(DOI): 10.22092/ISFJ.2025.133990 34(2) 41-56 Iranian Scientific Fisheries Journal

Optimization of sodium alginate extraction conditions using a central composite design from the brown seaweed *Sargassum angustifolium*

Norozi A.[1]; Shamsaie Mehrgan M.[1*]; Roomiani L.[2*]; Rajabi Islami H.[1]; Raissy M.[3]

*m.shamsaie@srbiau.ac.ir; Laleh.roomiani@iau.ac.ir

1-Department of Agriculture Science and Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of Fisheries, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- Department of Aquatic Health, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

Received: March 2025 Accepted: May 2025 Published: July 2025

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Introduction

Marine algae, with large size and wide variety of species, are marine ecosystems. They are cultivated both naturally and commercially in the coastal areas of the world. 25,000 tons of algae are produced worldwide each year and its economic value is about 6.5 billion, which appears to reach $ 1.07 billion by 2028 (Yang *et al*., 2025). Marine algae are mainly used as food in most Asian countries such as China, Japan, South Korea and North Korea, Indonesia, Philippines, Vietnam and Thailand, and for the first time in Japan in 1670 they were raised (Khan *et al*., 2024). Due to their high consumption in Asia, brown algae make up 47.3 percent of the world's cultivation level with 16.4 million tonnes (Nam *et al*., 2024; Radulovich *et al*., 2015).

Marine macroalgae are a sustainable raw material with antioxidant, antimicrobial, non-condensed, biodegradable and biological properties. The most important polysaccharide in algae cell is alginate (40 % dry weight), laminarin and fokoidan (Faidi *et al*., 2025). In algae, the percentage of alginate can reach up to 60 % dry weight. Alginates contain sodium, calcium, magnesium, barium and monomeric acid units D-mannuronic (M) and L-guluronic (G). Uronic acids are often organized in the forms of heteropolymer block (MG) or hemopolymer (MM or GG) (Fawzy *et al*., 2017).

Methodology

From the shallow and lower parts of the tide of the rocky beds of the Persian Gulf and the Oman Sea (Chabahar area), the *S. angustifolium* algae was carried out. The Persian Gulf and Oman Sea Atlas and Algae base platform data were used to confirm the species. The algae were washed with distilled water several times to remove impurities and algae sand. Then in the dry sun, they were powdered with a mill. Then, in polyethylene bags, they were transferred to the laboratory under 10°C (Fig. 1).

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Figure 1: *Sargassum angustifolium*

Central Composite Design (CCD) using Response Surface Methodology (RSM) to optimize the process of extraction of sodium alginate in brown algae *S. angustifolium* by considering 3 factors or independent variables temperature (A), time (b) and pH (c) consisting of 19 points and 5 repeats at point the central was used with 19 treatments. In RSM it is selected for each domain variable. The third level as the central level or (0) is minimal and maximum (Table 1).

Table 1: Experiment design levels for independent variables using CCD

Control factors		Surface		
		-1	**0**	**+1**
A	Temperature (°C)	40	65	90
B	Time (h)	1	2.5	4
C	pH	8	9	10

Results

The results of the CCD test plan with 19 repetitions are presented in Table 2 to evaluate the optimum parameters of sodium alginate extraction from *S. angustifolium*. As Table 2 shows, the actual and coded values of each factor and 19 experimental points include three repetitions of central points. Independent variables were the study of temperature (A), time (b) and pH (c). The second -degree polynomial equation shows the correlation between the independent variable and the responses. Multiple regression analysis and analysis of variance (ANOVA) were performed on experimental data and two multi -order multi - order equations were created in terms of encoded factors (Table 3). Second -degree equations for alginate efficiency and acidic amount were obtained as follows:

Alginate yield: $14.6029 + 2.0921\ A + 1.0935\ B + 9.3055\ C - 0.41\ AB + 1.6825\ AC + 0.7995\ BC - 1.15968\ A^2 + 0.0553247\ B^2 + 6.60732\ C^2$

Uronic acid content: $14.0044 - 0.8655\ A + 0.1275\ B + 8.9599\ C - 1.247\ AB - 1.8205\ AC - 0.413\ BC - 4.59434\ A^2 + 1.19566\ B^2 + 4.29266\ C^2$

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Table 2: CCD design from RSM and the observed responses; Sodium alginate yield and uronic acids (%)

Std	Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Response 1	Response 2
		A: Temperature	B: Time	C: pH	Sodium alginate yield	Uronic acid content
		°C	h		%	%
10	1	90	2.5	9	15.501	8.981
18	2	65	2.5	9	13.407	17.208
9	3	40	2.5	9	12.104	10.070
2	4	90	1	8	12.184	7.167
11	5	65	1	9	12.778	14.435
13	6	65	2.5	8	11.652	9.278
7	7	40	4	10	26.902	27.881
14	8	65	2.5	10	31.487	27.547
4	9	90	4	8	10.559	6.489
3	10	40	4	8	11.183	6.122
15	11	65	2.5	9	16.318	12.608
17	12	65	2.5	9	14.277	13.027
8	13	90	4	10	34.648	18.743
12	14	65	4	9	17.257	16.196
1	15	40	1	8	9.528	4.035
19	16	65	2.5	9	12.825	11.413
16	17	65	2.5	9	14.75	15.304
5	18	40	1	10	23.689	25.223
6	19	90	1	10	31.435	23.296

Table 3: Analysis of variance (ANOVA) for CCD model of sodium alginate extraction yield and uronic acid content

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	*p*-value	
Model of yield	1123.64	9	124.85	77.75	< 0.0001	significant
A-Temperature	43.77	1	43.77	27.26	0.0005	
B-Time	11.96	1	11.96	7.45	0.0233	
C-pH	865.92	1	865.92	539.28	< 0.0001	
AB	1.34	1	1.34	0.8375	0.3840	
AC	22.65	1	22.65	14.10	0.0045	
BC	5.11	1	5.11	3.18	0.1080	
A^2	3.67	1	3.67	2.29	0.1646	
B^2	0.0084	1	0.0084	0.0052	0.9440	
C^2	119.29	1	119.29	74.29	< 0.0001	
Residual	14.45	9	1.61			
Lack of Fit	7.20	5	1.44	0.7952	0.6046	not significant
Pure Error	7.25	4	1.81			
Cor Total	1138.09	18				
Model of uronic content	934.89	9	103.88	36.12	< 0.0001	significant
A-Temperature	7.49	1	7.49	2.60	0.1410	
B-Time	0.1626	1	0.1626	0.0565	0.8174	
C-pH	802.80	1	802.80	279.16	< 0.0001	
AB	12.44	1	12.44	4.33	0.0673	
AC	26.51	1	26.51	9.22	0.0141	
BC	1.36	1	1.36	0.4745	0.5083	
A^2	57.68	1	57.68	20.06	0.0015	
B^2	3.91	1	3.91	1.36	0.2738	
C^2	50.35	1	50.35	17.51	0.0024	

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	*p*-value	
Residual	25.88	9	2.88			
Lack of Fit	4.35	5	0.8703	0.1617	0.9643	not significant
Pure Error	21.53	4	5.38			
Cor Total	960.77	18				

Discussion and conclusion

Optimizing the process conditions to achieve maximum efficiency and uronic acid amount can be obtained by analyzing multiplication using utility function. Under the experimental conditions, the projected extraction efficiency of sodium alginates was 33.54 % and 0.956, respectively. High desirability ($0 \leq d \leq 1$) indicates better accuracy of independent variables in optimization. Both responses were empirically approved under optimal parameters, indicating that the model is sufficient to predict these responses and are comparable with other researchers: *Sargassum natans* 23 %, *Sargassum vulgare* 17 %, *Padina gymnospora* 16 %, *Padina antillarum* 22 %, *Laminaria digita* 29 %, *Macrocystis pyriffra* 26 % (Rhein-Knudsen *et al*., 2017), *Sargassum vulgare* 40 % (Sari-chmaysme *et al*., 2016), 19% *Sargassum natans* (Mohammed *et al*., 2018). Kanagesan *et al*. (2022) gained the efficiency of 13.55 % alginate by alkaline with 3 % carbonate extraction. Changes in alginate extraction efficiency among various studies, including the current study, may be due to differences in sargassum species, growth conditions, or extraction conditions (Khan *et al*., 2024). The efficiency of the extracted alginate is different among the brown marine algae, as these algae have physiological and metabolic processes that allow it to produce different metabolites. The concentration of nutrients in the environment directly affects the amount of polysaccharide in different metabolites. The production of polysaccharides is influenced by several factors such as species, age, sampling time and extraction method (El-Sheekh *et al*., 2024).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Islamic Azad University, Ahvaz Branch for arranging the experimental samples.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

مجله علمی شیلات ایران ۳٤ (۲) ٤١-٥٦ (DOI): 10.22092/ISFJ.2025.133990

مقاله علمی – پژوهشی:

بهینه‌سازی استخراج آلژینات‌سدیم با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD)[1] از جلبک دریایی قهوه‌ای *Sargassum angustifolium*

اکبر نوروزی[1]، مهدی شمسایی مهرجان*[1]، لاله رومیانی*[2]، هومن رجبی اسلامی[1]، مهدی رئیسی[3]

*m.shamsaie@srbiau.ac.ir; Laleh.roomiani@iau.ac.ir

۱-گروه دانشی، علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲-گروه شیلات، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳-گروه بهداشت و بیماری های آبزیان، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: اسفند ۱٤۰۳ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱٤۰٤ تاریخ چاپ: تیر ۱٤۰٤

