زیست فناوری دانشگاه تربیت مدرس
دوره 7، شماره 1، بهار و تابستان 1395

بررسی توانایی ترسیب کربن ریز جلبک *Spirulina platensis* در آب‌های با شوری متفاوت

مهری شعبانی[1]، محمد حسین صیادی[2*]، محمد رضا رضایی[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند

[*] بیرجند، صندوق پستی 331
mh_sayadi@birjand.ac.ir
(دریافت مقاله: 94/2/5 پذیرش مقاله: 94/2/23)

چکیده- ترسیب بیولوژیکی CO_2 با استفاده از جلبک‌ها یکی از روش‌های امیدوار کننده و سازگار با محیط زیست برای جداسازی CO_2 می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف بررسی توانایی ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس برای رشد در محیط‌های با شوری متفاوت و ترسیب کربن در غلظت‌های مختلف CO_2 می‌باشد. بدین منظور، تجزیه و تحلیل شاخص‌های رشد شامل تولید و بهره‌وری زیست توده، نرخ ویژه رشد و نرخ تثبیت کربن در طول دوره های 8 روزه با حفظ شرایط یکسان در 3 محیط کشت با شوری‌های مختلف (۳،۱۵۰۰ µs/cm، 34000) و 4 غلظت متفاوت دی اکسید کربن (0/03%، 2%، 5% و 10%) انجام شد. این آزمایش با استفاده از استوک خالص ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس و محیط کشت Zarrouk's Medium در بیوراکتور نوری صفحه مسطح انجام گرفت. در تمامی محیط‌های کشت در چهار روز اول کشت، بالاترین نرخ ویژه رشد مشاهده شده است، بطوری که این پارامتر در 4 غلظت کربن مذکور در آب شهری به‌ترتیب $0/35\ d^{-1}$، 0/23، 0/24 و 0/24 بوده است. ریزجلبک اسپیرولینا بالاترین نرخ تثبیت کربن و همین‌طور تولید زیست توده را در آب طبیعی (شهر بیرجند) تحت غلظت 10% دی اکسید کربن نشان داده است ($0/49\ gL^{-1}d^{-1}$ و 0/098). پس از آن به‌ترتیب آب مقطر با مقادیر $0/45\ gL^{-1}d^{-1}$ و 0/09 و در انتها آب دریا (به‌دلیل شوری بالا و نامساعد بودن شرایط محیطی) با مقادیر ب $0/42\ gL^{-1}d^{-1}$ و 0/84 در غلظت 10% دی اکسید کربن قرار گرفتند.

کلیدواژگان: آب شور، اسپیرولینا پلاتنسیس، بیرجند، ترسیب زیستی کربن، گازهای گلخانه‌ای.

1- مقدمه

فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده از سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و تولید انرژی سبب افزایش چشمگیری در گازهای گلخانه‌ای شده است. مصرف سوخت‌های فسیلی موجب تولید بخار آب، گاز کربنیک و گازهای سمی همچون اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، SO_2 و CO است. تمامی این مواد غیر از بخار آب، روی محیط زیست در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی اثر تخریبی دارند. در سطح

محلی بیشترین اثر تخریبی به صورت آلودگی هوا بروز می‌کند و هوای کلان شهرها بارزترین نمونه آن به شمار می‌رود. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (USEPA) اظهار کرده است که تولید و مصرف انرژی، عمدتاً ناشی از حمل و نقل، در انتشار 71 درصد از گازهای گلخانه‌ای جهان در سال 2010 نقش داشته است. این درصد از سال 1990 تا 2010، 35 درصد افزایش داشته است [1]. غلظت اتمسفری دی اکسید کربن، یکی از گازهای اصلی گلخانه‌ای، از 280 پی‌پی‌ام (از زمان انقلاب پیش صنعتی) به 390 پی‌پی‌ام (2013) افزایش یافته است [3،2]. در حال حاضر CO_2 در حدود 52% در گرمایش جهانی نقش دارد [1].

