

بررسی و مروری بر روش لایه‌نشانی رسوبات آلوده در اکوسیستم‌های آبی با استفاده از کربن فعال

ابوالفضل مرادی سعادتمند^{۱*}، مجید مولایی^۲

۱ کارشناسی ارشد شیمی معدنی، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، ایران

۲ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶)

چکیده

اصلاح موثر و ایمن رسوبات آلوده در اکوسیستم‌های آبی همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیست در جهان بوده است. برخی از اکوسیستم‌های طبیعی کشور به دلیل تجمع آلاینده‌های سمی در معرض نابودی هستند. از اینرو اصلاح سریع این اکوسیستم‌های ارزشمند امری ضروری است. لایروبی و لایه‌نشانی از جمله روش‌های شناخته‌شده در جهان هستند که برای پاکسازی و کاهش سریع غلظت آلاینده‌های سمی در رسوبات استفاده شده است. لایه‌نشانی یک فناوری اصلاحی اثبات شده و متداول جهت مهار رسوبات آلوده بمنظور کاهش تحرک و تماس آلاینده‌ها با محیط پیرامون است که در آن رسوبات آلوده بوسیله یک یا چند لایه از مواد تمیز مانند شن و ماسه، سنگ‌ریزه، مواد لایروبی شده تمیز، مواد فعال یا واکنشی و غیره پوشش داده می‌شود. این روش با کاهش سریع میزان آلاینده‌ها در آب‌های سطحی از طریق جذب و کاهش تحرک مواد سمی در رسوبات آلوده، احیای این اکوسیستم‌ها را فراهم می‌سازد. این فناوری از مخاطرات محیط زیستی کمتر و ارزانتر نسبت به روش لایروبی برخوردار است، درحالی‌که هیچ‌گاه در مقیاس آزمایشگاهی و یا میدانی در کشور مورد مطالعه قرار نگرفته است. این تحقیق قصد دارد ضمن معرفی این روش بوسیله کربن فعال، زمینه اجرای این فناوری را در کشور مهیا سازد. این تحقیق از حیث هدف و نحوه گردآوری اطلاعات بترتیب از نوع کاربردی و کتابخانه‌ای-اسنادی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: اصلاح درجا، لایه‌نشانی، رسوبات آلوده، کربن فعال، اکوسیستم‌های آبی.

سرآغاز

یکی از مشکلات مهم اکوسیستم‌های آبی در محیط زیست، تجمع رسوبات آلوده^(۱) در این مناطق هست که معمولاً نسبت به ستون آب پتانسیل آلاینده‌گی بیشتری دارد. رسوبات آلوده بطور مداوم ذرات معلق آلوده موجود در ستون آب را جذب نموده و در نتیجه میزان آلاینده‌گی آن افزایش می‌یابد (حقشناس و همکاران، ۱۳۹۶). تجمع زیستی^(۲) رسوبات آلوده در این مناطق مانند دریا، دریاچه‌ها، تالاب‌ها، مرداب‌ها و غیره می‌تواند آلاینده‌ها را از طریق زنجیره غذایی به بی‌مهرگان کفزی و ماهیان منتقل کرده و در درازمدت ممکن است باعث افزایش ریسک سلامتی انسانی و اکولوژیک در این مناطق گردد. لذا می‌باید با انجام روش‌های اصلاحی موثر و کارآمد، زمینه احیاء و پاکسازی سریع این زیست‌بوم‌ها را فراهم نمود. از دهه ۱۹۷۰ اجرای روش‌های نوین و موثر جهت کاهش این خطرات در اولویت بحث‌های محیط زیستی کشورهایی در آمریکای شمالی، اروپا و سایر نقاط جهان قرار گرفت. در آن زمان روش‌های لایروبی و لایه‌نشانی^(۳) رسوبات آلوده در مراحل اولیه تحقیقات آزمایشگاهی قرار داشتند و اجرای آن‌ها با مخالفت‌هایی در سطح عمومی مواجه شده بود (patmont et al., 2015). از طرفی بدلیل اثرات منفی روش لایروبی بر محیط زیست (کرباسی و شادی، ۱۳۹۱)، استفاده از یک روش مکمل و کم‌خطر نیز بشدت احساس می‌شد. اولین بار در سال ۱۹۷۸، فناوری لایه‌نشانی در لانگ آیلند سوند (مدخل رودخانه‌ای در اقیانوس اطلس) از مواد لایروبی شده این منطقه جهت پوشش رسوبات آلوده استفاده شد (ITRC, 2014). لایه‌نشانی یک فناوری اصلاحی اثبات شده و متداول جهت مهار رسوبات آلوده به منظور کاهش تحرک و تماس آلاینده‌ها با محیط پیرامون می‌باشد. در این روش رسوبات آلوده بوسیله یک یا چند لایه از مواد تمیز مانند شن و ماسه تمیز، سنگ‌ریزه، مواد فعال واکنشی و غیره پوشش داده می‌شوند (Parsons, 2004). از اوایل دهه ۲۰۰۰ نتایج قابل قبول تست‌های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی در مقیاس کوچک، بحث اصلاح درجا و مدیریت رسوبات آلوده را در نظر متخصصان و مسئولان کشورها پررنگ کرد. در این پروژه‌ها از مواد فعال و موثری همچون کربن فعال^(۴) (AC)، رس‌های آلی (ارگانوکیلی^(۵))، آپاتیت، بیوجار، کک، زئولیت‌ها و آهن صفر ظرفیتی (Fe⁰) استفاده شده بود که کربن فعال، رس‌های آلی و آپاتیت به عنوان مواد فوق‌العاده موثر و امیدوارکننده جهت اصلاح درجا رسوبات آلوده شناخته شدند (Patmont et al., 2015). امروزه این فناوری با

استفاده مواد و تجهیزات پیشرفته توانسته بعنوان یک روش اصلاحی کارآمد و موفق در کنار سایر روش‌های احیا و پاکسازی محیط‌های آبی مطرح شود. باتوجه به عدم اجرای روش لایه‌نشانی در ایران، نویسندگان این متن قصد دارند ضمن معرفی این فناوری، زمینه اجرایی و پیاده‌سازی آن را طی یک تحقیق کتابخانه‌ای-اسنادی فراهم سازند.

لایه‌نشانی

لایه‌نشانی یک فناوری اصلاحی اثبات شده و متداول جهت مهار رسوبات آلوده بمنظور کاهش تحرک و تماس آلاینده‌ها با محیط پیرامون می‌باشد. در این روش رسوبات آلوده بوسیله موادی مانند شن و ماسه تمیز، سنگ‌ریزه، مواد فعال واکنشی و غیره پوشش داده می‌شوند. از مهم‌ترین اهداف و مزایای این روش، محصورسازی فیزیکی رسوبات آلوده از محیط کف، جلوگیری از تعلیق مجدد رسوبات آلوده و انتشار آن به محیط و کاهش شار آلاینده‌ها در ستون آب می‌باشد. مواد فعال (بعنوان جاذب) موجود در یک کپ، می‌تواند باعث کاهش سریع آلاینده‌ها در رسوبات شده و از انتقال آن‌ها به ستون آب جلوگیری نماید. معمولاً جهت حفاظت از جریان‌های فرسایشی مانند طوفان‌ها و سیلاب‌های شدید از یک لایه محافظتی (زرهی)^(۶) برروی لایه سطحی کپ استفاده می‌کنند و در برخی از مناطق مانند تلاقی آبریزها، ورودی رودخانه‌ها و محل‌های شستن پروانه‌های کشتی از لایه‌های فرسایشی بیشتری استفاده می‌گردد. علاوه براین می‌توان جهت جلوگیری از فرسایش توسط باد و امواج از یک موج‌شکن یا موانع دیگر و یا لایروبی کردن محل (افزایش دادن عمق) قبل از عملیات لایه‌نشانی استفاده نمود (Palermo et al., 2004; Parsons, 2004). 1998.

انواع لایه‌نشانی: این روش معمولاً براساس تفاوت در میزان ضخامت لایه‌ها و اهداف خاص اجرایی به دو صورت انجام می‌شود: ۱- لایه‌نشانی ایزوله‌ای^(۷) ۲- لایه‌نشانی نازک‌لایه^(۸).

