فهرست مطالب

فصل اول : بررسی منابع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مواد رنگزا ۳

۱-۲-۱- انواع مواد رنگزا ۳

۱-۲-۲- مواد رنگزای آزو ٤

۱-۲-۳- گروه عاملی آزو در مواد رنگزا ٤

۱-۲-٤- پایداری مواد رنگزای آزو ٤

۱-۲-۵- سمّیّت زیست محیطی مواد رنگزای آزو ۵

۱-۳- روش‌های تصفیه‌ی پساب‌های حاوی مواد رنگزای آزو ٦

۱-۳-۱- پالایش فیزیکی ٦

۱-۳-۲- پالایش شیمیایی ٦

۱-۳-۳- پالایش زیستی ٦

۱-٤- اهمیت اکولوژیک گیاهان در محیط‌های آلوده ۷

۱-۵- انواع تکنولوژی‌های گیاه‌پالایی ۹

۱-۵-۱- تغییر شکل گیاهی ۱۰

۱-۵-۲- استخراج توسط گیاه ۱۰

۱-۵-۳- فیلتر ریشه‌ای ۱۱

۱-۵-٤- تجزیه‌ی ریشه‌ای ۱۱

۱-۵-۵- پایدارسازی گیاهی ۱۱

۱-۵-٦- فرارسازی گیاهی ۱۱

۱-٦- مزایای تکنولوژی‌های گیاه‌پالایی ۱۱

۱-۷- جذب، انتقال و اثرات آلاینده‌ها در گیاهان ۱۲

۱-۷-۱- جذب آلاینده‌های زیست محیطی توسط برگ‌ها ۱۲
۱-۷-۲- نفوذ آلاینده‌ها به ریشه‌ها ۱۳
۱-۷-۳- انتقال آلاینده‌های زیست محیطی در گیاهان ۱۵
۱-۸- تغییر آلاینده‌های آلی در گیاهان ۱۶
۱-۹- استرس‌های محیطی و واکنش در سلول‌های به آن‌ها ۱۸
۱-۹-۱- شکل‌گیری گونه‌های اکسیژن فعّال و مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی در گیاهان..... ۱۸
۱-۹-۲- گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن و آسیب اکسیداتیو به مولکول‌های زیستی ۱۹
۱-۹-۳- سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی در گیاهان ۲۰
۱-۹-٤- اجزای غیر آنزیمی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی ۲۱
۱-۹-۵- آنزیم‌های سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی ۲۱
۱-۱۰- تأثیر آلاینده‌های زیست محیطی بر روی سلول‌های گیاهی ۲۲
۱-۱۱- گیاه‌پالایی مواد رنگزای آزو ۲۲
۱-۱۱-۱- اهمّیّت مطالعه‌ی فرآیندهای گیاه‌پالایی مواد رنگزای آزو ۲۲
۱-۱۱-۲- انتخاب سیستم‌های گیاهی برای پالایش مواد رنگزای نساجی ۲۲
۱-۱۲- گونه‌ی گیاهی مورد استفاده در این پژوهش ۲٤
۱-۱۲-۱- گیاه *Spirodela polyrrhiza* ۲٤
۱-۱۲-۲- اختصاصات عمومی تیره‌ی عدسک آبی (*Lemnaceae*) ۲٤
۱-۱۲-۳- تیره‌ی عدسک آبی در ایران ۲۵
۱-۱۲-٤- ویژگی‌های جنس *Spirodela* ۲۵
۱-۱۲-۵- مروری بر بررسی‌های انجام شده روی گونه‌ی *S. polyrrhiza* در جهت پالایش ۲۵
۱-۱۳- مواد رنگزای مستقیم ۲۵
اهداف پژوهش ۲٦
فصل دوم : مواد و روش‌ها ۲۷
۲-۱- دستگاه‌ها و مواد مورد استفاده: ۲۸
۲-۲- تهیه‌ی نمونه‌های گیاهی ۲۹
۲-۳- ماده‌ی رنگزای مورد استفاده ۲۹

