

## بررسی الگوی انباشتگی زیستی فلز سنگین مس در بافت‌های جبه، پا و آبشش صدف دوکفه‌ای آب شیرین *Anodonta cygnea* (Linea, 1876) در دوره کوتاه‌مدت مواجهه

سهیل ایگدری\*<sup>۱</sup>، محمد سلکی<sup>۲</sup>، لعبت تقوی<sup>۳</sup>، فاتح معزی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران.

۳. استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران.

۴. دانشجوی دکتری گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۳/۲۱

### چکیده

مطالعه حاضر به منظور بررسی الگوی تجمع زیستی فلز سنگین مس در بافت‌های جبه، پا و آبشش دوکفه‌ای آب شیرین *Anodonta cygnea* در یک دوره کوتاه مدت مواجهه انجام شد. برای این منظور دوکفه‌ای‌ها در طول یک دوره ۹ روزی با غلظت  $125 \mu\text{g.L}^{-1}$  از عنصر مس در شرایط آزمایشگاهی مواجهه یافتند و سطوح این عنصر در روزهای سوم، ششم و نهم از دوره مواجهه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، محتوای مس در دوکفه‌ای‌های مواجهه نیافته در اندام‌های آبشش و پا به ترتیب بیشترین ( $10/35 \pm 2/12 \mu\text{g Cu/g DW}$ ) و کمترین ( $5/39 \pm 1/8 \mu\text{g Cu/g DW}$ ) مقدار را به خود اختصاص دادند. در هر سه اندام مورد مطالعه مقدار مس در پایان دوره مواجهه در مقایسه با سطوح این فلز در دوکفه‌ای‌های شاهد (مواجهه نیافته) به شکل معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) افزایش یافته بود. در بین اندام‌های مورد بررسی، بیشترین مقدار تجمع متعلق به آبشش و کمترین مقدار مربوط به جبه بود. بیشترین و کمترین مقادیر فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) نیز به ترتیب در آبشش و جبه مشاهده گردید. بر اساس نتایج می‌توان گفت که بررسی غلظت عنصر مس در اندام‌های داخلی دوکفه‌ای *A. cygnea* (به ویژه آبشش) شاخص مناسبی در ارتباط با بررسی مواجهه این دوکفه‌ای با آلودگی مس در زیستگاه‌های این موجود خواهد بود.

واژگان کلیدی: دوکفه‌ای‌ها، فلزات سنگین، شاخص زیستی، آلودگی.

## ۱. مقدمه

آلودگی فلزات سنگین یک معضل جهانی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه بوده و با توجه به امکان انباشتگی این آلاینده‌ها در پیکره موجودات آبی، امروزه نگرانی‌های زیادی در رابطه با حضور آن‌ها در محیط‌های آبی و آبیان خوراکی وجود دارد. این موضوع اهمیت بررسی تجمع زیستی و پایش سطوح این عناصر در بافت‌های موجودات آبی را دوچندان کرده است (Wang and Rainbow, 2008). به‌علاوه ارزیابی تجمع مواد شیمیایی در بافت‌های مختلف موجودات می‌تواند در درک اثرات و سرنوشت آن‌ها در این موجودات مفید واقع شود (Al-Sid-Cheikh *et al.*, 2013). چراکه برنامه‌های پایش زیستی که گونه‌های مختلفی از آبیان را به منظور بررسی آلودگی فلزات در محیط‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌دهند، نیازمند اطلاعات گسترده و درک مناسب‌تر درباره فرآیندها و اهمیت تجمع زیستی فلزات به‌منظور تحلیل داده‌های حاصل از چنین برنامه‌هایی می‌باشد (Wang and Rainbow, 2008).

مس یکی از عناصر فلزی سنگین است که برای متابولیسم کربوهیدرات‌ها و عملکرد بیش از ۳۰ آنزیم در مقادیر کم (۵ تا ۲۰ میکروگرم به ازای گرم وزن بدن) برای پستانداران، ماهی‌ها و نرم‌تنان مورد نیاز می‌باشد (Wright and Welbourn, 2002). این فلز همچنین در بسیاری از صنایع از جمله تهیه آلیاژها، جواهرات، محفظه‌های نگهداری مواد غذایی و نوشیدنی‌ها، لنت ترمز اتومبیل‌ها، کابل‌های انتقال برق و صنایع ریخته‌گری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Taub, 1997). در کنار موارد فوق، فعالیت‌های معدن‌کاوی مس و همچنین استفاده از آن به‌عنوان ترکیب ضدزیستی جهت از بین بردن جلبک‌ها، قارچ‌ها و نرم‌تنان نیز از مهم‌ترین راه‌های ورود این عنصر به توده‌های آبی هستند (Wright and Welbourn, 2002).

