

تأثیر گروه سنی، جنسیت و شاخص‌های وضعیت بدن در غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز

مریم قهرمان پوری^۱؛ آزیتا کوشافر^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار، گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

(تاریخ دریافت ۰۰/۰۱/۲۱-تاریخ پذیرش ۰۰/۰۷/۱۰)

چکیده:

از میان گونه‌های پرندگان آبی، اردک سرسبز *Anas platyrhynchos* مدل زیستی مناسبی برای تحقیقات سم‌شناسی اکولوژیکی فلزات سنگین به شمار می‌رود. از بین اندام‌ها، استفاده از پرها به‌عنوان اندیکاتور زیستی و نوعی روش غیرکشنده و غیرمخرب در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین بسیار متداول است. با توجه به تناقض نتایج تحقیقات مختلف در رابطه بین غلظت فلزات سنگین با سن، جنس و وضعیت‌های مختلف بدنی پرندگان، این تحقیق انتخاب شده است. نمونه‌برداری از ۳۰ اردک سرسبز در پاییز و زمستان ۱۳۹۸ در دامگاه فریدون‌کنار با روش زنده‌گیری دوما انجام گرفت. نمونه‌ها براساس رنگ منقار و شاهپره‌های بال و پر به نر و ماده و بالغ و نابالغ تفکیک شدند و پارامترهای طول تارس، طول بال، طول دم، طول سر، طول بدن و وزن بدن به‌عنوان شاخص‌های وضعیت بدن اندازه‌گیری شدند. سپس با نیم گرم از پر قسمت‌های سینه‌ای، هضم نمونه‌ها با اسید نیتریک و هیدروژن پراکسید انجام گرفت و فلزات سنگین به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مدل MP-AES 4100 قرائت شد. نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌دار آماری در غلظت فلزات سنگین بین جنس‌های نر و ماده مشاهده نشد (کادمیوم: $P=0/558$ و سرب: $P=0/215$). این اختلاف غلظت فلزات بین بالغان و نابالغان نیز از نظر آماری معنی‌دار نبود (کادمیوم: $P=0/673$ و سرب: $P=0/214$). پارامترهای وضعیت بدن (طول دم، طول بدن و وزن بدن) نیز اثر معنی‌داری بر غلظت کادمیوم (به‌ترتیب $P=0/385$ ، $P=0/299$ ، $P=0/547$) و سرب (به‌ترتیب $P=0/554$ ، $P=0/185$ ، $P=0/377$) در بافت پر نداشته‌اند. تحقیق حاضر نشان داد که غلظت سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز وابسته به جنس، گروه‌های سنی و شاخص‌های وضعیت بدن نیست. تحقیقات طولانی‌مدت، بهتر می‌تواند این اثرها و سازوکارهای آنها را در بافت پر گونه‌های پرندگان مشخص کند.

کلید واژگان: آلودگی فلزات سنگین، پر سینه‌ای، پرندگان آبی، شاخص زیستی، فریدون‌کنار

۱. مقدمه

در بین جمعیت‌های پرندگان به خصوص گونه‌های آبی، اردک سرسبز مدل زیستی مناسبی برای مطالعه سم‌شناسی اکولوژیکی است، زیرا فراوان است، به راحتی قابل دستیابی است، عمر به نسبت طولانی دارد، دارای ارزش شکار و خوراکی است، فیزیولوژی شناخته شده‌ای دارد، تشخیص جنسیت و سن آن امکان پذیر است و استانداردهای ضروری آن مشخص است، داده‌های آن از مناطق مختلف جهان برای قیاس وجود دارد و جمعیت آن نیز در جهان طی بیست سال اخیر رو به کاهش است (Kalisinska *et al.*, 2004).

از میان بافت‌ها و اندام‌های پرندگان، استفاده از پرها به عنوان شاخص زیستی غیرکشنده و غیرمخرب در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین متداول است (Thyen *et al.*, 2000). پرها مزیت‌های دیگری نیز به عنوان پیشگر دارند: ۱. به آسانی تهیه می‌شوند و برای تحقیقات طولانی مدت می‌توان آنها را نگهداری کرد؛ ۲. از آنجا که نمونه‌های پرندگان کشته نمی‌شوند، در صورت نیاز به نمونه‌های بیشتر، بقای جمعیت آنها تهدید نمی‌شود. فلزات سنگین ذخیره شده در دیگر بافت‌های بدن نیز به طور تدریجی از طریق خون به پرها منتقل می‌شوند (Burger and Gochfeld, 1991).

غلظت فلزات سنگین با سن، جنس و وضعیت‌های مختلف بدنی پرندگان تغییر می‌کنند که متأسفانه گاهی این ویژگی‌ها نادیده گرفته شده و نمونه‌های همگن برای آنالیز استفاده می‌شوند که ممکن است به نتیجه‌گیری اشتباه بینجامد. تفاوت‌های وابسته به سن و جنس برای تعدادی از گونه‌ها گزارش شده است، اما الگوی واضحی در زمینه عناصر سنگین و بافت‌ها وجود ندارد که ممکن است به دلیل ناکافی

افزایش فعالیت‌های صنعتی و شهری سبب تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود و خطری بالقوه برای بقای جمعیت‌های موجودات زنده است (Keith and Brugger, 1998). فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌ها هستند که مقادیر زیادی از آنها به واسطه فعالیت‌های انسانی مانند فاضلاب‌های کشاورزی، صنایع، حمل‌ونقل و ... وارد محیط زیست می‌شوند (Gerbersmann *et al.*, 1997) و بر ساختار و عملکرد اکوسیستم اثر می‌گذارند (Zverev, 2009).

برخی از فلزات سنگین، قابلیت بزرگ‌نمایی زیستی در زنجیره غذایی را نیز دارند (Burger and Gochfeld, 1991). آنها در بدن موجودات زنده اثرهای مختلفی مانند کاهش رشد، تغییر رفتار و تغییرات ژنتیکی دارند و در نهایت مرگومیر را موجب می‌شوند (Mance, 1990).

برای اندازه‌گیری فلزات سنگین، از موجودات زنده به عنوان شاخص‌های زیستی استفاده می‌شود (Depledge *et al.*, 1993). در میان این شاخص‌های زیستی، پرندگان در مقایسه با دیگر مهره‌داران حساسیت بیشتری نشان می‌دهند (Furness, 1993)، زیرا به راحتی قابل مشاهده‌اند، محدوده پراکنش گسترده دارند، به مواد سمی حساس‌اند و رژیم غذایی متنوعی دارند (Burger, 1994). سرب و کادمیوم، هر دو به عنوان فلزات سنگین غیرضروری و سمی مطرح‌اند (Goyer *et al.*, 1995). سرب موجب کاهش رشد و بقای تخمک‌ها و کم‌خونی (Mateo *et al.*, 2007) و کادمیوم موجب اختلالات فیزیولوژیک، تغییر رفتار و کاهش یا اختلال در سیستم تخم‌گذاری می‌شود (Furness, 1996).

۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی قرار دارند. این دامگاه‌ها، شالیزارهای برنج هستند که در پاییز و زمستان به زیر آب می‌روند و با غذایی شکارچیان، آماده فرود پرندگان مهاجر می‌شوند. یکی از مهم‌ترین روستاهای دارای دامگاه، سوته است که برای این پژوهش انتخاب شد. در این پژوهش از روش زنده‌گیری دوما استفاده شد. در این روش صیادان محلی با رهاسازی و پرواز اردک‌های تربیت‌شده، مرغابی‌های وحشی را گمراه و جذب کرده و با تور آنها را صید می‌کنند.

۲-۲. نحوه نمونه‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در پاییز و زمستان ۱۳۹۸ با حضور جمعیت‌های اردک سرسبز در دامگاه فریدون‌کنار، نمونه‌برداری از ۳۰ اردک سرسبز انجام گرفت. پس از زنده‌گیری، اردک‌های سرسبز با استفاده از کلید شناسایی موجود در کتاب راهنمای صحرایی تعیین سن و جنس مرغابی‌ها، براساس رنگ منقار و شاهپره‌های بال و پر (Carney, 1992; Krapu et al., 2000)، به نر و ماده و بالغ و نابالغ تفکیک شدند. سپس شش متغیر مورفولوژی (طول تارس، طول یک سر بال، طول دو سر بال، طول دم، طول سر، طول بدن و وزن بدن) که شاخص‌های وضعیت بدن به شمار می‌روند، به‌وسیله تخته زیست‌سنجی، خط‌کش و کولیس و وزن بدن نیز با ترازوی فنری دستی pesola اندازه‌گیری شد (Dzubin and Cooch, 1992).

پس از اندازه‌گیری پارامترهای وضعیت بدن، حدود ۱ گرم از پرهای قسمت‌های سینه‌ای به‌طور مجزا در گروه‌های اردک‌های سرسبز نر بالغ، نر نابالغ، ماده بالغ و ماده نابالغ چیده شد و در پاکت‌های مستقل با شماره و مشخصات به آزمایشگاه انتقال یافت. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های پر با آب شهر و سپس

بودن نمونه‌ها یا مشکل تعیین سن یا جنس واقعی پرندگان و اندازه‌گیری شاخص‌های وضعیت سلامت/ بدن آنها باشد (Burger and Gochfeld, 1999). غلظت برخی از فلزات سنگین با افزایش سن بیشتر می‌شود (Furness, 1993). به هر حال به‌دلیل مشکلات و محدودیت‌های تعیین سن پرندگان، هنوز در خصوص تأثیرات وابسته به سن آلودگی‌های فلزات سنگین ابهام وجود دارد. از نظر تفاوت جنسیتی نیز ماده‌ها می‌توانند برخی از فلزات سنگین را با تخم‌گذاری از بدن دفع کنند (Burger and Gochfeld, 1991) که سبب می‌شود ماده‌ها روند منحصربه‌فردی در حذف فلزات سنگین در مقایسه با نرها داشته باشند و حتی غلظت فلزات سنگین در بدن آنها کمتر باشد. وضعیت بدن پرندگان نیز ممکن است در تجمع زیستی فلزات سنگین تأثیرگذار باشد. به‌طور معمول پارامترهای مورفومتریک مانند وزن بدن، طول تارس و طول بال، شاخص ارزیابی موقعیت بدن و وضعیت سلامت پرنده‌اند و در موفقیت بقای پرندگان نیز تأثیرگذارند (Haywood and Perrins, 1992).

به‌طور کلی با توجه به تناقض نتایج پژوهش‌های مختلف در پرندگان آبی و محدودیت نوع تحقیقات درباره اردک سرسبز در کشور، این پرسش مطرح می‌شود که آیا رابطه معنی‌داری بین گروه‌های سنی، جنسیت و وضعیت بدن با غلظت فلزات سنگین در بافت پر اردک سرسبز وجود دارد؟

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه پژوهش و روش نمونه‌گیری

دامگاه‌های فریدون‌کنار از مهم‌ترین مناطق زمستان‌گذرانی پرندگان مهاجر در روستاهای مختلف شهرستان فریدون‌کنار مازندران در عرض جغرافیایی

کادمیوم ppm ۱۰۰۰ و ماتریکس اسید نیتریک ۰/۵ مولار با دستگاه جذب اتمی با مشخصات یادشده بوده است.

۲-۴. آنالیز آماری

پس از آماده شدن داده‌ها و اطمینان از توزیع نرمال با پلات Q-Q، برای مقایسه اختلاف بین غلظت‌های فلزات سنگین سرب و کادمیوم در اردک‌های سرسبز با دو گروه سنی مختلف (بالغ و نابالغ) و جنسیت‌های مختلف (نر و ماده) از آزمون تی استفاده شد و نتایج به صورت نمودارهای جعبه‌ای ارائه شد که در این نمودارها، حداقل، حداکثر، حدود اطمینان میانه برمبنای محدوده میانه $1/57 \pm$ برابر بین چارک‌های اول و سوم آورده شده است (شکل‌های ۱ تا ۴). تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) روی هفت پارامتر شاخص وضعیت بدن اردک سرسبز انجام گرفت تا پارامترهای اصلی مشخص شوند. برای تعیین اثر پارامترهای انتخاب شده شاخص وضعیت بدن با غلظت‌های فلزات سنگین سرب و کادمیوم از مدل رگرسیون خطی استفاده شد. سپس با حذف مرحله به مرحله هر یک از پارامترهای وضعیت بدن براساس بیشترین ارزش غیرمعنی‌دار آماری، مدل نهایی با پارامترهای وضعیت بدن که اثر معنی‌داری در تجمع زیستی فلزات سنگین کادمیوم و سرب دارند ارائه شد. همه آزمون‌های آماری در نرم‌افزار R انجام گرفت.

۳. نتایج

۳-۱. مقادیر غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم و پارامترهای مختلف وضعیت بدن در بافت پر اردک سرسبز بین جنس‌ها و سنین مختلف غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم (میلی‌گرم بر

استون و در نهایت با آب مقطر (دیونیزه) شسته شدند تا آلودگی‌های خارجی آنها به حداقل برسد. سپس نمونه‌های پر در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه خشک شدند (Manjula *et al.*, 2014). پرها بعد از خشک شدن کامل، با قیچی به ذرات مساوی قطعه‌قطعه شدند.

