



تشخیص و اندازه گیری ترکیبات مولد طعم و بو در مخازن آب

صابر مسعودی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف*

مسعود تجریشی، عضو هیات علمی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

رضا موسوی، عضو هیات علمی دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

احمد ابریشمچی، عضو هیات علمی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*تلفن: ۰۲۱-۶۱۶۴۱۱۸-۰۲۱، پست الکترونیکی: msaber@mehr.sharif.edu

چکیده

پدیده شکوفایی جلبک در مخزن سد بوکان باعث بروز مشکلات کیفی آب، شامل بدطعمی و بوی نامطبوع گردیده است. ورود فاضلاب شهری بوسیله رود چم سقز به مخزن، مواد لازم برای شکوفایی جلبک را فراهم می آورد و در مواقعی از سال که تراز آب پایین بوده و نور و مواد مغذی جهت رشد جلبک به میزان کافی در دسترس باشد، این پدیده رخ می دهد. جلبکها با تولید نوعی ترکیب آلی بنام Geosmin طعم و بویی شبیه به بوی خاک را در آب ایجاد می نمایند. مطالعات میدانی از مرداد ماه سال ۱۳۷۹ بر روی مخزن آغاز شد و پارامترهای کیفی از جمله اکسیژن محلول، فسفات، نیترات، غلظت مواد محلول، دمای آب، هدایت الکتریکی، سیلیکا و غلظت مواد معلق در اعماق مختلف مخزن اندازه گیری شده است. جهت مشخص شدن نوع طعم و بو و همچنین اثبات جلبک به عنوان عامل اصلی ایجاد طعم و بو، نمونه هایی برای تشخیص و اندازه گیری غلظت Geosmin به وسیله دستگاه طیف سنجی جرم، کراماتوگرافی گاز (GC-MS) برداشته شد و در شرایط خاص نگهداری و به آزمایشگاه منتقل گردید. نتایج مطالعات نشان می دهد که نوعی جلبک سبز-آبی بنام Microsystis با تولید ترکیب آلی Geosmin باعث ایجاد طعم و بوی نامطبوع در آب این سد می گردد. نتایج بدست آمده از میزان غلظت Geosmin و غلظت کلروفیل-a نیز ارتباط مستقیمی بین شدت بو و میزان غلظت جلبک نشان می دهد. در این مقاله نتایج حاصله از اندازه گیری پارامترهای کیفی بررسی شده و چگونگی برداشت آب و نحوه بهره برداری از مخزن در راستای کاهش طعم و بو در آب شرب شهر سقز ارائه شده است.

کلید واژه ها شکوفایی جلبک، کیفیت آب سد بوکان، Geosmin، طعم و بو در مخازن آب، GC-MS

۱- مقدمه

پدیده شکوفایی جلبک، یکی از مهمترین عوامل زوال کیفیت آب در دریاچه های آب شیرین و مخازن سدها می باشد [۱]. تخلیه فاضلاب خانگی، صنعتی و زهاب کشاورزی به مخازن آب، مواد مغذی مورد نیاز رشد جلبک را فراهم می آورد و در صورت مساعد بودن شرایط محیطی مانند دمای مناسب، وجود فسفات و در

دسترس بودن نور جهت فعالیتهای فتوسنتزی جمعیت جلبک ها به صورت ناگهانی افزایش یافته و اصطلاحاً شکوفایی جلبک رخ می دهد [۲]. این معضل در کشورهای متعددی از جمله امریکا، ژاپن، استرالیا، اسپانیا، فنلاند، و در سالهای اخیر در ایران از جمله سد میناب و سد بوکان به وجود آمده است. برخی از ترکیبات آلی که توسط جلبک ها در زمان شکوفایی جلبک تولید می شوند باعث ایجاد طعم و بوی نامطبوع در آب می گردند [۳]. مهمترین این ترکیبات Geosmin و 2-methyl-isoborneol (MIB) می باشند، که با غلظتی در حد قسمت در تریلیون (ppt) طعم و بوی شبیه به بوی خاک را در آب ایجاد می نمایند [۴]. روشهای متنوعی جهت تشخیص نوع بو و اندازه گیری غلظت حد آستانه آن به کار گرفته می شود. روشهای اولیه روشهای حسی می باشند که شناسایی نوع و تعیین شدت میزان طعم و بو، بر پایه حس چشایی و بویایی افراد آموزش دیده انجام می گیرد. در روشهای نوین از دستگاههای پیچیده ای مانند کراماتوگرافی گاز- طیف سنجی جرم Gas Chromatography- Mass Spectrometry (GC-MS) جهت اندازه گیری ترکیبات مولد طعم و بو با غلظتهای ناچیز استفاده می گردد [۵].