امروزه استفاده از موجودات آبی به‌عنوان شاخص پایش فلزات سنگین یک روند متداول است (Tuzen *et al.*, 2008) و در این راستا نرم‌تنان آبی با توجه به پتانسیل بالای آن‌ها در جذب فلزات سنگین به‌عنوان گروهی شاخص جهت پایش سطوح محیطی

این عناصر محسوب می‌شوند (Hamed and Emara, 2006; Abdallah and Abdallah, 2007). در این میان دوکفه‌ای‌ها با توجه به عملکرد فیلتراسیونی و همچنین تماس مستقیم با بخش‌های آلوده شده آب و رسوبات، توان تجمع مقادیر بسیار بالایی از این عناصر را دارند، به طوری که غالباً سطوحی بالاتر از آن‌چه را که در رسوبات و محیط آبی پیرامونی آن‌ها وجود دارد، در خود دارند (Fournier *et al.*, 2001; van Duren *et al.*, 2006; Karouna-Renier *et al.*, 2007).

از این رو مطالعه حاضر با هدف بررسی الگوی تجمع زیستی عنصر مس (Cu) در اندام‌های پا، جبه و آبشش در دوکفه‌ای آب‌شیرین *Anodonta cygnea* (Linea, 1876) در مواجهه با غلظت تحت‌کشنده این عنصر در محیط آزمایشگاهی در یک دوره کوتاه‌مدت ۹ روزه به اجرا درآمد. این دوکفه‌ای آب‌شیرین متعلق به خانواده Unionidae، از مهمترین بی‌مهرگان کفزی پیکره‌های آبی نواحی شمالی کشور به حساب می‌آید (Pourang *et al.*, 2010; Moëzzi *et al.*, 2017) و با توجه به حساسیت آن در مواجهه با شرایط نامساعد محیطی، به‌عنوان گونه‌ای مطلوب برای پایش استرس‌های ناشی از حضور آلاینده‌های شیمیایی در محیط‌های آبی مطرح شده است (Moëzzi *et al.*, 2013a, b). بنابراین نتایج این تحقیق می‌تواند با فراهم آوردن اطلاعات پایه‌ای، به درک بهتر استفاده از این موجود آبی برای پایش آلودگی منابع آبی شمال کشور به فلز سنگین مس منجر شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. نمونه‌برداری

تعداد ۷۰ عدد دوکفه‌ای با دامنه طولی cm ۹/۸±۲/۷ و وزن g ۶۹/۷±۹/۳ در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۴ از منطقه سمسکنده ساری (36°48'52"N, 53°6'43"E) (حوضه رودخانه تجن) در استان مازندران برداشت، به‌صورت زنده به آزمایشگاه منتقل و در مخازن شیشه‌ای ۱۰۰ لیتری استقرار داده شدند. برای پرکردن مخازن از آب شهری کلرزدایی شده استفاده گردید (T=12±2°C; pH=7/2±0/3). به‌منظور تطابق با شرایط آزمایشگاهی، نمونه‌ها به مدت

۱۴ روز بدون غذادهی و در تاریکی نگهداری شدند.

## ۲.۲. طرح آزمایش

تعداد ۶۰ عدد دوکفه‌ای در ۴ گروه مساوی (هر گروه دارای ۱۵ نمونه) تقسیم شدند (یک گروه به عنوان شاهد و سه گروه مواجهه‌ای). بر اساس مطالعات انجام شده، غلظت مواجهه‌ای دوکفه‌ای‌ها با مس در سطح ۱۲۵ میکروگرم در لیتر (کمتر از غلظت کشنده) تعیین گردید (Naimo, 1995). گروه‌های مواجهه‌ای به مدت ۹ روز در مواجهه با غلظت ۱۲۵  $\mu\text{g/l}$  از عنصر مس قرار گرفتند. به منظور تهیه محلول‌های اصلی فلزی از نمک  $\text{CuSO}_4$  (Merck) استفاده شد. به منظور حصول مواجهه با غلظت مورد نظر در کل دوره مواجهه، آب مخازن مواجهه‌ای هر ۲۴ ساعت با توده آبی جدید دارای غلظت ۱۲۵  $\mu\text{g/l}$  جایگزین گردید. در ابتدای آزمایش به منظور تعیین سطوح اولیه عنصر مس در اندام‌های هدف شامل پا، جبه و آبشش از ۳ عدد دوکفه‌ای از هر تیمار نمونه‌برداری به عمل آمد. در روزهای سوم، ششم و نهم از دوره مواجهه نیز جهت تعیین تغییرات میزان عنصر مس در بافت‌های هدف دوکفه‌های مواجهه یافته، از تعداد ۳ نمونه از هر تیمار نمونه‌برداری صورت گرفت. همچنین به منظور اندازه‌گیری غلظت مس در آب مخازن مواجهه نیز نمونه‌های آب در روزهای سوم، ششم و نهم برداشت گردید.

## ۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آنالیز میزان مس

### در آب و بافت‌ها

در هر نمونه‌برداری از توده آبی مخازن مواجهه-ای، حجم ۲۰ ml از آب برداشت و پس از صاف کردن با کاغذ صافی واتمن، در ظروف نمونه‌برداری حاوی ۵ ml اسید نیتریک با  $\text{pH} < 2$  در دمای  $4^\circ\text{C}$  در محیط تاریک نگهداری شدند (Macrovecchio, 2007). برای سنجش میزان تجمع فلز مس در بافت‌های دوکفه‌ای، پس از جدا کردن پوسته‌های دوکفه‌ای‌ها، توده احشایی آن‌ها جدا گردید و توده‌های بافتی اندام-های پا، جبه و آبشش با استفاده از تیغ جراحی از توده احشایی جدا شده و توزین گردیدند. توده‌های بافتی به‌دست آمده، جهت خشک کردن به مدت ۴۸ ساعت در دمای  $75^\circ\text{C}$  در آون نگهداری شدند. پس از خشک

شدن نمونه‌ها، مجدداً توزین انجام گردید. سپس جهت عصاره‌گیری از نمونه‌ها، بافت‌های خشک شده در اسید نیتریک ۷۵ درصد برای مدت ۲۴ ساعت بدون حرارت هضم شده و در ادامه جهت تبخیر اسید نیتریک به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شدند و سپس توده خشک به‌دست آمده مجدداً در اسید نیتریک ۰/۵ درصد به حالت تعلیق درآمدند و تا زمان اندازه‌گیری مقدار فلز در دمای  $4^\circ\text{C}$  نگهداری شدند (Raftopoulou and Dimitriadis, 2011). سطوح فلز مس در نمونه‌های آب و عصاره‌های بافتی با استفاده از دستگاه ICP-MS (VG PlasmaQuad 3-VG Elemental, Winsford, Cheshire, UK) اندازه‌گیری شد. تمامی نمونه‌های مورد بررسی پیش از آنالیز با دستگاه ICP با کاغذ استات سلولز  $0.22 \mu\text{m}$  مجدداً صاف شدند.

## ۴.۲. محاسبه فاکتور تغلیظ زیستی (BCF)

فاکتور تغلیظ‌زیستی (BCF) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Moloukhia and Sleem, 2011):

$$\text{BCF} = \frac{\text{غلظت فلز}}{\text{غلظت فلز در هر گرم وزن تر}} \quad \text{در هر گرم آب}$$

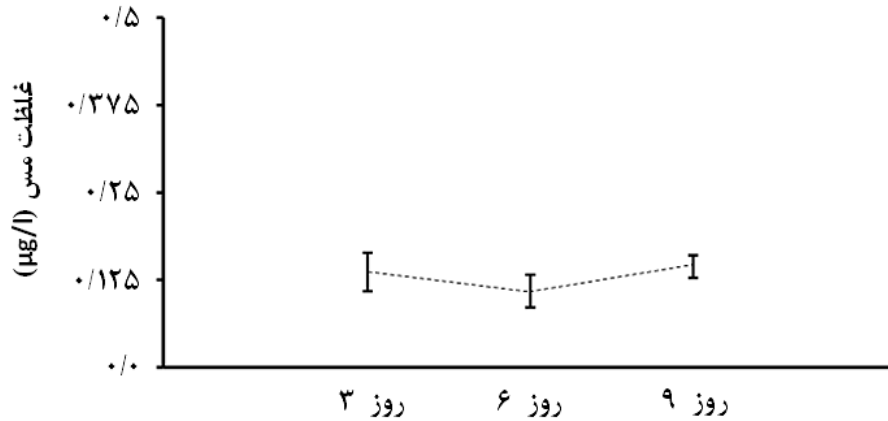
## ۵.۲. آنالیزهای آماری

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی گردید. بررسی معنی-دار بودن تفاوت‌ها بین غلظت‌های مس در بافت‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) انجام شد. سطح معنی‌داری تفاوت‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۱۹) و رسم نمودارها در نرم‌افزار Excel (Microsoft Office 2013) انجام شد.