۲-۳. نحوه آنالیز سرب و کادمیوم در پرها

آنالیز سرب و کادمیوم در پرها با الگوگیری از روش‌های (Abbasi *et al.*, 2015) و Mukhtar *et al.* (2020) انجام گرفت. نیم گرم از هر یک از نمونه‌های پر توزین شد و با افزودن ۷/۵ سی‌سی اسید نیتریک ۶۵ درصد و ۲ سی‌سی هیدروژن پراکسید، هضم نمونه‌ها در دمای حدود ۱۲۰ (۹۰ تا ۱۲۰) درجه سانتی‌گراد تا شفاف شدن کامل نمونه انجام گرفت. پس از سرد شدن نمونه‌ها، فیلتر کردن نمونه با کاغذ فیلتر ۴۲ میکرون انجام گرفت و نمونه‌ها با بالون ژوزه به حجم ۲۵ سی‌سی رسانده شدند. نمونه‌ها در نهایت به ظروف پلی‌اتیلنی منتقل و تا زمان شروع قرائت، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند (Plessl *et al.*, 2017). قرائت میزان فلزات در نمونه‌های محلول توسط دستگاه MP-AES 4100: Microwave atomic emission spectroscopy, Agilent, Australia انجام گرفت. آزمایش بلانک (شاهد) نیز با افزودن صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و سرب به طور مجزا به نمونه‌ها با سه تکرار صورت گرفت و نمونه‌ها برای صحت‌سنجی و محاسبه میزان بازیابی اسپایک شدند. برای سنجش دقت نیز انحراف معیار نسبی RSD محاسبه شد. مشخصات مواد مرجع مجاز (Certified Reference Material)، استاندارد Romil با محلول مرجع عناصر سرب و

تأثیر گروه سنی، جنسیت و شاخص‌های وضعیت بدن در غلظت فلزات سنگین...

جدول ۱- مقادیر میانگین ($\pm SD$) فلزات سنگین سرب و کادمیوم و پارامترهای مختلف وضعیت بدن در جنس‌ها و سنین مختلف در بافت پر اردک سرسبز

	نر (۱۴)		ماده (۱۶)	
	بالغ (۱۱)	نابالغ (۳)	بالغ (۵)	نابالغ (۱۱)
طول یک سر بال (سانتی‌متر)	۴۰/۶۳۶ \pm ۱/۵۵۱	۳۹/۳۳۳ \pm ۴/۱۹۳	۴۸/۳۰۰ \pm ۱/۵۶۵	۳۹/۶۳۶ \pm ۲/۰۲۶
طول دو سر بال (سانتی‌متر)	۸۹/۷۷۳ \pm ۳/۳۶۴	۸۹/۸۳۳ \pm ۴/۳۱۱	۸۵/۹۰۰ \pm ۲/۳۸۲	۸۳/۶۳۶ \pm ۷/۳۵۵
طول دم (سانتی‌متر)	۹/۵۷۳ \pm ۱/۲۵۶	۱۱ \pm ۰/۵۰۰	۸/۹۰۰ \pm ۰/۴۱۸	۸/۷۲۷ \pm ۰/۶۲۱
طول تارس (سانتی‌متر)	۵/۱۷۳ \pm ۰/۲۷۶	۵/۱۶۷ \pm ۰/۱۵۳	۴/۹۰۰ \pm ۰/۲۲۴	۴/۷۴۵ \pm ۰/۴۰۸
طول سر (سانتی‌متر)	۷/۸۶۴ \pm ۰/۹۵۱	۸/۴۳۳ \pm ۱/۶۱۶	۶/۶۰۰ \pm ۰/۸۹۴	۷/۳۶۴ \pm ۱/۱۶۴
طول بدن (سانتی‌متر)	۵۷/۷۲۷ \pm ۲/۱۲۶	۵۶/۶۶۷ \pm ۲/۵۶۶	۵۳/۱۰۰ \pm ۰/۸۹۴	۵۳/۲۵۴ \pm ۱/۴۶۷
وزن بدن (کیلوگرم)	۰/۷۶۴ \pm ۰/۰۹۲	۰/۷۲۳ \pm ۰/۰۹۷	۰/۷۱۳ \pm ۰/۰۹۶	۰/۶۰۷ \pm ۰/۱۱۹
غلظت سرب (ppm)	۱۵/۲۲۷ \pm ۲/۲۵۴	۱۶/۹۳۸ \pm ۱/۱۷۲	۱۶/۶۵۶ \pm ۷/۳۷۸	۱۸/۲۵۷ \pm ۶/۱۳۱
غلظت کادمیوم (ppm)	۰/۰۱۷ \pm ۰/۰۲۲	۰/۰۱۴ \pm ۰/۰۱۱	۰/۰۱۹ \pm ۰/۰۲۷	۰/۰۲۷ \pm ۰/۰۶۳

جدول ۲- غلظت یافت‌شده، درصد بازیابی و انحراف معیار نسبی (RSD) در نمونه‌های اسپایک‌شده برای کادمیوم و سرب در بافت پر اردک سرسبز

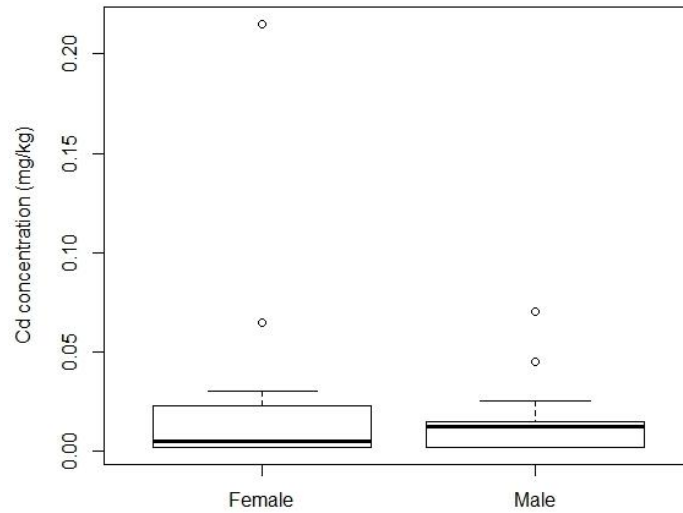
فلز سنگین	غلظت اضافه‌شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	غلظت یافت‌شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	درصد بازیابی	انحراف معیار نسبی (RSD)
کادمیوم	۰	۰/۰۶۵	-	-
	۵	۵/۰۸۴	۱۰۰/۳	۵/۵۸
	۱۰	۱۰/۱۱	۱۰۰/۴۴	۳/۶۳
سرب	۰	۱۹/۶۵	-	-
	۵	۲۵/۸	۱۰۴/۶۶	۵/۲۱
	۱۰	۳۱/۳۷	۱۰۵/۸	۴/۶۷