مدت زمان زیادی است که میکروجلبک‌ها به عنوان جایگزین امیدوارکننده‌ای برای تولید سوخت زیستی، با هدف جایگزین شدن استفاده از سوخت‌های فسیلی شناخته شده‌اند. این رویکرد بیشتر به‌دلیل کارایی فتوسنتز آن‌ها در تبدیل زیستی دی اکسید کربن (CO_2)، توانایی تولید بیومس بالا، تجمع چربی بالا و محصولات جانبی غیرسوختی ارزشمند آن‌ها است [4]. ریزجلبک‌های اتوتروف فتوسنتز کننده قابلیت بالایی در تثبیت دی اکسید کربن دارند که 10 الی 50 برابر مؤثرتر از گیاهان عالی هستند [6،5]. انتظار می‌رود گیاهان زمینی تنها در کاهش 3 تا 6 درصد انتشارجهانی CO_2 شرکت کنند [8،7]. در طی فرایند فتوسنتز، CO_2 به عنوان منبع کربن مورد استفاده قرار می‌گیرد که با استفاده از انرژی خورشیدی به ترکیبات مختلف تبدیل می‌شود. کربن، مهم‌ترین عنصر تغذیه ریزجلبک بوده و بعد از آن نیتروژن و فسفر قرار دارند [10،9] . توده ریزجلبک خشک حاوی حدود 50 درصد کربن بوده، که همه برگرفته از CO_2 می‌باشد [11]. با تولید هر 1 کیلوگرم بیومس ریزجلبک میزان حدود 1/83 کیلوگرم کربن دی اکسید می‌تواند تثبیت شود[12]. غلظت دی اکسید کربن در جو به میزان 0/03 الی 0/06 درصد (v/v) در دسترس است [2].

اسپیرولینا یک سیانوباکتری سبز آبی متشکل از سلول های استوانه‌ای است که تشکیل ریسه را می‌دهند. شکل مارپیچی صفت مشخصه این جنس بوده ولی مشخصات مارپیچ (یعنی طول و قطر آن) بین گونه‌ها و حتی در یک گونه تفاوت دارد برای مثال در اسپیرولینا پلاتنسیس قطر مارپیچ حدود 35 تا 50 میکرون می‌باشد [13].

چیو و همکاران (2008) مطالعه‌ای را بر روی ریزجلبک کلرلا انجام دادند آن‌ها در این مطالعه توانایی ترسیب کربن این ریز جلبک را در 4 غلظت 2، 5، 10 و 15 درصد مورد بررسی قرار داده و نتایج تولید بیومس در این غلظت‌ها به‌ترتیب $gL^{-1}d^{-1}$ 1/21، 0/062، 0/01 و 0/009، و میزان حذف دی اکسید کربن $gL^{-1}d^{-1}$ 0/261، 0/316، 0/466 و 0/573 حاصل شده است [14]. در تحقیقی دیگر کلرلا وولگاریس کشت شده در کربن اتمسفری (0/03 درصد) مقدار $gL^{-1}d^{-1}$ 0/075 دی اکسید کربن را حذف کرده است [15]. گزارش‌های حاصل از مطالعات موراییس و همکارانش (2007) بر روی اسپیرولینا پلاتنسیس حاکی از این است که این ریز جلبک در غلظت‌های 0، 6 و 12 درصد دی اکسید کربن میزان تولید بیومس به‌ترتیب برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/14، 0/22 و 0/33 و تثبیت کربن به‌ترتیب در دو غلظت 6 و 12 درصد 53/29% و 45/61% گزارش شده است. ریزجلبک *Dunaliella* توسط ونگ و همکارانش (2008) در غلظت 27 درصد کربن کشت داده شد و مقدار تولید بیومس به میزان $gL^{-1}d^{-1}$ 0/17 و حذف کربن $gL^{-1}d^{-1}$ 0/313 داشته است [16].

در دنیا مطالعاتی در زمینه تثبیت زیستی کربن توسط ریزجلبک‌ها انجام شده است، اما امکان‌سنجی پرورش ریزجلبک‌ها در آب‌های شور و ترسیب کربن در مناطقی که فاقد آب شیرین کافی می‌باشند، نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. یکی از راهکارهای شناخته شده ترسیب

کربن توسط پوشش گیاهی است. در مناطق خشک و نیمه خشک که منابع آب شیرین در آن محدود بوده و شرایط کشت گیاهان به‌دلیل کمبود منابع آب و اقلیم خشک این منطقه محدود می‌باشد [17]، باید راهکارهایی برای استفاده بهینه از آب‌های شور ارائه شود. هدف از این مطالعه بررسی توانایی رشد جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در تیمارهای مختلف آب با شوری‌های متفاوت و بدنبال آن توانایی این جلبک در ترسیب کربن می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- محیط کشت ریز جلبک‌ها و شرایط کشت

نمونه خالصی از ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس از پژوهشکده آبزیان بندر انزلی تهیه شد و در محیط کشت Zarrok's medium [18] پرورش داده شد و سپس با حجم مشخص 1 لیتر به داخل هر راکتور انتقال داده شد.

