

اعتبارسنجی و بکارگیری یک روش آنالیز جهت اندازه گیری میزان آلاینده‌های آلی پایدار در نمونه‌های ماهی قزل آلائی رنگین کمان (*Onchorhynchus mykiss*) جمع آوری شده از بازار تهران

میترا بیات^۱، محمد صابرتهرانی^۱، فرزاد کبارفرد^{۲*}، سید واقف حسین^۱، حسن یزدان‌پناه^۳

*farzadkf@yahoo.com

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- گروه شیمی دارویی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- گروه سم شناسی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: آبان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت: مرداد ۱۳۹۸

چکیده

آلاینده‌های آلی پایدار گروه وسیعی از ترکیبات سمی و خطرناک می‌باشند که در برابر تجزیه شیمیایی، فیزیکی و حتی پرتوها مقاوم هستند. در این تحقیق یک روش آنالیز همزمان برای شناسایی و تعیین مقدار ۱۸ آلاینده آلی پایدار شامل هفت ترکیب PCBs، ایزومرهای شماره ۱۸۰، ۱۵۳، ۱۳۸، ۱۱۸، ۱۰۱، ۵۲، ۲۸ به عنوان شاخص‌های آلودگی بی‌فنیل‌های پلی‌کلره و یازده آفت‌کش آلی کلره (OCPs) شامل هگزا کلروبنزن (Hexachlorobenzene)، متوکسی کلر (Methoxychlor)، دی‌آلدترین (Dieldrin)، ددت و متابولیت‌های آن (DDTs: *o,p'*-DDE، *p,p'*-DDE، *o,p'*-DDT، *p,p'*-DDT) و تعدادی از سیکلو دی‌ان‌ها (Σ Cyclodiene) شامل آلفا و بتا-اندوسولفان (α -، β -Endosulfan)، آلفا و گاما-کلردان (α -، γ -Chlordane)، بررسی و مقدار آن در ماهی قزل آلائی رنگین کمان با روش استخراج مایع-مایع و دستگاه کروماتوگرافی گازی طیف سنجی جرمی-متوالی (GC-MS/MS) و روش پایش MRM اندازه‌گیری شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که منحنی کالیبراسیون ۱۸ آلاینده آلی پایدار مورد مطالعه در سطوح غلظتی ۰/۱-۳۰ ng/mL برای PCBs و ۰/۵-۱۵۰ ng/mL برای OCPs خطی بوده است و ضریب همبستگی (r^2) در محدوده ۰/۹۹۹-۰/۹۹۰ قرار داشت. مقادیر حد تشخیص و حد تعیین مقدار آنالیت‌های مورد مطالعه برترتیب ng/g ۸/۳-۰/۶ و ng/g ۲۵-۲ بدست آمد. میانگین میزان بازیافت و میزان تکرارپذیری روش در ۵ سطح آلوده مختلف (برای OCPs: ۱۰۰-۵ ng/g و برای PCBs: ۲۰-۱ ng/g)، برترتیب ۱۱۲%-۷۳% و ۱۷.۹%-۱/۴% محاسبه شد. دامنه مقادیر عدم قطعیت ۳۰/۸۸%-۲/۷۷% قرار داشت. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دهنده حضور ترکیبات آلی کلره در ماهیان مورد بررسی می‌باشد، بدین ترتیب که بیشترین میزان آلودگی مربوط به *p,p'*-DDT با مقدار میانگین ng/g ww (wet weight) ۱۱۳ بدست آمد. همچنین سموم Dieldrin و *p,p'*-DDE با مقادیر میانگین برترتیب ng/g ww ۱۳/۳ و ng/g ww ۱۰ در مراتب بعدی آلودگی قرار داشتند. بررسی دیگر سموم آلی کلره مورد مطالعه در نمونه‌های ماهی نشان‌دهنده حضور برخی از این ترکیبات مانند α -Chlordane، γ -Chlordane، *o,p'*-DDE، *o,p'*-DDT و HCB بود که مقادیر بدست آمده در نمونه‌ها پایین‌تر از حدود تعیین مقدار روش، بود. با توجه به مقادیر بدست آمده، میزان آلودگی به سموم آلی کلره پایین‌تر از حداکثر مقادیر مجاز مصوب SANTE/۱۱۸۱۳، ۲۰۱۷ قانون اتحادیه اروپا قرار داشت. همچنین بررسی بی‌فنیل‌های پلی‌کلره شاخص مورد مطالعه در نمونه‌های ماهی، نشان‌دهنده حضور تنها PCB-۲۸ بود که مقدار آن پایین‌تر از حداکثر مقادیر مجاز مصوب EU/۶۴۴، ۲۰۱۷ قانون اتحادیه اروپا قرار داشت.

واژگان کلیدی: آلاینده‌های آلی پایدار، آفت‌کش‌های آلی کلره، بی‌فنیل‌های پلی‌کلره، ماهی قزل آلائی رنگین کمان، دستگاه کروماتوگرافی گازی-طیف سنجی

جرمی متوالی

*نویسنده مسئول

مقدمه

انتشار مواد شیمیایی سمی به محیط زیست، سلامت انسان و جانوران های مختلف را به مخاطره انداخته است (Dip *et al.*, 2003). آلاینده‌های آلی پایدار (POs)¹ به دلیل پراکندگی و آلودگی محیط زیستی، موجب نگرانی‌های بسیاری در ارتباط با سلامت عمومی هستند و محدودیت‌های بسیاری در استفاده از این ترکیبات در بیشتر کشورها ایجاد گردیده است اما کاربرد وسیع آنها در حال حاضر در صنایع مختلف از جمله کشاورزی ادامه دارد (Guruge and Tanabe, 2001; Minh *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2007).

آلاینده‌های آلی پایدار گروه بسیار متنوع و متفاوتی از مواد شیمیایی انسان ساخت را دربرمی‌گیرد. چندین گروه از این مواد شیمیایی در کنفرانس استکهلم به عنوان آلاینده‌های آلی پایدار شناخته شده‌اند و نگرانی زیادی در مورد سمیت این ترکیبات به عنوان مواد خطرناک و آلوده‌کننده محیط زیست وجود دارد. دی بنزو دی اکسین های پلی کلره (PCDDs)، دی بنزوفوران‌های پلی کلره (PCDFs)، هیدرو کربن های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)، دی فنیل اترهای پلی برمه (PBDEs)، بی‌فنیل‌های پلی کلره (PCBs)، آفت‌کش‌های آلی کلره (OCPs) شامل هگزا کلرو بنزن، هگزا کلرو سیکلوهگزان و ایزومرهای آن (آلفا، بتا و گاما)، ددت و متابولیت‌های آن، حشره‌کش‌های سیکلودین (آلدرین، دی آلدرین، کلردان، اندوسولفان و ...)، توکسافون²، هپتاکلر³ و میرکس⁴، از جمله این ترکیبات می‌باشند (Fu and Wu, 2005) و ملوندی، (۱۳۸۸). آلاینده‌های آلی پایدار در برابر تجزیه نوری، بیولوژیک و شیمیایی بسیار مقاوم می‌باشند و خصوصیات نظیر چربی دوستی بالا و ماندگاری طولانی مدت آنها در محیط زیست، منجر به تجمع زیستی این ترکیبات در بافت‌های چربی موجودات زنده می‌شود که در نتیجه ماندگاری آنها در طول زنجیره غذایی افزایش می‌یابد و خطرات جبران‌ناپذیری برای سلامتی انسان و سایر اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری ایجاد می‌نماید (Perugini *et al.*, 2004; Naso *et al.*, 2005). PCBs و OCPs دو گروه از مهمترین این ترکیبات می‌باشند.

طبق تعریف سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو)¹¹، ترکیبی که بتواند هر نوع آفت را از بین ببرد یا از آن جلوگیری کند، آفت‌کش نامیده می‌شود (FAO, 2003; WHO, 2003). آفت‌کش‌ها مواد شیمیایی هستند که آگاهانه توسط انسان وارد مواد غذایی می‌شوند و به دلیل پایداری زیاد پس از مصرف، در بافت‌های انسانی و حیوانی تجمع می‌یابند و سبب ایجاد بیماری‌های فراوانی از جمله سرطان و انواع تومورها می‌شوند (Navaro *et al.*, 2007).

