقاومت‌های گوناگون می‌تواند به تولید بیش‌تر زیست‌توده منتهی شود. ارتباط نور تابانیده شده در رشد ریزجلبک می‌تواند

سبب تغییر عمده ای بر تولید و عملیات کشت شود که در این پژوهش انجام نشده و نیاز به بررسی بیشتر دارد. اگر مبنای تولید براساس موجود بودن نور قرار داده شود و یا دمای آب، مجدداً تغییر زیادی در روند رشد مشاهده می شود. بررسی پراکندگی و تعداد ریزجلبک‌ها در آب‌های ساحلی مناطق جنوبی می تواند به عنوان شاخصی ابتدایی در پیش بینی میزان رشد و تولید به کار رود (Guieysse et al. 2013; Venteris et al. 2013; Kang et al. 2015).



شکل (۴). پراکندگی جغرافیایی منابع تامین گاز کربن دی‌اکسید مورد نیاز برای رشد ریزجلبک در سواحل خلیج فارس و دریای عمان (ماخذ: نگارنده)

همان‌گونه که داده‌های شکل (۲) نشان می‌دهند گستردگی واحدهای گزینش شده در سواحل استان خوزستان بیشترین سطح را به خود اختصاص داده است و این شرایط، امکان سرمایه‌گذاری گسترده و تاسیس واحدهای بسیار بزرگ را فراهم می‌کند. وجود خدمات فنی و گاز کربن دی‌اکسید واحدهای نفت و گاز محلی بیش‌تر در سواحل استان بوشهر و خوزستان امتیاز بزرگی برای گسترش کشت ریزجلبک در این منطقه به شمار می‌آید. وجود آب با کیفیت بیش‌تر در سواحل دریای عمان امتیاز ویژه‌ای است که این سواحل را برتر از دیگر سواحل جنوبی می‌سازد. پساب‌ها و گازهای سوزانده شده نفتی (فلر<sup>۹</sup>) فراوان در سواحل استان بوشهر و خوزستان جزو موادی هستند که می‌توانند به عنوان ماده غذایی، برای کاهش هزینه تولید در کشت ریزجلبک به کار روند. افزون بر آن که در کاهش آلاینده‌گی و حفظ محیط زیست محلی نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند. مجموع منابع

<sup>9</sup> Flare

زمین، آب، گاز کربن دی اکسید و دیگر مواد غذایی، خدمات فنی و نیروی انسانی اولویت بیش تری را در سواحل شمال غربی خلیج فارس پیشنهاد می کند.

چالش های پژوهشی زیادی برای ارزیابی پتانسیل تولید ریزجلبک وجود دارد که انجام آن ها برای امکان سنجی درست و دقیق ضروری است (Pate et al. 2011). برای نمونه میزان مصرف آب و میزان انرژی مورد نیاز برای انتقال آب در صورتی که کشت در کل مدت سال انجام شود باید مورد بررسی قرار گیرند (Murphy and Allen 2011). افزون بر آن نه تنها سواحل خلیج فارس و دریای عمان، بلکه پتانسیل تمامی مناطق جغرافیایی کشور برای تولید ریزجلبک باید مورد ارزیابی قرار گیرد. امکان تامین مواد غذایی کشت از منابع آلاینده از نظر کیفیت و امکان دسترسی در استخرهای کشت نیاز به بررسی مفصل و دقیق دارد. با انجام این پژوهش ها این امکان فراهم می شود که با پیش بینی نسبتا جامع، بتوان جایگاهی جهانی برای کشور در حوزه تولید فراورده های جلبکی ایجاد کرد.

### نتیجه گیری

فرض این پژوهش براین است که امکان دست یابی به فناوری کشت ریزجلبک در استخرهای روباز فراهم است. در این راستا، این پژوهش مکان های مناسب کشت، تامین آب و گاز کربن دی اکسید برای کشت ریزجلبک را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این پژوهش نشان داد که فراوانی و پراکندگی جغرافیایی مکان های مناسب کشت ریزجلبک در محدوده جغرافیایی سواحل خلیج فارس و دریای عمان، وجود منابع کربن دی اکسید، آب دریا و شدت زیاد نور در طول سال عواملی هستند که امکان تولید صنعتی انبوه و گسترده ریزجلبک ها در این منطقه جغرافیایی را فراهم می نمایند. این پژوهش یک مرحله اساسی در تعیین ظرفیت تولید و گسترش زیست توده ریزجلبکی در کشور را نشان می دهد و آشکار می کند که به دلیل فراوانی و ارزانی منابع تولید، مستعدترین مزرعه های کشت و تولید ریزجلبک در سواحل جنوبی قابل گسترش است. هم چنین منابع و عوامل موثر بر رشد ریزجلبک مانند کیفیت آب، میزان تغییرات جوی محلی و وجود زیرساختارها، سبب تفاوت در میزان تولید زیست توده ریزجلبکی در استخرهای روباز در مکان های متفاوت محدوده مطالعاتی می شود. نتایج این پژوهش با وجود فرض ها و ساده سازی های متعدد، اطلاعات با ارزشی را برای گسترش صنعت ریزجلبک در سواحل جنوبی کشور ارائه می دهد. اما عوامل و محدودیت های مهم دیگری مانند قوانین کشوری، تامین مواد غذایی محیط کشت، سرعت زیاد تیخیر آب و زیر ساختارهای ترابری نیز باید در نظر گرفته شوند. هم چنین بررسی های بسیار بیش تری لازم است تا به صورت دقیق تر میزان تولید زیست توده ریزجلبکی، کاربردهای بعدی زیست توده تولیدی و داده های این پژوهش را عمیق تر ارزیابی کند.