• **لایه‌نشانی ایزوله‌ای:** لایه‌نشانی ایزوله‌ای معمولاً براساس مفهوم «لایه‌کیک»^(۹) تعریف می‌شود که شامل چند لایه از مواد برروی رسوبات آلوده است. میزان ضخامت لایه‌ها در این روش براساس پارامترهایی از قبیل مقدار و نوع آلاینده‌گی، موقعیت سایت، تنوع و فعالیت موجودات کفزی^(۱۰) (بیوتوربایسون) و غیره نسبت به کپ نازک‌لایه بیشتر است. اهداف اصلی ساخت کپ ایزوله‌ای عبارتند از: ۱- جداسازی

مختلفی در لایه‌نشانی ایزوله‌ای استفاده می‌شود که می‌تواند مواد معمولی مانند شن و ماسه و یا مواد فعال مانند کک، کربن فعال و غیره باشد. شکل (۱) دو نمونه از مواد پیش‌ساخته شده کپ ایزوله‌ای را نشان می‌دهد.

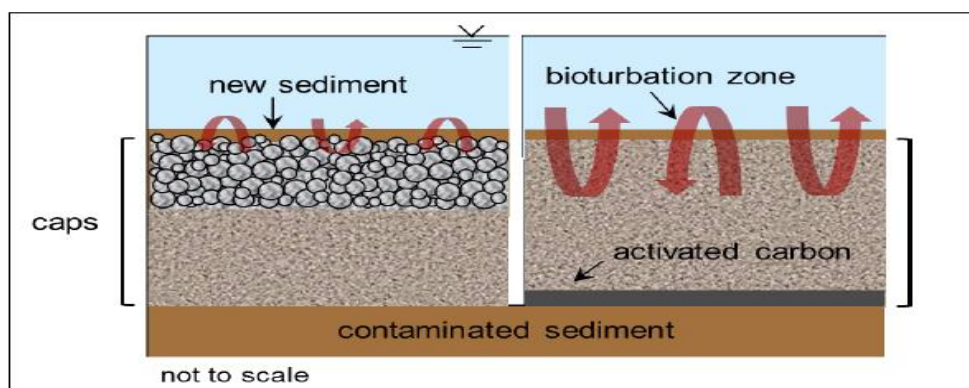
فیزیکی رسوبات آلوده به جهت قطع ارتباط موجودات کفزی مانند کرم‌ها از تماس و پراکنده‌سازی رسوبات. ۲- جداسازی شیمیایی ناحیه بیولوژیکی کپ، از آلودگی‌هایی که پس از لایه‌نشانی بالا می‌روند. ۳- تثبیت رسوبات آلوده در برابر نیروهای فرسایشی از نوع طبیعی و انسانی. معمولاً از مواد



شکل (۱): کربن فعال BioBlok® (راست) و شن و ماسه طبیعی (چپ) (Jersak et al., 2016)

آب‌های زیرزمینی، پایداری شیب، میزان استحکام رسوبات، گازهای خروجی و غیره می‌تواند در انتخاب نوع کپ^(۱۳) موثر باشد. شکل (۲) لایه‌نشانی ایزوله‌ای معمولی و فعال را نشان می‌دهد.

معمولاً در بسیاری از سایت‌های آلوده، لایه‌نشانی ایزوله‌ای معمولی^(۱۱) جهت اصلاح رسوبات آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود در برخی موارد بسته به شرایط سایت، کارایی، هزینه ساخت، نوع و میزان آلاینده‌گی و غیره لایه‌نشانی ایزوله‌ای فعال^(۱۲) ترجیح داده می‌شود. همچنین پارامترهای دیگری مانند جریان



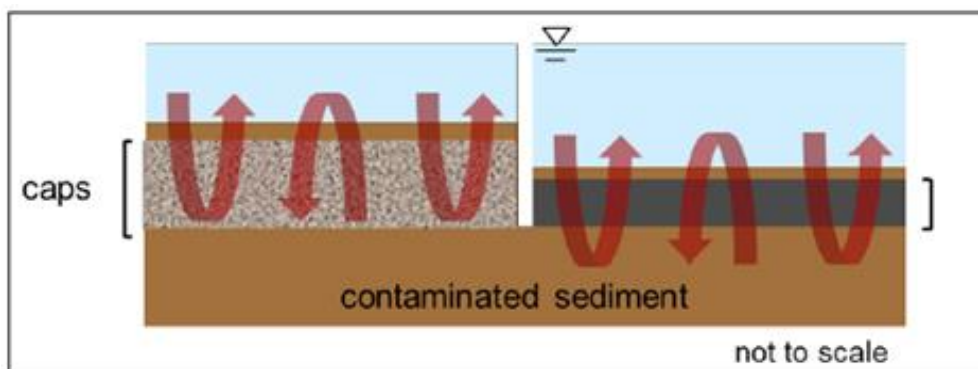
شکل (۲): لایه‌نشانی ایزوله‌ای فعال (راست) و معمولی (چپ) (Jersak et al., 2016)

قایقرانی- ناوبری و مناطق تفرجگاهی به دلیل از بین رفتن لایه‌های کپ غیرقابل اجراست. ۲- مانند هر فناوری اصلاحی دیگر می‌تواند بر زیستگاه جانوران و بی‌مهرگان کفزی اثر سوء داشته باشد. ۳- و غیره.

• مزایا و معایب لایه‌نشانی ایزوله‌ای: مزایا: ۱- کاهش تحرک، سمیت و تماس مواد شیمیایی به ستون آب و جانداران منطقه. ۲- امکان ایجاد لایه زیستگاه در مناطق ساحلی و عمیق. ۳- ارزان و دوستدار محیط زیست نسبت به روش لایروبی. ۴- و غیره. معایب: ۱- این روش در شرایط هیدرولیکی ویژه مانند مناطق سیلابی و یا مناطقی که دارای زیستگاه خاص، محل

آلاینده‌های رسوبات است. پارامترهای کنترل‌کننده طراحی و ضخامت لایه‌نشانی نازک‌لایه عبارتند از: ۱- نوع و واکنش پذیری مواد کپ. ۲- عمق ناحیه فعالیت موجودات کفزی. ۳- میزان شاخص کاهش آلاینده‌ها.

• **لایه‌نشانی نازک‌لایه:** این روش همانند لایه‌نشانی ایزوله‌ای بوده با این تفاوت که ضخامت لایه‌ها نازک‌تر و با حداقل مواد انجام می‌شود. معمولاً این فناوری به دو صورت کپ معمولی و فعال که در شکل (۳) نشان داده شده به کار می‌رود. هدف اصلی در این روش محصورسازی و کاهش، و نه حذف



شکل (۳): لایه‌نشانی نازک‌لایه فعال (راست) و معمولی (چپ) (Jersak et al., 2016)

آلاینده‌های کپ را بوسیله یک لایه ایزوله شیمیایی پیش‌بینی می‌کند (USEPA, 1997; Palermo et al., 1998). در عین سادگی، این طرح نمی‌تواند مساله مهمی مانند غلظت یا جریان آلاینده را در منطقه فعال بیولوژیکی توضیح دهد. در سال‌های بعد لمپرت و همکاران ۲۰۰۹م با ارایه مدل تحلیلی حالت پایا^(۱۷) محدودیت‌های این روش را به حداقل رساندند (Lampert & Reible, 2009). برای مثال در پروژه بزرگ احیاء و پاکسازی دریاچه انونداگا^(۱۸) تیم طراحی آن موفق شدند با ترکیب این دو مدل بوسیله نرم‌افزارهای خاص طراحی و بکارگیری متغیرهای چندگانه برای هر سایت آلوده، مدل‌سازی لایه‌نشانی رسوبات آلوده را انجام دهند (Parsons & Anchor, 2012b).