بی‌فنیل‌های پلی کلره در چند دهه اخیر در حجم بسیار زیادی تولید شده‌اند و به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصربفرد به عنوان دی الکتریک در خازن‌ها، مایعات هیدرولیک، روغن ترانسفورماتورها، مواد پوشش دهنده سطح، چسب‌ها و رنگ‌ها در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند (Cok and Satiroglu, 2004). به طور تجاری این ترکیبات از کلرینه نمودن بی‌فنیل‌ها تولید می‌شوند که مخلوط ایزومرهای چندگانه با درجه متفاوت از کلر هستند (Borja *et al.*, 2005). از آنجایی که ترکیبات PCB مقاومت بالایی نسبت به تجزیه دارند، در خاک و آب برای سالهای زیادی باقی می‌مانند (Wenhai *et al.*, 2005). شایان ذکر است، کشور ما عضو کنوانسیون استکهلم بوده و متعهد است تا سال ۲۰۲۵ نسبت به امحاء بی‌فنیل‌های پلی کلره، اقدام نماید (UN, 2001; Porta and Zumeta., 2002; UNEP, 2004).

روش دستگاهی مورد استفاده در تحقیقات علمی برای بالا بردن صحت و دقت روش بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر، سموم ارگانوکلره و فنیل‌های پلی کلره دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت هستند و تفاوت‌های زیادی در قطبیت، فراریت و پایداری در مقابل تجزیه شدن از خود نشان می‌دهند. طبق گزارش‌های موجود، مقدار سموم ارگانوکلره فعال مورد استفاده در کشورهای مختلف بیش از هزار عدد می‌باشد که با احتساب متابولیت‌های آنها این عدد به چندین هزار خواهد رسید (Carlo and Yolanda, 2007). همچنین فنیل‌های پلی کلره به دلیل تنوع استخلاف دارای ایزومرهای مختلف می‌باشد. بنابراین، شناسایی این مواد در ماتریکس‌های پیچیده‌ای مانند مواد غذایی بخصوص ماتریکس‌های چرب نیازمند یک روش جداسازی و دستگاهی دقیق جهت شناسایی و تعیین مقدار آنالیت‌های مورد آنالیز در غلظت‌های بسیار کم می‌باشد. نتیجه آنالیز این آلاینده‌ها باید سریع، ساده، دقیق و انتخابی باشد و در ضمن، قابل کاربرد در ماتریکس‌های

¹ Persistent organic pollutants² Polychlorinated dibenzo-dioxins³ Polychlorinated dibenzo-furans⁴ Polyaromatic hydrocarbones⁵ Polybrominated diphenyl ethers⁶ Polychlorinated biphenyls⁷ Organochlorine Pesticides⁸ Toxaphene⁹ Heptachlor¹⁰ Mirex¹¹ Food and Agriculture Organization (FAO)

مواد و روش کار

نمونه برداری ماهی

تعداد ۷۴ نمونه ماهی در مدت زمان دو سال (آبان ۹۵ لغایت آبان ۹۷) از مغازه‌های خرده فروشی شیلات و فروشگاه‌های سطح شهر تهران جمع‌آوری گردیدند. پس از جمع‌آوری، نمونه‌های ماهی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در فریزر نگهداری شدند. جهت انجام آزمایش‌ها و آنالیز، نمونه‌ها پس از خروج از فریزر به صورت فیله درآمدند و سایر اجزاء آن شامل سر، دم، پوست و استخوان‌های ماهی دور ریخته شدند. سپس فیله‌ها به داخل دستگاه آسیاب آشپزخانه‌ای منتقل شدند و به شکل خمیری درآمدند و در نهایت در ظروف شیشه‌ای مناسب بسته‌بندی و دوباره به فریزر منتقل گردیدند.

مواد مورد نیاز

حلال‌های سیکلوهاگزان، استن، نرمال هگزان، دی کلرومتان، ایزواکتان و مواد شیمیایی کلرید سدیم، سولفات منیزیم و سیلیکا از شرکت مرک^۵ خریداری شد. بی‌فنیل‌های پلی‌کلره به صورت یک آمپول مخلوط از PCBs ۷ با شماره‌های ۲۸ - ۵۲ - ۱۰۱ - ۱۱۸ - ۱۳۸ - ۱۵۳ و ۱۸۰ با غلظت ۰/۰۱ میلی‌گرم در میلی‌لیتر و حجم ۱ میلی‌لیتر و استاندارد داخلی آنها نیز به صورت یک آمپول مخلوط از هفت ¹³C-PCBs با غلظت ۰/۰۵ mg/mL و حجم ۱ میلی‌لیتر از کمپانی Wellington و آفت‌کش‌های آلی کلره شامل ۱۱ ترکیب (هگزا کلروبنزن، متوکسی‌کلر، دی‌آلدرین، ددت و متابولیت‌های آن (o,p'-DDT, p,p'-DDT, o,p'-DDE, DDE)، آلفا و بتا-اندوسولفان، آلفا و گاما-کلردان)، هر کدام یک آمپول یک میلی‌لیتری با غلظت ۰/۱ mg/mL و دو آمپول جداگانه p,p'-DDE -D8 و p,p'-DDT -D8 با غلظت ۰/۱ mg/mL و حجم ۱ میلی‌لیتر از کمپانی Chiron^۶ خریداری شد و به عنوان استاندارد داخلی مورد استفاده قرار گرفت.

تجهیزات مورد نیاز

دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل 7890A با دتکتور طیف سنج جرمی متوالی (GC-MS/MS) مجهز به یونساز با تکنیک EI و آنالیزور جرمی Triple Quadrupole همراه با اتوسمپلر مدل 7693 از شرکت آمریکایی Agilent مورد استفاده قرار گرفت. ستون نصب شده بر روی دستگاه، ستون موبینه-HP (5MS (5% phenyl-methylpolysiloxane) با مشخصات (طول ستون ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر، ضخامت فاز

مختلف نیز باشد تا بتوان به سهولت و در کمترین زمان اطلاعات دقیقی درباره پایش، ارزیابی خطر و کیفیت مواد غذایی بدست آورد. روش‌های استخراج متعددی برای شناسایی و تعیین مقدار آلاینده‌های آلی پایدار در غذای انسان وجود دارد (Voorspoels *et al.*, 2004; Covaci *et al.*, 2005). امروزه استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی- طیف سنجی جرمی متوالی (GC-MS/MS) انتخاب مناسبی جهت تحقق تمامی موارد مذکور می‌باشد. با استفاده از این دستگاه می‌توان چندین نوع آلاینده از کلاسهای متفاوت را به طور همزمان و با بهره‌گیری از روش‌های Multiresidue و تکنیک‌های پایش یونها مانند MRM^۱ یا SIM^۲ اندازه‌گیری نمود (Carlo and Yolanda, 2007).

غذاهای دریایی از جمله ماهی به عنوان یکی از کالاهای مهم در سبد غذایی مردم جامعه می‌باشد. هر ایرانی با مصرف روزانه ۶ گرم (۶ g/day)، (انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی ایران، ۸۵-۱۳۸۳؛ کلانتری و غفاری پور، ۸۱-۱۳۷۹) از غذاهای دریایی بهره می‌برد و با توجه به نیاز انسان به این کالای غذایی به عنوان گوشت سفید حاوی منابع امگا ۳ و ویتامین D، بایستی سلامت این ماده غذایی بررسی گردد (کریمی، ۱۳۹۷). بافت‌های ماهی به عنوان یک منبع مناسب دارای میزان چربی بالا (۲٪)، محیط مناسبی جهت تجمع آلاینده‌های آلی موجود در محیط‌های آبی مانند رودخانه‌ها می‌باشد (Brown *et al.*, 1987). به دلایل مذکور و اینکه ایران یکی از بزرگترین تولیدکننده ماهی قزل‌آلا در دنیا است (خدانظری، ۱۳۹۷) و این ماهی بیشتر از سایر محصولات دریایی مورد مصرف جامعه می‌باشد، ماهی قزل‌آلا به عنوان ماده غذایی مورد مطالعه از نظر آلودگی به آلاینده‌های آلی پایدار (OCPs, PCBs) انتخاب شد.

هدف از انجام این تحقیق، تکوین و اعتبارسنجی یک روش آنالیز معتبر جهت اندازه‌گیری میزان سموم آلی کلره و بی‌فنیل‌های پلی‌کلره در ماهی قزل‌آلا می‌باشد. در مطالعه حاضر با کمک دستگاه GC-MS و روش پایش MRM و روش استخراج مایع-مایع (LLE^۳)، روشی مناسب، سریع، آسان، ارزان و دقیق برای آنالیز همزمان OCPs ۱۱ و PCBs ۷ در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بازار تهران بکار گرفته شد.

