

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

مهری شعبانی¹، محمد حسین صیادی^{2*}، محمد رضا رضایی²

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 CO₂ با استفاده از جلبک‌ها یکی از روش‌های امیدوار کننده و سازگار با محیط زیست برای جداسازی CO₂ می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف بررسی توانایی ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس برای رشد در محیط‌های با شوری متفاوت و ترسیب کربن در غلظت‌های مختلف CO₂ 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 (3، 1500، 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 به ترتیب 0/35، 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 و 0/098). پس از آن به ترتیب آب مقطر با مقادیر 0/45 و 0/09 و در انتها آب دریا (به دلیل شوری بالا و نامساعد بودن شرایط محیطی) با مقادیر 0/42 و 0/84 در غلظت 10% دی اکسید کربن قرار گرفتند.

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

1- مقدمه

موجب تولید بخار آب، گاز کربنیک و گازهای سمی همچون اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، SO₂ و CO است. تمامی این مواد غیر از بخار آب، روی محیط زیست در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی اثر تخریبی دارند. در سطح

فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده از سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و تولید انرژی سبب افزایش چشمگیری در گازهای گلخانه‌ای شده است. مصرف سوخت‌های فسیلی

درصد (v/v) در دسترس است [2]. اسپیرولینا یک سیانوباکتری سبز آبی متشکل از سلول های استوانه‌ای است که تشکیل ریشه را می‌دهند. شکل ماریچی صفت مشخصه این جنس بوده ولی مشخصات ماریچ (یعنی طول و قطر آن) بین گونه‌ها و حتی در یک گونه تفاوت دارد برای مثال در اسپیرولینا پلاتنسیس قطر ماریچ 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 به ترتیب 0.062 ، 0.01 ، 0.009 و 0.009 $g L^{-1} d^{-1}$ و میزان حذف دی اکسید کربن 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 0.075 $g L^{-1} d^{-1}$ دی اکسید کربن را حذف کرده است [15]. گزارش‌های حاصل از مطالعات مورایس 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 به ترتیب برابر 0.14 ، 0.22 و 0.33 $g L^{-1} d^{-1}$ و تثبیت کربن به ترتیب 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 0.17 $g L^{-1} d^{-1}$ و حذف کربن 0.313 $g L^{-1} d^{-1}$ 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

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 [2،3]. 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 به دلیل 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 [5،6]. انتظار می‌رود گیاهان زمینی تنها در کاهش 3 تا 6 درصد انتشار جهانی CO_2 شرکت کنند [7،8]. 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 [9،10]. 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

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

ریزجلبک‌ها در راکتورهای شیشه‌ای تخت به ابعاد $40 \times 40 \times 40$ 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 ($g L^{-1}$) از طریق سانتیفریوژ 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

زمانی که 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 توسط پوشش گیاهی است. در مناطق خشک و نیمه خشک که منابع آب شیرین در آن محدود بوده و شرایط کشت گیاهان به دلیل 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 آبریان 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 $3 \mu s/cm$ ، $1500 \mu s/cm$ ، $34000 \mu s/cm$ 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.

کربن است [21].

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% و 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 بهره‌وری زیست توده (P) جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس پس از پایان 8 روز به ترتیب $0/065 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ، 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 به ترتیب برابر $0/074$ ، $0/08 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ و 0/091، در غلظت 5% CO_2 ، $0/088$ ، $0/079$ و 0/098 و در غلظت 10%، $0/09 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ، 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.

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

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

2-6- محاسبه نرخ رشد ویژه

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

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

2-7- نرخ تثبیت کربن

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

$$R_{\text{CO}_2} (\text{g CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}) = (C_c P (m_{\text{CO}_2} m_c^{-1})) \quad (3)$$

که در این رابطه R_{CO_2} نرخ تثبیت CO_2 ($\text{g CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)، بهره‌وری زیست توده ($\text{g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)، C_c کسری از کربن در زیست توده (g/g)، m_{CO_2} 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.

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

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

غلظت CO₂ در هوا در حدود 0/03 می باشد.جدول 2 مقادیر نرخ تثبیت کربن ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در غلظت های مختلف CO₂ در 8 روز

نرخ تثبیت کربن (R) ($gCO_2 L^{-1} d^{-1}$)				محیط کشت	
1-8	6-8	4-6	روز 1-4		
0/33	0/11	0/1	0/11	کربن اتمسفری	آب مقطر (EC= 3 $\mu s/cm$)
0/4	0/1	0/15	0/14	%2	
0/44	0/08	0/1	0/2	%5	
0/45	0/07	0/11	0/21	%10	
0/31	0/07	0/07	0/14	کربن اتمسفری	آب دریای شبیه سازی شده (EC= 34000 $\mu s/cm$)
0/37	0/13	0/05	0/15	%2	
0/39	0/11	0/09	0/16	%5	
0/42	0/07	0/13	0/17	%10	
0/41	0/2	0/1	0/12	کربن اتمسفری	آب طبیعی (EC= 1500 $\mu s/cm$)
0/46	0/13	0/09	0/19	%2	
0/48	0/19	0/05	0/2	%5	
0/49	0/16	0/07	0/21	%10	
0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	P value