کشت گونه اسپیرولینا به صورت جداگانه در سه راکتور صفحه تخت انجام شد (Flat Plate Reactors). این جلبک در سه محیط آب مقطر، آب دریای شبیه‌سازی شده و آب طبیعی در منطقه مورد مطالعه (خراسان جنوبی، شهر بیرجند) با مقادیر متفاوت هدایت الکتریکی (اندازه‌گیری شده توسط *EC* متر مدل *Istek Model 915 PDC*) به ترتیب 3 µs/cm، 1500 µs/cm، 34000 µs/cm به مدت 8 روز پرورش داده شد. حجم محیط کشت پرورش داده شده در هر بیوراکتور 10 لیتر بوده است. شرایط نوری فراهم شده در این پژوهش به صورت دوره-های 12 ساعت تاریکی/روشنایی با نور 3500 لوکس بوده است.

تمامی آزمایش‌ها در شرایط میدانی انجام شده که مقدار دمای محیط بین حداقل 22 و حداکثر 33 درجه سانتی‌گراد متفاوت بوده است. هوادهی با استفاده از پمپ هوا *(RESUN AC-9603)* با مشخصات فشار هوای 0/12MPa در کل طول دوره به صورت مداوم انجام شد.

2-2- آماده‌سازی محیط کشت آب دریای شبیه‌سازی شده

در برخی از مطالعات آب دریای شبیه‌سازی شده جایگزین آب دریای طبیعی می‌باشد و دلیل این امر کاهش تأثیرات بیولوژیکی و فراهم آوردن مایع قابل تکرار با مواد و ترکیب شناخته شده می‌باشد. در این مطالعه از فرمول و ترکیب ارائه شده توسط کالکین (1965) استفاده شده است [19].

2-3- بیوراکتورهای نوری صفحه تخت Flat Plate (Reactors) FPR

ریزجلبک ها در راکتورهای شیشه‌ای تخت به ابعاد (40×40×40 سانتی‌متر) با حجم 10 لیتر به منظور بررسی توانایی اسپیرولینا پلاتنسیس در ترسیب کربن پرورش داده شده‌اند.

بیوراکتورهای نوری صفحه مسطح نوعی از راکتورهای بسته هستند که معمولاً در یک زاویه با افق مماس هستند و در برخی موارد نیز به شکل عمود نسبت به زمین دیده شده‌اند [20].

2-4- اندازه‌گیری وزن خشک

وزن خشک سلولی (gL^{-1}) از طریق سانتریفیوژ کردن 10 میلی‌لیتر از هر نمونه در دور 4500 RPM به مدت 30 دقیقه انجام شد و پس از آن در آون در دمای 105 درجه سانتی‌گراد به مدت 40 دقیقه خشک گردید. لازم به ذکر است که هر یک در 3 تکرار مورد بررسی قرار گرفت.

2-5- محاسبه تولید زیست توده

زمانی‌که از کشت جلبک برای ترسیب کربن استفاده می‌شود این پارامتر مهم‌ترین شاخص مشاهده روند رشد می‌باشد. انتخاب گونه ریزجلبکی مناسب برای این کار یکی از عوامل تعیین کننده موفقیت در ترسیب زیستی

کربن است[21].

تولید زیست توده در این مطالعه با استفاده از رابطه (1) محاسبه شد که در آن پارامترهای P نشان دهنده بیومس تولید شده ($g\ L^{-1}\ d^{-1}$) ، X_0 (gL^{-1}) بیومس ابتدایی و X_t مقدار بیومس در زمان t_t می‌باشد [22].

$$P_{overall}\ (g\ L^{-1}\ d^{-1}) = (x_t - x_0)/(t_t - t_0) \qquad (1)$$

2-6- محاسبه نرخ رشد ویژه

نرخ رشد ویژه بر اساس وزن خشک سلولی از رابطه (2) بدست می‌آید [22]:

$$\mu\ (day^{-1}) = \ln (x_t/x_0)/(t_t - t_0) \qquad (2)$$

2-7- نرخ تثبیت کربن

نرخ تثبیت کربن (R) برای ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس با استفاده از رابطه (3) محاسبه شد [22]:

$$R_{co2}\ (g_{CO2}\ L^{-1}\ d^{-1}) = (C_c P\ (m_{CO2}\ m_C^{-1}) \qquad (3)$$

که در این رابطه R_{CO2} نرخ تثبیت CO_2 ($g_{CO2}\ L^{-1}\ d^{-1}$)، P بهره‌وری زیست توده ($g\ L^{-1}\ d^{-1}$)، C_c کسری از کربن در زیست توده (g/g)، m_{CO2} جرم مولی دی اکسید کربن (g/mol) و m_C جرم مولی کربن (g/mol) است.