۳-۲. مقایسه غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم

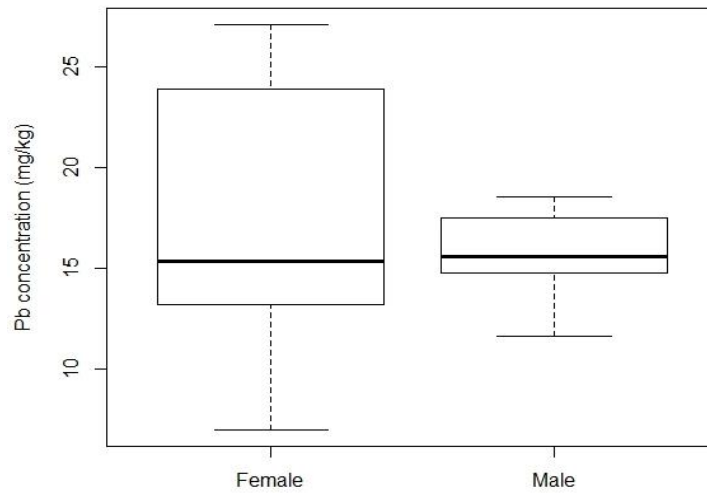
بین جنس‌های مختلف در بافت پر اردک سرسبز نتایج نشان داد که میانه غلظت کادمیوم در بافت پر جنس نر (ppm ۰/۰۱۲) بیشتر از جنس ماده (ppm ۰/۰۰۵) بود (شکل ۱)، ولی از نظر آماری، اختلاف معنی‌داری در غلظت کادمیوم بین جنس‌های نر و ماده در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد ($t=۰/۵۹۶, df=۱۹, P=۰/۵۵۸$).

میانه غلظت سرب نیز در بافت پر جنس نر

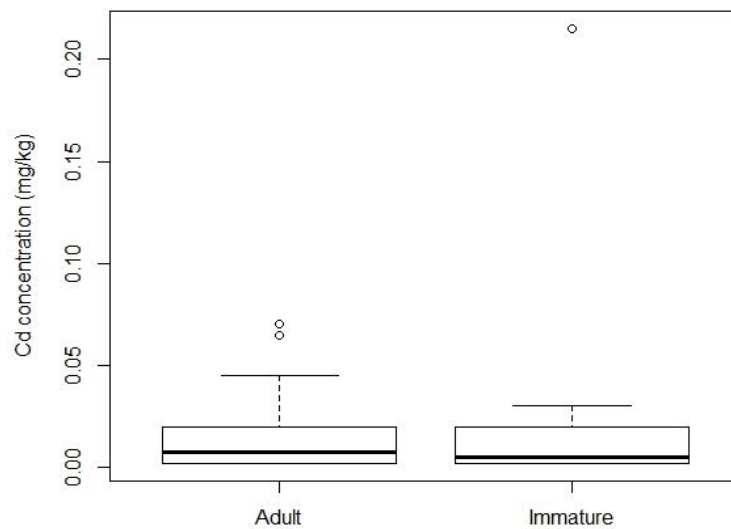
کیلوگرم وزن خشک بدن یا ppm) و آمار توصیفی پارامترهای مختلف وضعیت بدن بین جنس‌ها و سنین مختلف در بافت پر اردک سرسبز در جدول ۱ با ارائه مقادیر میانگین، انحراف معیار و تعداد نمونه ارائه شده است. غلظت یافت‌شده، درصد بازیابی و انحراف معیار نسبی (RSD) در نمونه‌های اسپایک‌شده برای کادمیوم و سرب در جدول ۲ ارائه شده است که نشان‌دهنده صحت و دقت زیاد مقادیر ارائه‌شده است.



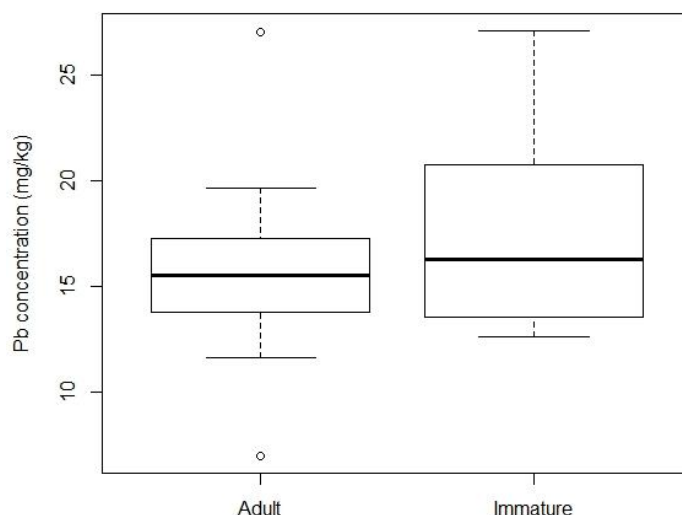
شکل ۱- نمودار جعبه‌ای مقایسه غلظت فلز سنگین کادمیوم بین جنس‌های نر (۱۴ نمونه) و ماده (۱۶ نمونه) در بافت پر اردک سرسبز



شکل ۲- نمودار جعبه‌ای مقایسه غلظت فلز سنگین سرب بین جنس‌های نر (۱۴ نمونه) و ماده (۱۶ نمونه) در بافت پر اردک سرسبز



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای مقایسه غلظت کادمیوم بین گروه‌های سنی بالغ (۱۶ نمونه) و نابالغ (۱۴ نمونه) در بافت پر اردک سرسبز



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای مقایسه غلظت سرب بین افراد بالغ (۱۶ نمونه) و نابالغ (۱۴ نمونه) در بافت پر اردک سرسبز

۳-۴. رابطه بین شاخص‌های وضعیت بدن با غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز

۳-۴-۱. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

مطابق نتایج و آنالیز و اهمیت نسبی مؤلفه‌های مختلف، مؤلفه‌های اصلی اول (PC1) و دوم (PC2)، به‌عنوان مهم‌ترین محورهای تغییرات پارامترهای وضعیت بدن شامل به‌ترتیب ۴۲/۸۴ و ۲۰/۱۹ درصد از تغییرات مورد توجه هستند (۶۳/۰۳ درصد از کل واریانس). با ترسیم نمودار پارامترهای وضعیت بدن در طول این دو محور (شکل ۵)، تعداد آنها از ۷ به ۳ پارامتر که همبستگی معنی‌داری ندارند، کاهش داده شد. مجموعه طول سر، طول تارس و طول دم مطابق شکل ۵، همبسته و همسو هستند و از این رو طول دم به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی و نماینده این سه پارامتر انتخاب شد.