• **تعیین ضخامت موثر لایه کپ:** یکی از بحث‌های مهم در طراحی روش لایه‌نشانی، تعیین ارتفاع و ضخامت لایه‌هاست. در سال ۲۰۰۴ ریبیل براساس دو پارامتر اصلی یعنی اثرات بیوتوربایسیون و تثبیت شدن^(۱۹) لایه‌های کپ پس از قراردادی، معادله عمومی (۱) و شماتیک کلی کپ ایزوله‌ای معمولی (شکل (۴)) را بشرح زیر بیان نمودند:

$$h_{cap} = h_0 - \frac{\Delta h_{sed}}{R_f} - \Delta h_{cap} - h_{bio} \quad (1)$$

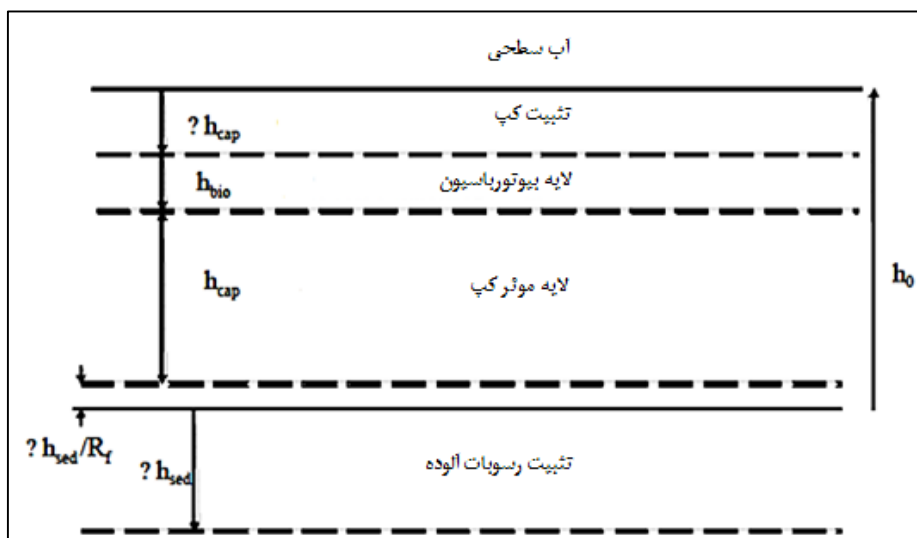
در رابطه فوق h_{cap} بیانگر ضخامت موثر کپ (نهایی) پس از قراردادی؛ h_0 ضخامت لایه‌نشانی اولیه قبل از تثبیت کپ؛ Δh_{sed}

• **مزایا و معایب کپ نازک‌لایه:** مزایا: ۱- کاهش سریع غلظت آلاینده‌ها در لایه‌های سطحی و ستون آب. ۲- کاهش انتشار و تحرک آلاینده‌های رسوبات به محیط ۳- کاهش یا از بین بردن موجودات کفزی در لایه‌های زیرین کپ. ۴- امکان قراردادی لایه زیستگاه بر روی کپ. ۵- لایه‌نشانی نازک‌لایه در مناطقی که بازبایی طبیعی^(۱۴) در حال انجام است می‌تواند مفید باشد به این صورت که با قراردادن یک لایه نازک از مواد (مانند شن و ماسه) بر روی رسوبات آلوده از انتشار و تحرک مواد شیمیایی سمی به محیط جلوگیری شده و با آمدن رسوبات تمیز این کپ دفن گردیده و در اصل یک کپ ایزوله‌ای طبیعی در طولانی‌مدت ساخته می‌شود. معایب: ۱- عدم ایزوله‌سازی کامل رسوبات آلوده. ۲- پخش شدن مقداری از آلاینده‌ها در مواد کپ (Parsons, et al., 2016; Jersak, 2004).

طراحی عمومی لایه‌نشانی درجا

از جمله ملاحظات مهم در طراحی فناوری لایه‌نشانی به حداقل رساندن فرسایش، کاهش شار آلاینده‌ها به گیرنده‌های بیولوژیکی و تأمین ضخامت مناسب برای ادغام رسوبات سطحی است. پالرمو و همکاران ۱۹۹۸م یک طراحی ساده جهت ارزیابی شار و غلظت آلاینده‌ها در کپ‌ها ارایه نمودند. این روش براساس یک مدل‌سازی عددی^(۱۵) و آنالیز مونت کارلو^(۱۶) استوار است که انتقال و شار

تغییرات ضخامت لایه رسوبات آلوده؛ R_f فاکتور تاخیر؛ h_{bio} عمق بیوتوربایسیون و کسر $\frac{\Delta h_{sed}}{R_f}$ متوسط عمق نفوذ آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۴): شماتیک طراحی عمومی لایه‌نشانی ایزوله‌ای معمولی (Reible, 2004)

لایه کپ (Δh_{cap}) به طور مستقیم ضخامت موثر را کاهش می‌دهد و اثر دیگری ندارد. تثبیت رسوبات آلوده (Δh_{sed})، مستقیماً بر ضخامت کپ تأثیر نمی‌گذارد ولی انتقال شیرابه آلوده از لایه آلوده به داخل کپ را بیان می‌کند. عمق نفوذ متوسط آلاینده‌های شیمیایی (Δh_{cont}) به داخل کپ بوسیله معادله (۲) محاسبه می‌شود (Reible, 2004):

$$\Delta h_{cont} = \frac{\Delta h_{sed}}{R_f} \quad (2)$$

- **عوامل موثر در طراحی و تعیین ضخامت کپ:** امروزه با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری، مدل اولیه و شمای کلی کپ را طراحی می‌کنند و سپس با توجه به شرایط سایت آلوده، ضخامت نهایی لایه‌های کپ محاسبه می‌شود. عوامل مهمی که در طراحی کپ مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: ۱- میزان پایداری کپ در مقابل نیروهای فرسایشی. ۲- میزان ضخامت نرمال جهت جلوگیری از اختلاط رسوبات آلوده با لایه‌های کپ توسط موجودات کفزی. ۳- میزان ضخامت لازم جهت کاهش انتشار و انتقال آلاینده‌ها به ستون‌های آب. ۴- در دسترس بودن مواد کپ ۵- پایداری بالقوه مواد کپ. ۶- اثرات محیط زیستی این روش بر روی آبزیان. ۷- هزینه‌های نگهداری، نظارت بلندمدت و رویکرد تقویت زیستگاه (Parsons, 2004).

معمولاً در این طرح از یک لایه حفاظتی (لایه سنگی، چوب، سنگریزه‌ها و غیره) جهت کاهش اثرات نیروهای فرسایشی مانند امواج، باد، حرکت قایق‌ها و غیره استفاده می‌شود. همچنین در مناطق توریستی و گردشگری می‌توان بسته به شرایط منطقه، یک لایه زیستگاه^(۲۰) (کاشت چمن، بوته‌زار و غیره) به طرح فوق اضافه نمود.

- **فاکتور بیوتوربایسیون:** جداسازی رسوبات آلوده از تماس موجودات کفزی که در نزدیکی سطح رسوب و آب زندگی می‌کنند یکی از مهم‌ترین اهداف لایه‌نشانی است. اگر جداسازی بطور کافی ایجاد شود، می‌توان از تماس مستقیم بین آلاینده‌های رسوبات و ارگانیسم‌ها جلوگیری کرد، بدین ترتیب انتشار مواد آلاینده به ستون‌های آب، تجمع آلاینده‌ها در ارگانیسم‌ها و انتشار شیمیایی ناشی از تغییرات فیزیکی و شیمیایی وارد شده توسط آن‌ها کاهش می‌یابد. موجودات کفزی می‌توانند با نرخ ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال فعالیت اختلاط رسوبات سطحی را انجام داده و سبب انتشار آلاینده‌ها به محیط شوند. از اینرو قرارگیری یک کپ نازک لایه هم می‌تواند اثرات مخرب این پدیده را خنثی کند. پس در نتیجه در طراحی کپ یک ضخامت (h_{bio}) در نظر گرفته شده است.
- **فاکتور تثبیت:** پس از قرار دادن کپ، فرآیند تثبیت و متراکم شدن رسوبات آلوده زیرین و لایه موثر کپ رخ می‌دهد. تثبیت

نحوه اجرای لایه‌نشانی رسوبات آلوده

با توجه به بررسی پروژه‌های انجام شده در حوزه لایه‌نشانی، بطور کلی قراردعی مواد کپ معمولاً به ۳ صورت مختلف انجام می‌شود که عبارتند از: ۱- قراردادن مواد کپ بین دو لایه ژئوتکستایل^(۲۰) و پهن کردن آن مانند یک حصیر (کاور)^(۲۱) بر روی رسوبات آلوده. ۲- قراردعی توده‌ای یک لایه نازک از مواد بر روی رسوبات. ۳- اختلاط مواد کپ با رسوبات آلوده.

• **مزایای کاور ژئوتکستایل:** ۱- جلوگیری از تحرک و معلق ماندن مواد فعال کپ به هنگام قراردعی لایه‌ها. ۲- جداسازی کامل رسوبات آلوده از دسترس موجودات کفزی. ۳- عدم اختلاط مواد فعال با رسوبات آلوده. ۴- افزایش یکنواختی لایه‌های کپ و اثرگذاری یکسان بر آلاینده‌ها. ۵- کاهش فرسایش و تجزیه شدن به دلیل وجود الیاف مصنوعی (USEPA, 2013).