¹ Gas chromatography –Tandem mass spectrometry

² Multiple reaction monitoring

³ Selected ion monitoring

⁴ Liquid-liquid extraction

⁵ Merck

⁶ Campro Scientific

گردید. دمای محفظه تزریق ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. خروجی کروماتوگرافی گازی به صورت گاز حاوی آنالیت‌ها و حلال می‌باشد که پس از ورود به اتافک یون‌ساز توسط روش برخورد الکترونی (EI) یونیزه می‌شود و به سمت آنالیزور جرمی هدایت می‌گردد. مقدار انرژی یونیزاسیون جهت یونیزه کردن یون‌ها ۷۰ الکترون ولت در نظر گرفته شد. همچنین دمای محفظه یونیزاسیون و آنالیزورهای جرمی بترتیب ۲۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

آنالیز جرمی بکار رفته در دستگاه GC-MS مورد استفاده در این تحقیق آنالیزور جرمی چهار قطبی سه گانه^۴ می‌باشد. این آنالیزور با داشتن محدوده خطی مطلوب در آنالیز کمی آنالیت‌ها، محدوده جرمی مناسب، به عنوان یک فیلتر جرمی به صورت سیستم‌های پایش Full scan، SIM، و سایر پایش‌های اختصاصی‌تر مانند MRM استفاده گردید. در روش پایش MRM از قسمت میانی آنالیزور جرمی چهار قطبی سه گانه یا همان سلول تصادم^۵ به عنوان محلی جهت شکستن یون‌های مورد نظر و بدست آوردن قطعات یونی مناسب (فرگمنت) آنها در انرژی‌های بهینه شده (۱۰-۳۵ eV) استفاده گردید. از گازهای نیتروژن به عنوان گاز فرگمنته کننده و هلیوم به عنوان گاز خنک کننده با سرعت ثابت ۱ mL/min به طور جداگانه استفاده شد.

معتبرسازی روش آنالیز

جهت شناسایی آنالیت‌ها و به منظور تشخیص زمان بازداری و یون‌های شاخص (یون تعیین مقدار و یون‌های تاییدی) هر آلاینده، ابتدا محلول‌های استانداردهای ۱۱ آفت‌کش آلی کلره (غلظت ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر)، ۷ بی‌فنیل چندکلره (غلظت ۱ µg/mL) و استاندارد داخلی PCBs -¹³C₁₂ ۷ (غلظت ۰/۵ µg/mL) و استانداردهای داخلی p,p'-DDT-D8 و p,p'-DDE-D8 (غلظت ۱ µg/mL) را به طور جداگانه در مد اسکن Full scan در محدوده جرمی ۲۵-۵۰۰ واحد جرم اتمی (amu) به مقدار ۱ میکرو لیتر به دستگاه GC-MS تزریق گردید و کروماتوگرام و طیف جرمی آنها بدست آمد (جدول ۱).

ثابت ۰/۲۵ میکرومتر) بود. تجهیزات دیگری مانند ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم، آسیاب آشپزخانه‌ای، دستگاه تبخیر Turbovap II، سانتی‌فیوژ، همزن، سونیکاتور، میکروپیپت در اندازه‌های مختلف، ستون کروماتوگرافی شیشه‌ای، لوله فالکون، گاز ازت و هلیوم با خلوص بالا (۹۹/۹۹۹٪) در این پروژه مورد استفاده قرار گرفت.

معتبرسازی روش آنالیز و آماده سازی نمونه ها

بهینه سازی شرایط دستگاه GC-MS: به منظور آنالیز هر یک از آلاینده‌های آلی پایدار مورد مطالعه (PCBs، OCPs، ۷) و تهیه کروماتوگرام و طیف جرمی برای مشخص کردن یون‌های شاخص (یون تاییدی و یون تعیین مقدار) (کبارفرد و عمیدی، ۱۳۸۷)، برنامه دمایی با در نظر گرفتن نقطه جوش حلال و تحمل دمایی ستون طراحی شد. به این صورت که دمای ابتدای ستون ۶۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب و به مدت ۲ دقیقه ستون در این دما نگهداری شد، سپس با سرعت ۲۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، ستون به دمای ۱۲۰ درجه رسید و سپس با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و در نهایت با سرعت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید و ۵ دقیقه در این دما نگهداری شد. کل برنامه دمایی به مدت ۲۵/۶ دقیقه (run time) محاسبه گردید. اولین پیک نمایش داده شده در کروماتوگرام مربوط به HCB (دقیقه ۱۵/۶) و آخرین پیک مربوط به PCB-۱۸۰ (دقیقه ۲۲/۲) می‌باشد. بدین ترتیب کلیه ۱۸ آلاینده آلی پایدار مورد مطالعه در مدت حدود ۷ دقیقه جداسازی گردیدند. در برنامه طراحی شده برای این آنالیز سرعت حرکت فاز متحرک (گاز هلیوم) از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای این منظور برنامه فشار گاز متحرک هلیوم متناسب با برنامه دمایی طراحی گردید. بدین ترتیب، در ابتدا فشار گاز ۷ psi به مدت یک دقیقه ثابت نگهداشته شد. سپس با سرعت ۱۰ psi/min به فشار ۱/۵ psi و سپس با سرعت ۰/۴ psi/min به فشار ۹/۶ psi و در ادامه با سرعت ۱ psi/min به فشار ۱۱/۲ psi رسانده شد و در این فشار به مدت ۵ دقیقه نگهداری گردید. در این راستا با توجه به لزوم آنالیز نمونه‌هایی که احتمالاً حاوی مقادیر بسیار پایینی از آنالیت‌ها بودند و با در نظر گرفتن حداکثر مجاز این ترکیبات در ماهی قزل‌آلا، تزریق در حالت splitless و با لاینر مناسب^۳ split/splitless انجام

⁴ Triple Quadrupole

⁵ Collision cell

⁶ Electron volt

⁷ Atomic mass unit

¹ Qualifier and quantifier ions

² Pound-force per square inch (unit of pressure)

³ Splitless and split mode used for dilute and concentrated solutions respectively

جدول ۱: یونهای شاخص و تعیین مقدار شناسایی شده برای ۱۸ آلاینده آلی پایدار (۱۱ OCPs و ۷ PCBs) و استانداردهای داخلی آنها

Table 1: Qualifier and quantifier ions used for 18 POPs (11 OCPs and 7 PCBs) and their IS

ترکیب	زمان بازداری (دقیقه)	یون مادر	یون های محصول (یون تأییدی، یون تعیین مقدار)	انرژی تفکیک (الکترون ولت)
HCB	۱۵/۶	۲۸۵	۲۴۹،۲۱۴	۱۶،۱۵
α -Chlordane	۱۹/۵	۴۱۰	۲۶۶،۳۰۱	۲۸،۱۵
γ -Chlordane	۱۹/۳	۴۱۰	۲۶۶،۳۰۱	۲۸،۱۵
Dieldrin	۱۹/۹	۳۸۰	۱۹۳،۲۲۸	۳۵،۲۴
o,p'-DDE	۱۹/۳	۳۱۸	۱۷۶،۲۴۸	۲۸،۱۵
p,p'-DDE	۱۹/۸	۳۱۸	۱۷۶،۲۴۸	۲۸،۱۵
o,p'-DDT	۲۰/۵	۳۵۴	۱۶۵،۱۹۹	۳۰،۱۵
p,p'-DDT	۲۱	۳۵۴	۱۶۵،۱۹۹	۳۰،۱۵
α -Endosulfan	۱۹/۵	۴۰۶	۲۰۶،۱۵۹	۱۵،۱۰
β -Endosulfan	۲۰/۴	۴۰۶	۲۰۶،۱۶۰	۱۳،۱۰
Methoxychlor	۲۱/۸	۳۴۵	۱۴۱،۱۶۹	۳۵،۳۵
PCB ۲۸	۱۷/۱	۲۵۶،۲۵۸*	۱۸۶	۳۰
PCB ۵۲	۱۷/۷	۲۹۰،۲۹۲*	۲۲۰	۳۰
PCB ۱۰۱	۱۹/۳	۳۲۶،۳۲۸*	۲۵۶	۳۵
PCB ۱۱۸	۲۰/۳	۳۲۶،۳۲۸*	۲۵۶	۳۵
PCB ۱۵۳	۲۰/۷	۳۶۰،۳۶۲*	۲۹۰	۳۰
PCB ۱۳۸	۲۱/۱	۳۶۰،۳۶۲*	۲۹۰	۳۰
PCB ۱۸۰	۲۲/۱	۳۹۴،۳۹۶*	۳۲۴	۳۵
p,p'-DDE-D8	۱۹/۸	۳۲۶	۱۸۴،۲۵۶	۲۸،۱۵
p,p'-DDT-D8	۲۱	۳۶۲	۱۷۳،۲۰۷	۳۰،۱۵
¹³ C-PCB ۲۸	۱۷/۱	۲۶۸،۲۷۰*	۱۹۸	۳۰
¹³ C-PCB ۵۲	۱۷/۷	۳۰۲،۳۰۴*	۲۳۲	۳۰
¹³ C-PCB ۱۰۱	۱۹/۳	۳۳۸،۳۴۰*	۲۶۸	۳۵
¹³ C-PCB ۱۱۸	۲۰/۳	۳۳۸،۳۴۰*	۲۶۸	۳۵
¹³ C-PCB ۱۵۳	۲۰/۷	۳۷۲،۳۷۴*	۳۰۲	۳۰
¹³ C-PCB ۱۳۸	۲۱/۱	۳۷۲،۳۷۴*	۳۰۲	۳۰
¹³ C-PCB ۱۸۰	۲۲/۱	۴۰۶،۴۰۸*	۳۳۶	۳۵