کربن موجود در وزن خشک سلولی ریزجلبک‌ها 50% در نظر گرفته شد (W / W) که مرتبط با نیاز 1/83 کیلوگرم CO_2 برای تولید 1 گرم وزن خشک سلولی ریزجلبک‌ها می‌باشد [23].

2-8- تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا داده‌های خام در نرم‌افزار اکسل ذخیره گردید. همچنین با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 17 رابطه بین نرخ تولید زیست توده، رشد ویژه و تثبیت کربن اتمسفری با تیمارهای مختلف شوری به کمک آزمون توکی و ضریب اطمینان 99 درصد سنجیده شد.

3- نتایج و بحث

در این مطالعه ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در 3 نمونه آب مقطر، آب دریا و آب طبیعی به حجم 10 لیتر و به مدت 8 روز کشت داده شده و میانگین نتایج 3 تکرار مرتبط با تولید زیست توده و نرخ رشد ویژه در جدول 1 و نرخ تثبیت کربن (R) در جدول شماره 2 برای محیط‌های کشت تحت ECهای مختلف آورده شده است. همان‌طور که در جدول‌های 1 و 2 مشاهده می‌شود در هر محیط کشت فرایند رشد و ترسیب کربن در 4 غلظت متفاوت CO_2 (کربن اتمسفری 0/03 درصد، 2%، 5% و 10%) مورد بررسی قرار گرفت.

در بستر کشت بدون تزریق CO_2 در طول 8 روز ، در محیط کشت حاوی آب مقطر، آب دریا و آب طبیعی تولید و بهره وری زیست توده (P) جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس پس از پایان 8 روز به ترتیب $gL^{-1}d^{-1}$ 0/065، 0/063 و 0/083 می‌باشد (جدول 1) که نشان می‌دهد آب طبیعی تولید بیشتری از زیست توده داشته است و آب دریا دارای کمترین مقدار بوده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود تفاوت معنی‌داری بین مقادیر این پارامتر در بستر بدون تزریق دی اکسید کربن با بسترهایی می‌باشد که تزریق CO_2 در آن‌ها انجام شده است وجود دارد. با افزایش غلظت دی اکسید کربن تولید زیست توده افزایش یافته است، بطوری که مقدار این پارامتر در 3 محیط کشت متفاوت (آب مقطر، آب دریا و آب شهری) در 2% غلظت CO_2 به‌ترتیب برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/08، 0/074 و 0/091، در غلظت 5% CO_2، $gL^{-1}d^{-1}$ 0/088، 0/079 و 0/098 و در غلظت 10%، $gL^{-1}d^{-1}$ 0/09، 0/084 و 0/098 می‌باشد (جدول 1).

نرخ رشد ویژه (μ) در هر سه محیط کشت آبی در چهار روز اول بالاترین مقدار را داشته و پس از آن رو به کندی بوده است بنابراین می‌توان گفت به طور کلی روز اول تا چهارم نرخ رشد بیشتر بوده است.

جدول 1 مقادیر تولید زیست توده و نرخ رشد ویژه ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در غلظت های مختلف CO2 در 8 روز

محیط کشت		تولید زیست توده (P) ($gL^{-1}d^{-1}$)				نرخ رشد ویژه (μ) (d^{-1})			
		روز1-4	4-6	6-8	1-8	روز1-4	4-6	6-8	1-8
آب مقطر (EC= 3 µs/cm)	کربن اتمسفری[a]	0/068	0/06	0/065	0/065	0/2	0/11	0/1	0/1
	%2	0/085	0/09	0/06	0/08	0/19	0/12	0/07	0/143
	%5	0/12	0/06	0/05	0/088	0/24	0/07	0/05	0/15
	%10	0/128	0/065	0/04	0/09	0/25	0/07	0/04	0/153
آب دریای شبیه‌سازی شده (EC=34000 µs/cm)	کربن اتمسفری[a]	0/084	0/04	0/043	0/063	0/23	0/07	0/06	0/15
	%2	0/093	0/03	0/08	0/074	0/02	0/04	0/1	0/133
	%5	0/098	0/055	0/065	0/079	0/21	0/07	0/08	0/14
	%10	0/105	0/08	0/045	0/084	0/22	1/0	0/05	0/147
آب طبیعی (EC= 1500 µs/cm)	کربن اتمسفری[a]	0/075	0/06	0/12	0/083	0/35	0/13	0/19	0/25
	%2	0/115	0/055	0/08	0/091	0/23	0/07	0/08	0/154
	%5	0/123	0/03	0/115	0/098	0/24	0/04	0/12	0/157
	%10	0/128	0/041	0/095	0/098	0/24	0/05	0/1	0/157
P value		0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00