طول بدن نیز همبستگی و همسویی متفاوت و مستقلى از پارامترهای شاخص وضعیت بدن دارد و خود به‌عنوان دومین مؤلفه اصلی انتخاب شده است. مجموعه طول یک سر بال، طول دو سر بال و وزن

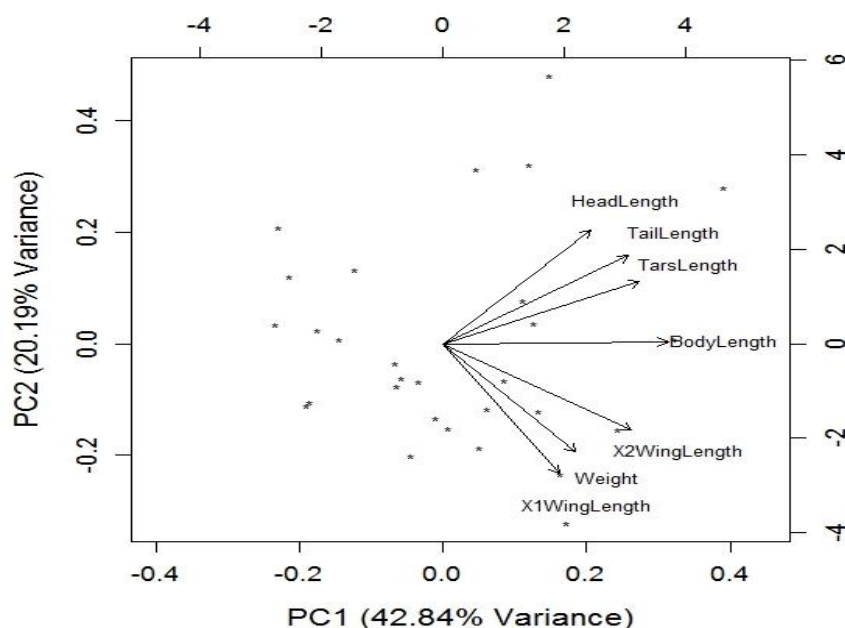
(۱۵/۶۱۵ ppm) بیشتر از جنس ماده (۱۵/۳۳۷ ppm) بود (شکل ۲)، ولی از نظر آماری، اختلاف معنی‌داری در غلظت سرب بین جنس‌های نر و ماده در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد ($t=1/283, df=19, P=0/215$).

۳-۳. مقایسه غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم بین گروه‌های سنی مختلف در بافت پر اردک

سرسبز

نتایج نشان داد که میانه غلظت کادمیوم در بافت پر گروه سنی افراد بالغ (۰/۰۰۷ ppm) بیشتر از نابالغ‌ها (۰/۰۰۵ ppm) بود (شکل ۳)، ولی از نظر آماری، اختلاف معنی‌داری در غلظت کادمیوم بین بالغ‌ها و نابالغ‌ها در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد ($t=-0/430, df=17, P=0/673$).

میانه غلظت سرب در بافت پر افراد نابالغ (۱۶/۲۹۷ ppm) بیشتر از افراد بالغ (۱۵/۵۲۰ ppm) بود (شکل ۴)، ولی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در غلظت سرب بین بالغ‌ها و نابالغ‌ها در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد ($P=0/214, t=-1/276, df=25$).



شکل ۵- نمودار پارامترهای شاخص وضعیت بدن اردک سرسبز در طول محورهای مؤلفه‌های اصلی اول و دوم

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱. مقایسه غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم

بین جنس‌های مختلف در بافت پر اردک سرسبز در مطالعات مشابهی که در اردک سرسبز و دیگر گونه‌های پرندگان صورت گرفته است، نتایج متناقضی در خصوص غلظت فلزات سنگین وابسته به جنس در پرها وجود دارد. در برخی تحقیقات در اردک سرسبز، تفاوت معنی‌داری بین نر و ماده از نظر سرب وجود داشت (Óvári *et al.*, 2016; Solgi *et al.*, 2020) و اردک‌های سرسبز نر، غلظت بیشتری از سرب را نشان دادند (Florijancic *et al.*, 2009). غلظت فلزات سنگین در غاز خاکستری نیز به جنسیت وابسته بود (Lucia *et al.*, 2010) و در ماده‌ها بیشتر گزارش شده بود. در تمایز با نتایج این پژوهش، اختلاف معنی‌داری در غلظت سرب و کادمیوم بین جنس‌های نر و ماده در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد (شکل‌های ۱ و ۲). پژوهش (Mansouri and Majnoni (2014) در پرها

بدن نیز مطابق شکل ۵، همبسته و همسو هستند و از این رو وزن بدن یکی از مؤلفه‌های اصلی و نماینده این سه پارامتر انتخاب شد.

۳-۴-۲. رابطه بین شاخص‌های وضعیت بدن و غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز

براساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی، پارامترهای طول دم، طول بدن و وزن بدن به‌عنوان نماینده مجموعه پارامترهای وضعیت بدن، در مدل رگرسیون خطی وارد شدند. نتایج مدل اولیه و نهایی نشان داد که رابطه معنی‌داری بین پارامترهای وضعیت بدن و غلظت فلزات سنگین کادمیوم (جدول ۳) و سرب (جدول ۴) در بافت پر اردک سرسبز وجود نداشته است. با توجه به آنکه پارامترهای وضعیت بدن در مدل اولیه و نهایی، اثر معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین کادمیوم و سرب نداشته‌اند نتایج مدل اولیه ارائه شده است.

جدول ۳- رابطه بین پارامترهای وضعیت بدن و غلظت فلز سنگین کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز

ارزش آماری (P-value)	ارزش t	خطای استاندارد	برآورد	
۰/۳۹۳	۰/۸۶۹	۰/۱۶۱	۰/۱۴۰	(Intercept)
۰/۳۸۵	۰/۸۸۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	طول دم
۰/۲۹۹	-۱/۰۵۹	۰/۰۰۴	-۰/۰۰۴	طول بدن
۰/۵۴۷	۰/۶۱۰	۰/۰۷۶	۰/۰۴۶	وزن بدن

جدول ۴- رابطه بین پارامترهای وضعیت بدن و غلظت فلز سنگین سرب در بافت پر اردک سرسبز

ارزش آماری (P-value)	ارزش t	خطای استاندارد	برآورد	
۰/۰۵۱	۲/۰۴۵	۱۹/۱۹۰	۳۹/۲۴۰	(Intercept)
۰/۵۵۴	۰/۶۰۰	۰/۹۹۰	۰/۵۹۴	طول دم
۰/۱۸۵	-۱/۳۶۲	۰/۴۴۷	-۰/۶۰۹	طول بدن
۰/۳۷۷	۰/۸۹۹	۹/۰۱۴	۸/۱۰۸	وزن بدن