چکیده

جلبک‌های دریایی قهوه‌ای منبع ارزشمندی از بیوپلیمرهای مختلف هستند که آلژینات به عنوان یک فیکوکلوئید از اهمیت صنعتی بالایی برخوردار است. این تحقیق به منظور بهینه‌سازی استخراج آلژینات‌سدیم از جلبک دریایی قهوه‌ای *Sargassum angustifolium* با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) روش سطح پاسخ (RSM)[2] با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل زمان، دما و pH انجام شد. بازده استخراج آلژینات‌سدیم و میزان اسیدیورونیک پاسخ‌های مدل بودند. نتایج نشان داد که شرایط بهینه ۴ ساعت، ۹۰ درجه سانتی‌گراد و pH ۱۰ منجر به ۳۴/۶۴ درصد بازده آلژینات‌سدیم شد درحالی‌که شرایط بهینه برای بیشترین میزان اسیدیورونیک با ۲۷/۱۲ درصد در pH ۱۰، زمان ۴ ساعت و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که pH دارای بیشترین تاثیر در بین سایر متغیرهای مستقل بر پاسخ‌ها بود و به دنبال آن دما و زمان قرار داشتند. نتایج نشان داد که مدل‌درجه‌دوم قادر است، بازده آلژینات‌سدیم و میزان اسیدیورونیک را با R^2، R^2_{Adj} و R^2_{Pre} به‌ترتیب با مقادیر ۰/۹۸۷۳، ۰/۹۷۴۶، ۰/۹۲۷۵ و ۰/۹۷۴۴، ۰/۹۴۸۹، ۰/۹۲۳ پیش‌بینی کند. افزایش pH منجر به آلژینات‌های با رنگ روشن‌تر شد. نتایج این مطالعه نشان داد، استخراج آلژینات‌سدیم با استفاده از طرح مرکب مرکزی برای بهینه‌سازی آن و بهبود شرایط استخراج، رضایت‌بخش بود.

لغات کلیدی: آلژینات‌سدیم، اسیدیورونیک، جلبک، *Sargassum angustifolium*

*نویسنده مسئول

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

[1] Central Composite Design (CCD)
[2] Response Surface Methodology (RSM)

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

مقدمه

جلبک‌های دریایی، با اندازه بزرگ و تنوع گونه‌ای بسیار گسترده، اکوسیستم‌های آبهای دریایی هستند. آنها به صورت طبیعی و تجاری در مناطق ساحلی دنیا کشت می‌شوند. هر ساله ۲۵ هزار تن جلبک‌دریایی در سراسر جهان تولید می‌شود و ارزش اقتصادی آن حدود ۶/۵ میلیارد است که به‌نظر می‌رسد تا سال ۲۰۲۸ به ۱/۰۷ بیلیارد دلار برسد (Yang *et al*., 2025). جلبک دریایی عمدتاً به عنوان غذا در اکثر کشورهای آسیایی (چین، ژاپن، کره‌جنوبی و شمالی، اندونزی، فیلیپین، ویتنام و تایلند)، استفاده می‌شود و برای اولین بار در ژاپن در سال ۱۶۷۰ پرورش یافت (Khan *et al*., 2024). جلبک‌های قهوه‌ای به دلیل مصرف زیاد در آسیا، ۴۷/۳ درصد از سطح زیرکشت جهان را با ۱۶/۴ میلیون تن تشکیل می‌دهند (Nam *et al*., 2024; Sugiura *et al*., 2025).

ماکروجلبک‌های دریایی به عنوان یک ماده خام پایدار با ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، ضدمیکروبی، غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار هستند. مهم‌ترین پلی‌ساکارید در دیواره سلولی جلبک‌های قهوه‌ای آلژینات (۴۰ درصد وزن خشک)، لامینارین و فوکوئیدان است (Faidi *et al*., 2025). در جلبک‌ها درصد آلژینات می‌تواند تا ۶۰ درصد وزن خشک برسد. آلژینات حاوی یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم، باریم و واحدهای مونومریک اسیداورونیک D-mannuronic (M) و L-guluronic (G) هستند. اسیدهای اورونیک اغلب به شکل‌های بلوک هتروپلیمری (MG) یا هموپلیمری (MM یا GG) سازماندهی می‌شوند (Fawzy *et al*., 2017).

کاربرد آلژینات در بسته‌بندی موادغذایی به صورت تثبیت‌کننده، تغلیظ‌کننده و ژل‌کننده برای تهیه پوشش‌های محصولات رژیمی و فیلم‌های خوراکی است. آلژینات دارای فعالیت‌های زیستی متعددی از جمله، آنتی‌اکسیدان (Nguyen *et al*., 2021)، ضدقارچ، محافظت‌کننده عصبی، ضدسرطان و تحریک‌کننده ایمنی (El-Sheekh *et al*., 2023)، است. محققان علاقه‌مند به استفاده از آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند آلژینات هستند، زیرا بسیاری از مواد مصنوعی که به عنوان مهارکننده رادیکال‌های آزاد عمل می‌کنند، دارای عوارض جانبی قابل‌توجهی هستند. میزان و فعالیت آلژینات ارتباط مستقیمی با روش و بازده استخراج دارد. این موضوع به دلیل نحوه سازماندهی انواع اسیداورونیک در آلژینات مرتبط است. شرایط استخراج آلژینات بر خصوصیات رئولوژیک آن تاثیر بسیار زیادی می‌گذارد. استخراج قلیایی یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای بهبود بالقوه عملکرد و خواص فیزیکوشیمیایی آلژینات است (Liu *et al*., 2019).

تاکنون مطالعه‌ای در ایران بر بهینه‌سازی استخراج آلژینات از جلبک *S. angustifolium* انجام نشده است، اما در سایر نقاط جهان محققان مطالعاتی بر سایر گونه‌های این جنس انجام داده‌اند که می‌توان به مطالعه Kolahdoozan و همکاران (۲۰۲۴) بر استخراج اسیدآلژینیک از *S. angustifolium* با استفاده از شرایط مختلف استخراج اشاره کرد که آنها نتیجه گرفتند که دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین تاثیر را بر استخراج دارد. استخراج آلژینات‌سدیم از جلبک قهوه‌ای *Padina pavonica* در مطالعه Faidi و همکاران (۲۰۲۵) که نتیجه گرفتند، pH بیشترین تاثیر را در استخراج آلژینات دارد. Queiroz و همکاران (۲۰۲۴) بهینه‌سازی استخراج آلژینات از *Dictyota mertensii* را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش دما و زمان، بازده استخراج آلژینات کاهش می‌یابد. استخراج آسیدآلژینیک به شیوه اولتراسوند از جلبک *S. angustifolium* انجام گردید و نشان داده شد که توان اولتراسوند دارای بیشترین تاثیر در فرایند استخراج بود (Mousavi *et al*., 2023).

با توجه به موارد مذکور و اهمیت شرایط استخراج آلژینات‌سدیم بر بازده آن و نوآوری مطالعه به دلیل استخراج آلژینات‌سدیم و اسیدیورونیک جلبک مورد مطالعه، هدف از مطالعه حاضر، تعیین اثرات موثر بر روش استخراج قلیایی از جمله دما، زمان و pH بر بازده استخراج آلژینات‌سدیم و میزان اسیدیورونیک از جلبک قهوه‌ای (*S. angustifolium*) بود تا بتوان با تیمارهای کمتر، سبب کاهش وقت و هزینه استخراج شد.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

مواد و روش کار

جمع‌آوری جلبک

از قسمت‌های کم‌عمق و پایین بین جزر و مدی بسترهای صخره‌ای سواحل خلیج‌فارس و دریای‌عمان (منطقه چابهار) جمع‌آوری جلبک *S. angustifolium* انجام شد. جهت تایید گونه از اطلس جلبک‌های دریایی خلیج‌فارس و دریای‌عمان و داده‌های پلت‌فرم *algaebase* استفاده گردید (Guiry *et al.*, 2021). برای حذف ذرات ناخالصی و ماسه‌های چسبیده به جلبک، جلبک‌ها چندین بار با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس در آفتاب خشک و با آسیاب به صورت پودر درآمدند. سپس در کیسه‌های پلی‌اتیلن در شرایط دمایی زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل شدند.

استخراج آلژینات‌سدیم

استخراج آلژینات‌سدیم با استفاده از روش Khan و همکاران (۲۰۲۴) با اندکی تغییرات انجام شد. ۱۲ گرم جلبک تازه شسته و خشک‌شده با ۲۵۰ میلی‌لیتر کلریدکلسیم (۲ درصد) به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق معلق شدند. پس از شستشو، ۱۶ میلی‌لیتر فرمالدئید (۳۷ درصد) به آن اضافه و به به مدت ۲ ساعت معلق ماند. سپس سه بار با آب یونیزه شسته و فیلتر شد. ۲۰۰ میلی‌لیتر کربنات‌سدیم (۳ درصد) به محلول پس از شستشو اضافه و تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت حمام آب گرم (۲/۵ ساعت) قرار گرفت. ماده باقیمانده به مدت ۱، ۲/۵ و ۴ ساعت در آون با دمای ۴۰، ۶۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از شستشو، باقیمانده مجدداً در مخلوط ۲۰۰ میلی‌لیتری ۱ مولار کربنات‌سدیم و ۰/۵ گرم اسیداتیلن‌دی‌آمین‌تترااستیک به مدت دو شبانه‌روز معلق شد. pH با استفاده از محلول بافر اسیدکلریدریک (نرمالیته ۰/۱) و کلرید پتاسیم (نرمالیته ۱) در حدود ۸، ۹ و ۱۰ تنظیم شد. محلول مجدداً فیلتر شد و با ۲۰۰ میلی‌لیتر اتانول به مدت ۱۵ دقیقه هم‌زده شد. رسوب در محلول اتانول به صورت نمک سدیم ظاهر شد که صاف شده و باقیمانده ۳/۴۶ وزن و با ۳۰ میلی‌لیتر استون به مدت ۳۰ دقیقه دو بار شستشو داده شد. پس از استخراج، عصاره خام پلی‌ساکارید جلبک به مدت زمان ۱۰ دقیقه با دور g ×۴۵۰۰، سانتریفیوژ و مایع رویی با اتانول ۹۰ درصد به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد رسوب گردید. پس از سانتریفیوژ دوباره با دور g ×۵۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه، ماده باقیمانده در آون با دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شد و بازده استخراج از طریق فرمول ذیل به‌دست آمد:

$$\text{بازده استخراج (درصد)} = \frac{\text{وزن آلژینات}}{\text{وزن زیست توده خشک شده جلبک}} \times ۱۰۰ \quad \text{(رابطه ۱)}$$