[a]غلظت CO_2 در هوا در حدود 0/03 می‌باشد.

جدول 2 مقادیر نرخ تثبیت کربن ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در غلظت‌های مختلف CO_2 در 8 روز

محیط کشت		نرخ تثبیت کربن (R) ($g_{CO2}\ L^{-1}\ d^{-1}$)			
		روز 1-4	4-6	6-8	1-8
آب مقطر (EC= 3 µs/cm)	کربن اتمسفری	0/11	0/1	0/11	0/33
	%2	0/14	0/15	0/1	0/4
	%5	0/2	0/1	0/08	0/44
	%10	0/21	0/11	0/07	0/45
آب دریای شبیه‌سازی شده (EC= 34000 µs/cm)	کربن اتمسفری	0/14	0/07	0/07	0/31
	%2	0/15	0/05	0/13	0/37
	%5	0/16	0/09	0/11	0/39
	%10	0/17	0/13	0/07	0/42
آب طبیعی (EC= 1500µs/cm)	کربن اتمسفری	0/12	0/1	0/2	0/41
	%2	0/19	0/09	0/13	0/46
	%5	0/2	0/05	0/19	0/48
	%10	0/21	0/07	0/16	0/49
P value		0/00	0/00	0/00	0/00

در این مطالعه بالاترین مقادیر رشد مربوط به محیط کشت آب طبیعی (EC=1500) می‌باشد به طوریکه در این محیط کشت در غلظت کربن 0/03%، 2%، 5% و 10% به‌ترتیب برابر d^{-1} 0/25، 0/154، 0/157 و 0/157 می‌باشد در آب مقطر نرخ رشد ویژه به‌ترتیب برابر d^{-1} 0/1، 0/143، 0/15 و 0/153 بوده که پایین تر از مقادیر آب شهری است. این نرخ در آب دریا برای 4 غلظت دی اکسید کربن به‌ترتیب برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/15، 0/133، 0/14 و 0/147 می‌باشد.

همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، در طول 8 روز در آب طبیعی پایین ترین نرخ تثبیت مربوط به کربن اتمسفری $gL^{-1}d^{-1}$ 0/41 و بالاترین آن مربوط به غلظت 10% کربن دی اکسید با مقدار $gL^{-1}d^{-1}$ 0/49 بوده است. با استفاده از داده های موجود در این جدول می‌توان نتیجه گرفت که بالاترین نرخ تثبیت کربن تسط ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس مربوط به کشت این ریزجلبک در آب شهری و در غلظت 10% در اکسید کربن بوده است. مقدار این پارامتر برای آب مقطر در غلظت‌های کربن اتمسفری (0/03 درصد) ، 2%، 5% و 10% به‌ترتیب برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/33، 0/4، 0/44 و 0/45 و در آب دریا برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/31، 0/37، 0/39 و 0/42 بوده است (جدول 2). در بستر بدون تزریق CO_2 در چهار روز اول کشت بالاترین نرخ تثبیت متعلق به آب طبیعی بعد از آن آب دریا و در انتها آب مقطر می‌باشد، اما پس از پایان 8 روز این روند به آب طبیعی، آب مقطر و آب دریا تغییر کرد (جدول 2).

نتایج آماری طبق آزمون توکی نشان داد که بین نرخ تولید زیست توده، رشد ویژه و تثبیت کربن اتمسفری در تیمارهای مختلف شوری آب اختلاف معنی داری در سطح 1 درصد را نشان می‌دهد. بنابراین شوری آب بر میزان رشد و ترسیب کربن ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس تاثیر متفاوتی داشته است.