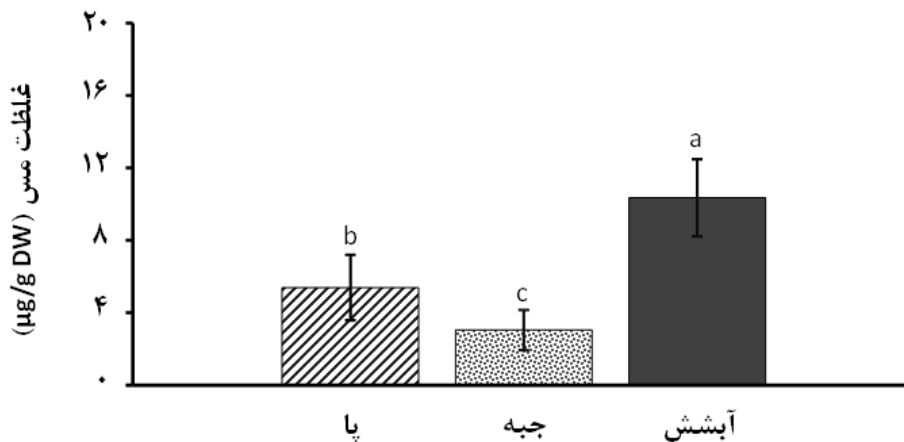
## ۳. نتایج

### ۱.۳. غلظت‌های اندازه‌گیری شده فلز مس در آب

نتایج غلظت‌های اندازه‌گیری شده مس در آب تیمارها در طول دوره مواجهه در شکل ۱ نشان داده



شکل ۱ - غلظت‌های مواجهه‌ای اندازه‌گیری شده فلز مس در آب (خطوط نشان دهنده انحراف معیار، غلظت‌های مواجهه‌ای عنصر مس در ریزهای سوم، ششم و نهم است).



شکل ۲ - سطوح اولیه فلز مس در بافت‌های پا، جبه و آیشش دوکفه‌ای *Anodonta cygnea* مواجهه نیافته (خطوط نشان‌دهنده انحراف معیار است. حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) است).

جدول ۱ - مقادیر (میانگین  $\pm$  انحراف معیار) فاکتور انباشتگی زیستی (BCF) مربوط به فلز مس در اندام‌های پا، جبه و آیشش دوکفه‌ای‌های *Anodonta cygnea* مواجهه یافته با فلز مس. حروف متفاوت، نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) در ستون‌ها است.

روز سوم	روز ششم	روز نهم	
۱۸/۶۹ $\pm$ ۳/۳۹ <sup>b</sup>	۳۸/۵۷ $\pm$ ۸/۳۹ <sup>b</sup>	۳۸/۰۰ $\pm$ ۱۶/۱۵ <sup>b</sup>	پا
۴/۳۳ $\pm$ ۱/۵۸ <sup>c</sup>	۱۴/۸۶ $\pm$ ۲/۳۶ <sup>c</sup>	۱۵/۰۵ $\pm$ ۵/۵۳ <sup>c</sup>	جبه
۳۴/۵۳ $\pm$ ۱۲/۰۴ <sup>a</sup>	۵۰/۸۹ $\pm$ ۴/۸۹ <sup>a</sup>	۶۷/۵۶ $\pm$ ۱۶/۱۲ <sup>a</sup>	آیشش

شده است. تفاوت معنی‌داری بین غلظت‌های اندازه-گیری شده از مقدار ۱۲۵ µg/l مشاهده نشد.

### ۲.۳. سطوح اولیه فلز مس در اندام‌های مورد

#### مطالعه

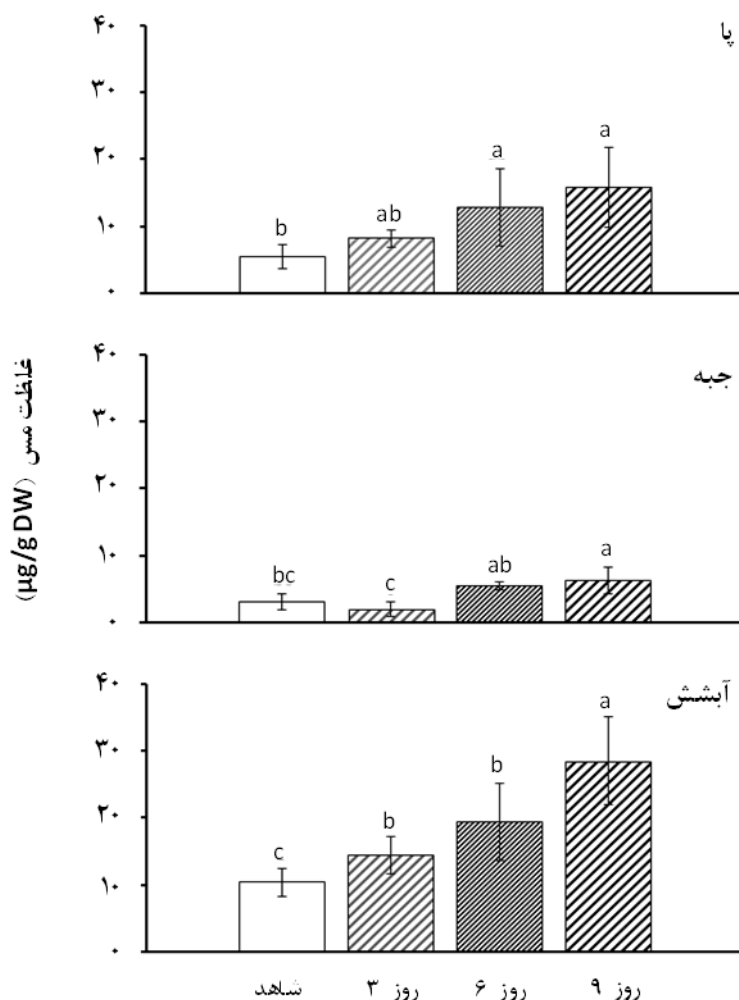
سطوح اولیه فلز مس در اندام‌های مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. بین مقادیر فلز مس در این اندام‌ها تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) وجود داشت به طوری که بیشترین مقدار مربوط به آیشش