چنگر معمولی و اردک سرسبز نشان داد که تفاوت معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین بین نرها و ماده‌ها در پرها وجود ندارد. نبود تفاوت معنی‌دار در غلظت‌های سرب و کادمیوم در اردک‌های سرسبز در

اتریش نیز گزارش شده است (Plessi et al., 2017). در تحقیقی در قوهای بالغ، غلظت سرب و کادمیوم وابسته به جنس نبود (Eskildsen and Grandjean, 1984). به‌طور کلی این نبود تفاوت معنی‌دار در غلظت فلزات سنگین در جنس‌های مختلف در تحقیق (Hamesadeghi et al., 2019) گزارش شده است. به هر حال پیش‌بینی می‌شد که تفاوت وابسته به جنس در غلظت فلزات سنگین وجود داشته باشد و نرها غلظت بیشتری از فلزات سنگین را به دلایل زیر نشان دهند: ۱. ماده‌ها می‌توانند برخی از فلزات سنگین را از بدن با دفع تخم‌ها خارج کنند (Mansouri et al., 2012b). ۲. نرها و ماده‌ها، از غذاهای متفاوت، با اندازه متفاوت و نسبت‌های متفاوت تغذیه می‌کنند (Ishii et al., 2017)، از این‌رو باید غلظت‌های متفاوتی از عناصر سنگین داشته باشند.

۲-۴. مقایسه غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم بین گروه‌های سنی مختلف در بافت پر اردک سرسبز

در تحقیقات مشابهی که کم‌وبیش در اردک سرسبز و دیگر گونه‌های پرندگان صورت گرفته است، نتایج متناقضی در خصوص غلظت فلزات سنگین وابسته به سن در پرها وجود دارد. در تحقیقات (Sadeghi et al., 2019)، میانگین غلظت سرب و کادمیوم در بالغین اردک سرسبز در مقایسه با افراد جوان بیشتر بوده است. در خوتکا، متوسط غلظت سرب و کادمیوم در بالغ‌ها بیشتر بوده است. در غاز خاکستری در افراد نابالغ بیشتر بوده است. در فیلوش، غلظت متوسط کادمیوم در بالغ‌ها و غلظت متوسط سرب در افراد نابالغ بیشتر بوده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که از نظر آماری،

متناقض تحقیقات اثر وابسته به سن غلظت فلزات سنگین در اندام‌های پرندگان در سطح و بین گونه‌ها تأثیرگذار باشند.

۴.۳. رابطه بین شاخص‌های وضعیت بدن و غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز

شاخص‌های وضعیت بدن از عوامل مهم اثرگذار در جذب فلزات سنگین است (Debacker *et al.*, 2000). تغییرات در اندازه بدن سبب تغییر در انواع طعمه و اندازه آنها می‌شود و انتظار می‌رود که غلظت آلاینده‌ها در طعمه‌های با اندازه بزرگ‌تر بیشتر باشد (Burger, 2007). علی‌رغم آن، در تحقیقات درباره اردک سرسبز و گونه‌های دیگر، نتایج متناقضی در خصوص غلظت فلزات سنگین وابسته به شاخص‌های وضعیت بدن وجود دارد. در تحقیقی در اردک سرسبز، پرندگان با طول بدن بیشتر، مقادیر کمتری از تجمع کادمیوم را نشان دادند (Alipour *et al.*, 2016). با وجود این، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که رابطه معنی‌داری بین پارامترهای وضعیت بدن و غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز وجود نداشته است. با همه این موارد، برخی محققان معتقدند که پارامترهای مورفولوژیکی ممکن است شاخص‌های ضعیفی برای تعیین تأثیر آلاینده‌ها بر پرندگان باشند (Dauwe *et al.*, 2006) که ضرورت تحقیقات بیشتر در آینده را نشان می‌دهد.

۴.۴. چالش‌های مطالعه در مقایسه نتایج

در این پژوهش مانند بیشتر پژوهش‌های مشابه، پره‌های سینه‌ای استفاده شده است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که تفاوت معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین بین انواع پر وجود دارد

اختلاف معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین بین بالغ‌ها و نابالغ‌ها در بافت پر اردک سرسبز مشاهده نشد که مشابه نتایج بسیاری از پژوهش‌های دیگر است. برای مثال، تفاوت‌های وابسته به سن در غلظت‌های فلزات سنگین به‌جز جیوه در پرندۀ غواص *Gavia immer* در آمریکای شمالی گزارش نشد (Burger *et al.*, 1994). تفاوتی هم در سطوح جیوه در کاکایی‌های منقارقرمز در محدوده سنی ۱۵-۲ سال ثبت نشده است. انتظار تفاوت در سطوح فلزات سنگین در افراد بالغ و جوان، شاید به دلیل رفتارهای تغذیه‌ای توصیف شود (Burger and Gochfeld, 1997) که پرندگان بالغ و جوان غذاهای مختلف با نسبت‌های متفاوت مصرف می‌کنند و بدن آنها رهاسازی فلزات را با روند متفاوتی انجام می‌دهد که در تحقیق حاضر این تفاوت در رفتار تغذیه‌ای احتمالاً وجود نداشته است. دلیل دیگر آن است که مشابه بیشتر پژوهش‌ها، تشخیص دقیق سن واقعی اردک سرسبز به دلیل مهاجرت و ممکن نبودن پایش طولانی‌مدت جمعیت‌های حلقه‌گذاری شده وجود نداشت و نمونه‌ها به‌طور کیفی تنها به دو گروه سنی بالغ و نابالغ تفکیک شدند و طبیعتاً غلظت فلزات سنگین در گروه‌های سنی واقعی در مقایسه با دو گروه سنی کیفی بالغ و نابالغ متفاوت خواهد بود (Castro *et al.*, 2011). افزون بر آن، مقادیر زیادی از فلزات سنگین در پرندگان مسن‌تر ممکن است در طول دوران پرریزی دفع شود که ممکن است از دیگر دلایل معنی‌دار نبودن غلظت فلزات سنگین وابسته به سن باشد (Hughes *et al.*, 1997). حتی سطوح فلزات سنگین شاید بین نمونه‌های زنده و مرده نیز متفاوت باشد که این عوامل می‌توانند در ارائه نتایج

دیگر گونه‌های پرندگان در تحقیقات مختلف وجود داشته باشد که توجه به این چالش‌ها در مقایسه نتایج بسیار حائز اهمیت است.