میزان اسیدیورونیک با استفاده از اسیدگلوکورونیک به عنوان استاندارد، طبق روش Bitter و Muir (۱۹۶۲) انجام شد. ۰/۵۰۰ گرم سدیم‌تترابورات با واکنش‌گر سدیم‌تترابورات ۰/۰۲۵ مولار در یکصد میلی‌لیتر اسیدسولفوریک حل گردید. سپس محلول کربازول (با حل‌کردن ۰/۱۲۰ گرم کربازول) در یکصد میلی‌لیتر اتانول خالص در ظرف شیشه‌ای تیره قرار داده شد. سپس محلول سدیم‌تترابورات به لوله‌های شیشه‌ای منتقل و نمونه‌های آماده‌شده در اسیدبنزوئیک اشباع به لوله‌ها اضافه گردید. لوله‌ها به مدت ۱۰ ثانیه سرد و بعد به مدت ۱۲ دقیقه در حمام آب‌جوش قرار گرفتند. پس از خنک‌شدن، جذب در ۵۳۰ نانومتر قرائت گردید.

طرح آزمایش‌ها

طرح مرکب‌مرکزی (CCD) با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی فرایند استخراج آلژینات‌سدیم موجود در جلبک قهوه‌ای *S. angustifolium* با در نظر گرفتن ۳ عامل یا متغیرهای مستقل دما (A)، زمان (B) و pH (C) (جدول ۱) متشکل از ۱۹ نقطه و ۵ تکرار در نقطه مرکزی با ۱۹ تیمار استفاده شد.

جدول ۱: سطوح طرح آزمایش برای متغیرهای مستقل با استفاده از CCD

Table 1: Experiment design levels for independent variables using CCD

Control factors		Surface		
		-1	0	+1
A	Temperature (°C)	40	65	90
B	Time (h)	1	2.5	4
C	pH	8	9	10

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

در روش سطح پاسخ برای هر متغیر دامنه‌ای انتخاب می‌شود. سطح سوم به عنوان سطح مرکزی یا (۰)، کمینه و بیشینه است. متغیرهای وابسته یا پاسخ‌های ارزیابی شده شامل بازده آلژینات‌سدیم (درصد) (پاسخ ۱) و میزان اسیدیورونیک (درصد) (پاسخ ۲) بودند. پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین‌شده و ضرایب آن پیش‌بینی خواهند شد. داده‌های تجربی به یک مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم (رابطه ۲) برازش داده شد که متغیرها و پاسخ‌های مستقل را به‌هم مرتبط می‌کند:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum \beta_{ii} x_i x_j + \in \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در روش سطح پاسخ، معمولاً، معادله مدل درجه دوم کامل است. $\beta 0$ ، βi ، βii و βij به‌ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه‌دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. xi و xj متغیرهای مستقل هستند. $\in$ خطای مدل است. k شمارنده متغیرهاست. i و j اندیس‌های متغیرهای مستقل و i کوچک‌تر از j است. از ضریب تبیین پیش‌بینی‌شده (R^2) برای تعیین قدرت پیش‌بینی مدل استفاده می‌شود. از جنبه آماری، مدلی مناسب است که دارای بالاترین مقدار R^2 و R^2_{adj} تصحیح‌شده و R^2_{Pre} باشد و هرچه مقادیر این ضرایب به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر است.

طیف‌سنجی فوریه تبدیل مادون‌قرمز (FTIR)[1]

برای تعیین گروه‌های عاملی تیمار بهینه از روش طیف‌سنجی FTIR استفاده شد. در این مطالعه داده‌های FTIR آلژینات‌سدیم استخراجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر Perkin Elmer Frontier ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد. ۲ میلی‌گرم پودر آلژینات‌سدیم با ۱۵۰ گرم پودر بروماید‌پتاسیم (KBr) ترکیب و بعد مخلوط حاصله با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک ۱۵ تن (Orpington, UK) به صورت قرص تبدیل شد. طیف FTIR در حالت عبور با استفاده از دستگاه FTIR اسپکتوفتومتر در محدوده cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۰۰ و با تفکیک‌پذیری cm^{-1} ۴ به‌دست آمد. قبل از تجزیه‌وتحلیل FTIR، نمونه‌های آلژینات‌سدیم یک شبانه‌روز در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در زیر آون خشک شدند.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[2]

برای تشخیص خصوصیات مورفولوژیک آلژینات‌سدیم استخراجی از جلبک موردنظر از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل KYKY-EM3200 ساخت کشور چین استفاده شد. نمونه جلبک خشک‌شده روی پایه‌های آلومینیومی دستگاه لایه نشانی طلا با استفاده از چسب کربنی دوطرفه نصب شده و با لایه‌ای از فلز طلا پوشش داده شد. تصاویر عکس‌برداری شده با بزرگنمایی دلخواه ثبت گردید (Benslima *et al*., 2021).

تجزیه‌وتحلیل رنگ

نتایج به دست‌آمده از تجزیه‌وتحلیل رنگ با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج CR 10, Minolta ساخت کشور ژاپن انجام شد. پودر آلژینات‌سدیم استخراجی روی صفحه سفید استاندارد قرار گرفت. نتایج حاصله در تجزیه‌وتحلیل رنگ با شاخص‌های a^*، b^* و L بیان می‌شوند که L: نشان‌دهنده سفیدی، a^*: نشان‌دهنده رنگ قرمز تا سبز (مثبت قرمز، منفی سبز) و b^*: نشان‌دهنده مختصات زرد یا آبی (مثبت زرد، منفی آبی) است.

روش تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

شرایط بهینه برای استخراج آلژینات‌سدیم با استفاده از تکنیک تابع مورد نظر Derringer پیش‌بینی شده و آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. دقت و قابلیت کاربردی مدل‌ها با مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده، ارزیابی شدند. معنی‌دار بودن آماری ضرایب در معادله رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد. تناسب

[1] Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

[2] Scanning Electron Microscope (SEM)

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

معادله چندجمله‌ای با پاسخ‌ها با ضرایب تعیین (R^2) و عدم تناسب با آزمون (ANOVA) F در سطح اطمینان ۹۵ درصد (p>۰/۰۵) ارزیابی شد. طرح آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 10 انجام شد. برای مدل‌هایی که $F_{calculated}$ بیشتر از $F_{tabulated}$ و $R^2 \geq$ ۰/۹۰ است، سطوح پاسخ ایجاد و تحلیل می‌شوند.

نتایج

نتایج طرح آزمایش CCD با ۱۹ تکرار برای ارزیابی شاخص‌های بهینه استخراج آلژینات‌سدیم از *S. angustifolium* و مقادیر واقعی و کدشده هر عامل و ۱۹ نقطه آزمایشی شامل سه تکرار از نقاط مرکزی در جدول ۲ ارائه شده است. متغیرهای مستقل مطالعه شامل دما (A)، زمان (B) و pH (C) بودند. معادله چندجمله‌ای درجه‌دوم همبستگی بین متغیر مستقل و پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. تجزیه‌وتحلیل رگرسیون چندگانه و تجزیه‌وتحلیل واریانس (ANOVA) بر داده‌های تجربی انجام شد (جدول ۳) و دو معادله چندجمله‌ای مرتبه دوم بر حسب عوامل کدگذاری شده ایجاد شد.

جدول۲: طرح مرکب مرکزی RSM و پاسخ‌های مشاهده‌شده: بازده آلژینات‌سدیم و اسیدیورونیک (درصد)

Table 2: CCD design from RSM and the observed responses; Sodium alginate yield and uronic acids (%)

Std	Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Response 1	Response 2
		A: Temperature	B: Time	C: pH	Sodium alginate yield	Uronic acid content
		°C	h		%	%
10	1	90	2.5	9	15.501	8.981
18	2	65	2.5	9	13.407	17.208
9	3	40	2.5	9	12.104	10.070
2	4	90	1	8	12.184	7.167
11	5	65	1	9	12.778	14.435
13	6	65	2.5	8	11.652	9.278
7	7	40	4	10	26.902	27.881
14	8	65	2.5	10	31.487	27.547
4	9	90	4	8	10.559	6.489
3	10	40	4	8	11.183	6.122
15	11	65	2.5	9	16.318	12.608
17	12	65	2.5	9	14.277	13.027
8	13	90	4	10	34.648	18.743
12	14	65	4	9	17.257	16.196
1	15	40	1	8	9.528	4.035
19	16	65	2.5	9	12.825	11.413
16	17	65	2.5	9	14.75	15.304
5	18	40	1	10	23.689	25.223
6	19	90	1	10	31.435	23.296

معادلات درجه‌دوم برای بازده آلژینات و میزان اسیدیورونیک با استفاده از رابطه ذیل به‌دست آمد:

Alginate yield: $14.6029 + 2.0921\ A + 1.0935\ B + 9.3055\ C - 0.41\ AB + 1.6825\ AC + 0.7995\ BC - 1.15968\ A^2 + 0.0553247\ B^2 + 6.60732\ C^2$

Uronic acid content: $14.0044 - 0.8655\ A + 0.1275\ B + 8.9599\ C - 1.247\ AB - 1.8205\ AC - 0.413\ BC - 4.59434\ A^2 + 1.19566\ B^2 + 4.29266\ C^2$