مقدار کمترین مقدار مربوط به پا ( $5/39 \pm 1/8$  µg Cu/g DW) بود. غلظت مس در جبه نیز برابر با ( $5/39$  µg Cu/g DW) بود.  $3/045 \pm 1/11$

### ۳.۳. مقادیر تجمع یافته مس در اندام‌های مورد

#### مطالعه در طی دوره مواجهه

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، غلظت‌های مس در پا در روز نهم ( $67/56$  µg Cu/g DW)



شکل ۳- سطوح فلز مس اندازه‌گیری شده در بافت‌های پا، جبه و آبشش دوکفه‌ای *Anodonta cygnea* در روزهای ۳، ۶ و ۹ از دوره مواجهه. خطوط نشان‌دهنده انحراف معیار است. حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) است.

وجود داشت به طوری که بیشترین مقادیر BCF در کل دوره مواجهه متعلق به آبشش و کمترین مقادیر نیز مربوط به BCF برای جبه بود.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

##### ۴.۱. غلظت‌های مواجهه‌ای اندازه‌گیری شده در

##### آب مخازن

غلظت‌های اندازه‌گیری شده مس در آب مخازن نشان داد که مواجهه با غلظت مورد نظر ( $125 \mu\text{g/l}$ ) در تمامی مخازن صورت گرفته و تفاوت معنی‌داری از این غلظت در غلظت‌های مواجهه‌ای مورد آزمایش در طول کل دوره وجود نداشت.

##### ۴.۲. سطوح پایه فلز مس در اندام‌های مورد

##### مطالعه

به صورت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) بیشتر از غلظت این عنصر در پای دوکفه‌ای‌های مواجهه‌نیافته بود. در جبه، غلظت مس در پایان دوره مواجهه در روز نهم ( $6/27 \pm 2/04 \mu\text{g Cu/g DW}$ ) افزایش معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) را در مقایسه با دوکفه‌ای‌های مواجهه نیافته نشان داد. در آبشش نیز افزایش قابل توجهی در طول دوره مواجهه در محتوای فلز مس مشاهده گردید به طوری که مقدار مس در روز نهم ( $\mu\text{g Cu/g DW}$ )  $28/5 \pm 6/58$  به صورت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) بالاتر از روزهای قبل و همچنین نمونه‌های مواجهه نیافته بود.

##### ۴.۳. مقادیر فاکتور انباشتگی زیستی (BCF)

جدول ۱ مقادیر BCF مربوط به فلز مس در اندام‌های مورد مطالعه را در دوره مواجهه نشان می‌دهد. تفاوت‌های معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) بین سطوح BCF محاسباتی متعلق به اندام‌های مورد مطالعه

میزان تجمع فلزات در اندام‌های مختلف موجودات دوکفه‌ای متفاوت است. در برخی از مطالعات، صرف‌نظر از تفاوت در مسیر مواجهه با فلزات سنگین، بیشترین جذب در آبشش ثبت شده است (Viarengo *et al.*, 1981; Pourang *et al.*, 2010; Al-Subiai *et al.*, 2011). نتایج برخی از مطالعات (Pourang *et al.*, 2011; Fukunaga and Anderson, 2010) نشان داده است که جذب فلزات مختلف در گونه‌های مختلف دوکفه‌ای متفاوت است. همچنین میزان تجمع هر فلز در بافت‌های مربوط به اندام‌های مختلف متفاوت بوده، به طوری که بیشترین غلظت‌های مس در ماسل *Mytilus edulis* در آبشش‌ها و غده گوارشی دیده شده است (Viarengo *et al.*, 1981; Regoli and Principato, 1995).