۴.۵. نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر نشان داد که غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بافت پر اردک سرسبز وابسته به جنس، گروه‌های سنی بالغ و نابالغ و شاخص‌های وضعیت بدن نیست که هم در توافق و هم در تضاد با بسیاری از تحقیقاتی است که در بافت پر گونه اردک سرسبز و دیگر گونه‌های پرندگان انجام گرفته است. به هر حال، پژوهش‌های طولانی‌مدت در آینده با توجه به چالش‌های ارائه‌شده، بهتر می‌تواند غلظت فلزات سنگین وابسته به جنس، گروه‌های سنی و شاخص‌های وضعیت بدن و همچنین سازوکارهای آن را در بافت پر اردک سرسبز و دیگر گونه‌های پرندگان مشخص کند. به هر حال، این تحقیق می‌تواند نگرش‌های جدیدی را از نظر تغییرات آلاینده‌های زیست‌محیطی وابسته به گروه‌های سنی، جنسیت و وضعیت/ کیفیت بدن پیش روی محققان زیست‌شناسی، سم‌شناسی اکولوژیک و محیط زیست قرار دهد.

تقدیر و تشکر

از مشاوره علمی جناب آقای دکتر سید مهدی امینی نسب در طول مراحل تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود. این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مریم قهرمان پوری می‌باشد.

(Ahmadpour *et al.*, 2013). شیمی پر بین کلاس‌های سنی و جنسی تغییر می‌کند (Bortolotti and Barlow, 1988). نوع مقاومت متفاوت پرها هم تأثیرگذار است (Sinkakarimi *et al.*, 2018). سطوح فلزات در پرها به نوع رنگدانه پر نیز بستگی دارد. پرهایی که زودتر ریزش می‌کنند، به‌طور معمول محتوای فلزات سنگین بیشتری دارند (Sinkakarimi *et al.*, 2018). غیر از انتخاب نوع پر، توجه به چالش‌ها و موارد زیر نیز می‌تواند به‌عنوان دلایل علمی در مقایسه نتایج پژوهش حائز اهمیت باشد. اندازه نمونه اردک سرسبز بین مناطق مختلف متفاوت بوده است. افزون بر آن، اردک سرسبز مهاجر است (Aubrecht and Hozler, 2000) که این موضوع ممکن است اثر معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین در پره‌های پرندگان داشته باشد. پرندگان مهاجر به‌طور معمول در معرض استرس بیشتری قرار دارند. Mansouri and Hoshyari در سال ۲۰۱۲ بیان داشتند که غلظت‌های فلزات سنگین در بافت‌های پرندگان بومی به‌طور معمول کمتر از پرندگان مهاجر است. در کنار تغییرات منطقه‌ای آلودگی زیست‌محیطی، نوع و مقدار غذا ممکن است در غلظت فلزات سنگین تأثیرگذار باشد. غلظت فلزات سنگین در پرها در فصول مختلف بسته به مناطق تغذیه، استراحت، پرریزی، زادآوری و مهاجرت متفاوت است. این غلظت بین پرنده زنده و مرده نیز فرق می‌کند که در نهایت سبب ایجاد تفاوت‌هایی از نظر در معرض قرارگیری شیمیایی با آلاینده‌ها شده (Burger, 2007) و موجب می‌شود تفاوت‌هایی در بین اردک‌های سرسبز (جدول ۵) و

References

- Abbasi, N.A., Jaspers, V.L., Chaudhry, M.J., Ali, S., Malik, R.N., 2015. Influence of taxa, trophic level, and location on bioaccumulation of toxic metals in bird's feathers: a preliminary biomonitoring study using multiple bird species from Pakistan. *Chemosphere* 120, 527-537.
- Ahmadpour, M., Hoseini, S.H., Ahmadpour, M., Mashrofeh, A., Sinkakarimi, M.H., Ghasempouri, S.M., Pourkhabbaz, A.R., Eskandari, T., 2013. Assessment of mercury concentration in feathers of six species of waterbirds in Southern Caspian Sea Wetlands. *Podoces* 8, 38-44.
- Alipour, H., Solgi, E., Majnoni, F., 2016. Concentrations of Heavy Metals in tissues of the Mallard *Anas platyrhynchos* in Kanibarazan, northwestern Iran. *Podoces* 11, 35-42.
- Aubrecht, G., Holzer, G., 2000. Stockenten: Biologie, Ökologie, Verhalten. Österr. Agrarverlag, Leopoldsdorf.
- Binkowski, L.J., Sawicka-Kapusta, K., 2015. Lead poisoning and its in vivo biomarkers in mallard and coot from two hunting activity areas in Poland. *Chemosphere* 127, 101-108.
- Bortolotti, G.R., Barlow, J.C., 1988. Some sources of variation in the elemental composition of Bald Eagle feathers. *Canadian Journal of Zoology*, 66, 1948-1951.
- Burger, J., 1994. Metals in Avian Feathers: Bioindicators of Environmental Pollution, *Reviews of Environmental Toxicology* 5, 197-306.
- Burger, J., Pokras, M., Chafel, R., Gochfeld, M., 1994. Heavy metal concentrations in feathers of common loons (*Gavia immer*) in the Northeastern United States and age differences in mercury levels. *Environmental Monitoring and Assessment* 30, 1-7.
- Burger, J., 2007. A framework and methods for incorporating gender-related issues in wildlife risk assessment: Gender-related differences in metal levels and other contaminants as a case study. *Environmental Research* 104, 153-162.
- Burger, J., Gochfeld, M., 1991. Lead, Mercury, and Cadmium in Feathers of Tropical Terns in Puerto Rico and Australia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 21, 311-315.
- Burger, J., Gochfeld, M., 1997. Age differences in metals in the blood of herring (*Larus argentatus*) and franklin's (*Larus pipixcan*) gulls. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 33(4), 436-440.
- Burger, J., Gochfeld, M., 1999. Heavy metals in Franklins gull tissues: age and tissue differences. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18, 673-678.
- Carney, S.M., 1992. Species, age, and sex identification of ducks using wing plumage. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C., USA.
- Castro, I., Aboal, J.R., Fernández, J.A., Carballeira A., 2011. Use of Raptors for Biomonitoring of Heavy Metals: Gender, Age and Tissue Selection. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 86, 347-351.
- Dauwe, T., Janssens, E., Eens, M., 2006. Effects of heavy metal exposure on the condition and health of adult great tits (*Parus major*). *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 140, 71-78.
- Debacker, V., Jauniaux, T., Coignoul, F., Bouquegneau, J., 2000. Heavy Metals Contamination and Body Condition of Wintering Guillemots (*Uria aalge*) at the Belgian Coast from 1993 to 1998. *Environmental Research* 84, 310-7.
- Depledge, M.H., Weeks, J.M., Bjerregaard, P., 1993. Heavy metals. In: Calow, P. (Ed.), *Handbook of Ecotoxicology*, vol. 1. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England, pp. 79e105.
- Dzubin, A., Cooch, E.G., 1992. Measurements of geese: general field methods. California Waterfowl Association, Sacramento CA.
- Eskildsen, J., Grandjean, P., 1984. Lead exposure from lead pellets: age-related accumulation in mute swan. *Toxicology Letters* 21, 225-229.
- Florijancic, T., Opacak, A., Boskovic, I., Dinko, J., Siniša, O., Tanja, B., 2009. Heavy metal