شد. همچنین برای بدست آوردن پیک‌هایی با حداکثر شدت، ۶ ناحیه زمانی جهت پردازش یون‌های شاخص ترکیبات تعریف گردید. در مرحله بعد به منظور انتخاب و بهینه سازی فرگمنت‌های حاصل از یون مادر و انرژی‌های مختلفی که در آن تبدیل‌های حاصل^۱ منجر به ایجاد یون‌های محصول با بیشترین

سپس محلول استاندارد حد واسط از مخلوط یازده OCPs و هفت PCBs مورد مطالعه به منظور آنالیز همزمان ۱۸ ترکیب آلی پایدار در روش پایش اسکن (غلظت OCPs: ۰/۵ $\mu\text{g/mL}$ و PCBs: ۰/۱ $\mu\text{g/mL}$) و به مقدار ۱ میکرولیتر به دستگاه تزریق شد.

پس از شناسایی یون‌های مادر، به منظور افزایش حساسیت و گزینش پذیری، از روش پایش یون‌های انتخابی (SIM) استفاده

¹ Transition

ترکیبات p,p' -DDE-D8 و p,p' -DDT-D8 به عنوان استانداردهای داخلی برای آنالیز ترکیبات ددت و متوکسی کلر مورد استفاده قرار گرفت و جهت آنالیز سایر سموم آلی کلره از ترکیب نشاندار $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB-118 استفاده گردید. بی فنیل‌های چندکلره با استاندارد داخلی مرتبط به خود از نوع نشاندار C_{12} -labelled-PCBs¹³، مورد بررسی قرار گرفتند.

معتبرسازی روش آنالیز نمونه‌ها

شناسایی و اندازه‌گیری میزان باقیمانده سموم آلی پایدار در نمونه‌های ماهی قزل آلا بوسیله دستگاه GC-MS/MS و با روش پایش MRM انجام شد. بدین ترتیب یک گرم فیله ماهی یخ زدایی شده عاری از هر گونه آلاینده (نمونه تمیز³)، با ۲۵ میکرولیتر از غلظت ۱۰۰۰ نانوگرم بر میلی‌لیتر استانداردهای داخلی OCPs و ۵۰ μL از غلظت ۵۰۰ ng/mL استانداردهای داخلی PCBs آلوده⁴ شد. همچنین جهت محاسبه میزان بازیافت و کارایی روش استخراج مقدار ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرولیتر از محلولی با غلظت OCPs: ۵۰۰ ng/mL و PCBs: ۱۰۰ ng/mL (جهت بدست آوردن سطوح اسپایک OCPs: ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ng/g و PCBs: ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ ng/g) بر ماهی اسپایک شد. پس از هم زدن شدید، مقدار ۱۰ mL مخلوط حلال‌های آن-هگزان/استن با نسبت ۱:۱ را بر روی نمونه ریخته و بعد از هم زدن محلول مقدار ۴ گرم سولفات منیزیم و ۲ گرم کلرید سدیم به آن اضافه شد. سپس این مخلوط با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانترفیوژ گردیده و میزان ۱ mL از محلول جداسازی شده با گاز ازت خشک شد. سپس به آن ۱ mL هگزان اضافه می‌شود (محلول ۱). به منظور تهیه ستون سیلیکا جهت مرحله خالص سازی⁵، مقدار ۱ گرم سیلیکای غیر فعال شده⁶، داخل ستون کروماتوگرافی مخصوص ریخته شد و پس از آماده سازی ستون⁷ با هگزان و دی کلرومتان، محلول ۱ به ستون اضافه شد. سپس لوله با ۲ mL هگزان در دو مرحله و هر بار ۱ mL شستشو گردید.

³ Blank

⁴ Spike

⁵ Clean up

⁶ تهیه سیلیکای غیر فعال: برای این منظور مطابق با دستورالعمل آزمایشگاه رفرانس اروپا سیلیکا ژل را سه مرتبه با دی کلرومتان شستشو داده و سپس جهت خشک شدن یک شب در آون با دمای ۳۰۰-۲۰۰ درجه قرار داده شد.

⁷ Conditioning

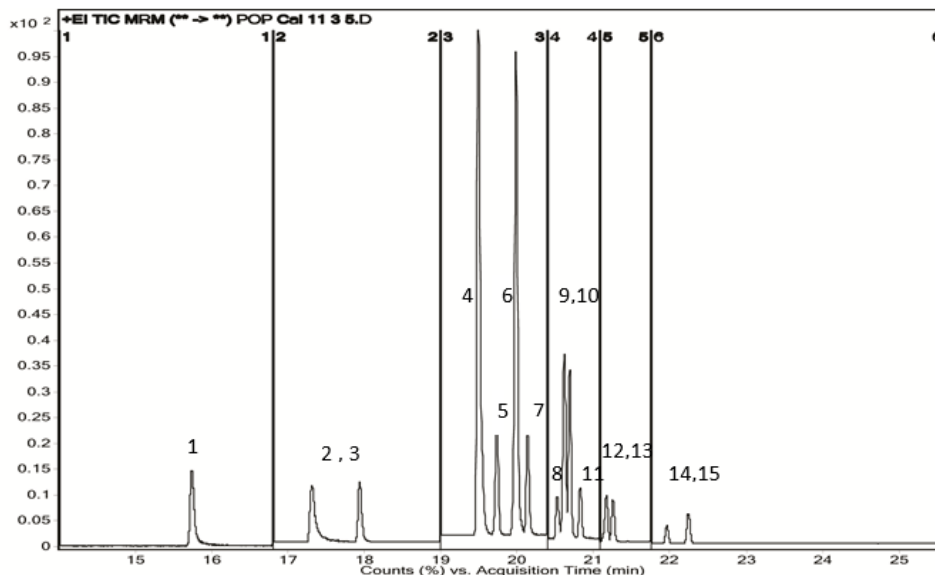
فراوانی می‌شوند و به عنوان انرژی‌های تفکیک¹ مخصوص هر سم انتخاب شد (جدول ۱). در ادامه جهت افزایش حداکثری اختصاصی بودن و حساسیت روش آنالیز، مقدار یک میکرولیتر از محلول با غلظت OCPs ۰/۵ $\mu\text{g/mL}$ و PCBs ۰/۱ $\mu\text{g/mL}$ به همراه استانداردهای داخلی مربوطه (غلظت ۲۵ نانوگرم بر میلی‌لیتر) تزریق گردید (شکل ۱).

جهت کشیدن منحنی کالیبراسیون محلول‌های استاندارد مخلوط از ۱۸ آلاینده آلی پایدار با غلظت‌های مختلف [۰/۵، ۱/۲۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰ ng/mL برای OCPs و ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ ng/mL برای PCBs] (استانداردهای داخلی آنها با غلظت ۲۵ ng/mL) تهیه و به دستگاه تزریق شد و مورد آنالیز قرار گرفت. بدین منظور با توجه به زمان بازداری آلاینده‌های مورد نظر در ناحیه‌های تعریف شده، یون‌های اختصاصی هر یک از سموم، پایش شده و سطح زیر پیک هر یک در غلظت مورد نظر بدست آمد. منحنی‌های استاندارد با تمامی استانداردهای داخلی کشیده شدند و نهایتاً بهترین معادله با ضریب همبستگی بالای ۹۹٪ انتخاب گردید. برای تعیین صحت و دقت روش پنج سطح اسپایک OCPs: ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ng/g و متناسب با آن PCBs: ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ ng/g (مورد بررسی قرار گرفت (استاندارد داخلی ۲۵ ng/g بود). نسبت سطح زیر منحنی آنالیت به سطح زیر منحنی استاندارد داخلی برای نمونه‌های مجهول پس از تزریق نمونه‌ها به دستگاه محاسبه گردید و در معادلات خطی منحنی کالیبراسیون قرار داده شد و غلظت هر سم و مقدار بازیافت آن بررسی گردید. برای هر غلظت در هر روز ۳ نمونه آماده و به دستگاه تزریق شد و این عمل ۳ روز متوالی تکرار گردید. بر مبنای نتایج حاصله میزان بازیافت به عنوان معیاری از صحت و RSD٪ به عنوان معیاری از دقت روش محاسبه گردید. همچنین کمترین غلظتی که پیکی معادل سه برابر نویز ایجاد کند ($S/N=3$) به عنوان LOD آنالیت مورد نظر و کمترین غلظتی که پیکی معادل ۱۰ برابر نویز ایجاد کند ($S/N=10$) به عنوان LOQ آن آنالیت در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت (U) روش از حاصلضرب درصد ضریب تغییرات در فاکتور پوشش (عدد ۲) مطابق فرمول فرمول ۱ بدست آمد (EU, 2017, 644; EU, SANTE, 2017, 11813; Chandran and Singh, 2007).