مدل‌های مختلفی در ارتباط با روندهای جذب و تجمع فلزات سنگین در موجودات آبی ارائه شده است. در مطالعه حاضر، محتوای بافتی فلز مس در اندام‌های مورد بررسی نشان‌دهنده یک الگوی افزایشی در کل دوره مواجهه بود. این در حالی است که غلظت مس در توده آبی مخازن با توجه به جایگزینی کامل در هر ۲۴ ساعت، تقریباً ثابت بود. چنین روندی از تجمع را می‌توان به ضروری بودن عنصر مس و پتانسیل سمیت کمتر این عنصر نسبت داد (Banfalvi, 2011). این در حالی است که دفع و پس‌دهی فلزات تجمع‌یافته در بافت‌های مختلف دوکفه‌ای‌ها در طول دوره‌های مواجهه کوتاه و بلندمدت در نتیجه سمیت یا تخریب‌های بافتی ناشی از تجمع آن‌ها در مطالعات متعدد گزارش شده است (Phillips and Rainbow, 1989; Abdullah *et al.*, 2007; Moëzzi *et al.*, 2013a, b).

#### ۴.۴. مقادیر BCF

پتانسیل تجمع زیستی در زیست‌مندان آبی به‌طور معمول با استفاده از نسبت غلظت‌های شیمیایی در بافت موجود زنده به غلظت‌های مواجهه‌ای آلاینده به‌صورت فاکتورهای انباشتگی زیستی (BCF) بیان می‌گردد. سطوح BCF در گونه‌های مختلف و برای عناصر مختلف بسیار متفاوت است (Abdullah *et al.*, 2007). گفته شده است که میزان BCF برای عناصر فلزی ضروری نظیر مس در مقایسه با عناصر

غلظت‌های عناصر مختلف در نرم‌تنان بین گونه‌های مختلف به دلیل تفاوت در ظرفیت و توانایی خاص گونه‌ها در تنظیم یا تجمع آن‌ها متفاوت است (Abdullah *et al.*, 2007). مطالعات متعددی در رابطه با تجمع زیستی فلزات سنگین در دوکفه‌ای‌ها و سایر نرم‌تنان صورت گرفته و نشان داده‌اند که این موجودات قابلیت تجمع مقادیر بالایی از فلزات سنگین را در خود دارند (De Forest *et al.*, 2007; Metian *et al.*, 2009; Fukunaga and Anderson, 2011; Molokhia and Sleem, 2011). در مطالعه حاضر، سطوح اولیه فلز مس تفاوت‌هایی را بین اندام‌ها نشان داد که بیانگر متفاوت بودن ظرفیت اندام‌های مختلف در جذب و تجمع این فلز در شرایط طبیعی است. میزان تجمع فلزات سنگین بسته به گونه و نوع فلز سنگین در اندام‌های مختلف نرم‌تنان متغیر می‌باشد (Paez-Osuna *et al.*, 2000; Pourang *et al.*, 2010; Fukunaga and Anderson, 2011; Waykar and Desmukh, 2012). دوکفه‌ای‌ها قادرند با وجود غلظت‌های پایین عناصر ضروری در محیط پیرامونی خود، به منظور برطرف کردن نیازهای متابولیک این عناصر را تا مقادیر بالایی در بافت‌های خود ذخیره نمایند (Metian *et al.*, 2009). بیشترین مقدار محتوای اولیه فلز مس در بین اندام‌های مورد مطالعه متعلق به آبشش بود و در دو اندام دیگر مقادیر کمتری وجود داشت. محتوای کمتر مس در اندام‌های جبهه و پا در برخی مطالعات دیگر گزارش شده است (Metian *et al.*, 2009; Pourang *et al.*, 2010).

#### ۳.۴. مقادیر تجمع یافته مس در اندام‌های مورد

##### مطالعه

توانایی تجمع‌زیستی فلزات سنگین در دوکفه‌ای‌ها و سایر نرم‌تنان در مطالعات مختلف مورد اشاره قرار گرفته است (Metian *et al.*, 2009; Fukunaga and Anderson, 2011; Molokhia and Sleem, 2011). در مطالعه حاضر، محتوای بافتی فلز مس در تمامی اندام‌های مورد بررسی در طول دوره مواجهه به شکل معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین مقدار افزایش مس در آبشش و کمترین مقدار افزایش نیز در جبهه اتفاق افتاده بود. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده (Regoli and Principato, 1995)،

BCF بین گونه‌های مختلف تا حد زیادی متغیر بوده و عموماً رابطه عکس با غلظت‌های مواجهه‌ای دارد. Mc Gear و همکاران (۲۰۰۳) یک رابطه معکوس بین BCF و غلظت‌های مواجهه‌ای را گزارش دادند به طوری که بیشترین مقدار BCF در غلظت‌های مواجهه کمتر (یا به عبارتی پتانسیل سمیت کمتر) و در غلظت‌های بالا، کمترین مقدار BCF به دست می‌آید. بر اساس نتایج به دست آمده، مواجهه کوتاه مدت با غلظت پایین از عنصر مس می‌تواند سطوح این عنصر را در اندام‌های آبشش، پا و جبهه در دوکفه‌ای آب شیرین *Anodonta cygnea* افزایش داده و آبشش با توجه به بیشترین میزان تجمع این فلز، شاخص‌ترین اندام در رابطه با تجمع این عنصر بوده است.