سد بوکان که در جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع شده است، دچار مشکل تغذیه گرایی بوده و در اواسط بهار و اوایل پاییز شکوفایی جلبک در آن رخ می دهد. فاضلاب خانگی شهر سقز توسط سیستم فاضلاب قدیمی شهر به رودخانه چم سقز تخلیه می گردد. با ورود این رودخانه به مخزن سد، غلظت مواد آلی در آن افزایش یافته و شرایط مساعدی را جهت شکوفایی جلبک فراهم می آورد. طعم و بوی خاک در تمام طول سال به وسیله حس بویایی قابل تشخیص است ولی در زمان شکوفایی جلبک یعنی اواسط بهار و اوایل پاییز شدت طعم و بوی نامطبوع افزایش یافته و باعث نارضایتی مردم از کیفیت آب شده است [۶].

هدف از این تحقیق، تشخیص نوع جلبک و شناسایی ترکیب مولد طعم و بوی نامطبوع در آب مخزن سد بوکان و آب شرب شهر سقز می باشد. ایجاد ارتباط بین غلظت جلبک و شدت طعم و بو و چگونگی تغییرات نیتروژن کل، فسفر کل و سیلیکا در عمق آب بواسطه حضور جلبک در آن، از اهداف دیگر این مطالعه می باشد. همچنین با محاسبه حداکثر عمق فعالیتهای بیولوژیکی راهکاری جهت کاهش طعم و بوی نامطبوع در شبکه آب شرب شهر سقز ارائه شده است.

۲- مواد و روشها

کیفیت آب شرب شهر سقز، از ابتدای برداشت آن از مخزن سد بوکان همواره دچار مشکل طعم و بوی نامطبوع بوده است. طعم و بوی شبیه بوی خاک که توسط ترکیب آلی Geosmin که از جلبک های سبز- آبی پراکنده می گردد و همچنین وجود جلبک در مخزن سد بوکان فرضیه ایجاد طعم و بو، بوسیله جلبک را تقویت نمود [۷]. علاوه بر آن تشدید طعم و بوی آب در برخی مواقع از سال - اواسط بهار و اوایل پاییز - که به علت شکوفایی جلبک رخ می دهد، این فرضیه را مورد تایید قرار داد. برای اثبات این فرضیه ابتدا با مطالعات میدانی که از مرداد ماه سال ۱۳۷۹ آغاز شد، وضعیت تغذیه گرایی مخزن مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای کیفی از جمله

اکسیژن محلول ، فسفات ، نترات ، غلظت مواد محلول ، دمای آب ، هدایت الکتریکی ، سیلیکا و غلظت مواد معلق در اعماق مختلف مخزن در ۶ نوبت اندازه گیری گردید. جهت مشخص شدن نوع طعم و بو و همچنین اثبات جلبک به عنوان عامل اصلی ایجاد طعم و بو ، نمونه هایی برای تشخیص و اندازه گیری غلظت Geosmin به وسیله دستگاه طیف سنجی جرم ، کراماتو گرافی گاز (GC-MS) برداشته و در شرایط خاص نگهداری و به آزمایشگاه منتقل گردید [۸]. علاوه بر آن نمونه هایی نیز جهت تشخیص نوع جلبک موجود در دریاچه برداشت شد و برای عکس برداری از آن به آزمایشگاه منتقل گردید.