$$\text{فرمول ۱} \quad U = 2 (\text{Coverage factor}) \times \text{CV}\%^2$$

¹ Collision energy

² Coefficient of variation



شکل ۱: کروماتوگرام مخلوط ۱۸ آلاینده آلی پایدار در مد MRM

Figure 1: GC-MS/MS chromatogram of 18 POPs in MRM mode

1: HCB, 2: PCB 28, 3: PCB 52, 4: PCB 101, γ -Chlordane, *o,p'*-DDE, 5: α -Chlordane, α -Endosulfan, 6: *p,p'*-DDE, 7: Dieldrin, 8: PCB 118, 9: β -Endosulfan, 10: *o,p'*-DDT, 11: PCB 138, 12: *p,p'*-DDT, 13: PCB 153, 14: Methoxychlor, 15: PCB 180

شماره ۶۴۴ و ۱۱۸۱۳ اتحادیه اروپا مقایسه شد (EU, 2017, 644; EU, SANTE, 2017, 11813; Chandran and (Singh, 2007).

تخمین میزان دریافت روزانه سموم POPs در شهر تهران

میزان دریافت هر سم به میزان آلودگی و میزان مصرف ماده غذایی مورد نظر بستگی دارد. در این تحقیق پس از شناسایی و تعیین مقدار آلاینده‌های آلی پایدار مورد مطالعه موجود در ماهی میزان متوسط دریافت روزانه این سموم با در نظر گرفتن میانگین سرانه ۶ گرم ماهی در روز (انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی ایران، ۸۵-۱۳۸۳؛ کلانتری و غفاری پور، ۸۱-۱۳۷۹) و با احتساب ۶۰ کیلوگرم برای وزن یک فرد بالغ محاسبه گردید (FAO, 2002; WHO, FSF/FOS, 2011). با فرض اینکه یک فرد تهرانی در طول یک روز یک عدد ماهی مصرف کند، میانگین دریافت روزانه آلاینده‌های آلی پایدار مورد مطالعه از طریق مصرف ماهی به ازاء هر کیلوگرم وزن بدن او مطابق فرمول ۲ محاسبه شد (فرمول ۲).

هت استخراج نهایی آنالیت‌ها از ماهی مقدار ۱۰ mL مخلوط حلالهای هگزان/دی کلرومتان با نسبت ۱:۱ به آن اضافه شده و تا حجم ۰/۵ میلی لیتر با گاز ازت توسط دستگاه تبخیر خشک گردید. سپس مقدار ۲ mL ایزواکتان به آن اضافه شد و دوباره تا حجم ۰/۵ mL خشک گردید. مقدار ۱۰۰ μ L از آن را به ویال GC-MS منتقل شد و مقدار ۱ μ L به دستگاه GC-MS تزریق گردید. بدین ترتیب میزان حدود تشخیص و تعیین مقدار و همچنین میزان بازیافت به منظور صحت روش و میزان دقت از محاسبه تکرارپذیری روش، محاسبه گردید. غلظت هر یک از آلاینده‌های موجود در نمونه‌ها با استفاده از محاسبه نسبت مقدار سطح زیر پیک هر آلاینده به مقدار سطح زیر پیک استاندارد داخلی مربوطه و قراردادن آن در معادله خط منحنی کالیبراسیون استاندارد آنالیت‌ها بدست آمد. مقادیر بدست آمده به عنوان پاسخ تجزیه‌ای جهت محاسبه غلظت باقیمانده آلاینده‌های آلی پایدار موجود در نمونه‌ها استفاده شد. جهت بدست آوردن مقادیر هر آلاینده، جرم مورد نظر از داخل کروماتوگرام استخراج شد.

پس از بهینه کردن شرایط در بخش‌های مختلف از جمله کروماتوگرافی گازی و طیف سنجی جرمی و روش استخراج و خالص‌سازی، اعتبار بخشی روش بر اساس پروتکل اعتبارسنجی SANTE انجام شد و با پارامترهای موجود در دستورالعمل

$$\text{میزان آلودگی (ng/g)} = \frac{\text{حد تعیین مقدار} \times \text{تعداد نمونه غیر آلوده}}{\text{تعداد نمونه ها}}$$

$$\text{میزان دریافت (ng/kg bw/day)} = \frac{\text{مصرف سرانه ماهی (g/day)} \times \text{میزان آلودگی در ماهی (ها)}}{\text{میانگین وزن یک فرد بالغ (60kg)}}$$

فرمول ۲

نتایج

نتایج حاصل از تزریق استانداردها به دستگاه نمایانگر خطی بودن منحنی‌های کالیبراسیون می باشد. بدین ترتیب، معادلات خطی و ضریب همبستگی (r^2) در دامنه ۰/۹۹۰۱-۰/۹۹۹۷ بدست آمد. حد تشخیص و حد تعیین مقدار بترتیب ۸/۳ ng/g و ۰/۶ - ۲۵ ng/g محاسبه و میانگین میزان بازیافت و تکرارپذیری روش در ۵ سطح آلوده بترتیب در بازه ۱۱۱/۸ - ۷۳/۳ درصد مطابق با دستورالعمل اتحادیه اروپا (۱۲۰-۶۰ درصد جهت OCPs و ۱۳۰-۷۰ درصد جهت PCBs) و میانگین ضریب تغییرات در بازه ۱/۴-۱۷/۹ درصد مطابق دستورالعمل اتحادیه اروپا (کمتر از ۲۰ درصد) گزارش گردید (EU, 2017, 644; EU, SANTE, 2017, 11813). عدم قطعیت روش ۲/۷۷-۳۰/۸۸ درصد محاسبه گردید (جدول ۲).

مدت تکوین شده در تحقیق حاضر مورد آنالیز قرار گرفتند. در هر روز یک نمونه کنترل کیفی به صورت بلانک در کنار نمونه‌های مجهول آنالیز شد. نتایج بدست آمده در جدول ۳ ارائه شده است. بیشترین میزان آلودگی مربوط به p,p' -DDT با مقدار میانگین (Wet weight) ww ۱۱۳ ng/g بدست آمد. همچنین سموم Dieldrin و p,p' -DDE با مقادیر میانگین بترتیب ۱۳/۳ ng/g ww و ۱۰ ng/g ww در مراتب بعدی آلودگی قرار داشتند. بررسی سایر آلاینده‌های مورد مطالعه در نمونه‌های ماهی نشان‌دهنده حضور برخی از این ترکیبات مانند α -Chlordane, γ -Chlordane, α -Endosulfan, β -Endosulfan, Methoxychlor, PCB-28 و HCB بود که مقادیر بدست آمده در نمونه‌ها پایین‌تر از حدود تعیین مقدار روش (LOQ) بود. همچنین میزان تخمینی دریافت روزانه (Estimated daily intake) این سموم برای یک فرد بالغ تهرانی به میزان ng/kg bw/day ۰/۰۶۱ - ۰/۰۰۷ محاسبه گردید (جدول ۳).