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

با توجه به جدول ۲ بازده استخراج آلژینات‌سدیم بر اساس ۱۹ تیمار درنظرگرفته شده، در محدوده ۳۴/۶۴۸-۹/۵۲۸ درصد بود. بیشترین میزان بازده آلژینات‌سدیم در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۴ ساعت تحت pH ۱۰ به‌دست آمد. میزان اسیدیورونیک در محدوده ۲۷/۸۸۱- ۴/۰۳۵ درصد به‌دست آمد که بیشترین میزان آن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۴ ساعت و در pH ۱۰ حاصل گردید. در جدول ۳ رابطه بین متغیرهای مستقل (دما، زمان و pH) و پاسخ‌ها (بازده و اسیدیورونیک) ارائه شده است. ضرایب تعیین (R^2) برای مدل بازده (۰/۹۸) و اسیداورونیک (۰/۹۷) بالا بود (جدول۴) درحالی‌که مقادیر p پایین برای بازده و اسیدیورونیک (p =۰/۰۰۰۲) تأیید شد که نشان‌دهنده برازش خوب مدل با داده‌های آزمایش بود. ضرایب تخمین‌زده‌شده برای معادله بهینه‌شده نشان می‌دهد که متغیر مستقل pH (C; p< ۰/۰۰۰۱) و عبارت درجه دوم آن (C^2; p<۰/۰۰۰۱) مهم‌ترین شاخص مؤثر بر بازده آلژینات بود و به دنبال آن دما (A; p = ۰/۰۰۰۵) و زمان (B; p = ۰/۰۲۳۳) در مراحل بعدی بودند. برهمکنش قابل‌توجهی بین pH و دمای استخراج به‌دست آمد (AC; p = ۰/۰۰۴۵) (جدول ۳).

جدول ۳: تجزیه‌وتحلیل واریانس (ANOVA) برای طرح CCD بازده استخراج آلژینات‌سدیم و میزان اسیدیورونیک

Table 3: Analysis of variance (ANOVA) for CCD model of sodium alginate extraction yield and uronic acid content

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	*p*-value	
Model of yield	1123.64	9	124.85	77.75	< 0.0001	significant
A-Temperature	43.77	1	43.77	27.26	0.0005	
B-Time	11.96	1	11.96	7.45	0.0233	
C-pH	865.92	1	865.92	539.28	< 0.0001	
AB	1.34	1	1.34	0.8375	0.3840	
AC	22.65	1	22.65	14.10	0.0045	
BC	5.11	1	5.11	3.18	0.1080	
A^2	3.67	1	3.67	2.29	0.1646	
B^2	0.0084	1	0.0084	0.0052	0.9440	
C^2	119.29	1	119.29	74.29	< 0.0001	
Residual	14.45	9	1.61			
Lack of Fit	7.20	5	1.44	0.7952	0.6046	not significant
Pure Error	7.25	4	1.81			
Cor Total	1138.09	18				
Model of uronic content	934.89	9	103.88	36.12	< 0.0001	significant
A-Temperature	7.49	1	7.49	2.60	0.1410	
B-Time	0.1626	1	0.1626	0.0565	0.8174	
C-pH	802.80	1	802.80	279.16	< 0.0001	
AB	12.44	1	12.44	4.33	0.0673	
AC	26.51	1	26.51	9.22	0.0141	
BC	1.36	1	1.36	0.4745	0.5083	
A^2	57.68	1	57.68	20.06	0.0015	
B^2	3.91	1	3.91	1.36	0.2738	
C^2	50.35	1	50.35	17.51	0.0024	
Residual	25.88	9	2.88			
Lack of Fit	4.35	5	0.8703	0.1617	0.9643	not significant
Pure Error	21.53	4	5.38			
Cor Total	960.77	18				

در مورد میزان اسیدیورونیک، pH (C; p = ۰/۰۰۰۱) حتی زمانی که با متغیرهای دما (AC; p = ۰/۰۱۴۱) و زمان (AB; p = ۰/۰۶۷۳) ترکیب شد، اثر خطی قابل‌توجهی بر میزان اسیدیورونیک داشت. با توجه به جدول ۴، pH دارای بیشترین تاثیر بر میزان اسیدیورونیک و بازده آلژینات‌سدیم بود.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

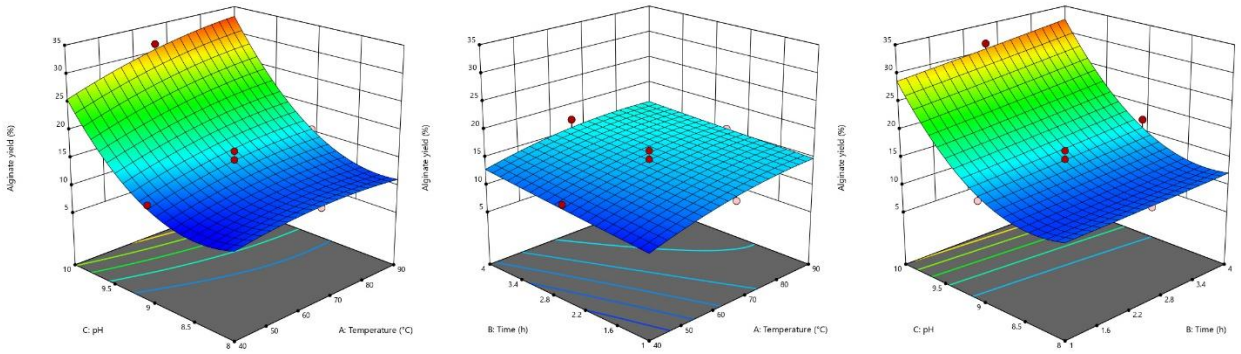
جدول ۴: مدل درجه‌دوم برای پاسخ‌های بازده آلژینات‌سدیم و میزان اسیدیورونیک

Table 4. Quadratic model for the responses of Alginate yield and Uronic acid content

Y	Intercept	A	B	C	A^2	B^2	C^2	A×B	A×C	B×C	R^2
Alginate yield (%)	14.60	2.09*	1.09*	9.31*	-1.16	0.05	6.61*	-0.41	1.68*	0.79	0.98
Uronic acid (%)	14.00	-0.86	0.12	8.96*	-4.59*	1.20	4.29*	-1.25	-1.82*	-0.41	0.97

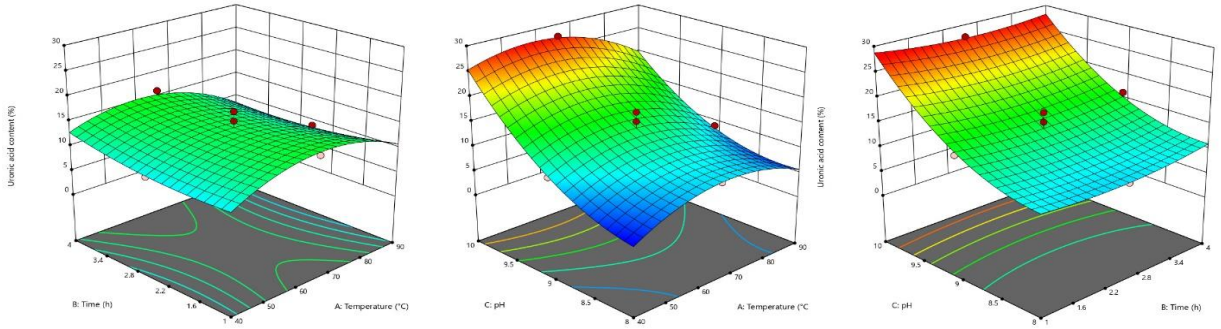
*Significant ($p<0.05$); A: Temperature; B: Time; C: pH.

نمودارهای سه‌بعدی سطح پاسخ، برای پاسخ‌های بازده آلژینات و میزان اسیدیورونیک بر اساس معادله چند جمله‌ای درجه‌دوم را نشان می‌دهد (شکل‌های ۲ و ۳). بر اساس نتایج، بازده آلژینات‌سدیم با افزایش pH با حداقل مشارکت دما و زمان استخراج آلژینات‌سدیم افزایش یافت. با افزایش pH میزان اسیدیورونیک افزایش یافته، اما با افزایش دما میزان اسیدیورونیک کاهش یافت.



شکل ۲: اثر همزمان دما، زمان و pH بر بازده آلژینات‌سدیم استخراجی از جلبک *S. angustifolium*

Figure 2: The simultaneous effect of temperature, time and pH on the yield of sodium alginate extracted from *S. angustifolium* algae

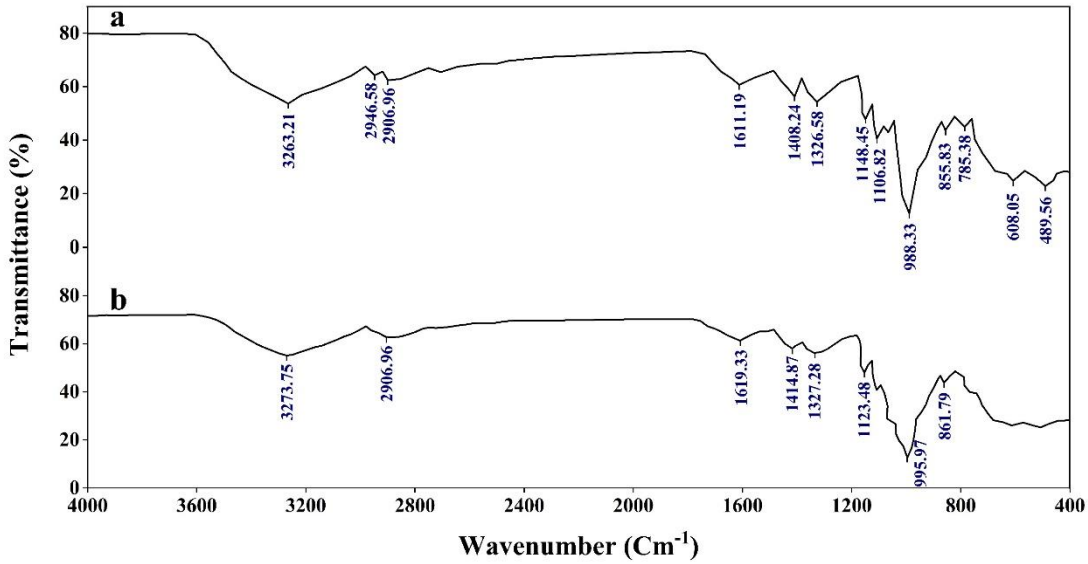


شکل ۳: اثر همزمان دما، زمان و pH بر درصد اسیدیورونیک جلبک *S. angustifolium*

Figure 3: The simultaneous effect of temperature, time and pH on the percentage of uronic acid in the *algae S. angustifolium*