مواد و تجهیزات عمومی لایه‌نشانی

به طور معمول شن و ماسه تمیز به عنوان مواد کپ استفاده می‌شود زیرا در دسترس، نسبتاً ارزان و نحوه قراردعی آن بر روی رسوبات آلوده آسان است. اگرچه شن و ماسه، بسیاری از ویژگی‌های عملکردی کپ را فراهم می‌کند، ولی با استفاده از مواد فعال می‌توان جذب آلاینده‌های رسوبات را افزایش و ضخامت لایه‌های کپ را کاهش داد. مواد فعالی که برای استفاده در کپ پیشنهاد شده‌اند عبارتند از: ۱- خاک غنی از مواد آلی (یا شن و ماسه اصلاح شده با مواد آلی) جهت افزایش فاکتور تاخیر (کاهش انتشار) آلاینده‌های آلی آبگریز^(۲۲) (HOCs) از طریق کپ به محیط و افزایش سرعت تخریب. ۲- رس آلی جهت کنترل انتشار سیالات غیرقابل امتزاج با آب^(۲۳) (NAPL) از طریق کپ. ۳- خاک رس اصلاح‌شده مانند کامپوزیت Aquablock[®] و مواد معدنی رس‌پایه جهت کنترل و کاهش نفوذپذیری آلاینده‌ها. ۴- کک یا کربن فعال برای جداسازی و جذب آلاینده‌های آلی. ۵- افزودن آپاتیت جهت جذب و جداسازی آلاینده‌های فلزی. ۶- به کار بردن آهن صفر (Fe⁰) برای افزایش واکنش کلردایی ترکیبات کلردار. ۷- ترکیبات کاهنده یون‌های آهن مثل کلروبنزن‌ها. ۸- آلومینیوم فعال شده. ۹- ترکیبات آلی دیگر (Palermo et al., 1998; Jersak et al., 2016).

از ملاحظات مهم در انتخاب روش‌های قراردعی مواد در روش لایه‌نشانی، جایگذاری دقیق و کنترل شده مواد بر روی رسوبات

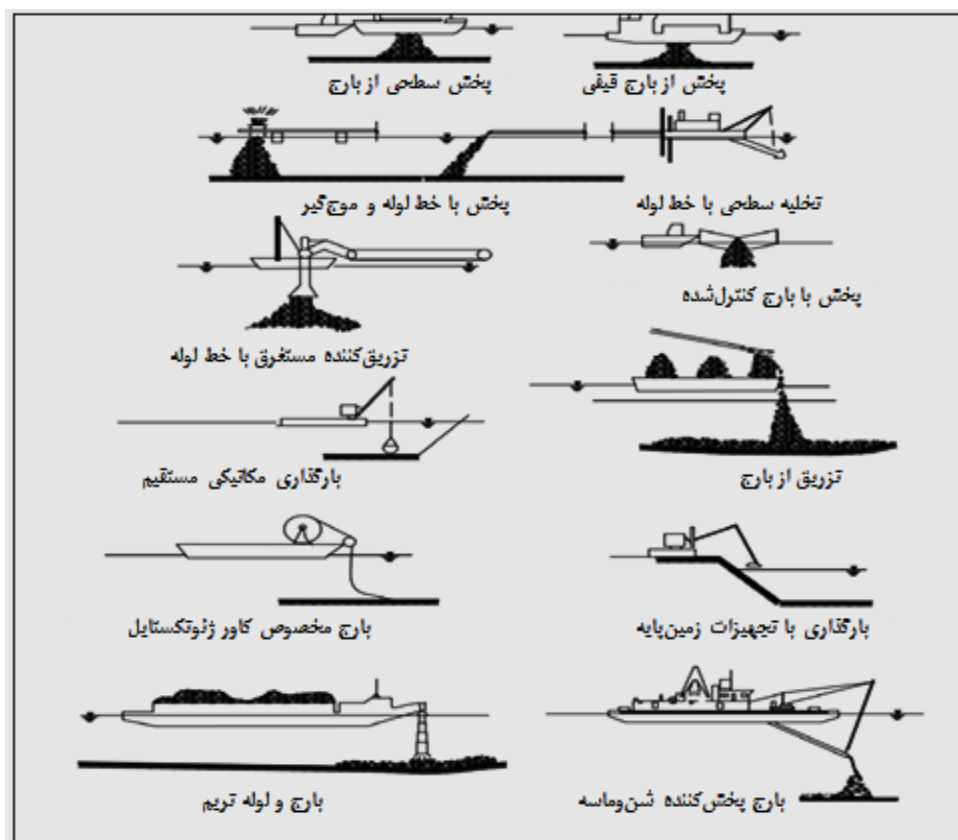
آلوده است. برای جلوگیری از جابجایی یا مخلوط شدن با رسوبات زیرین، قراردادن یکنواخت و آهسته مواد ضروری است. همچنین قراردعی کنترل نشده مواد کپ می‌تواند منجر به تعلیق مجدد مواد آلوده در ستون آب و انحراف به محیط مجاور خود گردد. براساس میزان نرمی رسوبات آلوده و جلوگیری از نفوذ مواد کپ به درون آن‌ها از تجهیزات هیدرولیکی (شستن و سرازیر کردن هیدرولیکی شن و ماسه از روی یک بارج شناور، پخش‌کننده‌های سطلی موجود در انتهای لایروب هیدرولیکی و پمپاژ کردن دوغاب مواد کپ بوسیله لوله به عمق ستون آب) و مکانیکی (چنگکی^(۲۴) و بارج شکاف‌دار) جهت لایه‌نشانی مواد استفاده می‌شود. در روش‌های هیدرولیکی، کنترل و میزان لایه‌نشانی مناسب بوده و در روش مکانیکی چنگکی، کنترل لایه‌نشانی مناسب ولی سرعت فرآیند کند است. همچنین در لایه‌نشانی بوسیله بارج شکاف‌دار میزان فرآیند مناسب ولی کنترل ضخامت مشکل است.

قراردعی مواد ژئوسنتزی، می‌تواند به تجهیزات خاصی مانند شناور دارای قرقه بزرگ نیاز داشته باشد. علاوه‌براین برای قراردعی لایه حفاظتی کپ که معمولاً از مواد درشت استفاده می‌شود، می‌توان از بارج شناور یا حمل مواد از خط ساحلی بوسیله تجهیزات متداول مانند مخزن چنگکی استفاده نمود. نمونه‌هایی از انواع تجهیزات مورد استفاده جهت قراردعی مواد کپ در شکل (۵) نشان داده شده است (USEPA, 2005).

مانیتورینگ^(۲۵) روش لایه‌نشانی

بر اساس تعریف سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا^(۲۶) (USEPA)، مانیتورینگ لایه‌نشانی به معنی جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل مشاهدات یا اندازه‌گیری‌های مکرر جهت ارزیابی تغییرات احتمالی در وضعیت و پیشرفت اهداف پاکسازی رسوبات آلوده است که شامل جمع‌آوری داده‌های میدانی (شیمیایی، فیزیکی و یا بیولوژیکی) در یک دوره زمانی معین و در یک نقطه خاص برای تعیین وضعیت آن محل می‌شود. از اهداف مهم روش لایه‌نشانی در واقع توانایی آن در جداسازی فیزیکی -

شیمیایی و تثبیت رسوبات آلوده جهت کاهش آلاینده‌ها و خطر در معرض قرار گرفتن آن‌ها در محیط است که برای رسیدن به این اهداف و حداکثر کارایی مناسب کپ، مدیران پروژه می‌باید قبل، حین و بعد از عملیات لایه‌نشانی، برنامه‌های نظارتی جامعی را تدوین نمایند. معمولاً هنگام مانیتورینگ کپ و تهیه یک برنامه نظارتی برای آن، فرآیندهای زیر مورد توجه قرار می‌گیرد: ۱- نفوذ



شکل (۵): شماتیک تجهیزات قراردهی مواد کپ (USEPA, 2005)

کیفیت آب مقایسه کرد. علاوه براین، برای نظارت طولانی مدت عملکرد کپ، غلظت آلاینده‌های جمع شده در مواد کپ به عنوان تابعی از زمان می‌تواند با سطح تمیزی در سایت مقایسه شود. با این حال فرآیند نظارت شیمیایی کپ‌ها دشوار است، زیرا تمیزدادن بین انتقال عمودی آلاینده‌ها به داخل کپ و اختلاطی که در هنگام قراردهی مواد با رسوبات آلوده صورت گرفته عملی‌تر است.