در مطالعه‌ای که توسط چنگ و ینگ (2003) بر روی جلبک کلرلا انجام شد نیز با افزایش CO_2 میزان تولید بیومس افزایش یافته و بهترین نتیجه در غلظت 5% مشاهده شد [24]. سانگ و همکاران (1999) جلبک کلرلا گونه *KR-1* را در غلظت‌های مختلف دی اکسید کربن (10%، 30%، 50% و 70%) پرورش داده و مقادیر متفاوت تولید بیومس به‌ترتیب $gL^{-1}d^{-1}$ 1/1، 0/8، 0/6 و 0/1 گزارش کرده‌اند [25]. موراییس و کستا (2007) ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس را در 3 غلظت (0، 6 و 12 درصد) پرورش داده و تولید بیومس $gL^{-1}d^{-1}$ 0/14، 0/22 و 0/33 را گزارش کرده‌اند. در این مطالعه نیز مشابه مطالعه حاضر با افزایش دی اکسید کربن میزان تولید بیومس افزایش یافته است [18].

در مطالعه دیگری بر روی ریز جبلک اسپیرولینا در غلظت 6% دی اکسید کربن نرخ رشد ویژه d^{-1} 0/44 گزارش شده است [24]. در سال 2002 در مطالعه‌ای از جلبک کلرلا وولگاریس برای تثبیت کربن استفاده کردند و در بستر بدون تزریق CO_2 این ریزجلبک نرخ رشد d^{-1} 0/4 و تولید بیومس $gL^{-1}d^{-1}$ 0/04 داشته است [15]. در تحقیقی دیگر توسط چیو و همکارانش(2009) که بر روی گونه کلرلا انجام دادند، در غلظت 10% دی اکسید کربن نرخ رشد d^{-1} 0/252 را گزارش داده‌اند [28].

در بستر بدون تزریق CO_2 در چهار روز اول کشت بالاترین نرخ تثبیت متعلق به آب طبیعی بعد از آن آب دریا و در انتها آب مقطر می‌باشد، اما پس از پایان 8 روز این روند به آب طبیعی، آب مقطر و آب دریا تغییر کرد در مطالعه انجام شده توسط سیدنی و همکارانش (2010) با کشت اسپیرولینا پلاتنسیس در محیط کشت با تزریق 10% دی اکسید کربن نرخ تثبیت کربن برابر با $gL^{-1}d^{-1}$ 0/32 گزارش شده است [29]؛ اما در مطالعه حاضر در غلظت 10% دی اکسید کربن در 3 محیط کشت آب دریا، مقطر و آب طبیعی این مقدار برابر $gL^{-1}d^{-1}$ 0/45، 0/42 و

0/49 بوده است که نشان دهنده مقادیر بالاتری از تثبیت کربن بوده است. در مطالعه دیگری که توسط نادسون و همکاران (2009) بر روی این ریزجلبک انجام شده گزارش شده است که در غلظت 15% دی اکسید کربن نرخ تثبیت کربن $gL^{-1}d^{-1}$ 0/92 بوده که بسیار بالاتر از مطالعه حاضر می‌باشد[30]. البته باید توجه داشت که روش انجام و نوع بیوراکتور ها نیز تاثیر زیادی در این مقادیر دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شور بودن آب در مناطق گرم و خشک کشور ایران استفاده از ریز جلبک‌ها و جایگزینی آن‌ها با روش ترسیب کربن با گیاهان زمینی راهکاری مناسب برای بهینه‌سازی مصرف منابع آبی بوده است.

جدول 3 نرخ تثبیت کربن در مطالعه حاضر و برخی از تحقیقات به دست آمده را مقایسه می کند. شباهت‌هایی بین نتایج بدست آمده در این مطالعه و مطالعه سیدنی و همکارانش (2010) موجود است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها و مقادیر بدست آمده همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس توانایی کمتری در تثبیت کربن نسبت به ریز جلبک *Chlorella sorokiniana* که در مطالعات کومار و همکارانش (2014) آورده شده است را دارد [32].

جدول 3 مقایسه بین نرخ تثبیت کربن محاسبه شده در این مطالعه و مطالعات پیشین

گونه ریزجلبک		غلظت CO_2(%)	نرخ تثبیت کربن (R) ($g_{CO2}L^{-1}\ d^{-1}$)	منابع
اسپیرولینا پلاتنسیس		10	0/32	[29]
کلرلا وولگاریس		10	0/25	[29]
کلرلا وولگاریس		2	0/43	[31]
کلرلا وولگاریس		0/03	0/06	[11]
کلرلا وولگاریس		5	0/16	[11]
Chlorella sorokiniana		0/03	1/74	[32]
Scenedesmus obliquus		10	0/55	[33]
اسپیرولینا پلاتنسیس	آب مقطر (EC= 3 µs/cm)	0/03	0/33	مطالعه حاضر
		2	0/4	
		5	0/44	
		10	0/45	
اسپیرولینا پلاتنسیس	آب دریای شبیه‌سازی شده (EC=34000µs/cm)	0/03	0/31	مطالعه حاضر
		2	0/37	
		5	0/39	
		10	0/42	
اسپیرولینا پلاتنسیس	آب طبیعی (EC= 1500µs/cm)	0/03	0/41	مطالعه حاضر
		2	0/46	
		5	0/48	
		10	0/49	