۲-٤- آزمایش‌های رنگزدایی ۳۱
۲-٥- بررسی تأثیر وزن گیاه *S. polyrrhiza* در میزان حذف ماده‌ی رنگزای ۳۱
۲-٦- بررسی اثر غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزا در میزان حذف آن توسط گیاه *S. polyrrhiza* ۳۱
۲-۷- بررسی تأثیر pH در میزان حذف ماده‌ی رنگزا توسط گیاه *S. polyrrhiza* ۳۱
۲-۸- بررسی تأثیر دما در میزان حذف ماده‌ی رنگزا توسط گیاه *S. pollyrrhiza* ۳۲
۲-۹- بررسی کارآیی نمونه‌های گیاهی مورد مطالعه در حذف ماده‌ی رنگزای DB129 طی آزمایش‌های متوالی ۳۲
۲-۱۰- بررسی تأثیر ماده‌ی رنگزای DB129 در رشد گیاه *S. polyrrhiza* ۳۲
۲-۱۱- بررسی اثر ماده‌ی رنگزای DB129 در میزان مالون‌دی‌آلدئید ۳۳
۲-۱۲- بررسی اثر ماده‌ی رنگزای DB129 بر میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه ۳٤
۲-۱۳- سنجش فعالیت آنزیم‌ها در گیاهان تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۳٤
۲-۱۳-۱- استخراج عصاره‌ی آنزیمی ۳٤
۲-۱۳-۲- سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) ۳٥
۲-۱۳-۳- سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) ۳٥
۲-۱۳-٤- سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) ۳٥
۲-۱٤- شناسایی مواد حاصل از تجزیه‌ی زیستی DB129 توسط گیاه *S. polyrrhiza* ۳٦
۲-۱٥- نرم‌افزارهای مورد استفاده ۳٦
فصل سوم : نتایج و بحث ۳۷
۳-۱- تأثیر متغیرهای غیر زیستی مختلف در فرآیند رنگزدایی ۳۸
۳-۱-۱- تأثیر مقادیر مختلف گیاه *S. polyrrhiza* بر میزان رنگزدایی ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۳۸
۳-۱-۲- تأثیر غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزا در میزان حذف آن توسط گیاه *S. polyrrhiza* ۳۹
۳-۱-۳- تأثیر pH بر کارآیی حذف ماده‌ی رنگزای DB129 توسط گیاه *S. polyrrhiza* ٤۲
۳-۱-٤- تأثیر دما بر کارآیی گیاه *S. polyrrhiza* در حذف ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ٤٤
۳-۲- بررسی کارآیی گیاه *S. polyrrhiza* در حذف ماده‌ی رنگزای DB129 طی آزمایش‌های متوالی ٤٦
۳-۳- تأثیر ماده‌ی رنگزای DB129 در رشد گیاه *S. polyrrhiza* ٤۷

۳-٤- تأثیر ماده‌ی رنگزای DB129 بر میزان مالون‌دی‌آلدئید گیاه *S. polyrrhiza* ٤٩
۳-٥- تأثیر ماده‌ی رنگزای DB129 بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه *S. polyrrhiza* ٥٠
۳-٦- تأثیر ماده‌ی رنگزای DB129 بر روی آنتی اکسیدان‌های آنزیمی گیاه *S. polyrrhiza* ٥٢
۳-٦-۱- تغییر در فعالیت آنزیم SOD در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ٥٢
۳-٦-۲- تغییر در فعالیت آنزیم POD در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ٥٣
۳-٦-۳- تغییر در فعالیت آنزیم CAT در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ٥٤
۳-٦-٤- اثر pH و دما بر فعالیت آنزیم‌های CAT و POD ٥٥
۳-۷- شناسایی متابولیت‌های حد واسط تولید شده در مسیر تجزیه‌ی زیستی ماده‌ی رنگزای DB129 .. ٥٧
نتیجه‌گیری ٦٢
پیشنهادات ٦٣
منابع ٦٤

فهرست اشکال

فصل اول : بررسی منابع

شکل ۱-۱- ساختار عمومی ماده‌ی رنگزای دارای گروه عاملی آزو ٤
شکل ۱-۲- مسیرهای نفوذ آلاینده‌های محیطی به درون ریشه‌ها ١٤
شکل ۱-۳- مسیرهای اصلی تغییر آلاینده‌های آلی در سلول‌های گیاهان ١٦
شکل ۱-٤- تصویر شماتیک از تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان ١٩