• **انواع مانیتورینگ لایه‌نشانی:** همواره در پروژه‌های لایه‌نشانی اقدامات نظارتی جهت بررسی کارایی و اثرگذاری روش لایه‌نشانی صورت می‌پذیرد. این اقدامات به دو دسته مانیتورینگ فعال و مانیتورینگ بلندمدت طبقه‌بندی می‌شود که عبارتند از:

• **مانیتورینگ فعال:** این اقدام شامل مانیتورینگ ساخت و قراردهی مواد و مانیتورینگ بیولوژیکی کپ می‌شود. مانیتورینگ ساخت و قراردهی مواد: به‌طور معمول نظارت بر ساخت و قراردهی مواد کپ برای سنجش اینکه آیا برنامه‌های طراحی، مشخصات و عدم انتشار هرگونه آلودگی در هنگام قراردهی مواد کپ رعایت می‌شود یا خیر؟ نتایج این نظارت در

آلاینده‌ها به مواد کپ و سپس انتقال به آب‌های سطحی بوسیله‌ی جاری شدن آب‌های زیرزمینی، انتشار مولکولی و غیره. ۲- نیروهای فرسایشی یا سایر مداخلات فیزیکی در کپ. ۳- تخریب سطح کپ توسط جوامع کفزی (فرآیند بیوتوربایسون). ۴- و غیره نظارت بر کارایی فناوری لایه‌نشانی باید همواره با استانداردهای طراحی و اهداف اقدامات اصلاحی هر سایت منطبق باشد. بطور کلی، نظارت فیزیکی در ابتدا با یک برنامه مداوم نسبت به نظارت شیمیایی یا بیولوژیکی انجام می‌شود زیرا انجام آن هزینه کمتری دارد. معمولاً برخی از فرآیندها مانند فرآیند شار آلاینده‌ها بطور مستقیم ارزیابی نمی‌شود چون اندازه‌گیری آن بسیار دشوار است، ولی می‌توان با نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها از آب‌های سطحی، شیرابه رسوبات، بافت جانوران کفزی و رسوبات آلوده تثبیت‌شده بطور مستقیم و همچنین با استفاده از بررسی‌های عمق‌سنجی و انواع فناوری‌های عکاسی، ارزیابی کپ را بطور غیر مستقیم انجام داد. در برخی موارد، شار آلاینده‌ها و غلظت آلاینده‌ها در رسوبات سطحی، شیرابه کپ و یا آب‌های سطحی را می‌توان با سطح پاکسازی رسوبات مخصوص هر سایت یا استانداردهای

حین ساخت کپ، می‌تواند برای شناسایی مشکلات و اجرای اصلاحات ساختاری در طراحی منظور گردد. مانیتورینگ ساخت اغلب شامل ملاحظات قرارگیری اولیه مواد و پس از ساخت کپ می‌باشد. روش‌های مناسب برای نظارت بر قراردادی مواد کپ شامل کنترل میزان ضخامت لایه‌ها، بررسی عمق سنجی و میزان منافذ رسوبات، بررسی عکس‌های برش عمودی (نیمرخ) از رسوبات و نظارت بر تعلیق مجدد شیمیایی آلاینده‌ها می‌شود. در برخی سایت‌ها، از مشاهدات بصری در آب‌های کم‌عمق یا وسایل کمک بصری سطحی مانند مشاهده بوسیله لوله‌های مخصوص یا مشاهدات غواصان نیز جهت مانیتورینگ ساخت استفاده می‌شود. مانیتورینگ بیولوژیکی: نظارت بیولوژیکی جزو مانیتورینگ کوتاه‌مدت پس از ساخت کپ است. این روش شامل نظارت بر رفتار و تراکم موجودات کفزی پس از عملیات لایه‌نشانی است که ممکن است طی فرآیند بیوتوربایسیون سبب بهم‌ریختگی لایه سطحی کپ و کاهش پایداری و راندمان کپ گردد. در برخی موارد که تجمع زیستی آلاینده‌ها وجود دارد، نظارت بر میزان آلاینده‌گی در بدن ماهیان و یا سایر بافت‌های خوراکی مورد نیاز است.

- **مانیتورینگ بلندمدت:** این روش شامل نظارت دوره‌ای از کارایی کپ و میزان تطابق با اهداف پاکسازی رسوبات آلوده سایت می‌باشد. معمولاً نظارت طولانی مدت بر روی سایت‌هایی که عمل لایه‌نشانی انجام داده‌اند از جهت اینکه کپ دچار فرسایش و تخریب نشود بسیار اهمیت دارد. در این مرحله مواردی همچون نفوذ گیاهان آبی در مواد کپ، نرخ آب‌های زیرزمینی، فرآیند بیوتوربایسیون و حرکت آلاینده‌های شیمیایی از کپ به آب‌های سطحی مورد ارزیابی دوره‌ای قرار می‌گیرد. همچنین ممکن است جهت عدم آلوده شدن مجدد سطح کپ (ناشی از ورود آلاینده‌های جدید) نظارت به طور پیوسته و بلندمدت صورت گیرد (USEPA, 2005; USEPA, 2004c).

لایه‌نشانی با استفاده از کربن فعال

باتوجه به بررسی‌های انجام شده در حوزه لایه‌نشانی رسوبات آلوده، کربن فعال به طور گسترده در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی برای کنترل HOCs رسوبات آلوده استفاده شده است (Schaanning et al., 2021; Zimmerman et al., 2004; Millward et al., 2005; Cornelissen et al., 2006).

بیشتر به این دلیل است که AC چندین دهه است که به عنوان یک جاذب سطحی موثر برای تصفیه آب، فاضلاب و هوا با راندمان بالا استفاده شده و به همین دلیل در اکثر پروژه‌های لایه‌نشانی رسوبات آلوده، بعنوان گزینه مناسب پیشنهادی مطرح می‌شود. الستا و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که ظرفیت جذب بی‌فیل‌های پلی کلرینه^(۲۸) (PCBs) بوسیله یک لایه نازک از کربن فعال (با فرض اینکه کربن آلی موجود در خاک یا رسوبات حداکثر ۳/۸ درصد باشد) ۱۰۰ برابر بیشتر از ظرفیت جذب کپ ایزوله‌ای‌شن و ماسه‌ای است. بر اساس این نتایج، یک لایه فعال با ضخامت ۱ سانتی‌متر از کربن فعال و یک کپ شن و ماسه‌ای به ضخامت ۱ متر دارای عملکرد مشابهی برای جداسازی شیمیایی رسوبات آلوده هستند (Olsta et al., 2005). همچنین مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فرآیند مورفی و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که یک لایه با ضخامت ۱ سانتی‌متر از کربن فعال یا سایر مواد کربنی در زیر لایه کپ شن و ماسه می‌تواند به‌طور موثر شار PCBs را از رسوبات آلوده کاهش داده و آن را برای دهه‌ها تا قرن‌ها سال از محیط پیرامون خود جدا کند (Murphy et al., 2006). در تحقیق آزمایشگاهی دیگر اثرات آپاتیت، رس‌آلی و بیوپلیمرها در کاهش آلاینده‌های فلزی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقوی^(۲۹) (PAHs و PCBs) رسوبات بررسی شد. در این تحقیق با مقایسه کپ‌های شن و ماسه‌ای اصلاح شده با مواد آپاتیت و رس‌های آلی پیش‌بینی شد که کپ‌های اصلاح شده با این مواد می‌توانند از نفوذ آلاینده‌ها به آب‌های سطحی جلوگیری کرده و فرآیند انتشار آن‌ها را به بیش از صد سال به تأخیر بیندازد (Knox et al., 2008). سان و قوش در یک مطالعه آزمایشگاهی، کربن فعال را به نمونه‌های رسوبات آلوده به PCB اضافه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت PCB در شیرابه کپ ۶۹ تا ۹۷ درصد کاهش یافته و تجمع زیستی PCBs در بافت نرم‌تان (کرم) پس از ۲۸ روز در معرض قرار گرفتن به ۴۲ تا ۸۵ درصد کاهش می‌یابد (Ghosh, 2008) (Sun &). کوپریانچیک و همکاران (۲۰۱۳) اثر کربن فعال را بر کاهش تجمع زیستی HOCs در زنجیره غذایی جانوران دریایی بررسی کردند. در این تحقیق تیمارهای دارای AC منجر به کاهش قابل توجه غلظت HOC در شیرابه رسوبات، بافت بی‌مهرگان کفزی، زئوپلانکتون، ماکروفیت‌ها و ماهی *Leuciscus idus melanotus* شد. همچنین پس از ۶ ماه اصلاح به وسیله کربن فعال پودری^(۳۰) (PAC) ضریب تجمع زیستی PCB در این ماهی به عدد ۲۰

مهندسان و نهادهای نظارتی در سراسر جهان قرار گرفت. جدول (۱) برخی از پروژه‌های لایه‌نشانی با استفاده از مواد کربن‌پایه^(۳۱) در مقیاس‌های میدانی و وسیع را نشان می‌دهد. این پروژه‌ها بیشتر در مناطقی از ایالت متحده، اروپا و دیگر نقاط جهان گزارش شده است.