گام بعدی ایجاد ارتباط بین غلظت جلبک و مقدار غلظت Geosmin یا به عبارت دیگر ایجاد ارتباط بین غلظت جلبک و شدت طعم و بوی تولید شده می باشد . به همین منظور به صورت همزمان و در همان نقاطی که نمونه های اندازه گیری Geosmin و عکس برداری از نمونه جلبک فراهم شده بود ، نمونه های دیگری جهت اندازه گیری غلظت کلروفیل a- که بهترین شاخص غلظت جلبک است برداشت گردید . از طرف دیگر تغییر تراز آبگیری در هنگام شکوفایی جلبک بعنوان راه حلی برای رفع این معضل ، مورد مطالعه قرار گرفت. به همین منظور حداکثر عمقی که جلبکها با توجه به وجود نور قابلیت زیست و تکثیر را دارند (Photic zone) محاسبه گردید [۹]. ابزار به کار گرفته شده جهت به دست آوردن این عمق دستگاه نورسنجی می باشد که در اعماق آب میزان نور موجود را اندازه گیری می کند.

دستگاهها و تجهیزات به کار گرفته شده در این تحقیق بدین شرح می باشد : دستگاه Spectrometer مدل DR900 که جهت اندازه گیری فسفات ، نترات ، سیلیکا و غلظت مواد معلق در محل به کار گرفته شد. دستگاه (GC-MS) که متشکل از کراماتو گراف گازی مدل HP6890 مجهز به آشکار ساز طیف سنج جرمی HP5973 برای انجام جداسازی ، شناسایی و اندازه گیری غلظت Geosmin مورد استفاده قرار گرفت. جهت اندازه گیری غلظت کلروفیل a- ابتدائونونه ها آماده سازی و استخراج شدند، سپس بروش HPLC (High Performance Liquid Chromatography) غلظت کلروفیل a- اندازه گیری گردید. اندازه گیری نور در زیر آب به وسیله دستگاه نور سنج LI-COR مدل LI-1400 و سنسور 192SA بانجام رسید.

۳- مطالعه موردی: سد بوکان

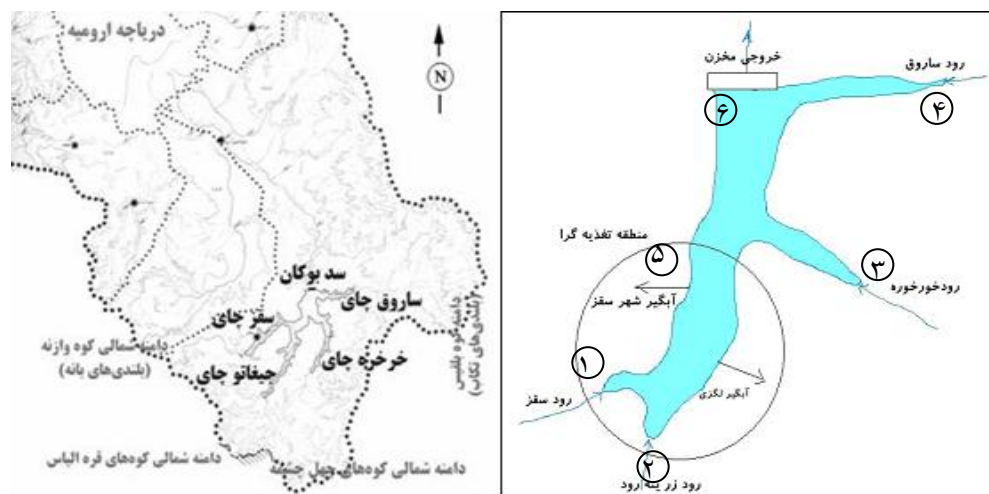
سد بوکان یا سد زرینه رود با ظرفیت ۶۵۰ میلیون متر مکعب ، در مختصات جغرافیایی ۳۲-۴۶ طول شرقی ۲۶-۳۶ عرض شمالی ، در ۸۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان میاندوآب و ۳۶ کیلومتری شرق شهر بوکان و ۲۶ کیلومتری شرق شهر سقز واقع است . ساروق چای ، جیغاتوی چای ، خرخره چای و چم سقز به مخزن آن سرازیر می گردند و آب خروجی از سد در پشت بند انحرافی نوروزلو در ۷۰ کیلومتری پایین دست سد آرام گرفته و جهت تامین آب شرب شهر تبریز و میاندوآب مورد استفاده قرار می گیرد . همچنین آب آشامیدنی شهرهای بوکان و سقز نیز از مخزن این سد برداشت می شود (شکل ۱).