شناسایی گروه‌های عاملی آلژینات‌سدیم استخراجی و مقایسه آن با آلژینات تجاری بر اساس طیف FTIR در شکل ۴-a و b-۴ نشان داده شده است. باندهای قوی ایجاد شده در cm^{-1} ۳۲۶۳ و ۳۲۷۶ به‌ترتیب مربوط به گروه‌های هیدروکسیل O-H طیف آلژینات‌سدیم تجاری و استخراجی است (Yang *et al*., 2025). باند cm^{-1} ۲۹۰۶ در هر دو طیف مربوط به گروه C-H است. باند ایجادشده در محدوده cm^{-1} ۱۶۰۰ مربوط به ارتعاشات نامتقارن و متقارن گروه O=C=O و C=O است که می‌تواند مربوط به وجود اسیدیورونیک باشد (Mohammad *et al*., 2018). باندهای ایجادشده در محدوده cm^{-1} ۱۱۰۶ و ۱۱۲۳ می‌تواند متعلق به خمش OH، کشش C-C پیرانوز متعلق به اسیدگلوکورونیک باشد.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

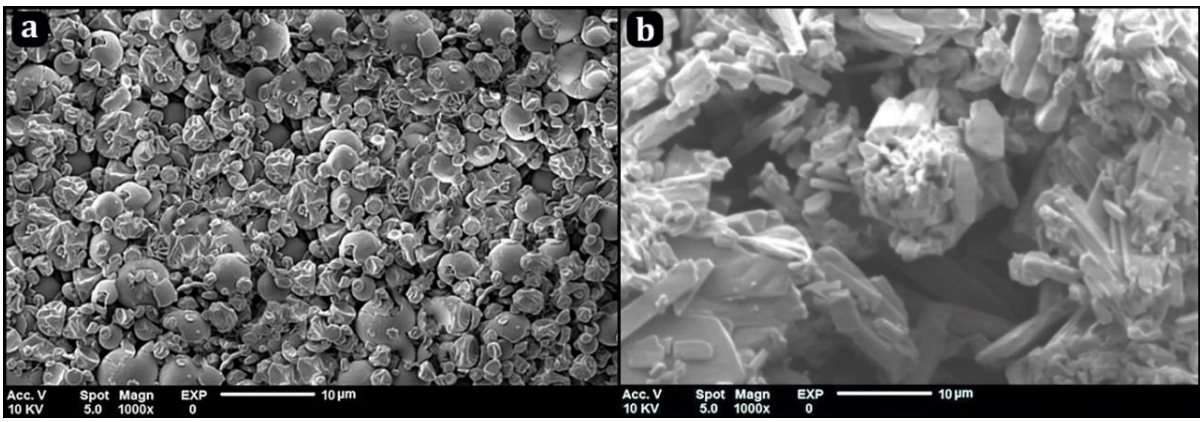


شکل ۴: طیف FTIR آلژینات‌سدیم تجاری (a) و آلژینات‌سدیم استخراجی (b)

Figure 4: FTIR spectra of commercial sodium alginate (a) and extracted sodium alginate (b)

باند cm^{-1} ۹۹۵ می‌تواند مرتبط با ارتعاش کششی C=O اسیدیورونیک باشد که مربوط به ارتعاش حلقه نامتقارن α-L-گلوکورونیک است. باند ظاهرشده در محدوده cm^{-1} ۸۵۵-۸۶۱ می‌تواند به β-D- اسیدمانورونیک مرتبط باشد (Mohammad *et al*., 2020).

در شکل ۴ ریخت‌شناسی سطح جلبک قهوه‌ای و آلژینات‌سدیم استخراجی نشان داده شده است. ریخت‌شناسی سطح جلبک به‌وضوح فیبرهای آلژینات‌سدیم را در شکل ۵ (a) نشان نمی‌دهد درحالی‌که در شکل ۵ (b) مورفولوژی سطح الیاف آلژینات‌سدیم استخراجی را می‌توان به‌وضوح مشاهده کرد. ذرات کوچک آلژینات‌سدیم دارای سطحی ناهموار به صورت شبه‌کروی بودند.



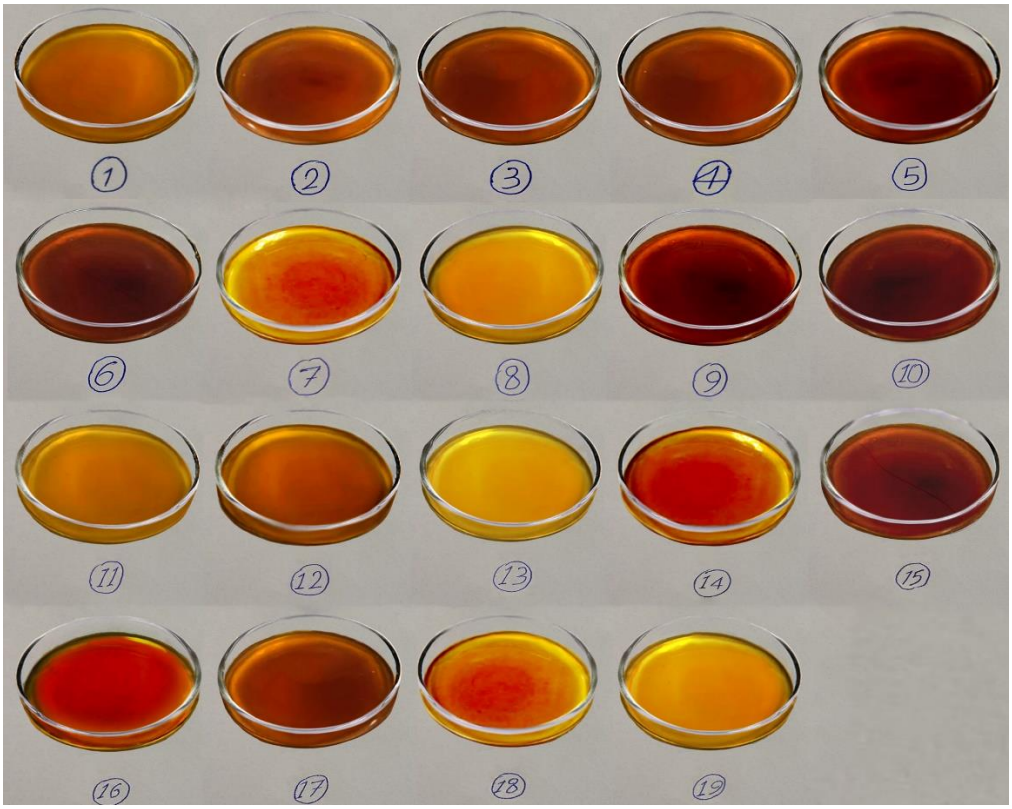
شکل ۵: تصویر SEM سطح جلبک *S. angustifolium* (a) و آلژینات‌سدیم استخراجی (b)

Figure 5: SEM image of the surface of *S. angustifolium* algae (a) and extracted sodium alginate (b)

در شکل ۶ تجزیه‌وتحلیل رنگ آلژینات‌سدیم استخراجی به‌واسطه طرح مرکب مرکزی با متغیرهای مستقل دما، زمان و pH نشان داده شده است. در بین متغیرهای مورد مطالعه، pH دارای بیشترین تأثیر بود و افزایش مقادیر pH منجر به

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

محلول‌های آلژینات با رنگ روشن‌تر شد همان‌طوری‌که در نمونه‌های شماره ۷، ۸، ۱۳، ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است که در pH=۱۰ به‌دست آمده‌اند. بنابراین، علاوه بر بازده بالاتر، استخراج قلیایی در مقادیر pH بالاتر، رنگ روشن‌تری به آلژینات داد.



شکل ۶: رنگ آلژینات‌سدیم استخراجی تحت‌تاثیر شاخص‌های متفاوت استخراج دما، زمان و pH

Figure 6: Color of extracted sodium alginate affected by different extraction parameters temperature, time, and pH

بحث

بهینه‌سازی شرایط فرایند برای رسیدن به حداکثر بازده و مقدار اسیدیورونیک را می‌توان با تجزیه‌وتحلیل چندپاسخ با استفاده از تابع مطلوبیت به‌دست آورد. در شرایط آزمایشی مورد مطالعه، بازده استخراج پیش‌بینی‌شده آلژینات‌سدیم به‌ترتیب ۳۳/۵۴ درصد و با مقدار مطلوب ۰/۹۵۶ بود. مقدار مطلوبیت بالا (۱≤ d≥۰) حاکی از دقت بهتر متغیرهای مستقل در بهینه‌سازی است. هر دو پاسخ به صورت تجربی تحت شاخص‌های بهینه تایید شدند که نشان می‌دهد، مدل برای پیش‌بینی این پاسخ‌ها کافی است. میزان استخراج آلژینات‌سدیم از جلبک *S. angustifolium* تحت شاخص‌های مطالعه حاضر، در محدوده آلژینات استخراجی از این جلبک و سایر گونه‌ها از سوی سایر محققان قابل مقایسه است: *Sargassum natans* ۲۳ درصد، *Sargassum vulgare* ۱۷ درصد، *Padina gymnospora* ۱۶ درصد، *Padina antillarum* ۲۲ درصد، *Laminaria digitata* ۲۹ درصد، *Macrocystis pyrifera* ۲۶ درصد (Rhein-Knudsen *et al*., 2017)، *Sargassum vulgare* ۴۰ درصد (Sari-Chmayssem *et al*., 2016)، Sargassum natans ۱۹ درصد (Mohammed *et al*., 2018)، *Sargassum cymosum* با ۵۱/۸۴ درصد (Nogueira *et al*., 2022) و *Dictyota mertensii* با ۲۸/۲۹ درصد (Queiroz *et al*., 2024). Kanagesan و همکاران (۲۰۲۲) از طریق استخراج قلیایی با ۳ درصد کربنات‌سدیم، بازده ۱۸/۵۵ درصد آلژینات را از جلبک *Sargassum* sp.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