فصل دوم : مواد و روش‌ها

شکل ۲-۱- طیف جذبی محلول DB129 به غلظت ۳۰ mg/L ۳۰

فصل سوم : نتایج و بحث

شکل ۳-۱- تأثیر مقادیر مختلف گیاه *S. polyrrhiza* بر حذف زیستی ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۳۹
شکل ۳-۲- تأثیر غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزای DB129 بر میزان حذف ٤٠
شکل ۳-۳- مقدار ماده‌ی رنگزای حذف شده در طول زمان در غلظت‌های اولیه‌ی مختلف DB129 .... ٤١
شکل ۳-٤- تأثیر pH محلول ماده‌ی رنگزا بر کارآیی حذف ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ٤٣
شکل ۳-۵- تأثیر دماهای مختلف بر روی حذف ماده‌ی رنگزای DB129 توسط گیاه ٤٥
شکل ۳-٦- قابلیت رنگزدایی زیستی گیاه *S. polyrrhiza* طی چرخه‌های متوالی قرارگیری در محلول ماده‌ی رنگزا ٤٧
شکل ۳-۷- تأثیر غلظت‌های مختلف ماده‌ی رنگزای DB129 بر رشد نسبی گیاه ٤٨
شکل ۳-۸- تأثیر غلظت‌های مختلف ماده‌ی رنگزای DB129 بر تعداد نسبی فروندهای گیاه ٤٩
شکل ۳-۹- میزان تشکیل مالون‌دی‌آلدئید در گیاه تیمار شده بوسیله‌ی ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۵۰
شکل ۳-۱۰- محتوی کلروفیل a، b وکاروتنوئیدها در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۵۱
شکل ۳-۱۱- فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۵۳
شکل۳-۱۲- فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۵٤
شکل ۳-۱۳- فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 ..... ۵۵
شکل ۳-١٤- فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 در دماها و pHهای مختلف ۵٦

شـکل ۳-۱۵- فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاه تیمار شده با ماده‌ی رنگزای DB129 در دماها و pHهای مختلف ۵۷
شکل ۳-۱۶- کروماتوگرام مربوط به محلول DB129 پس از ۷ روز تیمار با گیاه *S. polyrrhiza*.....۵۸
شکل ۳-۱۷- مسیر احتمالی پیشنهاد شده برای تجزیه‌ی زیستی ماده‌ی رنگزای DB129 توسط گیاه.....۶۱

فهرست جداول

فصل دوم : مواد و روش‌ها

جدول ۲-۱- ترکیبات مورد نیاز در محیط کشت گیاه *S. polyrrhiza* ۲۹

جدول۲-۲- ساختار و ویژگی های ماده‌ی رنگزای DB129..... ۳۰

فصل سوم : نتایج و بحث

جدول ۳-۱- تأثیر مقادیر مختلف گیاه *S. polyrrhiza* در میزان حذف ماده‌ی رنگزای DB129..... ۳۹

جدول ۳-۲- تأثیر غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزای DB129 در میزان حذف آن..... ۴۱

جدول ۳-۳- مقدار ماده‌ی رنگزای حذف شده در طول زمان در غلظت‌های اولیه‌ی مختلف DB129.. ۴۲

جدول۳-٤- تأثیر pH محلول ماده‌ی رنگزا بر کارآیی حذف ماده‌ی رنگزای DB129..... ۴۳

جدول ۳-۵- تأثیر دماهای مختلف در حذف ماده‌ی رنگزای DB129 توسط گیاه *S. polyrrhiza* ۴۵

جدول ۳-٦- تأثیر غلظت‌های مختلف ماده‌ی رنگزای DB129 بررشد نسبی گیاه *S. polyrrhiza*..... ۴۸

جدول ۳-۷- تأثیر غلظت‌های مختلف ماده‌ی رنگزای DB129 بر تعداد نسبی فروندهای گیاه *S. polyrrhiza*..... ۴۹

جدول ۳-۸- ترکیبات میانی شناسایی شده‌ی حاصل از تجزیه‌ی DB129 توسط گیاه..... ۵۹

فهرست عبارات مخفف		
عبارت مخفف	**نام کامل**	**معادل فارسی**
DB129	C.I. Direct Blue 129	آبی مستقیم ۱۲۹
CAT	Catalase	کاتالاز
POD	Peroxidase	پراکسیداز
RFN	Relative Frond Number	میزان فروند نسبی
RGR	Relative Growth Rate	میزان رشد نسبی
SOD	Super Oxid Dismutase	سوپراکسید دیسموتاز

نام خانوادگی دانشجو: **مرادی** نام: **زهرا**

عنوان پایان نامه : **مطالعه‌ی توانایی گیاه *Spirodela polyrrhiza* در حذف ماده‌ی رنگزای C.I. Direct Blue 129 از آب های آلوده و اثرات ماده‌ی رنگزا بر فعالیت آنزیمی گیاه**