آب آشامیدنی شهر سقز به وسیله یک سازه آبنگیر و ایستگاه پمپاژ از مخزن سد بوکان تصفیه شده و به وسیله خط لوله ای به طول ۱۴ کیلومتر به تصفیه خانه ای مجاور شهر انتقال داده می شود. طعم و بوی ناخوشایندی شبیه به بوی خاک در تمام مسیر آب رسانی به وسیله حس چشایی و بویایی به وضوح قابل تشخیص است. در بهمن ماه سال ۷۸ که تراز آب به علت خشکسالی به پایین ترین حد رسید، شدت طعم و بو افزایش یافت و باعث ایجاد نارضایتی مردم از کیفیت آب شد. مسئولین مربوطه تمهیداتی را جهت رفع مشکل در تصفیه خانه به مرحله اجرا گذاشتند که مهمترین آنها تغییر تراز آبنگیر، شستشوی فیلترها و مخزن ته نشینی و همچنین افزایش مقدار غلظت کلر در واحد گندزدایی بوده است. از مرداد ماه سال ۷۹ مطالعات میدانی توسط مرکز مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف بر روی مخزن سد بوکان و رودخانه سقز آغاز شد. ایستگاههایی که برای اندازه گیری پارامترهای کیفی در این مطالعات در نظر گرفته شده اند بر روی شکل (۱) نشان داده شده است. انتخاب ایستگاه ۱ تا ایستگاه ۴ جهت روشن ساختن سهم هر یک از ورودی ها در ورود مواد مغذی به مخزن بوده است. ایستگاه شماره ۵ که مقابل برج آبنگیر قرار دارد؛ بیانگر چگونگی ورود آب به همراه مواد مغذی و جلبک به تصفیه خانه آب شهر سقز می باشد. و در نهایت ایستگاه شماره ۶ که در پشت بدنه سد بوکان قرار دارد، جهت بررسی روند کاهش غلظت مواد آلی در طی مسیر ورودی چم سقز تا پشت بدنه سد در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تغذیه گرایی مخزن

در جدول شماره ۱ وضعیت تغذیه گرایی مخزن سد بوکان مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ارقام مندرج در جدول مشخص می شود که این مخزن در گروه دریاچه های تغذیه گرا قرار دارد [۱۰].
شکل ۲- الف چگونگی تغییرات فسفر کل در عمق آب در ایستگاه شماره ۵ (مقابل برج آبنگیر) و در زمانهای مختلف را نشان می دهد. مقادیر موجود در بازه ای بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرو گرم بر لیتر قرار گرفته اند.