4- نتیجه‌گیری

در مناطق خشک و نیمه خشک مانند منطقه مورد مطالعه (خراسان جنوبی، بیرجند) به‌دلیل محدود بودن منابع آب شیرین و عدم کفایت آب برای کشت گیاهان و اقلیم خشک این مناطق ، یکی از بهترین راهکارهای پیشنهادی پرورش جلبک‌ها در این منابع آبی می‌باشد که ضمن تثبیت گازهای گلخانه‌ای (دی اکسید کربن) کاربردهای دیگری از جمله تولید سوخت تجدید پذیر و مصارف خوارکی و دارویی نیز داشته باشند. با توجه به نتایج این تحقیق بیشترین رشد زیست توده در آب طبیعی مشاهده شد و در آب دریای شبیه‌سازی شده روند رشد و تکثیر سلولی به دلیل شوری بالا و نامساعد بودن محیط برای این ریز جلبک، کند انجام شده است؛ بطوری که توانایی ترسیب کربن این ریز جلبک در محیط کشت‌هایی با شوری بالا نسبت به محیط‌های با شوری کمتر پایین می-باشد. بنابراین جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در هدایت الکتریکی 1500 µs/cm (آب طبیعی) رشد خوبی داشته و توان ترسیب کربن بالایی را از خود نشان داد. بنابراین می‌توان این جلبک را در منطقه مورد مطالعه (بیرجند، خراسان جنوبی) پرورش داد.

5- قدردانی

از همکاری‌های ارزشمند مسئولین محترم دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند به جهت فراهم نمودن امکانات و تجهیزات لازم برای انجام این تحقیق و همچنین سرکار خانم دکتر مریم فلاحی به جهت راهنمائی‌های لازم در کلیه مراحل تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارد.

6- منابع

[1] Wilbanks, T.J., Fernandez, S. (2014) Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities: Technical Report for the US Department of Energy in Support of the National Climate Assessment. Island Press

[2] Rahaman, M.S.A., Cheng, L.H., Xu, X.H., Zhang, L., Chen, H.L. (2011) A review of carbon dioxide capture and utilization by membrane integrated microalgal cultivation processes. Renewable & Sustainable Energy Reviews 15 (8), 4002–4012.

[3] Singh, U.B., Ahluwalia, A. (2013) Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 18 (1), 73–95.

[4] Xie, Y.P., Ho, S.H., Chen, C.Y., Chen, C.N.N., Liu, C.C., Ng, I.S., Jing, K.J., Yang, S.C., Chen, C.H., Chang, J.S., Lu, Y.H. (2014) Simultaneous enhancement of CO_2 fixation and lutein production with thermo-tolerant *Desmodesmus sp. F51* using a repeated fed-batch cultivation strategy. Biochemistry Engineering Journal 86, 33–40.

[5] Cheng, J., Huang, Y., Feng, J., Sun, J., Zhou, J., Cen, K. (2013) Improving CO2 fixation efficiency by optimizing *Chlorella PY-ZU1* culture conditions in sequential bioreactors. Bioresource. Technology 144, 321–327.

[6] Lam, M.K., Lee, K.T., Mohamed, A.R. (2012) Current status and challenges on microalgae-based carbon capture. International Journal of Greenhouse Gas Control 10, 456–469.

[7] Ho, S.H., Chen, C.Y., Lee, D.J., Chang, J.S. (2011). Perspectives on microalgal CO2 emission mitigation systems—a review. Biotechnology Advances 29 (2), 189–198.

[8] Kao, C.Y., Chen, T.Y., Chang, Y.B., Chiu, T.W., Lin, H.Y., Chen, C.D., Chang, J.S., Lin, C.S. (2014) Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella sp*. Bioresource Technology 166, 485–493.