رسید و در محدوده مجاز شاخص سمیت قرار گرفت (Kupryianchyk et al., 2013). بنابراین با توجه به این نتایج امیدوارکننده، امکان اصلاح درجا رسوبات آلوده به روش لایه‌نشانی در مقیاس میدانی فراهم گردید و همچنین استفاده از کربن فعال به عنوان بخشی از این فناوری بیشتر مورد توجه دانشمندان،

جدول (۱): برخی از پروژه‌های لایه‌نشانی با استفاده از مواد کربن‌پایه در مقیاس بزرگ (Patmont et al., 2015)

ردیف	سال (م)	مکان	نوع آلاینده	مساحت اجرا شده (هکتار)	نوع کربن	فناوری قراردادی	عمق آب (متر)	تجهیزات
۱	۲۰۰۴	رودخانه آناکوستیا، واشنگتن	PAHs	۰/۲	کک	کاور ژئوتکستایل	۸	جرثقیل
۲	۲۰۰۴-۲۰۰۶	سایت هانتروپوینت، سانفرانسیسکو	PCBs, PAHs	۰/۰۱	AC (دوغاب)	قراردادی مستقیم	<۱	Aquamog، تزریق دوغاب
۳	۲۰۰۶-۲۰۰۸	بندر تروندهایم، نروژ	PAHs, PCBs	۰/۱	AC (دوغاب)	کاور مخلوط، قراردادی مستقیم	۵	Tremie، اهرم پخش کننده
۴	۲۰۰۹	نهر بایلی، ویرجینیا	PCBs	۰/۰۳	AC (SediMite ^R)	قراردادی مستقیم	۱	پخش کننده پنوماتیکی
۵	۲۰۱۰	رودخانه تیتاباواسی، میشیگان	دی اکسان، فوران	۰/۱	AC (AquaGate TM)، بیوچار	کاور مخلوط	<۱	دیسک کشاورزی
۶	۲۰۱۱	کانال بالایی آبردین، مریلند	جیوه و PCBs	۱	AC (SediMite ^R , AquaGate TM)، (دوغاب)	قراردادی مستقیم	<۱	پخش کننده پنوماتیک، پخش کننده آبی
۷	۲۰۱۱-۲۰۱۶	دریاچه انونداگا، سیراکوز نیویورک	مواد شیمیایی مختلف (آلی)	۱۱۰	AC (دوغاب)	کاور مخلوط	۵	پخش کننده هیدرولیکی
۸	۲۰۱۱	رودخانه جنوبی، ویرجینیا	جیوه	۰/۰۲	بیوچار گرید (Cowboy Charcoal ^R)	قراردادی مستقیم	<۱	پخش کننده پنوماتیکی
۹	۲۰۱۱	بندرسندفورد، نروژ	PCBs, TBT, PAHs	۰/۰۲	AC (BioBlok ^a)	قراردادی مستقیم	۳۰	ابزار سطلی مکانیکی
۱۰	۲۰۱۲	سایت کشتی سازی لیرویک، نروژ	فلزات، PCBs، TBT ^{الف}	۰/۹	AC (BioBlok ^a)	قراردادی مستقیم	۳۰	پخش کننده هیدرولیکی
۱۱	۲۰۱۲	سایت نائودون، نروژ	فلزات، PCBs، PAHs، TBT	۰/۴	AC (BioBlok ^a)	قراردادی مستقیم	۳۰	ابزار سطلی مکانیکی
۱۲	۲۰۱۲	رود بری رادرفورد شرقی، نیوجرسی	جیوه و PCBs	۰/۰۱	(SediMite ^R)، AC (گرانولی)	کاور مخلوط، قراردادی مستقیم	<۱	پخش کننده پنوماتیکی

ادامه جدول (۱): برخی از پروژه‌های لایه‌نشانی با استفاده از مواد کربن پایه در مقیاس بزرگ (Patmont et al., 2015)

ردیف	سال (م)	مکان	نوع آلاینده	مساحت اجرا شده (هکتار)	نوع کربن	فناوری قراردادی	عمق آب (متر)	تجهیزات
۱۳	۲۰۱۲	کارخانه چوب‌بری آناکورتز، واشنگتن	دی‌اکسان، فوران	۰/۰۲	AC (SediMite ^R)	کاور مخلوط، قراردادی مستقیم	۸	پخش کننده کشاورزی
۱۴	۲۰۱۲	سایت دوامیش اسلیپ ۴، واشنگتن	PCBs	۱	AC (دوغاب)	کاور مخلوط	۴	ابزار سطلی مکانیکی
۱۵	۲۰۱۳	دریاچه آینه، دلاویر	جیوه و PCBs	۲	AC (SediMite ^R)	قراردادی مستقیم	۱	Telebelt & air horn
۱۶	۲۰۱۳	رودخانه پسیک، نیوآرک نیوجرسی	دی‌اکسان، فوران، PCBs	۲	AC (AquaGate TM)	کاور مخلوط	۱	Telebelt ^R

الف: TributylTin

Ghosh et al., 2011; Menzie, 2012; Sowers et al.,)
(2018).

مقایسه تکنیک لایروبی و لایه‌نشانی با گریدهای کربن فعال از لحاظ هزینه

هزینه یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در کلیه روش‌های احیاء و پاکسازی پروژه‌های محیط زیست محسوب می‌شود به طوری که در برخی از موارد اجرای این پروژه‌ها بدلیل عدم تامین بودجه لازم متوقف گردیده و یا اصلاً به مرحله اجرا نرسیده است. هزینه‌های اجرای یک روش اصلاح محیط‌زیستی بویژه لایه‌نشانی تحت تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله هزینه مواد، تجهیزات، نیروی انسانی، مانیتورینگ طولانی مدت و غیره می‌باشد. جدول (۲) نشان می‌دهد که هزینه اجرای لایه‌نشانی نازک لایه ماسه‌ای و بدون کربن فعال نسبت به بقیه تکنیک‌ها کمترین هزینه را در بر خواهد داشت. همچنین در میان گزینه‌هایی که شامل AC هستند، لایه‌نشانی به وسیله پلت‌های SediMite^R کمترین هزینه را دارد. معمولاً با افزایش مساحت سایت آلوده در پروژه‌هایی با مساحت ۴ هکتار به بالا، هزینه‌های ثابت پروژه کاهش یافته و به همین ترتیب مقادیر پایانی جدول (جمع کل هزینه‌ها) کاهش می‌یابد (Menzie, 2016).