استادان راهنما: **دکتر علی موافقی و دکتر علیرضا ختائی**

مقطع تحصیلی: **کارشناسی ارشد** رشته: **زیست شناسی گیاهی** گرایش: **فیزیولوژی گیاهی** **دانشگاه تبریز**

دانشکده: **علوم طبیعی** تاریخ فارغ التحصیلی: **تابستان ۹۲** تعداد صفحه: **۷۹**

کلید واژه‌ها: گیاه‌پالایی، عدسک آبی پرریشه، شاخص‌های فیزیولوژیک، مواد رنگزا، تصفیه‌ی پساب

چکیده : منابع آبی یکی از برجسته‌ترین منابع طبیعی مورد استفاده‌ی موجودات زنده می‌باشند. سرعت بالای صنعتی شدن و افزایش سریع جمعیت در چند دهه‌ی گذشته، موجب تخلیه‌ی میزان فراوانی از آلاینده‌های صنعتی و شهری در منابع آبی شده است و در نتیجه سلامت منابع آبی مورد تهدید جدی قرار گرفته است. حذف آلاینده‌های نامطلوب موجود در اکوسیستم‌های آبی، نیاز به فن‌آوری‌های کارا و مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست دارد. روش‌های زیستی یکی از روش‌های مؤثر و سازگار با محیط زیست در تصفیه‌ی آب‌ها و زمین‌های آلوده شده می‌باشند و به استفاده‌ی پایدار از منابع آبی و زیستی کمک می‌کنند. گیاه‌پالایی یکی از فرآیندهای زیستی می‌باشد که در آن از توانایی فیزیولوژیک برخی از گونه‌های گیاهی برای حذف، سمّیّت زدایی یا جذب آلاینده‌های خطرناک مانند ترکیبات آلی، فلزّات سنگین، ترکیبات رادیواکتیو، مواد رنگزا و ... موجود در خاک یا آب استفاده می‌شود. این فرآیند به عنوان یک روش تصفیه‌ی طبیعی، توانایی بالایی برای حذف محدوده‌ی گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی و غیر آلی حاصل از پساب‌های صنعتی مانند مواد رنگزا دارد و یک روش کم هزینه برای پالایش پساب‌ها می‌باشد. در این کار پژوهشی توانایی گیاه آبزی *Spirodela polyrrhiza* در تجزیه‌ی ماده‌ی رنگزا دی آزوی آبی مستقیم ۱۲۹ مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیبات حاصل از تجزیه‌ی زیستی ماده‌ی رنگزای آبی مستقیم ۱۲۹ بوسیله‌ی دستگاه GC-MS مورد آنالیز قرار گرفته است و همچنین تأثیر متغیرهای آزمایشی مانند غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزای آبی مستقیم ۱۲۹، pH محلول، دما و مقدار بیومس در کارآیی فرآیند رنگزدایی آبی مستقیم ۱۲۹ توسط گیاه *S. polyrrhiza* تیمار شده توسط ماده‌ی رنگزای مورد نظر بررسی شده است. افزایش دما، افزایش غلظت اولیه‌ی ماده‌ی رنگزا و افزایش مقدار بیومس منجر به افزایش میزان حذف ماده‌ی رنگزا شد. همچنین در این پژوهش، تأثیر ماده‌ی رنگزای مورد نظر بر پراکسیداسیون لیپیدها و محتوی رنگیزه‌های گیاهی بررسی شده است. پس از ۷ روز ماده‌ی رنگزای آبی مستقیم ۱۲۹ در محیط کشت گیاه *S. polyrrhiza* منجر به افزایش ۲۷ و ۱۲٤ درصدی محتوی مالون دی آلدئید در گیاه تیمار شده به ترتیب در محیط‌های حاوی ماده‌ی رنگزا با غلظت ۱۵ و mg/L ۳۰ شد. میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز در گیاهان تیمار شده کاهش یافت. برای اطلاع از فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان در شرایط حضور ماده‌ی رنگزا در محیط کشت گیاه مورد مطالعه، فعالیت تعدادی از این آنزیم‌ها، نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز که در سیستم دفاعی گیاه در شرایط تنش‌زا درگیرند، مورد بررسی قرار گرفت. فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز پس از ۷ روز در گیاهان تیمار شده با غلظت‌های پایین و بالای ماده‌ی رنگزا (۱۵ و mg/L ۳۰) افزایش یافت، در حالیکه فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز کاهش یافت. احتمالا توانایی گیاه *S. polyrrhiza* در تجزیه‌ی ماده‌ی رنگزای آبی مستقیم ۱۲۹ با فعالیت افزایش یافته‌ی آنزیم‌های آنتی اکسیدانت در گیاه *S. polyrrhiza* تیمار شده با ماده‌ی رنگزای مورد نظر ارتباط دارد.