آنالیز نمونه‌های جمع‌آوری شده از سطح بازار تهران با ۷۴ نمونه ماهی جمع‌آوری شده از فروشگاه‌های شهر تهران با

جدول ۲: حد تشخیص، حد تعیین مقدار، دقت، صحت و عدم قطعیت در ۱۸ آلاینده آلی پایدار (۱۱OCPs و ۷ PCBs)
Table 2: Performance characteristics of the method for analysis of 18 POPs (OCPs and PCBs) in fish

ترکیب	حد تشخیص (نانوگرم بر گرم)	حد تعیین مقدار (نانوگرم بر گرم)	صحت ± دقت (درصد)	عدم قطعیت (درصد)	ضریب همبستگی	معادله خط
HCB	۱/۶	۵	۸۷ ± ۳/۴	۶/۷۸	۰/۹۹۰۱	$Y = 0.321X - 0.019$
α -Chlordane	۳/۳	۱۰	۸۵/۲ ± ۹/۳	۱۸/۵۸	۰/۹۹۵۴	$Y = 0.194X + 0.031$
γ -Chlordane	۱/۶	۵	۱۰۸/۵ ± ۱۳/۸	۲۷/۶۴	۰/۹۹۶۷	$Y = 0.193X - 0.223$
Dieldrin	۳/۳	۱۰	۱۰۰/۸ ± ۱۴/۳	۲۸/۶۰	۰/۹۹۴۸	$Y = 0.047X - 9.51 \times 10^{-5}$
o,p' -DDE	۱/۶	۵	۱۰۳/۹ ± ۱۳/۹	۲۷/۸۲	۰/۹۹۹۰	$Y = 0.111X - 0.0804$
p,p' -DDE	۱/۶	۵	۱۱۱/۸ ± ۵/۵	۱۱/۰۴	۰/۹۹۸۰	$Y = 0.1029X - 0.0652$
o,p' -DDT	۳/۳	۱۰	۹۵/۸ ± ۱/۴	۲/۷۷	۰/۹۹۵۰	$Y = 0.062X + 0.2559$
p,p' -DDT	۳/۳	۱۰	۱۰۹/۷ ± ۱۳/۵	۲۷/۰۱	۰/۹۹۱۹	$Y = 0.167X - 0.745$
α -Endosulfan	۸/۳	۲۵	۷۳/۳ ± ۱۷/۹	۲۵/۷۰	۰/۹۹۱۵	$Y = 0.08X + 0.153$
β -Endosulfan	۸/۳	۲۵	۸۵/۲ ± ۵/۳	۱۰/۵۵	۰/۹۹۷۲	$Y = 0.048X - 0.081$
Methoxychlor	۳/۳	۱۰	۸۳/۲ ± ۱۴/۵	۲۹/۰۸	۰/۹۹۶۹	$Y = 0.292X - 0.1754$
PCB 28	۰/۶	۲	۸۹ ± ۴/۴	۸/۸۲	۰/۹۹۷۸	$Y = 0.0493X - 0.161$
PCB 52	۰/۶	۲	۸۴/۴ ± ۲/۹	۵/۷۴	۰/۹۹۹۷	$Y = 0.0506X - 0.205$
PCB 101	۰/۶	۲	۸۰/۵ ± ۸/۱	۱۶/۱۴	۰/۹۹۸۰	$Y = 0.0781X - 0.406$
PCB 118	۰/۶	۲	۸۷/۳ ± ۷/۳	۱۴/۶۷	۰/۹۹۷۹	$Y = 0.0541X - 0.257$
PCB 138	۰/۶	۲	۸۲ ± ۱۴/۷	۲۹/۴۷	۰/۹۹۶۷	$Y = 0.0471X - 0.044$
PCB 153	۰/۶	۲	۹۵/۱ ± ۸/۵	۱۷/۰۸	۰/۹۹۹۱	$Y = 0.0507X - 0.245$
PCB 180	۱/۶	۵	۷۶ ± ۱۵/۴	۳۰/۸۸	۰/۹۹۴۸	$Y = 0.0471X - 0.012$

جدول ۳: مقادیر میانگین، میانه، درصد پراکندگی و میزان تخمینی دریافت روزانه نمونه های ماهی آلوده به سموم آلی کلره و بی فیل های پلی کلره مورد مطالعه در کل ۷۴ نمونه ماهی

Table 3: Occurrence of OCPs and PCBs in fish samples from Tehran markets (Median, Mean, Incidence, EDI) (n=74)

ترکیب	پراکندگی (درصد)	میانگین (نانوگرم بر گرم)	میانه (نانوگرم بر گرم)	حداکثر (نانوگرم بر گرم)	میزان تخمینی	
					دریافت روزانه (نانوگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز)	حداکثر مقادیر مجاز مصوب (نانوگرم بر گرم وزن تر)
HCB	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۶	۲۰۰
α -Chlordane	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۰۷	۵۰
γ -Chlordane	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۰۷	(مجموع ایزومرهای سیس و ترانس)
Dieldrin	۲/۷	۱۳/۳۱	۱۳/۳۱	۱۵/۱	۰/۰۴	۲۰۰ (به تنهایی یا همراه با آلدین)
o,p'-DDE	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۲	
p,p'-DDE	۸/۱۱	۱۰/۰۳	۷/۴۵	۱۷/۹	۰/۲۸	۱۰۰۰
o,p'-DDT	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۱	(مجموع تمام متابولیت ها)
p,p'-DDT	۵/۴	۱۱۲/۹۹	۲۱/۸۸	۳۹۸	۰/۶۱	
α -Endosulfan	Nd*	-	-	-	-	۵۰ (مجموع ایزومرهای آلفا، بتا و سولفات اندوسولفان)
β -Endosulfan	Nd*	-	-	-	-	
Methoxychlor	Nd*	-	-	-	-	۱۰
PCB ۲۸	Nd*	< LOQ	< LOQ	-	۰/۰۲	
PCB ۵۲	Nd*	-	-	-	-	
PCB ۱۰۱	Nd*	-	-	-	-	
PCB ۱۱۸	Nd*	-	-	-	-	۷۵
PCB ۱۳۸	Nd*	-	-	-	-	(مجموع ۷ شاخص)
PCB ۱۵۳	Nd*	-	-	-	-	
PCB ۱۸۰	Nd*	-	-	-	-	

* مشخص نشد (مقادیر زیر حد تشخیص دستگاه بود و مشاهده نشد)

بحث

و دی کلرومتان و دستگاه GC-ECD، نمونه ها را آنالیز کردند. این تحقیق بر سه گونه ماهی شامل اردک ماهی (*Esox*)، کپور (*Ciprinus carpio*) و کاراس (*Carassius auratus*) انجام شد (Davodi et al., 2011). همچنین در تحقیقی دیگر با استفاده از حلال های آن هگزان و دی کلرومتان و استن با نسبت های مختلف و دستگاه سوکسله تعدادی از PCB ها و OCP ها در ماهی آنالیز شدند (Voorspoels et al., 2004; Covaci et al., 2005). روش سوکسله یکی از متدهای مرسوم جهت آماده سازی و استخراج آلاینده ها در ماتریکس های مختلف مواد غذایی و گیاهان بوده است. اما مدت زمان آنالیز نمونه ها (۲۴-۴ ساعت)، حجم زیاد حلال مصرفی و بازده پایین روش، کم کم باعث شد از روش های جایگزین

طبق مطالعات انجام گرفته در ایران، اکثر روش های آنالیز نمونه ها بر اساس روش آنالیز آلاینده های آلی پایدار در نمونه های ماهی بر اساس روش سوکسله^۱ و دستگاه GC-ECD^۲ انجام شده است. محققین (داودی، ۱۳۸۹؛ جاودان خرد، ۱۳۹۱) با استفاده از مخلوط حلال های آن هگزان و استن بوسیله دستگاه سوکسله به مدت ۴ ساعت تعدادی از آفت کش های آلی کلره و بی فیل های پلی کلره را استخراج نمودند و سپس با استفاده از ستون کارتریج حاوی سیلیکاژل و مخلوط حلال های آن هگزان