فلزی غیرضروری همچون کروم و سرب به مراتب کمتر است (Rogival *et al.*, 2007). مقادیر BCF محاسبه شده در مطالعه حاضر بزرگ‌تر از ۱ بود که نشان‌دهنده توان تجمعی بالای هر سه اندام مورد مطالعه برای عنصر مس بوده است. بیشترین و کمترین مقادیر فاکتور تغلیظ زیستی به ترتیب متعلق به آبشش و جبهه بود. این در حالی است که بیشترین و کمترین سطوح پایه عنصر مس نیز در بین اندام‌های مورد بررسی به ترتیب متعلق به آبشش و جبهه بوده است. بر این اساس می‌توان گفت که توانایی جذب و تجمع فلز مس به عنوان یک عنصر ضروری در اندام‌های مختلف متفاوت و تا حدودی اختصاصی است (Abdullah *et al.*, 2007). مطالعات انجام شده نشان داده است که مقادیر

## References

- Abdullah, M.H., Sidi, J., Aris, A.Z., 2007. Heavy metals (Cd, Cu, Cr, Pb, and Zn) in *Meretrix meretrix* roding, water and sediments from estuaries in Sabah, North Borneo. *International Journal of Environmental and Science Education*, 2(3), 69-74.
- Al-Sid-Cheikh, M., Rouleau, C., Pelletier, E., 2013. Tissue distribution and kinetics of dissolved and nanoparticulate silver in Iceland scallop (*Chlamys islandica*). *Marine Environmental Research*, 86, 21-28.
- Al-Subiai, S.N., Moody, A.J., Mustafa, S.A., Jha, A.N., 2011. A multiple biomarker approach to investigate the effects of copper on the marine bivalve mollusc *Mytilus edulis*. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 74, 1913-1920.
- Banfalvi, G., 2011. Cellular effects of heavy metals. Springer, London, U.K., 348p.
- De Forest, D.K., Brix, K.V., Adams, W.J., 2007. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: the inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration. *Aquatic Toxicology*, 84, 236-246.
- Fournier, M., Pellerin, J., Clermont, Y., Morin, Y., Brousseau, P., 2001. Effects of in vivo exposure of *Mya arenaria* to organic and inorganic mercury on phagocytic activity of haemocytes. *Toxicology*, 161, 210-211.
- Fukunaga, A., Anderson, M.J., 2011. Bioaccumulation of copper, lead, zinc by the bivalve *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 396, 244-252.
- Hamed, M.A., Emara, A.M., 2006. Marine molluscs as biomonitors for heavy metal levels in the Gulf of Suez, Red Sea. *Journal of Marine Systems*, 60(3-4), 220-234.
- Karouna-Renier, N.K., Snyder, R.A., Allison, J.G., Wagner, M.G., Rao, K.R., 2007. Accumulation of organic and inorganic contaminants in shellfish collected in estuarine waters near Pensacola, Florida: contamination profiles and risks to human consumers. *Environmental Pollution*, 145(2), 474-488.
- Macrovecchio, J.E., Botte, S.E., Freije, R.H., 2007. Heavy metals, major metals, trace elements. In: Nolle, L.M.L. (eds.), Handbook of water analysis. CRC Press, Taylor and Francis Group., pp. 275-312.
- Al-Subiai, S.N., Moody, A.J., Mustafa, S.A., Jha, A.N., 2011. A multiple biomarker approach to investigate the effects of copper on the marine bivalve mollusc *Mytilus edulis*. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 74, 1913-1920.
- Banfalvi, G., 2011. Cellular effects of heavy metals. Springer, London, U.K., 348p.
- De Forest, D.K., Brix, K.V., Adams, W.J., 2007. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: the inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration. *Aquatic Toxicology*, 84, 236-246.
- Fournier, M., Pellerin, J., Clermont, Y., Morin, Y., Brousseau, P., 2001. Effects of in vivo exposure of *Mya arenaria* to organic and inorganic mercury on phagocytic activity of haemocytes. *Toxicology*, 161, 210-211.