به‌دست آوردند. تغییرات در بازده استخراج آلژینات در میان مطالعات مختلف، از جمله مطالعه حاضر، ممکن است به دلیل تفاوت در گونه‌های سارگاسوم، شرایط رشد یا شرایط استخراج باشد (Khan *et al*., 2024). بازده آلژینات استخراجی در بین جلبک‌های دریایی قهوه‌ای مورد بررسی متفاوت است، زیرا این جلبک‌ها دارای فرایندهای فیزیولوژیک و متابولیک مختلفی هستند که به آنها اجازه می‌دهد، متابولیت‌های زیست‌فعال تولید کنند. غلظت موادمغذی در محیط به طور مستقیم بر میزان تولید پلی‌ساکارید از نظر متابولیت‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. تولید پلی‌ساکاریدها تحت تأثیر چندین عامل مانند گونه، سن، زمان نمونه‌برداری و روش استخراج، متفاوت است (El-Sheekh *et al*., 2024).

اثر دما

نقطه بحرانی در استخراج قلیایی، دمای مورد استفاده در طول عملیات است که معمولاً در محدوده ۱۰۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. افزایش دمای استخراج می‌تواند منجر به آزادسازی بیشتر آلژینات از جلبک قهوه‌ای شود که در بازده بالاتر منعکس می‌شود. با این‌حال، افزایش دما می‌تواند تخریب زنجیره‌های پلیمری آلژینات را افزایش داده و در نتیجه ویسکوزیته محلول آلژینات مربوطه را کاهش دهد (Bojorges *et al*., 2023). در مطالعه حاضر، دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد بهترین بازده استخراج آلژینات را به‌همراه داشت. Chee و همکاران (۲۰۱۱) بازده استخراج آلژینات از *Sargassum siliquosum* را در شرایط ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت ۴۹/۹ درصد به‌دست آوردند. Fertah و همکاران (۲۰۱۷) سه دمای مختلف (۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) برای استخراج آلژینات از *Laminaria digitata* را مقایسه کردند و بالاترین بازده استخراج در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به میزان ۵۱/۸ درصد را گزارش کردند. Torres و همکاران (۲۰۰۷) حداکثر بازده آلژینات را ۱۷/۷ درصد در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد از *Sargassum vulgare* گزارش کردند. نتایج مشابهی از Caballero و همکاران (۲۰۲۱) گزارش شده است که بازده آلژینات بالاتر (۲۱ درصد) برای *Durvillaea antarctic* در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای بالاتر (۱۱ درصد آلژینات در ۸۰ درجه سانتی‌گراد) به‌دست آوردند که با مطالعات قبلی هم‌خوانی داشت. در مقابل، Mohammad و همکاران (۲۰۲۰) بازده استخراج بالاتری را از گونه‌های *Sargassum* گزارش کردند (۲۰/۸ درصد در ۸۰ درجه سانتی‌گراد). این نتایج با نتایج گزارش شده از Mazumder و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد که مشاهده کردند که عملکرد به طور قابل‌توجهی در بالای ۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت (همخوانی با مطالعه حاضر) درحالی‌که حداکثر بازده آلژینات از *Sargassum muticum* بین ۹۲ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۱۲/۶ و ۱۳/۵ درصد به‌دست آمد که کمتر از نتیجه مطالعه حاضر بود. با این‌حال، گزارش شده است که دمای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند تجزیه آلژینات را تحریک کند و وزن مولکولی آن را کاهش دهد (Abraham *et al*., 2019). دمای بهینه برای دستیابی به بازده استخراج بالاتر به گونه‌های جلبک قهوه‌ای و سایر متغیرها (زمان، قلیائیت، pH) و اثر متقابل آنها با یکدیگر بستگی دارد. علاوه‌براین، دستیابی به راندمان استخراج بالا همیشه هدف مورد نظر نیست. اغلب، هدف به‌دست آوردن آلژینات با کیفیت بالاست. بنابراین، نسبت M/G، وزن مولکولی و ویسکوزیته، شاخص‌های حیاتی برای کاربرد آلژینات هستند. در نتیجه، بهینه‌سازی دما در طول فرایند استخراج باید همراه با بهینه‌سازی سایر متغیرها انجام شود (Bojorges *et al*., 2023).

اثر زمان

زمان استخراج یک شاخص مهم است که به طور قابل‌توجهی بر عملکرد آلژینات و خواص فیزیکوشیمیایی آن تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، فرایند استخراج به چندین ساعت نیاز دارد که در محدوده ۱۲-۲ ساعت متغیر است. با این‌حال، تحقیقات نشان داده‌اند که برای استخراج آلژینات از *Macrocystis pyrifera* زمان استخراج بهینه ۳/۵ ساعت بود و پس از آن زمان، بازده استخراج کاهش یافت (Gomez *et al*., 2009). Mazumder و همکاران (۲۰۱۶) نتایج مشابهی را گزارش کردند که ارتباط مستقیمی بین زمان استخراج و بازده استخراج یافتند جایی‌که حداکثر بازده

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

استخراج آلژینات از *Sargassum muticum* پس از ۳ ساعت استخراج به‌دست آمد که با نتیجه مطالعه حاضر همخوانی داشت. Mohammed و همکاران (۲۰۲۰) رابطه قوی بین متغیرهای دما و زمان را گزارش کردند جایی‌که زمان استخراج بهینه ۶ ساعت برای دستیابی به بازده بالای آلژینات از *Sargassum* نیاز بود. اثر زمان استخراج نه‌تنها بر عملکرد بلکه بر خواص رئولوژیک آلژینات نیز تأثیر می‌گذارد. Vauchel و همکاران (۲۰۰۸) کاهش قابل‌توجهی در ویسکوزیته دینامیک آلژینات پس از ۲ ساعت استخراج مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که زمان استخراج طولانی می‌تواند منجر به پلیمریزاسیون آلژینات و کاهش ویسکوزیته شود. Truus و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند که زمان استخراج طولانی و دماهای بالا باعث پلیمریزاسیون زنجیره پلیمری آلژینات می‌شود و آلژینات‌هایی با ویسکوزیته کمتر تولید می‌کند. به طور متناقض، Torres و همکاران (۲۰۰۷) آلژینات را از گونه‌های *Sargassum* استخراج کردند. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، آلژینات‌های استخراجی با زمان استخراج کوتاه‌تر (۱ ساعت) را به عنوان "ویسکوزیته کم" شناسایی کردند درحالی‌که آلژینات‌ها به مدت ۵ ساعت به عنوان "ویسکوزیته بالا" استخراج می‌شوند. افزایش زمان استخراج منجر به انحلال ماکرومولکول‌هایی با وزن مولکولی بالا در محلول استخراج قلیایی می‌شود. علاوه‌براین، مقادیر نسبت M/G بالاتر بود (به‌ترتیب ۱/۶ و ۱/۳) در مقایسه با اکثر موارد گزارش شده برای گونه‌های *Sargassum* که در محدوده ۰/۸-۰/۲ است (Łabowska *et al*., 2019). این نتیجه، مطابق با با گزارشFawzy و همکاران (۲۰۱۷) بود که نشان داد، افزایش زمان استخراج منجر به افزایش قابل‌توجهی در MM و کاهش GG شد که در نتیجه نسبت M/G بالاتری ایجاد می‌شود.

اثر pH

آلژینات با محلول‌های قلیایی، معمولاً با Na_2CO_3 به دلیل هزینه کم و توانایی آن برای رسیدن به pH بالای ۱۰ استخراج می‌شود (Łabowska *et al*., 2019). pH خنثی منجر به تبدیل اسیدآلژینیک به آلژینات‌سدیم محلول در آب می‌شود که حالت ژل دارد (Fenoradosoa *et al*., 2010).