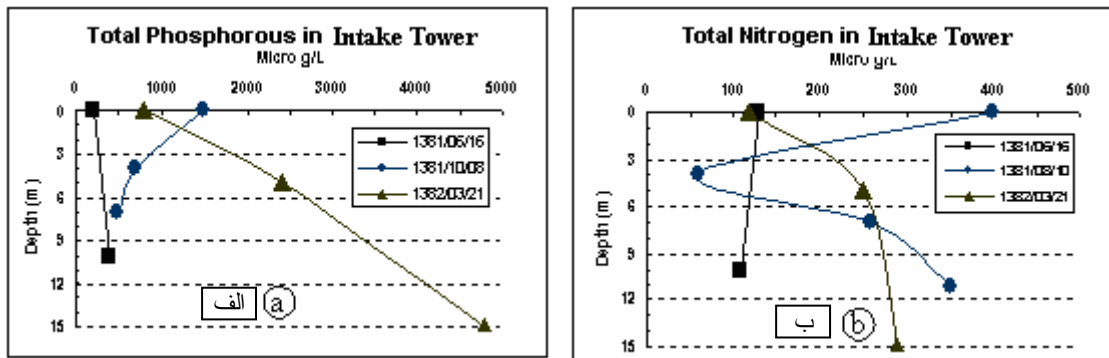
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد بوکان، ورودی ها و برج آبنگیر شهر سقز

جدول ۱: بررسی وضعیت تغذیه گرابی سد بوکان

شاخص تغذیه گرابی	دریاچه تغذیه گرا	دریاچه سد بوکان
میانگین غلظت فسفر (میکروگرم برلیتر)	۱۶-۳۸۶	۲۰-۴۱۰ (n*=۴۵)
میانگین غلظت نیتروژن (میکروگرم برلیتر)	۳۹۳-۶۱۰۰	۳۰۰-۳۷۰۰ (n=۴۴)
میانگین غلظت کلروفیل a- (میکروگرم برلیتر)	۳-۷۸	۳/۳-۲۷/۸ (n=۵)
میانگین عمق شفافیت سکی (متر)	۰/۸-۷/۰	۰/۸-۳/۳ (n=۱۸)

*: تعداد دفعات نمونه برداری

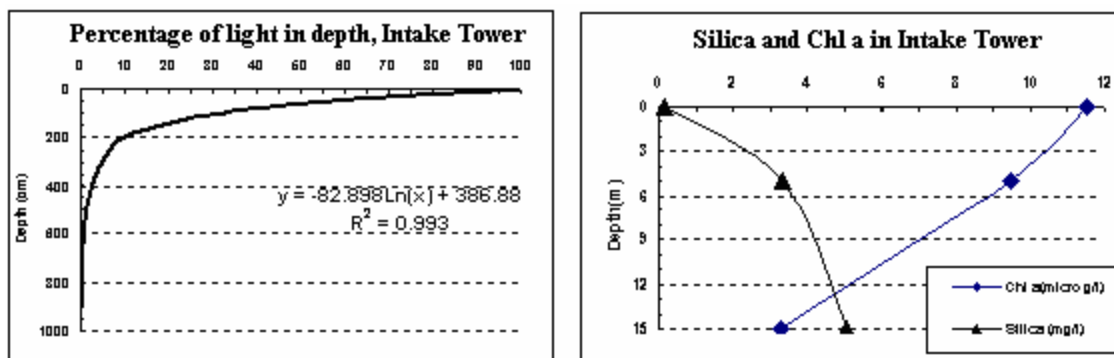
مقدار فسفر کل ورودی بوسیله رودخانه چم سقز بسیار بیشتر از این مقدار و در حدود ۱۰۲۰۰ میکروگرم بر لیتر بوده است. این مساله بیانگر مصرف فسفر بوسیله جلبک ها در مخزن می باشد. در شکل ۲-ب نیز تغییرات نیتروژن کل در عمق آب در ایستگاه برج آبگیر در فصول مختلف سال نشان داده شده است. مقادیر این نمودار بجز یک مورد در بازه ای بین ۳۰ تا ۲۵۰۰ میکروگرم بر لیتر قرار دارند. مقادیر نیتروژن ورودی بوسیله چم سقز ۲۴۲۰۰ میکروگرم بر لیتر بوده است و این روند نیز دلیل دیگری بر فعالیتهای شدید بیولوژیکی در مخزن می باشد. در تاریخ ۸۲/۳/۲۱ و در عمق ۱۴/۵ متری مقدار نیتروژن کل ۵۰۰ میکروگرم بر لیتر نشان داده شده است که بدلیل ورود رسوبات کف- که حاوی مواد آلی بیشتری می باشد- به داخل نمونه بردار عمقی بوده است.