- concentrations in the liver of two wild duck species: Influence of species and gender. *Italian Journal of Animal Science* 8, 222-224.
- Furness, R.W., 1993. Birds as monitors of pollutants. In: R.W. Furness and J.J.D. Greenwood (Eds.). *Birds as monitors of environmental Change*. Chapman and Hall, London p. 86-143.
- Furness, R.W., 1996. Cadmium in birds. In: Beyer WN, Heinz GH, Redmon-Norwood AW, editors. *Environmental contaminants in wildlife: interpreting tissue concentrations*. Boca Raton, FL: CRC Press, pp: 389-404.
- Gerbersmann, C., Heisterkamp, M., Adams, F.C., Broekaert, J.A.C., 1997. Two methods for the speciation analysis of mercury in fish involving microwave-assisted digestion and gas chromatography atomic emission spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 350, 273-285.
- Goyer, R.A., Klaassen, C.D., Waalkes, M.P., 1995. *Metal toxicology*. San Diego, CA: Academic Press.
- Hamesadeghi, Y., Rahmania, R., Mansouri, A., 2019. Coot, *Fulica atra*, and Mallard, *Anas platyrhynchos* as indicators of mercury contamination in Zarivar wetland from Western of Iran. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 11, 100197.
- Haywood, S., Perrins, C.M., 1992. Is clutch size in birds affected by environmental conditions during growth? *Proceedings of the Royal Society of London B* 249, 195-197.
- Hughes, K.D., Ewins, P.J., Clark, K.E., 1997. A comparison of mercury levels in feathers and eggs of osprey (*Pandion haliaetus*) in the North American Great Lakes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 33, 441-452.
- Ishii, C., Ikenaka, Y., Nakayama, S.M.M., Mizukawa, H., Yohannes, Y.B., Watanuki, Y., Fukuwaka, M., Ishizuka, M. 2017. Contamination status and accumulation characteristics of heavy metals and arsenic in five seabird species from the central Bering Sea. *Journal of Veterinary Medical Science* 79(4), 807-814.
- Kalisinska, E., Salicki, W., Myslek, P., Kavetska, K., and Jackowski, A., 2004. Using the Mallard to biomonitor heavy metal contamination of wetlands in north-western Poland. *The Science of the total environment* 320, 145-61.
- Keith, J. O., Bruggers, R.L., 1998. Review of hazards to raptors from pest control in Sahelian Africa. *Journal of Raptor Research*, 32, 151-158.
- Krapu, G., Pietz, P., Brandt, D., Jr, R., 2000. Factors Limiting Mallard Brood Survival in Prairie Pothole Landscapes. *Journal of Wildlife Management* 64, 553-561.
- Lucia, M., Andre, J., Gontier, K., Diot, N., Veiga, J., Davail, S., 2010. Trace element concentrations (mercury, cadmium, copper, zinc, lead, aluminium, nickel, arsenic, and selenium) in some aquatic birds of the southwest Atlantic coast of France. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 58(3), 844-853.
- Mance, G., 1990. *Pollution threat of heavy metals in aquatic environmental*, Elsevier science publishers LTD, pp: 32-123.
- Manjula, M., Mohanraj, R., Prashanthi Devi, M., 2015. Biomonitoring of heavy metals in feathers of eleven common bird Species in urban and rural environments of Tiruchirappalli, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 187, 267.
- Mansouri, B., Hoshyari, E., 2012a. Nickel concentration in two bird species from Hara Biosphere Reserve of southern Iran. *Chinese Birds* 3(1), 54-59.
- Mansouri, B., Babaei, H., Houshyari, E., 2012b. Heavy metal contamination in feathers of Western Reef Heron (*Egretta gularis*) and Siberian gull (*Larus heuglini*) from Hara biosphere reserve of Southern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(10), 6139-6145.
- Mansouri, B., Majnoni, F., 2014. Comparison of the metal concentrations in organs of two bird species from western of Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 92, 433-439.
- Mateo, R., Green A.J., Lefranc, H., Baos, R., Figuerola, J., 2007. Lead poisoning in wild birds

- from southern Spain: a comparative study of wetland areas and species affected, and trends over time. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 66, 119-126.
- Mukhtar, H., Chan, C.Y., Lin, Y.P., Lin, C.M., 2020. Assessing the association and predictability of heavy metals in avian organs, feathers, and bones using crowdsourced samples, *Chemosphere* 252, 126583.
- Plessi, C., Jandrisits, P., Krachler, R., Keppler, B., Jirsa, F., 2017. Heavy metals in the mallard *Anas platyrhynchos* from eastern Austria. *Science of the Total Environment* 580, 670-676.
- Óvári, M., Laczi, M., Török, J., Mihucz, V., 2016. Elemental composition in feathers of a migratory passerine for differentiation of sex, age, and molting areas. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 2021-2034.
- Sadeghi, M., Ghasempouri, S.M., Bahramifar, N., 2019. Xenobiotic and essential metals biomonitoring by feathers: molting pattern and feather regrowth sequence in four dominant waterfowl. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16, 125-134.
- Sinkakarimi, M.H., Hassanpour, M., Pourkhabbaz, A.R., Błaszczak, M., Paluch, J., Binkowski, L.J. 2016. Trace element concentrations in feathers of five Anseriformes in the south of the Caspian Sea, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 188, 22.
- Sinkakarimi, M.H., Binkowski, L.J., Hassanpour, M., Rajaei, G., Ahmadpour, M., Levengood, J.M., 2018. Metal concentrations in tissues of gadwall and common teal from: Miankaleh and Gomishan international wetlands. *Iran Biological Trace Element Research* 185(1), 177-184.
- Solgi, E., Mirzaei-Rajeouni, E., Zamani, A., 2020. Feathers of Three Waterfowl Bird Species from Northern Iran for Heavy Metals Biomonitoring. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 104, 727-732.
- Thyen, S., Becker, P.H., Behmann, H., 2000. Organochlorine and mercury contamination of little terns (*Sterna albifrons*) breeding at the western Baltic Sea, 1978-96. *Environmental Pollution* 108, 225-238.
- Zverev, V.E., 2009. Mortality and recruitment of mountain birch (*Betula pubescens ssp czerepanovii*) in the impact zone of a copper-nickel smelter in the period of significant reduction of emissions: the results of 15-year monitoring. *Russian Journal of Ecology* 40, 254e260.