از آن‌جایی‌که تنظیم pH در استخراج آلژینات می‌تواند پیچیده باشد، Mazumder و همکاران (۲۰۱۶) اثر غلظت Na_2CO_3 را بر بازده استخراج آلژینات از *Sargassum muticum* تجزیه‌وتحلیل کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که غلظت قلیایی بهینه برای به‌دست آوردن عملکرد بالاتر از ۳ درصد است. بالاتر از این غلظت، عملکرد به طور قابل‌توجهی کاهش یافت که در مطالعه حاضر نیز از ۳ درصد کربنات‌سدیم استفاده شد. سایر مطالعات نیز این موضوع را ثابت کردند (Hernandez-Carmona *et al*., 2002; Mazumder *et al*., 2016). Mohammed و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از غلظت بالاتر ۱۰-۵ درصد کربنات‌سدیم را برای استخراج آلژینات از *Sargassum natans* بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در غلظت ۵ درصد به بالا، بازده استخراج کمی افزایش یافته، ولی بازده آلژینات به طور معنی‌داری کاهش یافت. کربنات‌سدیم طی استخراج قلیایی با پیوندهای β-گلیکوزیدی واکنش می‌دهد و باعث تخریب آلژینات و تشکیل اسیدهای مونوکربوکسیلیک و دی‌کربوکسیلیک می‌شود. کربنات‌سدیم باعث جایگزینی سدیم در گروه‌های کربوکسیلیک اسیدآلژینیک شده و نمک آلژینات‌سدیم حاصل می‌شود. افزایش غلظت کربنات‌سدیم سبب جایگزین‌شدن بیشتر یون کلسیم می‌شود و راندمان استخراج آلژینات افزایش می‌یابد. این افزایش تا جایگزین شدن کامل گروه‌های کربوکسیلیک با یون سدیم ادامه می‌یابد و سپس دپلیمریزه شدن آلژینات، موجب کاهش راندمان می‌شود. پس تاثیر زمان در این مرحله اهمیت دارد، زیرا برای نفوذ کربنات‌سدیم و تبدیل اسیدآلژینیک به آلژینات‌سدیم به زمان نیاز است. نشان داده شد که زمان بالاتر از ۳ ساعت بالاترین بازده استخراج آلژینات را به‌دست می‌آورد (مطابق با نتایج مطالعه حاضر). ولی بعد از آن به دلیل اثر سوء pH قلیایی کربنات‌سدیم و دپلیمریزاسیون آلژینات، راندمان کاهش می‌یابد (Kanagesan *et al*., 2022). بنابراین، توصیه می‌شود pH تا حدود ۱۰ کنترل شود که در مطالعه حاضر نیز همین مقدار بیشترین بازده آلژینات و اسیدیورونیک را به‌همراه داشت. این موضوع در مطالعه Tiemi و همکاران (۲۰۲۲) نیز تایید شد که استفاده از ۲ درصد کربنات‌سدیم برای تنظیم pH=۱۰ را گزارش

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

کردند که برای به‌دست‌آوردن بازده بالا ۴۵/۸ درصد آلژینات از *Sargassum cymosum* بهینه بود. با توجه به ناهمگونی جلبک‌های قهوه‌ای، اجماع در مورد بهترین محدوده pH نمی‌تواند برای همه گونه‌های جلبک قهوه‌ای اعمال شود. در مطالعه Youssouf و همکاران (۲۰۱۷) بازده آلژینات در pH=۱۲، ۴-۳۳/۵۴ درصد بود که در مقایسه با pH=۱۰، ۶/۳-۰/۳ درصد از *Sargassum binderi* و *Turbinaria ornata* بود (Youssouf *et al*., 2017). Mohammed و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از کربنات‌سدیم ۵/۵ درصد توانستند بازده ۲۱/۷ درصد آلژینات را بدون تجزیه آن از گونه‌های *Sargassum* به‌دست آورند. آنها به این نتیجه رسیدند که در آن غلظت و با افزایش دما، محلول قلیایی به دیواره‌های سلولی جلبک نفوذ نمود و حلالیت و انتشار آلژینات را در محلول قلیائیت بهبود بخشید. علاوه‌براین، سایر فعل‌وانفعالات بین زمان، نسبت قلیایی به جلبک و دما می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در M/G شود. به طور خاص، افزایش محتوای MM بلوک‌های هموپلیمری و کاهش محتوای GG برای زمان‌های استخراج طولانی و نسبت قلیایی به جلبک بالا در مقایسه با بلوک‌های MG که دارای نوسانات متناوب اندکی هستند، گزارش شد. به عبارت دیگر، بلوک‌های G هموپلیمری به دلیل شکستن پیوندهای گلیکوزیدی مرتبط با اسیدگولورونیک، نسبت به بلوک‌های هتروپلیمری به شرایط استخراج حساس‌تر هستند (Fawzy *et al*., 2017).

طیف‌سنجی FTIR

نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های FTIR آلژینات‌سدیم در مطالعه حاضر، با پیک‌های مربوط به ارتعاش کششی نامتقارن ۱۶۱۰-۱۶۰۰ بر سانتی‌متر) و متقارن (cm^{-1} ۱۴۱۰-۱۴۰۰) گروه کربوکسیلات آلژینات‌سدیم O-C-O در طیف آلژینات‌های استخراجی از مطالعات مطابقت داشت (Sagukawa *et al*., 2004; Gomwz *et al*., 2009; Yang *et al*., 2013). در استخراج قلیایی آلژینات امکان انحلال اسیدآلژنیک به شکل گروه‌های کربوکسیله فراهم می‌شود. علاوه‌براین، پیک‌های موجود در ناحیه cm^{-1} ۱۱۰۰-۱۰۰۰ مربوط به ارتعاشات کششی C-C، C-O و C-O-C حلقه پیرانوز، به صورت قوی‌تر در نمونه استخراجی نسبت به نمونه تجاری آلژینات دیده شد. برای تجزیه‌وتحلیل پلی‌ساکاریدها، ناحیه آنومری بین cm^{-1} ۹۵۰ و ۷۰۰ است. به طور کلی، آلژینات دو پیک در این ناحیه نشان می‌دهد، یکی حدود cm^{-1} ۹۹۵/۹۷ و دیگری به صورت یک پیک شانه‌ای کوچک حدود cm^{-1} ۸۶۱/۷۹ که به‌ترتیب مربوط به مانورونیک‌اسید و گلوکورونیک‌اسید است. این پیک‌ها در طیف آلژینات تجاری نیز شناسایی شدند، اما در مقایسه با آلژینات استخراجی، شدت آنها افزایش یافته است. علاوه‌براین، پیک‌های شانه‌ای با شدت‌های کوچک در cm^{-1} ۶۰۸/۰۵ و پیک شانه‌ای در ۴۸۹/۵۶ در طیف FTIR آلژینات تجاری یافت شد که به‌ترتیب به ارتعاش کششی C-O اسید اورونیک و ارتعاش تغییر شکل C1-H اسید مانورونیک نسبت داده می‌شوند (Nesic *et al*., 2023). تغییرشکل پیک از شانه پهن به پیک باریک و شدت پیک از ضعیف به قوی، نشان می‌دهد که این مسئله می‌تواند مربوط به گروه عاملی دیگری در آلژینات باشد. در مقالات یافت شده است که پیک‌های cm^{-1} ۸۸۰-۸۷۰ نمونه‌ای از ارتعاشات یون‌های کربنات هستند (Fleet, 2009; Database of ATR-FT-IR, 2022).

منابع

Abraham, R.E., Su, P., Puri, M., Raston, C.L. and Zhang, W., 2019. Optimisation of biorefinery production of alginate, fucoidan and laminarin from brown seaweed *Durvillaea potatorum*. *Algal Research*, 38:101389. DOI:10.1016/j.algal.2018.101389

Benslima, A., Sellimi, S., Hamdi, M., Nasri, R., Jridi, M., Cot, D., Li, S., Nasri, M. and Zouari, N., 2021. The brown seaweed *Cystoseira schiffneri* as a source of sodium alginate: chemical and structural characterization, and antioxidant activities. *Food Bioscience*, 40:100873, DOI:10.1016/j.fbio.2020.100873

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Beratto, A., Agurto, C., Freer, J., Peña-Farfal, C., Troncoso, N., Agurto, A. and Castillo, R.D.P., 2017. Chemical characterization and determination of the anti-oxidant capacity of two brown algae with respect to sampling season and morphological structures using infrared spectroscopy and multivariate analyses. *Applied Spectroscopy*, 71:2263–227. DOI:10.1177/0003702817715654.

Bitter, T. and Muir, H.M., 1962. A modified uronic acid carbazole reaction. *Analytical Biochemistry*, 4 330–334. DOI:10.1016/0003-2697 (62)90095-7.

Bojorges, H., Lopez-Rubio, A., Martínez-Abad, A. and Fabra, M.J., 2023. Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 140:104142. DOI:10.1016/j.tifs.2023.104142

Caballero, E., Flores, A. and Olivares, A., 2021. Sustainable exploitation of macroalgae species from Chilean coast: Characterization and food applications. *Algal Research*, 57:102349. DOI:10.1016/J.ALGAL.2021.102349

Chee, S.Y., Wong, P.K. and Wong, C.L., 2011. Extraction and characterisation of alginate from brown seaweeds (Fucales, Phaeophyceae) collected from Port Dickson, Peninsular Malaysia. *Applied Phycology*, 23(2):191–196. DOI:10.1007/s10811-010-9533-7

Database of ATR-FT-IR Spectra of Various Materials, 2022. Available online: https://spectra.chem.ut.ee/ (accessed on 22 July 2022)

El-Sheekh, M., Fathy, A., Saber, H. and Saber, A., 2023. Medicinal and pharmaceutical applications of seaweeds. *Egyptian Journal of Botany*, 63 (1):1–29. DOI:10.21608/ejbo.2022.145631.2022.

El-Sheekh, M., Kassem, W.M.A., Alwaleed, E.A. and Saber, H., 2024. Optimization and characterization of brown seaweed alginate for antioxidant, anticancer, antimicrobial, and antiviral properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278:134715. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.134715

Faidi, A., Becheikh, M.E.H., Lassoued, M.L., Stumbé, J.F., Safta, F. and Sfar, S., 2025. Isolation of sodium alginate-like polysaccharide from *Padina pavonica*: Optimization, characterization and antioxidant properties. *Journal of Molecular Structure*, 139737. DOI:10.1016/j.molstruc.2024.139737

Fawzy, M.A., Gomaa, M., Hifney, A.F. and Abdel-Gawad, K.M., 2017. Optimization of alginate alkaline extraction technology from *Sargassum latifolium* and its potential antioxidant and emulsifying properties. *Carbohydrate Polymers*, 157: 1903-1912. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.11.077

Fenoradosoa, T.A., Ali, G., Delattre, C., Laroche, C., Petit, E., Wadouachi, A. and Michaud, P., 2010. Extraction and characterization of an alginate from the brown seaweed *Sargassum turbinarioides* Grunow. *Applied Phycology*, 22(2):131–137. DOI:10.1007/S10811-009-9432-Y/FIGURES/4

Fertah, M., Belfkira, A., Taourirte, M. and Brouillette, F., 2017. Extraction and characterization of sodium alginate from

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Moroccan *Laminaria digitata* brown seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*, 10:S3707–S3714. DOI:10.1016/j.arabjc.2014.05.003

Fleet, M.E., 2009. Infrared spectra of carbonate apatites: ν2-Region bands. *Biomaterials*, 30:1473–1481.