- Fukunaga, A., Anderson, M.J., 2011. Bioaccumulation of copper, lead, zinc by the bivalve *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 396, 244-252.
- Hamed, M.A., Emara, A.M., 2006. Marine molluscs as biomonitors for heavy metal levels in the Gulf of Suez, Red Sea. *Journal of Marine Systems*, 60(3-4), 220-234.
- Karouna-Renier, N.K., Snyder, R.A., Allison, J.G., Wagner, M.G., Rao, K.R., 2007. Accumulation of organic and inorganic contaminants in shellfish collected in estuarine waters near Pensacola, Florida: contamination profiles and risks to human consumers. *Environmental Pollution*, 145(2), 474-488.
- Macrovecchio, J.E., Botte, S.E., Freije, R.H., 2007. Heavy metals, major metals, trace elements. In: Nollet, L.M.L. (eds.), *Handbook of water analysis*. CRC Press, Taylor and Francis Group., pp. 275-312.
- Metian, M., Wamau, M., Hedouin, L., Bustamante, P., 2009. Bioaccumulation of essential metals (Co, Mn and Zn) in the king scallop *Pecten maximus*: seawater, food and sediment exposures. *Marine Biology*, 156, 2063-2075.
- Moëzzi, F., Poorbagher, H., Ghadermarzi, A., Parvizi, F., Benam, S., 2017. Variation in the shell form of the swan mussel, *Anodonta cygnea* (Linea, 1876) in response to water current. *International Journal of Aquatic Biology*, 5(4), 275-281.
- Moëzzi, F., Javanshir, A., Eagderi, S., Poorbagher, H., Sallaki, M., 2013a. Evaluation of bivalve clearance rate (CR) as a physiological indicator of heavy metal toxicity in freshwater mussel, *Anodonta cygnea* (Linea, 1876). *Scientific Journal of Animal Sciences*, 2 (4), 89-94.
- Moëzzi, F., Javanshir, A., Eagderi, S., Poorbagher, H., 2013b. The study of zinc bioaccumulation in internal organs of swan mussel, *Anodonta cygnea* (Linea, 1876). *Scientific Journal of Animal Sciences*, 2 (9), 242-246.
- Moloukhia, H., Sleem, S., 2011. Bioaccumulation, fate and toxicity of two heavy metals common in industrial wastes in two aquatic molluscs. *Journal of American Science*, 7(8), 459-464.
- Naimo, T.J., 1995. A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels. *Ecotoxicology*, 4, 341-362.
- Paez-Osuna, F., Ochoa-Izaguirre, M.J., Bojorquez-Leyva, H., Michel-Reynoso, I.L., 2000. Macroalgae as biomonitors for metal availability in coastal lagoons from the subtropical Pacific of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(6), 846-851.
- Phillips, D.J.H., Rainbow, P.S., 1989. Strategies of trace metal sequestration in aquatic organisms. *Marine Environmental Research*, 28(1-4), 207-210.
- Pourang, N., Richardson, C.A., Mortazavi, M.S., 2010. Heavy metal concentrations in the soft tissues of swan mussel (*Anodonta cygnea*) and surficial sediments from Anzali wetland, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163, 196-213.
- Raftopoulou, E. K., Dimitriadis, V. K., 2011. Comparative study of the accumulation and detoxification of Cu (essential metal) and Hg (nonessential metal) in the digestive gland and gills of mussels *Mytilus galloprovincialis*, using analytical and histochemical techniques. *Chemosphere*, 83(8), 1155-1165.
- Regoli, F., Principato, G., 1995. Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: implications for the use of biochemical biomarkers. *Aquatic Toxicology*, 31, 143-164.
- Rogival, D., Scheirs, J., Blust, R., 2007. Transfer and accumulation of metals in a soil-diet-wood mouse food chain along a metal pollution gradient. *Environmental Pollution*, 145, 516-528.
- Taub, F.B., 1997. Unique information contributed by multispecies systems: examples from the standardized aquatic microcosm. *Ecological Applications*, 7(4), 1103-1110.
- Tuzen, M., Saygi, K.O., Soylak, M., 2008. Solid phase extraction of heavy metal ions in environmental samples on multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 632-639.
- Van Duren, L.A., Herman, P.M.J., Sandee, A.J.J., Heip, C.H.R., 2006. Effects of mussel filtration activity on boundary layer structure. *Journal of Sea Research*, 55, 3-14.
- Viarengo, A., Zanicchi, G., Moore, M.N., Orunesu, M., 1981. Accumulation and detoxification of copper by mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam: a study of the subcellular distribution in the digestive gland cells. *Aquatic Toxicology*, 1, 147-157.
- Wang, W.X., Rainbow, P.S., 2008. Comparative approaches to understand metal bioaccumulation in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 148, 315-323.
- Waykar, B., Deshmukh, G., 2012. Evaluation of bivalves as bioindicators of metal pollution in freshwater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88, 48-53.



Wright, D.A., Welbourn, P., 2002. Environmental toxicology- Cambridge environmental chemistry series 11. Cambridge University Press. 657 p.