همچنین نمودار شکل (۷) با مقایسه هزینه‌های تکنیک لایروبی در سایت دوامیش (واقع در واشنگتن) با سایر روش‌های لایه‌نشانی برای سایت‌هایی با مساحت ۴ هکتار به بالا، نشان می‌دهد که لایه‌نشانی رسوبات آلوده نسبت به روش لایروبی هزینه کمتری

پیشرفت‌های لایه‌نشانی

طی سال‌های اخیر با پیشرفت علم بویژه در حوزه اقدامات اصلاحی در اکوسیستم‌های طبیعی، تکنیک لایه‌نشانی فعال هم بی‌تاثیر نبوده است. استفاده از جاذب‌های جدید و موثرتر همراه با ریسک پایین‌تر یکی از چالش‌های جذاب در این بخش محسوب می‌شود. قراردادن مستقیم یک جاذب مانند کربن فعال هنگام تزریق به ستون آب در لایه‌نشانی رسوبات آلوده ممکن است باعث تعلیق مجدد و هدررفت آن به محیط اطراف شود. از اینرو امروزه این جاذب‌ها در قالب یک کامپوزیت تولید کرده و سپس به ستون آب تزریق می‌کنند. مکانیسم جذب آلاینده‌ها به این گونه است که کامپوزیت دارای کربن فعال در سطح آب وارد شده و به راحتی در سطح رسوب فرو رفته و میزان بالایی از جاذب کربن فعال را به رسوبات آلوده می‌رساند. ذرات این ترکیب با گذشت زمان و از طریق فرآیندهای اختلاط طبیعی مانند بیوتوربایسون تخریب شده و کربن فعال، آلاینده مورد نظر را جذب می‌نماید. کربن فعال تحویل داده شده از این طریق می‌تواند برای اصلاح رسوبات آلوده به PCB، جیوه، متیل جیوه، دی‌اکسین‌ها، فوران‌ها، PAHs، DDT و سایر مواد شیمیایی آبریز استفاده گردد (SSC, 2020). شکل (۶) برخی از این مواد کامپوزیتی فعال مانند پلت‌های (۳۲) SediMite^R ساخت شرکت Sediment Solutions، سنگدانه‌های (۳۳) AquaGate+PACTM ساخت شرکت AquaBlok[®], Ltd. که در پروژه‌های اصلاح درجا (۳۴) رسوبات آلوده بوسیله فناوری لایه‌نشانی استفاده شده نشان می‌دهد

در بر خواهد داشت (Menzie, 2016).



شکل (۶): پلت‌های SediMite^R (راست) و سنگدانه AquaGate+PACTM (چپ) (AquaBlok, 2019; SSC, 2020)

جدول (۲): مقایسه هزینه اجرای لایه‌نشانی نازک‌لایه با جاذب‌های کربن فعال (Menzie, 2016)

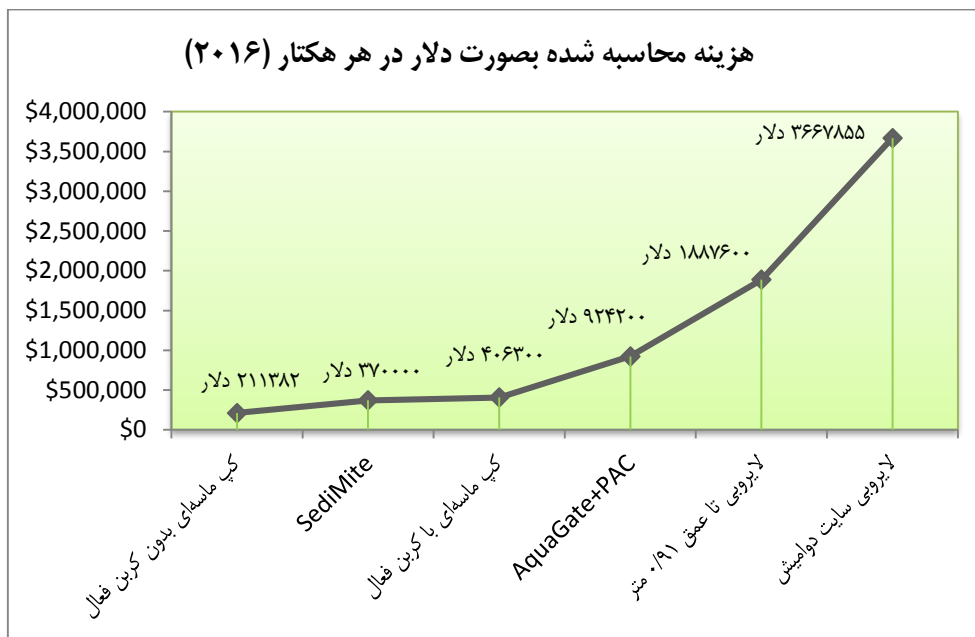
موارد هزینه	نرخ هر واحد			اندازه سایت (هکتار)		
	هزینه ثابت در هر پروژه (دلار)	هزینه در هر هکتار (دلار)	هزینه روزانه (دلار)	۱ (دلار)	۲ (دلار)	۴ (دلار)
هزینه مواد SediMite ^R	—	۱۸۵۰۰	—	۱۸۵۰۰	۳۷۰۰۰	۷۴۰۰۰
کپ ماسه‌ای بدون AC (ضخامت ۰/۱۵ متر)	—	۲۲۱۸۲	—	۲۲۱۸۲	۴۴۳۶۴	۸۸۷۲۸
کپ ماسه‌ای با AC (ضخامت ۰/۱ متر)	—	۲۱۷۱۰۰	—	۲۱۷۱۰۰	۴۳۴۲۰۰	۸۶۸۴۰۰
AquaGate+PAC TM (ضخامت ۰/۱ متر)	—	۷۳۵۰۰	—	۷۳۵۰۰	۱۴۷۰۰۰	۲۹۴۰۰۰
نیروی انسانی	۵۷۵۰۰	—	—	۵۷۵۰۰	۱۱۵۰۰۰	۲۳۰۰۰۰
حمل و نقل	۱۱۷۵۰۰	—	—	۱۱۷۵۰۰	۲۳۵۰۰۰	۴۷۰۰۰۰
هزینه جانبی برای SediMite ^R	—	—	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۴۰۰۰۰
هزینه جانبی برای کپ‌ها	—	—	۱۴۲۰۰	۱۴۲۰۰	۲۸۴۰۰	۵۶۸۰۰
جمع کل هزینه‌ها برای هر پروژه						
هزینه پروژه SediMite ^R				۳۷۰۰۰۰	۷۴۰۰۰۰	۱۴۸۰۰۰۰
هزینه پروژه کپ ماسه‌ای بدون AC				۲۱۱۳۸۲	۴۲۲۷۶۴	۸۵۴۵۲۸
هزینه پروژه کپ ماسه‌ای با AC				۴۰۶۳۰۰	۸۱۲۶۰۰	۱۶۲۵۲۰۰
هزینه پروژه AquaGate+PAC TM				۹۲۴۲۰۰	۱۸۴۸۴۰۰	۳۶۹۶۸۰۰

نکته: مقادیر به دست آمده بدون محاسبه هزینه مطالعه امکان‌سنجی (۱۵۰۰۰ دلار) و مانیتورینگ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تالاب‌ها، مرداب‌ها، دریاچه‌ها، کانال‌های آب، رودخانه‌ها و غیره نسبت به سایر روش‌های حذفی از جمله لایروبی برتری بالایی داشته باشد. لذا با توجه به پتانسیل‌ها و امکانات موجود در کشور می‌توان این فناوری را در برخی از سایت‌های آبی آلوده کشور مانند تالاب انزلی که با انباشت میزان آلاینده‌ها مواجه است اجرا نمود.

با توجه به مطالب مطرح‌شده در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که اجرای روش‌های اصلاحی از جمله لایه‌نشانی رسوبات آلوده به وسیله جاذب‌های موثری از جمله کربن فعال می‌تواند جهت کاهش سریع آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های طبیعی در معرض خطر مانند



شکل (۷): نمودار مقایسه هزینه (دلار در هکتار) برای روش‌های مختلف اصلاح رسوبات آلوده. هزینه‌ها شامل امکان‌سنجی یا مانیتورینگ نمی‌شود. هزینه لایروبی، برای پروژه‌هایی با مساحت بالای ۴ هکتار محاسبه شده است (Menzie, 2016)

یادداشت‌ها

- | | |
|---|---------------------------|
| 19. Consolidation | 1. Contaminated Sediments |
| 20. Geotextile | 2. Bioaccumulation |
| 21. Habitat Layer | 3. Capping |
| 22. Mat | 4. Activated Carbon |
| 23. Hydrophobic Organic Contaminants (HOCs): PCBs & PAHs | 5. Organoclay |
| 24. Nonaqueous Phase Liquids (NAPL) | 6. Armor |
| 25. Grap | 7. Isolation Capping |
| 26. Monitoring | 8. Thin-layer Capping |
| 27. United States Environmental Protection Agency (USEPA) | 9. Layer-cake |
| 28. PolyChlorinated Biphenyls (PCBs) | 10. Bioturbation |
| 29. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) | 11. Conventional |
| 30. Powder Activated Carbon (PAC) | 12. Active |
| 31. Carbon-based | 13. Cap |
| 32. Pellets | 14. Natural Recovery |
| 33. Aggregate | 15. Numerical Modeling |
| 34. In-Situ Treatment | 16. Monte Carlo Analysis |
| | 17. Steady State Modeling |
| | 18. Onondaga Lake |

فهرست منابع

- حقیقت‌سناس، آ.، حاتمی‌منش، م.، میرزائی، م.، میرسنجری، م. و حسین‌خضری، پ. ۱۳۹۶. سنجش و ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در رسوبات سطحی منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس. دوماهنامه طب جنوب، دوره ۲۰، شماره ۵.
- کرباسی، ع. و شادی، ر. ۱۳۹۱. ارزیابی اثرات محیط زیستی طرح‌های لایروبی. اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران. دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، منطقه سوم نیروی دریایی راهبردی ارتش جمهوری اسلامی ایران-کنارک.