¹ Soxhlet

² Gas chromatography-electron capture detector

نتایج بدست آمده از این پژوهش دقیق و قابل استناد می‌باشد. این میزان صحت و دقت را می‌توان معلول استفاده از استانداردهای داخلی متعدد و اختصاصی هر ترکیب دانست. بررسی مقالات مختلف نشان داد استفاده از استاندارد داخلی اختصاصی هر ترکیب می‌تواند دقت انجام آزمایش را تا حدود بسیار زیادی بالا ببرد. میزان انحراف استاندارد نسبی (RSD^7) یا به عبارتی تکرارپذیری روش در تحقیقات توسط Voorspoels و Covaci (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵) انجام دادند، کمتر از ۳۰ درصد گزارش شده بود (Voorspoels *et al.*, 2004; Covaci *et al.*, 2005). در این تحقیقات تنها از دو استاندارد داخلی PCB ۴۶ و ۱۴۳ استفاده گردید (EU, 2017, 644; EU, 2017, 11813). در روش بهینه شده توسط Cocco و همکاران (۲۰۱۱) تنها از یک استاندارد داخلی (PCB-۲۰۹) استفاده شده است که میزان بازیافت ۹۴-۷۴ درصد و RSD در دامنه ۱۹-۱۱ درصد اعلام شده بود (Cocco *et al.*, 2011) و میزان حداکثر حدود تشخیص و تعیین مقدار بترتیب ۲۰ و ۴۰ ng/g گزارش شده بود که در روش اخیر (این مقاله) این مقدار بترتیب ۸/۳ و ۲۵ بدست آمد. استفاده از متد طیف سنجی جرمی متوالی (MS/MS) و پایش یون‌ها به روش MRM یکی از بهترین گزینه‌ها برای آنالیز همزمان ۱۸ آلاینده آلی پایدار در ماتریکس پیچیده‌ای مانند ماهی می‌باشد. بدین ترتیب، در مدت زمان بسیار کوتاه (۷ دقیقه) و فقط با تعیین تعدادی یون شاخص از آلاینده‌های مورد نظر، پاسخ سریع، صحیح و دقیقی بدست آمد. بررسی آلاینده‌های آلی پایدار مورد مطالعه در ۷۴ نمونه ماهی قزل آلاهی رنگین کمان جمع‌آوری شده از فروشگاه‌های شهر تهران، مشخص نمود که تعدادی از آنها به این سموم آلوده می‌باشند (جدول ۳). مقدار بالای p,p' -DDT (۱۱۳ ng/g) در ماهیان نشان می‌دهد، برخلاف ممنوعیت بکارگیری DDT صنعتی در مزارع کشاورزی، این سم اخیراً مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر، مقدار کم متابولیت p,p' -DDE (۱۰ ng/g) همچنین مقادیر ناچیز متابولیت‌های p,p' -DDT و p,p' -DDE در ماهیان آلوده به این سموم، نشانه‌ای از مقاومت بالای زیست محیطی و نیمه عمر طولانی آنها در اکوسیستم‌های آبی می‌باشد که مشخصاً نشان می‌دهد، این ماهیان بتازگی در معرض سم DDT قرار نگرفته‌اند (Andersen *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2008).

دی آلدین متابولیت پایدار سم آلدین است که به صورت اپوکسید نسبت به پیش ماده خود، دارای قطبیت بیشتر و در

مانند ASE^۱ یا PLE^۲ استفاده گردد. Lui و همکاران (۲۰۰۶) و همچنین Yang و همکاران (۲۰۱۰) بترتیب از روش‌های GPC^۳ و ASE برای آنالیز سموم آلی کلره و بی‌فنیل‌های پلی‌کلره با بکارگیری حلال‌های آن‌هگزان و دی‌کلرومتان استفاده کردند (Liu *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2010). همچنین Drabova و همکاران (۲۰۱۱) و Suchan و همکاران (۲۰۰۴) مقدار زیادی از آلاینده‌های آلی پایدار را با بکار بردن حلال آن‌هگزان و دی‌کلرومتان (۱:۱) و روش PLE جداسازی و شناسایی نمودند (Suchan *et al.*, 2004; Drabova *et al.*, 2011). روش‌های مذکور امروزه همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند اما با توجه به تعدد پروژه‌های تحقیقاتی، استفاده از روشی که بتواند در مدت زمان کوتاهی نتایج قابل قبولی ارائه نماید، لازم و ضروری می‌باشد. در این تحقیق از روش استخراج مایع - مایع استفاده شده است. سادگی و حجم کم حلال مصرفی و عدم نیاز به تجهیزات خاص و گران جهت آماده‌سازی نمونه‌ها از مزایای استفاده از این روش می‌باشد. بدین ترتیب استفاده از حلال‌های متفاوت در درصد‌های مختلف برای دو مرحله استخراج و خالص‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مخلوط حلال‌های آن‌هگزان و استن با نسبت ۱:۱ جهت مرحله استخراج و مخلوط حلال‌های آن‌هگزان و دی‌کلرومتان با نسبت ۱:۱ جهت مرحله خالص‌سازی با بدست آوردن مقدار بازیافت مناسب برای آنالیت‌های مورد مطالعه انتخاب گردید. در بررسی مقالات مختلف، حجم مصرفی حلال به میزان بالایی (۴۰-۱۷۰ میلی لیتر) گزارش شده است (Suchan *et al.*, 2004; Voorspoels *et al.*, 2004; Covaci *et al.*, 2005; Lui *et al.*, 2006; Schmid *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2010; Cocco *et al.*, 2011; Davodi *et al.*, 2011; Drabova *et al.*, 2011). در تحقیق اخیر تنها ۲۰ میلی‌لیتر حلال در دو مرحله مورد استفاده قرار گرفت که می‌توان گفت با توجه به حجم کم حلال ملاحظات زیست محیطی رعایت گردیده است. در این مقاله از روش کالیبراسیون استاندارد داخلی^۴ استفاده شده است که در مقایسه با سایر روش‌های پیچیده مانند کالیبراسیون با دو روش "افزایش آنالیت به نمونه تمیز"^۵ و تطبیق ماتریکس^۶، روشی بسیار ساده‌تر می‌باشد و در مدت زمان کوتاه‌تری نتایج آنالیز بدست می‌آید.

¹ Accelerated Solvent Extraction

² Pressurized Liquid Extraction

³ Gel Permeation Chromatography

⁴ Internal standard calibration curve

⁵ Spiked calibration curve

⁶ Matrix match calibration curve

⁷ Relative Standard Deviation

- Cok, I. and Satiroglu, M.H., 2004. Polychlorinated Biphenyl Levels in Adipose Tissue of Primiparous Woman in Turkey. *Environment International*, 30: 7-10. Doi: 10.1016/S0160-4120(03)00140-5.
- Covaci, A., Gheorgheb, A., Voorspoels, S., Maervoeta, J., Steen Redeker, E., Blust, R. and Schepens, P., 2005. Polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediment cores from the Western Scheldt river (Belgium), analytical aspects and depth profiles. *Environment International*, 31: 367- 375. Doi: 10.1016/j.envint.2004.08.009.
- Davodi, M. Esmaili-Sari, A. and Bahramifarr N., 2011. Concentration of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in some edible fish species from the Shadegan Marshes (Iran). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74: 294-300. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.07.045.
- Dip, R., Hegglin, D., Deplazes, P., Dafflon, O., Koch, H. and Naegeli, H., 2003. Age- and Sex-dependent Distribution of Persistent Organochlorine in Urban Foxes. *Environmental Health Perspectives*, 111: 1608-1613. Doi: 10.1289/ehp.6226.
- Drabova, L., Pulkrabova, J., Kalachova, K., Hradecky, J., Suchanova, M., Tomaniova, M., Kocourek, V. and Hajslova J., 2011. Novel approaches to determination of PAHs and Halogenated POPs in Canned Fish. *Czech Journal of Food Sciences*, 29: 498-507. Doi:10.17221/405/2010-CJFS.
- European Commission, 2017. Commission Regulation (EU), 2017/644, Setting Maximum Levels for certain Contaminations in Foodstuffs. *Official Journal of the European Union*. L 92/9.
- دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی مهندسی محیط زیست.
- Andersen, G., Kovacs, K.M., Lydersen, C., Skaare, J.U., Gjertz I. and Jenssen, B.M., 2001. Concentrations and Patterns of Organochlorine Contaminants in White Whales (*Delphinapterus leucas*) from Svalbard Norway. *The Science of the Total Environment*, 264: 267- 281. Doi:10.1016/S0048-9697(00)00765-8.
- Bailey, R.E., 2001. Global hexachlorobenzene emissions. *Chemosphere*, 43: 167-182. Doi: 10.1016/S0045-6535(00)00186-7.
- Borja, J., Taleon, D.M., Auresenia, J. and Gallardo, S., 2005. Polychlorinated biphenyls and their biodegradation. *Process Biochemistry*, 40: 1999-2013. Doi: 10.1016/j.procbio.2004.08.006.
- Brown, J., Bedard, D.L., Brennan, M.J., Carnahan, J.C., Feng, H. and Wangner, R.E., 1987. Polychlorinated biphenyl dechlorination in aquatic sediments. *Science*, 236: 709-712. Doi: 10.1126/science.236.4802.709.
- Carlo, S. and Yolanda, P., 2007. Recent trends in liquid chromatography-tandem mass spectrometry to determine pesticides and their metabolites in food. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26: 103-115. Doi:10.1016/j.trac.2006.08.005.
- Chandran, S. and Singh, R.S.P., 2007. Comparison of various international guidelines for analytical method validation. *Pharmazie*, 62: 4-14. Doi: 10.1691/ph.2007.1.5064.
- Cocoo, E., Guignard, C., Haffmann, L. and Bohn, T., 2011. Rapid analysis of polychlorinated biphenyls in fish by pressurized liquid extraction with in-cell cleanup and GC-MS. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 91: 333-347. Doi: 10.1080/03067319.2010.496048.