شکل ۲: غلظت فسفر کل (الف) و غلظت نیتروژن کل (ب) در ایستگاه ۵ مورخ ۸۲/۳/۲۱

در شکل ۳ تغییرات عمقی سیلیکا و کلروفیل a- در ایستگاه ۵ (مقابل برج آبگیر) که در تاریخ ۸۲/۲/۳ برداشت شده مشاهده می شود. از آنجا که سیلیکا ماده ای ضروری برای رشد و تکثیر جلبک است، در سطح آب که فعالیتهای فتو سنتزی بعلت وجود نور حداکثر می باشد، مقدار این ماده به حداقل رسیده و غلظت کلروفیل a- حداکثر می باشد. با افزایش عمق بعلت کاهش میزان نور، فعالیتهای فتو سنتزی کاهش یافته و مقدار کلروفیل a- که شاخص این فعالیتهای می باشد نیز کاهش می یابد. همچنین مقدار کمتری از سیلیکا بوسیله جلبک مصرف شده و با افزایش عمق مقدار بیشتری از آن باقی می ماند.

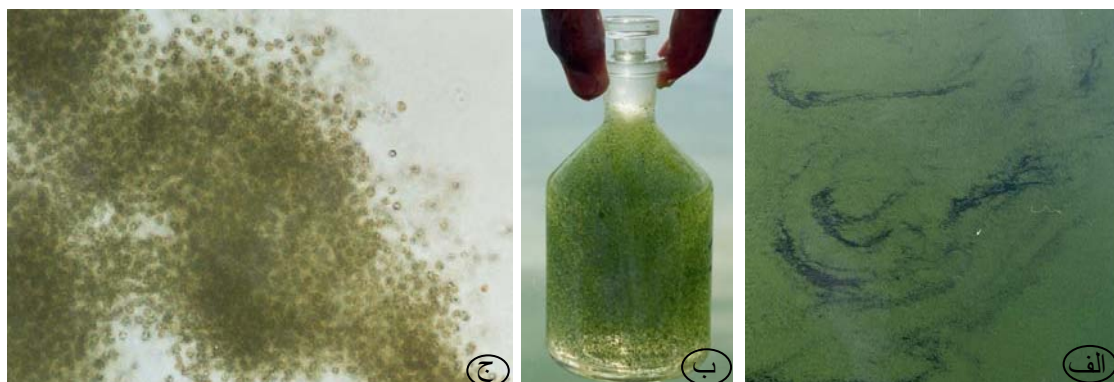
شکل ۴ تغییرات نور در عمق آب را نشان می دهد. با استفاده از نمودار، مقدار ضریب زوال نور (k_d) برابر m^{-1} (0.691) بدست می آید. مقدار عمق Photic zone یا عمقی که ۱ درصد از نور تابیده شده به سطح به آن نقطه می رسد، برابر ۵/۵ متر می باشد. نتیجه ای که از اندازه گیری این عمق حاصل می شود این است که میتوان آب را از دریچه ای که پایینتر از ۵/۵ متری سطح آب قرار دارد برداشت نمود و در نتیجه حداقل مقدار جلبک و یا ترکیب Geosmin را به تصفیه خانه و شبکه آب آشامیدنی انتقال داد.