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 به ترتیب $0/1$ ، $0/6$ ، $0/8$ ، $1/1$ $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ گزارش کرده‌اند [25]. مورایس و کستا (2007) ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس را در 3 غلظت (0، 6 و 12 درصد) پرورش داده و تولید بیومس $0/14$ ، $0/22$ ، $0/33$ 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 جلبک اسپیرولینا در غلظت 6% دی اکسید کربن نرخ رشد ویژه $0/44 \text{ d}^{-1}$ 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 $0/4 \text{ d}^{-1}$ و تولید بیومس $0/04 \text{ g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 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 $0/252 \text{ d}^{-1}$ 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 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 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 $0/45$ ، $0/42$ و

در این مطالعه بالاترین مقادیر رشد مربوط به محیط کشت آب طبیعی ($\text{EC}=1500$) می‌باشد به طوری که در این محیط کشت در غلظت کربن 0/03%، 2%، 5% و 10% به ترتیب برابر $0/157$ ، $0/154$ ، $0/25$ ، $0/157$ d^{-1} می‌باشد در آب مقطر نرخ رشد ویژه به ترتیب برابر $0/1$ ، $0/143$ ، $0/15$ ، $0/153$ بوده که پایین تر از مقادیر آب شهری است. این نرخ در آب دریا برای 4 غلظت دی اکسید کربن به ترتیب برابر $0/15$ $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ، $0/133$ ، $0/14$ 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 $0/41 \text{ g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ و بالاترین آن مربوط به غلظت 10% کربن دی اکسید با مقدار $0/49 \text{ g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ بوده است. با استفاده از داده‌های 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% به ترتیب برابر $0/33$ ، $0/4$ ، $0/44$ ، $0/45$ و در آب دریا برابر $0/31$ ، $0/37$ ، $0/39$ 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.

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 $0/92 \text{ gL}^{-1} \text{ d}^{-1}$ بوده که بسیار بالاتر از مطالعه حاضر می باشد [30]. البته باید توجه داشت که روش انجام و نوع بیوراکتور ها نیز تاثیر زیادی در این مقادیر دارند. همان طور که مشاهده می شود با توجه به شور بودن آب در مناطق گرم و خشک کشور ایران استفاده از ریز جلبک ها و جایگزینی آنها با روش ترسیب کربن با گیاهان زمینی راهکاری مناسب برای بهینه سازی

مصرف منابع آبی بوده است. جدول 3 نرخ تثبیت کربن در مطالعه حاضر و برخی از تحقیقات به دست آمده را مقایسه می کند. شباهت هایی بین نتایج بدست آمده در این مطالعه و مطالعه سیدنی و همکارانش (2010) موجود است. با توجه به نتایج آزمایش ها و مقادیر بدست آمده همان طور که در جدول مشاهده می شود 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

منابع	نرخ تثبیت کربن (R) ($\text{gCO}_2\text{L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	غلظت (%) CO_2	گونه ریزجلبک
[29]	0/32	10	اسپیرولینا پلاتنسیس
[29]	0/25	10	کلرلا وولگاریس
[31]	0/43	2	کلرلا وولگاریس
[11]	0/06	0/03	کلرلا وولگاریس
[11]	0/16	5	کلرلا وولگاریس
[32]	1/74	0/03	<i>Chlorella sorokiniana</i>
[33]	0/55	10	<i>Scenedesmus obliquus</i>
مطالعه حاضر	0/33	0/03	آب مقطر ($\text{EC} = 3 \mu\text{s/cm}$)
	0/4	2	
	0/44	5	
	0/45	10	
مطالعه حاضر	0/31	0/03	آب دریای شبیه سازی شده ($\text{EC} = 34000 \mu\text{s/cm}$)
	0/37	2	
	0/39	5	
	0/42	10	
مطالعه حاضر	0/41	0/03	آب طبیعی ($\text{EC} = 1500 \mu\text{s/cm}$)
	0/46	2	
	0/48	5	
	0/49	10	

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 CO₂ 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-ZUI* 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*

4- نتیجه گیری

در مناطق خشک و نیمه خشک مانند منطقه مورد مطالعه (خراسان جنوبی، بیرجند) به دلیل 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 می‌باشد. بنابراین جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس در هدایت الکتریکی $1500 \mu\text{s/cm}$ (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 راهنمایی‌های 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

- CO₂ 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 Conversion 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 CO₂ mitigation and biodiesel production. *Bioresource Technology* 101, 8725–8730
- 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) CO₂ 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* affected 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 CO₂ 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) CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different