[9] Lam, M.K., Lee, K.T. (2011) Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): win–win strategies toward better environmental protection. Biotechnology Advances 29 (1), 124–141.

[10] Sayadi, M.H., Ghatnekar, S. D., Kavian, M. F. (2011) Algae a promising alternative for biofuel, Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences 1(2), 112-124.

[11] Lam, M. K., Lee, K. T. (2013) Effect of carbon source towards the growth of *Chlorella*

vulgaris for CO2 bio-mitigation and biodiesel production. International Journal of Greenhouse Gas Control 14, 169–176.

[12] Jiang, Y.L., Zhang, W., Wang, J.F., Chen, Y., Shen, S.H., Liu, T.Z. (2013) Utilization of simulated flue gas for cultivation of *Scenedesmus dimorphus.* Bioresource Technology 128, 359–364.

[13] Sultani, N., Ghafari, R. (1391) Biology and Physiology of algae. Shahid Beheshti, Tehran, PP 181-183.

[14] Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Chen, C.H., Kuan, T.C., Ong, S.C., Lin C.S. (2008) Reduction of CO2 by a high-density culture of *Chlorella sp*. in a semicontinuous photobioreactor. Bioresource Technology 99, 3389–96.

[15] Scragg, A.H., Illman, AM., Carden, A., Shales, S.W. (2002) Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. Biomass Bioenergy 23:67–73.

[16] Wang, B., Li, Y., Wu, N., Lan, C.Q. (2008) CO_2 bio-mitigation using microalgae. Berlin: Springer-Verlag .

[17] Shabani, M., Sayadi, M.H., Rezaie, M.R. (2014) A study on carbon sequestration using *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris.* 1st International Congress on Biology and Science. Iran.

[18] De Morais, M.G., Costa, J.A. (2007) Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina sp.* and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. Journal of Biotechnology 129, 439–45

[19] Culkin, F. (1965) The major constituents of seawater. In: J.P. Riley and G. Skirrow, eds. Chemical Oceanography, 1st Ed., 121-161. Academic Press.

[20] Hu, Q., Richmond, A. (1996) Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* afected by light intensity, cell density and rate of mixing in a plate photobioreactor. Journal of Applied Phycology 8, 139±145.

[21] Cheah, W.Y., Show, P.L., Chang, J.S., Ling, T.C., Juan, J.C. (2014) Biosequestration of atmospheric CO_2 and flue gas-containing CO2 by microalgae. Bioresource Technology 184, 190–201. doi:10.1016/j.biortech. 2014.11.026

[22] Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., Zhong, J. (2011) CO_2 biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO_2 levels. Bioresource Technology 102, 3071–3076.

[23] Kumar, K., Das, D. (2012) Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in airlift and bubble column photobioreactors. Bioresource Technology 116, 307–313

[24] Chang, E.H., Yang, S.S. (2003) Some characteristics of microalgae isolated in Taiwan for biofixation of carbon dioxide. Botanical Bulletin of Academia Sinica 44, 43–52.

[25] Sung, K.D., Lee, J.S., Shin, C.S., Park, S.C., Choi, M.J. (1999) CO2 fixation by *Chlorella sp. KR-1* and its cultural characteristics. Bioresource Technology 68, 269–273.

[26] De Morais, M.G., Costa, J.A. (2007a) Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide. Energy Conversation Management 48, 2169–2173.

[27] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances 25, 294–306

[28] Chiu, S.Y., Tsai, M.T., Kao, C.Y., Ong, S.C., Lin, C.S. (2009) The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. Engineering in Life Sciences 9, 254–60.

[29] Sydney, E.B., Sturm, W., Larroche, C. (2010) Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. Bioresource Technology 101, 5892-5896.

[30] Knudsen, J.N., Jensen, J.N., Vilhelmsen, P.J., Biede, O. (2009) Experience with CO2 capture from coal flue gas in pilot-scale: testing of different amine solvents. Energy Procedia 1 (1), 783–790

[31] Yeh, K.L., Chang, J.S. (2011) Nitrogen starvation strategies and photobioreactor design for enhancing lipid content and lipid production of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris ESP-31*: implication for biofuel. Biotechnology Journal 6, 1358–1366.

[32] Kumar, K., Banerjee, D., Das, D. (2014) Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana.* Bioresource Technology 152, 225–33.

[33] Ho, S. H., Chen, W. M., Chang, J. S. (2010b) *Scenedesmus obliquus CNW-N* as a potential candidate for CO_2 mitigation and biodiesel production. Bioresource Technology 101, 8725–8730