شکل ۳: غلظت کلروفیل- a و سیلیکا، ایستگاه ۵، ۸۲/۳/۲۱ شکل ۴: درصد مقدار نور در عمق آب، ایستگاه ۵، ۸۲/۳/۲۱

۲-۴- شناسایی جلبک

نوع جلبک کلیه نمونه هایی که در آبان سال ۸۱ و در هنگام شکوفایی جلبک برداشت شد، با تطابق با عکسهای مندرج در کتاب Standard Methods مورد شناسایی قرار گرفت [۱۱]. این جلبک از نوع جلبک سبز-آبی بوده و نام آن Microcystis می باشند. این جلبک معمولترین جلبک در مخازن و آبهای شیرین بوده و حتی تا یک ماه نیز در آب پایدار می ماند و در شرایط خاصی که تا کنون بطور کامل مشخص نشده است، ترکیب آلی Geosmin را تولید می نماید. این ترکیب طعم و بویی شبیه به بوی خاک را در آب دریاچه ایجاد می کند. در شکل شماره ۵ تصاویر این جلبک در آب دریاچه و توسط میکروسکوپ نشان داده شده است [۱۲].

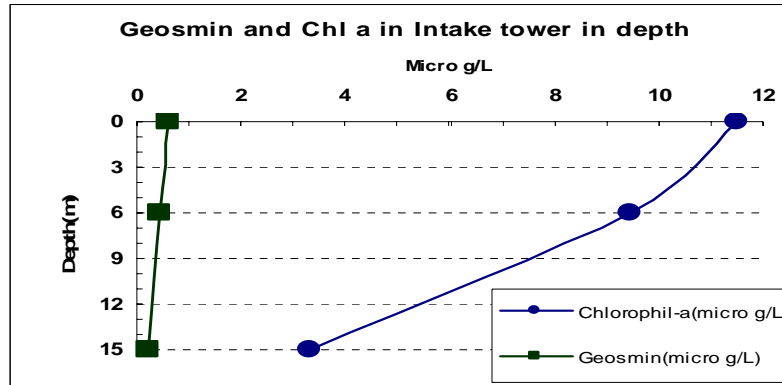


شکل ۵: نمایی از سطح آب سد بوکان (الف)، نمونه آب برداشت شده از عمق ۲ متری ایستگاه ۵ (ب) و عکس

برداری از نمونه جلبک بوسیله میکروسکوپ الکترونی (ج)

۳-۴- نتایج اندازه گیری Geosmin بوسیله دستگاه GC-MS

روش بکار گرفته شده جهت استخراج آلاینده های بوزا از نمونه های آب In-Two-Tube-Spme می باشد. در شکل شماره ۶ تغییرات غلظت Geosmin و کلروفیل-a در عمق، که در نمونه برداری ۸۲/۳/۲۱ در ایستگاه ۵ بدست آمده نشان داده شده است.



شکل ۶: غلظت ترکیب Geosmin و کلروفیل a در ایستگاه ۵ مورخ ۸۲/۳/۲۱

ارتباط مستقیمی بین غلظت کلروفیل-a (شاخص غلظت جلبک) و مقدار Geosmin (شاخص شدت طعم و بو مشاهده می گردد. مقدار Geosmin در ایستگاه ۱ (ورودی چم سقز) ۰/۸ میکروگرم در لیتر بوده و غلظت کلروفیل-a نیز برابر ۲۷/۸ میکروگرم در لیتر بدست آمده و در نهایت مقادیر غلظت در ایستگاه ۶ (پشت بدنه سد بوکان) بترتیب ۰/۵۰ و ۷/۳ میکروگرم در لیتر بوده است. بدین ترتیب با ورود مواد آلی بوسیله رودخانه چم سقز فعالیتهای بیولوژیکی افزایش یافته و شدت طعم و بو افزایش می یابد. با طی مسیری بتدریج از مقدار آلی کاسته شده و فعالیتهای بیولوژیکی نیز کاهش می یابند. جهت بررسی تاثیر فرایند کلرزنی بر شدت طعم و بو، به نمونه آب برداشت شده از ایستگاه ۱ مقدار ۲ میلیگرم بر لیتر کلر افزوده شده و غلظت Geosmin مجدداً اندازه گیری گردید. نتایج حاصله نشان می دهد که با افزودن کلر مقدار این ترکیب از ۰/۸ به ۱/۵ میکروگرم در لیتر افزایش یافته و در نتیجه تاثیر نامطلوبی بر شدت طعم و بو دارد. بعنوان راه حل این معضل، روشهای دیگری از جمله ازن زنی یا استفاده از کربن فعال در واحدهای تصفیه، که در کاهش شدت طعم و بو موثرترند پیشنهاد می گردد [۱۳].