- Cornelissen, G.; Breedveld, G. D.; Naes, K.; Oen, A. M. P. & Ruus, A. 2006. Bioaccumulation of native polycyclic aromatic hydrocarbons from sediment by a polychaete and a gastropod: Freely dissolved concentrations and activated carbon amendment. *Environ. Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(9): 2349–2355.
- Ghosh, U.; Luthy, R.G.; Cornelissen, G.; Werner, D. & Menzie, C. 2011. In situ Sorbent Amendments: A New Direction in Contaminated Sediment Management. *Environmental Science & Technology*, 45(4): 1163 – 1168.
- ITRC, (Interstate Technology & Regulatory Council). 2014. Contaminated Sediments Remediation. CS-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Contaminated Sediments Team.
- Jersak, J.; Göransson, G.; Ohlsson, Y.; Larsson, L.; Flyhammar, P. & Lindh, P. 2016. In-situ capping of contaminated sediments. Method overview. SGI Publication 30-1E, Swedish Geotechnical Institute, SGI, Linköping.
- Knox, A. S.; Paller, M. H.; Reible, D. D.; Ma, X. & Petrisor, I. G. 2008. Draft Sequestering Agents for Active caps – Remediation of Metals and Organics. Prepared under contract No. DE-AC09-96SR18500 with the Department of Energy.
- Kupryianchyk, D.; Rakowaka, M.; Roessink, I.; Reichman, E.P.; Grotenhuis, J. T. C. & Koelmans, A. A. 2013. In situ treatment with activated carbon reduces bioaccumulation in aquatic food chains. *Environmental Science & Technology*, 47 (9): 4563–4571.
- Lampert, D. J. & Reible, D. 2009. An Analytical Modeling Approach for Evaluation of Capping of Contaminated Sediments. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 18(4): 470 – 488.
- Murphy, P.; Marquette, A.; Reible, D. & Lowry, G. V. 2006. Predicting the Performance of Sediment Caps Amended with Sorbing Media. *Journal of Environmental Engineering*, 132:787-794.
- Menzie, C.A. 2012. "SediMite® A Delivery System for Amending Contaminated Sediment with Activated Carbon and/or other Amendments." Prepared for Lower Duwamish Waterway Workshop. February.
- Millward, R. N.; Bridges, T. S.; Ghosh, U.; Zimmerman, J. R. & Luthy, R. G. 2005. Addition of activated carbon to sediments to reduce PCB bioaccumulation by a polychaete (*Neanthes arenaceodentata*) and an amphipod (*Leptocheirus plumulosus*). *Environmental Science & Technology*, 39(8): 2880-2887.
- Menzie, C. 2016. A Low-Impact Delivery System for In Situ Treatment of Sediments Contaminated with Methyl Mercury and other Hydrophobic Chemicals. ER-200835.
- Olsta, J.T. & Darlington, J. 2005. Innovative Systems for Dredging, Dewatering, or for In-situ Capping of Contaminated Sediments. The 21st Annual International Conference on Soils, Sediments, and Water. University of Massachusetts at Amherst. October 17 through 20.
- Patmont, C. R.; Ghosh, U.; LaRosa, P.; Menzie, C.; Luthy, R. G.; Greenberg, M. S.; Cornelissen, G.; Eek, E.; Collins, J.; Hull, J.; Hjartland, T.; Glaza, E.; Bleiler, J. & Quadrini, J. 2015. In situ sediment treatment using activated carbon: A demonstrated sediment cleanup technology. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(2): 195–207.
- Palermo, M.; Maynard, S.; Miller, J. & Reible, D. 1998. Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments. EPA 905-896-004. Great Lakes National Program Office, Chicago, IL.
- Parsons, & Anchor QEA. 2012b. Onondaga Lake Capping, Dredging, Habitat and Profundal Zone (SMU 8) Final Design. Appendix B –Cap Modeling. https://www.dec.ny.gov/docs/regions_pdf/prof2.pdf.
- Reible, D. 2004. In Situ Sediment Remediation Through Capping: Status and Research Needs. Hazardous Substance Research Center/South and Southwest. 20 pages.
- Sun, X. & Ghosh, U. 2008. The Effect of Activated Carbon on Partitioning, Desorption, and Biouptake of Native Polychlorinated Biphenyls in Four Freshwater Sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(11): 2287-2295.

- Sowers, K. R.; Ghosh, U. & May, H. D. 2018. Evaluating the Efficacy of Bioaugmentation for In-Situ Treatment of PCB Impacted Sediments. Final Technical Report, ESTCP Project ER-201215.
- Schaanning, M. T.; Beylich, B.; Gunnarsson, J. S. & Eek, E. 2021. Long-term effects of thin layer capping in the Grenland fjords, Norway: Reduced uptake of dioxins in passive samplers and sedimentdwelling organisms. *Chemosphere*, 264(2): 1-11.
- USEPA, 1997. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis. Risk Assessment Forum. U.S.Environmental Protection Agency, EPA/630/R-97/001.
- USEPA, 2004c. Guidance for Monitoring at Hazardous Waste Sites: Framework for Monitoring Plan Development and Implementation. U.S. Environmental Protection Agency's (EPA's) new "Monitoring Guidance," OSWER 9355.4-28.
- USEPA, 2005. Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites. EPA-540-R-05-012 OSWER 9355.0-85.
- USEPA, 2013. Use of Amendments for In Situ Remediation at Superfund Sediment Sites. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
- Zimmerman, J. R.; Ghosh, U.; Millward, R. N.; Bridges, T. S. & Luthy, R. G. Addition of carbon sorbents to reduce PCB and PAH bioavailability in marine sediments: Physicochemical tests. *Environmental Science & Technology*, 38(20): 5458–5464.
- AquaBlok, Ltd. 2019. AquaGate+ for Contaminated Sediments. Retrieved from: <https://www.aquablok.com/remediation/products/aquagate>.
- Parsons, 2004. Onondaga lake feasibility study report. Retrieved from: <http://www.lakecleanup.com/publicdocs/docs>.
- SSC, (Sediment Solutions Corporation). 2020. Spec. Sheet of SediMite^R, Retrieved from: <http://www.sedimite.com/specs>.

Investigation and Review of the Capping Method of Contaminated Sediments in Aquatic Ecosystems Using Activated Carbon

Abolfazl Moradi-Saadatmand^{1*}, Majid Mollaei²

1 MSc in Inorganic Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Qom, Iran.

2 MSc in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

(Received: 2021/10/16 Accepted: 2021/12/27)

Abstract

Effective and safe treatment of contaminated sediments in aquatic ecosystems has always been one of the most important environmental challenges in the world. Natural ecosystems are always threatened by likely accumulation of toxic pollutants. Therefore, rapid remediation of these valuable ecosystems is essential. Dredging and Capping are among the well-known methods in the world that have been used for clean and quick reduction of the concentration of toxic contaminants in sediments. Capping is a proven and common remediation technology for containment of contaminated sediments in order to reduce their contaminants mobility and contact with the environment. In capping, the contaminated sediments are covered by one or more layers of clean materials such as sand, gravel, clean dredged material, active or reactive materials and etc. This method provides the restoration of these ecosystems by rapidly reducing the amount of pollutants in surface waters through absorbing and reducing the mobility of toxic substances in contaminated sediments. This technology has less environmental hazards than the dredging method, while it has never been studied on a laboratory or field scale in Iran. This research intends to introduce the method involving activated carbon, as a background for the implementation of this technology in the country. This research is of practical type and documentary-libraries in terms of purpose and method of data collection, respectively.

Keywords: In-situ treatment, Capping, Contaminated sediments, Activated carbon, Aquatic ecosystems.