### منابع

- Béchet Q, Shilton A, Guieysse B (2013) **Modeling the effects of light and temperature on algae growth : State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation.** *Biotechnol Adv*, **31**:1648–1663. doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.08.014
- Benemann, J.R., Oswald WJ (1996) **Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO<sub>2</sub> to biomass.** University of California at Berkeley.
- Berger M, Finkbeiner M (2010) **Water Footprinting: How to Address Water Use in Life**

- Cycle Assessment**, Sustainability, 2:919–944. doi: 10.3390/su2040919
- Blaas H, Kroeze C (2014) **Possible future effects of large-scale algae cultivation for biofuels on coastal eutrophication in Europe**. Sci Total Environ, 496:45–53.
- Guieysse B, Béchet Q, Shilton A (2013) **Variability and uncertainty in water demand and water footprint assessments of fresh algae cultivation based on case studies from five climatic regions**. Bioresour Technol, 128:317–323.
- Jacob-Lopes E, Scoparo CHG, Lacerda LMCF, Franco TT (2009) **Effect of light cycles (night/day) on CO<sub>2</sub> Process, fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors**. Chem Eng Process Intensif, 48:306–310.
- Jansson C, Wullschleger SD, Kalluri UC, Tuskan G a. (2010) **Phytosequestration: Carbon biosequestration by plants and the prospects of genetic engineering**. Bioscience, 60:685–696.
- Kang Z, Kim B-H, Ramanan R, et al (2015) **A cost analysis of microalgal biomass and biodiesel production in open raceways treating municipal wastewater and under optimum light wavelength**. J Microbiol Biotechnol, 25:109–18.
- Lababpour A (2016) Potentials of the microalgae inoculant in restoration of biological soil crusts to combat desertification. Int J Environ Sci Technol, 13:2521–2532.
- Lababpour A (2012) **Opportunities of microalgae large scale production in Iran**. In: 1st confrence on National production. Tarbat Modares University, Tehran, Iran,
- Lundquist TJ, Woertz IC, Quinn NWT, Benemann JR (2010) **A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production**. California
- McJannet DL, Cook FJ, Burn S (2013) **Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage**. Water Resour Res, 49:1415–1428.
- Molinuevo-Salces B, García-González MC, González-Fernández C (2010) **Performance comparison of two photobioreactors configurations (open and closed to the atmosphere) treating anaerobically degraded swine slurry**. Bioresour Technol, 101:5144–5149.
- Moore BC, Coleman AM, Wigmosta MS, et al (2015) **A High Spatiotemporal Assessment of Consumptive Water Use and Water Scarcity in the Conterminous United States**. Water Resour Manag , 29:5185–5200.
- Murphy CF, Allen DT (2011) **Energy-water nexus for mass cultivation of algae**. Environ Sci Technol, 45:5861–5868.
- Pate R, Klise G, Wu B (2011) **Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up**. Appl Energy, 88:3377–3388.
- Pienkos PT, Darzins A (2009) **The promise and challenges of microalgal-derived biofuels**. Biofuels, Bioprod Biorefining, 3:431–440.
- Salah P, Reisi-Dehkordi A, Kamranzad B (2016) **A hybrid approach to estimate the nearshore wave characteristics in the Persian Gulf**. Appl Ocean Res, 57:1–7.
- Sayre R (2010) Microalgae: The Potential for Carbon Capture. Bioscience, 60:722–727.
- Soltanieh M, Zohrabian A, Gholipour MJ, Kalnay E (2016) **A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran**. Int J Greenh Gas Control, 49:488–509.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A (2006) **Commercial applications of microalgae**. J Biosci Bioeng, 101:87–96.
- Venteris ER, Skaggs RL, Coleman AM, Wigmosta MS (2013) **A GIS Cost Model to Assess the Availability of Freshwater, Seawater, and Saline Groundwater for Algal Biofuel Production in the United States**. Environ Sci Technol, 47:4840–4849.

- Venteris ER, Skaggs RL, Wigmosta MS, Coleman AM (2014) **A national-scale comparison of resource and nutrient demands for algae-based biofuel production by lipid extraction and hydrothermal liquefaction.** *Biomass and Bioenergy*, **64**:276–290.
- Weissman JC, Goebel RP (1987) **Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels.** SERI/SP-231-2840. Solar Energy Research Institute: Golden, CO.
- Wigmosta MS, Coleman AM, Skaggs RJ, et al (2011) **National microalgae biofuel production potential and resource demand.** *Water Resour Res*, **47**:1–13.
- Xiong J-Q, Kurade MB, Jeon B-H (2018) Can Microalgae Remove Pharmaceutical Contaminants from Water? *Trends Biotechnol*, **36**:30–44.