Gomez, C.G., P´erez Lambrecht, M.V., Lozano, J.E., Rinaudo, M. and Villar, M.A., 2009. Influence of the extraction–purification conditions on final properties of alginates obtained from brown algae (*Macrocystis pyrifera*). *International Journal of Biological Macromolecules*, 44(4):365–371. http://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2009.02.005

Guiry, M.D., Guiry, M.D. and Guiry, G.M., 2021. AlgaeBase, World-Wide Electronic Publication, National University of Ireland, Galway. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=11385 (accessed August 27, 2023).

Hernandez-Carmona, G., McHugh, D.J., Arvizu-Higuera, D.L. and RodríguezMontesinos, Y.E., 2002. Pilot plant scale extraction of alginates from *Macrocystis pyrifera* 4. Conversion of alginic acid to sodium alginate, drying and milling. *Applied Phycology*, 14(6):445–451. http://doi.org/10.1023/A:1022372807813

Kanagesan, K., Abdulla, R., Derman, E., Sabullah, M.K., Govindan, N. and Gansau, J.A., 2022. A sustainable approach to green algal bioplastics production from brown seaweeds of Sabah, Malaysia. *Journal of King Saud University-Science*, 34:102268. DOI:10.1016/j.jksus.2022.102268.

Khan, M.A.A., Hasan, M.M., Hossain, M.K., Adhikery, D., Hakim, M. Mohanta, L.C., Sharif, A.S.M., Ashish, A.S.M. and Sarker, A.K., 2024. Extraction and characteristic properties analyses of sodium alginate derived from the *Sargassum oligocystum* brown seaweed alga of the Bay of Bengal. *Next Materials*, 6:100417. DOI:10.1016/j.nxmate.2024.100417

Kolahdoozan, M., Mousavi, S.E., Hatamipour, M.S. and Yegdaneh, A., 2024. Enhancing the antioxidant activity of alginic acid extracted from *Sargassum angustifolium* brown algae based on optimizing the extraction. *Advanced Biomedical Research*, 13:49. DOI:10.4103/abr.abr_491_23.

Łabowska, M.B., Michalak, I. and Detyna, J., 2019. Methods of extraction, physicochemical properties of alginates and their applications in biomedical field - a review. *Open Chemistry*, 17(1):738–762. DOI:10.1515/chem-2019-0077

Liu, J., Yang, S., Li, X., Yan, Q., Reaney, M.J.T. and Jiang, Z., 2019. Alginate oligosaccharides: production, biological activities, and potential applications. *Comprehensive Reviews Food Science and Food Safety*, 18:1859–1881. DOI:10.1111/ 1541-4337.12494

Mazumder, A., Holdt, S.L., de Francisci, D., Alvarado-Morales, M., Mishra, H.N. and Angelidaki, I., 2016. Extraction of alginate from *Sargassum muticum*: Process optimization and study of its functional activities. *Applied Phycology*, 28 (6):3625–3634. DOI:10.1007/s10811-016-0872-x

Mohammed, A., Bissoon, R., Bajnath, E., Mohammed, K., Lee, T., Bissram, M., John,

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

N., Jalsa, N.K., Lee, K.Y. and Ward, K., 2018. Multistage extraction and purification of waste *Sargassum natans* to produce sodium alginate: An optimization approach. *Carbohydrate Polymers*, 198:109–118. DOI:10.1016/j.carbpol.2018.06.067.

Mohammed, A., Rivers, A., Stuckey, D.C. and Ward, K., 2020. Alginate extraction from Sargassum seaweed in the Caribbean region: Optimization using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 245:116419. DOI:10.1016/j.carbpol.2020.116419

Mousavi, S.E., Hatamipour, M.S. and Yegdaneh, A., 2023. Ultrasound-assisted extraction of alginic acid from *Sargassum angustifolium* harvested from Persian Gulf shores using response surface methodology. *International Journal of Biological Macromolecules,* 226:660-669. DOI: DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.12.070

Nam, H.B., Lee, K.H., Yoo, H.Y., Park, C., Lim, J.M. and Lee, J.H., 2024. Rapid and high-yield recovery of sodium alginat e from *Undaria pinnatifida* via microwave-assisted extraction. *Processes*, 12:208. DOI:10.3390/pr12010208

Nesic, A., De Bonis, M.V., Dal Poggetto, G., Ruocco, G. and Santagata, G., 2023. Microwave assisted extraction of raw alginate as a sustainable and cost-effective method to treat beach-accumulated Sargassum algae. *Polymers*, 15:2979. DOI:10.3390/ polym15142979

Nguyen, D.T., Vu, N.B., Nguyen, X.H. Dang, T.T.T., Do, T.K. Nguyen, K.N. Nguyen, T.T., Pham, N.B.H., Pham, T.T. and Dang, X.C., 2021. The content, antioxidant activity, and structural characteristics of sodium alginate extracting from *Sargassum polycystum* grew in Vietnam: effect of various extraction conditions. *Pharmaceutical Research International*, 33 (41A):197–206. DOI: 10.9734/jpri/2021/v33i41A32318

Nogueiraa, M.T., Chicaa, L.R., Yamashitaa, C., Nunes, N.T.S., Moraes, I.S.F., Brancoa, C.C.Z. and Brancoa, I.G., 2022. Optimal conditions for alkaline treatment of alginate extraction from the brown seaweed *Sargassum cymosum* C. Agardh by response surface methodology. *Applied Food Research*, 2:100141. DOI:10.1016/j.afres.2022.100141

Queiroz, L.P.O., Aroucha, E.M., Santos, F.K.G. and Leite, R.H.L., 2024. Optimization of alginate extraction conditions from the brown seaweed *Dictyota mertensii* using a central composite design. *Algal Research*, 79:103482. DOI:10.1016/j.algal.2024.103482

Radulovich, R., Neori, A., Valderrama, D., Reddy, C.R.K., Cronin, H. and Forster, J., 2015. Farming of seaweeds. Seaweed sustainability; Chapter 3. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015, pp. 27–59.

Rhein-Knudsen, N., Ale, M.T., Ajalloueian, F. and Meyer, A.S., 2017. Characterization of alginates from Ghanaian brown seaweeds: *Sargassum* spp. and *Padina* spp. *Food Hydrocoll*, 71:236–244. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.05.016.

Sakugawa, K., Ikeda, A., Takemura, A. and Ono, H., 2004. Simplified method for estimation of composition of alginates by FTIR.

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]

Applied Polymer Science, 93(3):1372–1377.DOI:10.1002/app.20589

Sari-Chmayssem, N., Taha, S., Mawlawi, H., Guégan, J.P., Jeftić, J. and Benvegnu, T., 2016. Extracted and depolymerized alginates from brown algae *Sargassum vulgare* of Lebanese origin: Chemical, rheological, and antioxidant properties. *Journal of Applied Phycology*, 28:1915–1929. DOI: 10.1007/s10811-015-0676-4

Sugiura, Y., Misumi, S., Yamatani, H., Kusakawa, M., Katsuzaki, H., Hayashi, Y. and Murase, N., 2025. Three antiallergic meroterpenoids derived from the brown alga *Sargassum macrocarpum*. *Applied Phycology*, 9: (39). 251-259 DOI:10.1007/s10811-025-03476-2

Tiemi, N.M., Rustici, C.L., Yamashita, C., Sawada, N.N.S., Freitas, M.I.C., Zanini, B.C.C. and Guilherme, B.I., 2022. Optimal conditions for alkaline treatment of alginate extraction from the brown seaweed *Sargassum cymosum* C. Agardh by response surface methodology. *Applied Food Research*, 2(2):100141. DOI:10.1016/J.AFRES.2022.100141

Torres, M.R., Sousa, A.P.A., Silva Filho, E.A.T., Melo, D.F., Feitosa, J.P.A., de Paula, R.C.M. and Lima, M.G.S., 2007. Extraction and physicochemical characterization of Sargassum vulgare alginate from Brazil. *Carbohydrate Research*, 342(14):2067–2074. DOI:10.1016/J.CARRES.2007.05.022

Truus, K., Vaher, M. and Taure, I., 2001. ALGAL biomass from fucus vesiculosus (phaeophyta): Investigation of the mineral and alginate components. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Chemistry*, 50(2):95–103. DOI:10.3176/chem.2001.2.04

Vauchel, P., Arhaliass, A., Legrand, J., Kaas, R. and Baron, R., 2008. Decrease in dynamic viscosity and average molecular weight of alginate from *Laminaria digitata* during alkaline extraction. *Phycology*, 44:515-517. DOI:10.1111/j.1529-8817.2008.00482.x

Yang, M., Deng, Q., Chen, R., Sun, Y., Zhou, X. and Chen, H., 2025. Extraction, purification, structural characteristics, and biological activities of seaweed polysaccharides: A Review. *Starch*, 77, 2400029: 1-13. DOI:10.1002/star.202400029

Yang, Y., Campanella, O.H., Hamaker, B.R. and Zhang, G.G.Z., 2013. Rheological investigation of alginate chain interactions induced by concentrating calcium cations. *Food Hydrocolloid*, 30(1):26–32. DOI:10.1016/J.Foodhyd.2012.04.006

Youssouf, L., Lallemand, L., Giraud, P., Soul´e, F., Bhaw-Luximon, A., Meilhac, O., D'Hellencourt, C. L., Jhurry, D. and Couprie, J., 2017. Ultrasound-assisted extraction and structural characterization by NMR of alginates and carrageenans from seaweeds. *Carbohydrate Polymers*, 166:55–63. DOI:10.1016/j. carbpol.2017.01.041

[Downloaded from isfj.ir on 2026-10-16]