- European Commission, 2017.** SANTE/11813/2017, Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues and analysis in food and feed.
- FAO., 2002.** Submission and evaluation of pesticide residues data for the estimation of maximum residue levels in food and feed. Food and Agricultural Organization of United Nations. Rome, 25 P.
- FAO., 2003.** International Code of Conduct on the Distribution and use of Pesticide, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 6 P.
- Fu, C.T. and Wu, S.Ch., 2005.** Bioaccumulation of polychlorinated biphenyls in mullet fish in former ship dismantling harbor, a contaminated estuary, and nearby coastal fish farms. *Marine Pollution Bulletin*, 51: 932-939. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.09.047.
- Guruge, K.S. and Tanabe, S., 2001.** Contamination by persistent organochlorines and butyltin Compounds in west coast of Sri Lanka. *Marine Pollution Bulletin*, 42: 179-186. Doi: 10.1016/S0025-326X(00)00140-5.
- Liu, H., Zhang, Q., Cai, Z., Li, A., Wang, Y. and Jiang, G., 2006.** Separation of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in environmental samples using silica gel and florisil fractionation chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 557: 314-20. Doi: 10.1016/j.aca.2005.10.001.
- Minh, N.H., Someya, M., Minh, T.B., Kunisue, T., Iwata, H., Watanabe, M., Tanaba, S., Viet, P.H. and Tuyen, B.C., 2004.** Persistent Organochlorine residues in human breast milk from Honai and Hochiminh city, Vietnam, contamination, accumulation kinetics and risk assessment from infants. *Environmental Pollution*, 129: 431-441. Doi:10.1016/j.envpol.2003.11.012.
- Naso, B., Perrone, D., Ferrante, M.C., Bilancion, M. and Lucisano, A., 2005.** Persistent organic pollutants in edible marine species from the gulf of Naples, Southern Italy. *Science of the Total Environment*, 343: 83-95. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.10.007.
- Navarro, S., Vela, N. and Navarro, G., 2007.** An overview on the environmental behavior of pesticide residue in soils. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5: 357-375. Doi: 10.5424/sjar/2007053-5344.
- Perugini, M., Cavaliere, M., Giammario, A., Mazzone, P., Olivieri, V. and Amorena, M., 2004.** Levels of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in some Edible Marine Organisms from Central Adriatic Sea. *Chemosphere*, 57: 391-400. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.04.034.
- Porta, M. and Zumeta, E., 2002.** Implementing the Stockholm treaty on persistent organic pollutants. *Occupational and Environmental Medicine*, 59: 651-2. Doi: 10.1136/oem.59.10.651
- Ritter, L., Solomon, K.R. and Forget, J., 1995.** Persistent Organic Pollutants, an Assessment Report on, DDT, Aldrin, Dieldrin, Endrin, Chlordane, Heptachlor, Mirex, Toxaphene, HCB, PCBs, Dioxins and Furans. Canadian Network of toxicology Centers 620 Gordon Street Guelph on Canada, 145 P.
- Schmid, P., Kohler, M., Gujer, E., Zennegg, M. and Lanfranchi, M., 2007.** Persistent organic pollutants, brominated flame retardants and synthetic musks in fish from remote alpine lakes in Switzerland. *Chemosphere*, 67: 16-21. Doi:10.1016/j.chemosphere.2006.05.080.
- Suchan, P., Pulkrabova, J., Hajsolva, J. and Kocourek, V., 2004.** Pressurized liquid extraction in determination of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in fish

- samples. *Analytica Chimica Acta*, 520: 193-200. Doi:10.1016/j.aca.2004.02.061.
- UN., United Nations, Treaty Series., 2001.** Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Stockholm, 22 May, 2256: 119. Registration 17 May 2004, No: 40214, Signatories 152, Parties 183.
- UNEP., 2004.** UNEP Annual Evaluation Report 2004. Protecting human health and the environment from persistent organic pollutants. Stockholm convention. Available DIALOG. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/356>. Cited 28 Aug 2019.
- Voorspoels, S., Covaci, A., Maervoet, J., De Meester, I. and Schepens, P., 2004.** Levels and profiles of PCBs and OCPS in marine benthic species from the Belgian North Sea and the Western Scheldt Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 49: 393-404. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2004.02.024.
- Wenhai, W., Jie, X., Hongmei, Zh., Qing, Zh. and Shijian, L. 2005.** A practical approach to the degradation of polychlorinated biphenyls in transformer oil. *Chemosphere*, 7: 944-950. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.079.
- WHO., 2003.** Guidelines on the management of public health pesticides. Report of the WHO Interregional Consultation, Chiang Mai, Thailand.
- WHO/FSF/FOS/97.7., 2011.** Guideline for predicting dietary intake of pesticide residues.
- Yang, R., Wang, Y., Li, A., Zhang, Q., Jing, C., Wang, T., Wang, P., Jiang, G. and Li, Y. 2010.** Organochlorine pesticides and PCBs in fish from lakes of the Tibetan Plateau and the implications. *Environmental Pollution*, 158: 2310-2316. Doi: 10.1016/j.envpol.2010.02.004.
- Zhu, Y., Lio, H., Xi, Q., Cheng, H. and Xu, X., 2005.** Organochlorine pesticides (DDT and HCH) in soils from the outskirts of Beijing, China. *Chemosphere*, 60: 770-778. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.01
- Zhou, R., Zhu, L. and Kong, Q., 2007.** Persistent chlorinated pesticides in fish species from Qiantang River in East China. *Chemosphere*, 68: 838-847. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.021.
- Zhou, R., Zhu, L., Chen, Y. and Kong, Q., 2008.** Concentration and Characteristics of Organochlorine Pesticides in Aquatic Biota from Qiantang River in China. *Environmental Pollution*, 151: 190-199. Doi: 10.1016/j.envpol.2007.02.015.

Validation and application of an analytical method for determination of Persistent Organic Pollutants in Rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) collected from Tehran retail markets

Bayat M.¹; Saber Tehrani M.¹; Kobarfard F.^{2*}; Husain S.W.¹; Yazdanpanah H.³

*farzadkf@yahoo.com

1- Department of Chemistry, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- Department of Medicinal Chemistry, School of Pharmacy, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3- Department of Toxicology, School of Pharmacy, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

Persistent organic pollutants are a wide group of toxic and dangerous compounds. These organic compounds are chemically and physically stable even beams. In this study an analysis method for simultaneous determination of 18 persistent organic pollutants including eleven Organochlorine pesticides (OCPs): HCB, Dieldrin, Methoxychlor, α -, γ -Chlordane, α -, β -Endosulfan and *o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE, *o,p'*-DDT, *p,p'*-DDT and seven indicator Polychlorinated biphenyls (PCBs); IUPAC nos.: 28,52,101,118,138,153,180 congeners were determined in Rainbow trout by GC-MS/MS in MRM monitoring mode and LLE extraction. The validation results showed the calibration curves over the concentration range of 0.1-30 ng/mL for PCBs and 0.5-150 ng/mL for OCPs were linear and coefficient of determination (r^2) ranged between 0.990-0.999. The LODs and LOQs for POPs studied were between 0.6-8.3 and 2-25 ng/g, respectively. The average recoveries obtained for analytes in five different spiked levels (1-10 ng/g for PCBs and 5 times for OCPs) were in the range of 73%-112%. The relative standard deviations of POPs in fish were in the range of 1.4-17.9% for all of the concentration levels. The ranges of uncertainty were reported between 2.77%-30.88%. The results indicated the presence of organochlorine pesticides in trout samples and the highest level of contamination was related to *p,p'*-DDT with average values of 113 ng/g ww (wet weight). Dieldrin and *p,p'*-DDE were among the next level of contamination with mean values of 13.3 and 10 ng/g ww, respectively. Study of other OCPs in the trout samples indicated the presence of α -, γ -Chlordane, *o,p'*-DDE, *o,p'*-DDT and HCB in which the amount were lower than the limit of quantitation (LOQ) of the method. OCPs residues were lower than maximum residue levels set by European Council Directives, SANTE (2017) No.11813. Also, the study of PCBs in trout samples indicated the presence of only PCB 28 and its amount was lower than maximum residue levels set by European Commission Regulation (EU) (2017) No.644.

Keywords: Persistent organic pollutant, Polychlorinated biphenyls, Organochlorine pesticides, Rainbow trout, GC-MS/MS

*Corresponding author