۵- نتیجه گیری

غلظت بالای نیتروژن، فسفر و کلروفیل-a و عمق شفافیت سکی پایین نشان میدهد که دریاچه سد بوکان دریاچه ای تغذیه گرا می باشد. عامل ایجاد کننده طعم و بو در مخزن سد بوکان ترکیب آلی Geosmin می باشد که بوسیله نوعی جلبک سبز-آبی بنام Microcystis ایجاد می شود. غلظت این ترکیب در مواقعی از سال که شکوفایی جلبک رخ می دهد باعث افزایش غلظت جلبک بیشتر شده و سبب نارضایتی مردم از کیفیت آب می گردد. ارتباط

مستقیمی بین غلظت کلروفیل-a و غلظت Geosmin در آب مشاهده می شود. نحوه تغییرات پارامترهای کیفی دیگر در مخزن نیز حاکی از فعالیتهای شدید فتوسنتزی می باشد. با توجه به عمق Photic zone محاسبه شده می توان انتظار داشت که با برداشت آب از دریچه تحتانی در هنگام شکوفایی جلبک مقادیر کمتری از جلبک و در نتیجه ترکیب مولد طعم و بو به تصفیه خانه و شبکه آب آشامیدنی وارد شود. با توجه به اینکه کلرزنی باعث رهاسازی بیشتر ترکیب Geosmin از سلولهای جلبک می گردد، استفاده از فرآیندهای موثر تر تصفیه مانند استفاده از ازنزنی و کربن فعال بعنوان راه حلی جهت رفع مشکل طعم و بوی آب آشامیدنی شهر سقز پیشنهاد می گردد.

۶- مراجع

- [1] McGuire, M. J. , "Off-flavor as the consumer's measure of drinking water safety", Journal of Water Science and Technology, V. 31, No. 11, 1995, pp. 1-8.
- [2] Yagi, M., et al, " Odor problems in lake Biwa", Journal of Water Science and Technology, V. 15, 1983, pp. 311-321.
- [3] Persson, P. E., " A summary of problem areas in aquatic off-flavour research", Journal of Water Science and Technology, V. 25, No. 2, 1992, pp. 335-339.
- [4] Tsuchiya, Y and Matsumoto, A., " Identification of volatile metabolites produced by Blue-Green algae", Journal of Water Science and Technology, V. 20, No. 8/9, 1988, pp. 149-155.
- [5] Suffet, I. H. , et al, " The drinking water taste and odor wheel for the millennium: 2-Methylisoborneol, Journal of Water Science and Technology, V. 72, No. 6, 1999, pp. 1-13.
- [۶] مسعودی، صابر، " تشخیص و مدلسازی ترکیبات مولد طعم و بو در مخازن آب "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۲.
- [7] Izaguirre, G., et al., " Off-flavor problems in two reservoirs, associated with planktonic Pseudanabaena species", Journal of Water Science and Technology, V. 40, No 6, 1999, pp. 85-90.
- [8] Nollet, M. L., " Hand book of Water Analysis", 2000.
- [9] Stefan, G. H. , et al., " Model of light penetration in a turbid lake ", Water Resources Research, V. 19, NO. 1, 1983, pp. 109-120.
- [10] Wetzel, G. R., " Limnology: Lake and river ecosystem ", Third edition, 2001.
- [11] Clesceri, L. S., et al., "Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater", 20th Edition, 1998.
- [۱۲] ریاحی، حسین، " جلبک شناسی "، دانشگاه الزهراء، ۱۳۸۱.
- [13] McGuire, M. J. , "Advances in treatment processes to solve off-flavor problems in drinking water", Journal of Water Science and Technology, V. 40, No. 6, 1999, pp. 153-163.