فصل اول: بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

افزایش مداوم آلودگی محیط زیست بوسیله‌ی ترکیبات شیمیایی یکی از مشکلات مهم و حل نشده‌ی بشر است. منابع آلاینده‌های شیمیایی به دو دسته تقسیم می‌شوند: آلاینده‌های طبیعی و آلاینده‌های انسانی که از فعّالیّت‌های انسانی منشأ می‌گیرند. آلاینده‌های طبیعی از فرآیندهایی مانند انتشار گازهای سمّی طیّ فعّالیّت آتشفشان‌ها، شسته شدن عناصر سمّی از سنگ‌ها توسط سیلاب یا زلزله، فعّالیّت‌های متابولیک تمام موجودات، ترشّح ترکیبات سمّی و غیره به وجود می‌آیند. در مقایسه با آلاینده‌های طبیعی سهم انسان در آلودگی محیط زیست بسیار زیاد است. در نتیجه‌ی شهرنشینی، رشد غیرقابل پیش‌بینی صنعت، افزایش سالانه‌ی تولید مواد شیمیایی، فعّالیّت‌های نظامی و غیره عوامل خطرناکی تولید می‌شوند که در نهایت سلامتی بشر را مورد تهدید قرار خواهند داد. سالانه بیش از ۵۰۰ میلیون تن از مواد شیمیایی در جهان تولید می‌شود. حجم بزرگی از این مواد خطرناک یا محصولات حدّ واسط سمّی بوجود آمده از دگرگونی ناقص، در زیست کره جمع می‌شوند که به طور قابل توجّهی در تعادل محیط زیست اختلال ایجاد می‌کنند. بدون شک اکثر مواد شیمیایی ساخته شده مانند مواد رنگزا، حشره‌کش‌ها، محصولات صنایع غذایی، دارویی، نسّاجی و غیره سمّی هستند، سمّیّت برخی از این مواد در مقایسه با آلاینده‌های طبیعی بسیار بیشتر است (Korte et al., 2000).

پساب‌های حاوی مواد رنگزا معمولا بوسیله‌ی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی متعددی مورد پالایش قرار می‌گیرند. این فن‌آوری‌ها معمولا در از میان بردن مواد رنگزا کارایی بالایی ندارند، چرا که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند و سازگاری کمی با محدوده‌ی گسترده‌ای از پساب‌های حاوی مواد رنگزا دارند. همچنین این فن‌آوری‌ها انرژی فراوانی را مصرف می‌کنند و محصولات جانبی خطرناکی را تولید می‌کنند که خود عامل آلودگی محیط می شوند (Yuzhu, 2001).

زیست پالایی[1] می‌تواند به عنوان یک فن‌آوری جایگزین برای پالایش پساب‌های نساجی بکار رود. زیست‌پالایی استفاده از موجودات زنده برای بهبود بخشیدن و اصلاح شرایط مکان‌های آلوده شده مانند خاک‌ها ، رسوب‌ها ، هوا و آب می‌باشد. بسیاری از موجودات زنده مانند جلبک‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، مخمرها و ... قادر به تجزیه‌ی مواد رنگزای نساجی می‌باشند (Kabra et al., 2011; Khataee and Dehghan, 2011; Khataee et al., 2011). گیاهان نیز سیستم‌های پیچیده‌ای دارند که می‌توانند به عنوان یک ابزار پالایشی بکار روند. گیاه‌پالایی[2] بکارگیری گیاهان جهت انباشتن، جدا سازی، حذف و تجزیه کردن آلاینده‌های آلی و غیر آلی موجود در خاک، رسوب‌ها، آب‌های سطحی و آب‌های زمینی می‌باشد (Kabra et al., 2011). از آنجا که گیاهان دارای سیستم‌های آنزیمی توانمندی می‌باشند

---

1. Bioremediation
2. Phytoremediation

می‌توانند ساختار پیچیده‌ی مواد آلاینده را تخریب نمایند. این فرآیند یک روش سازگار با محیط زیست و یک روش احیاء مناسب برای تبدیل محیط‌های آلوده به محیط‌های سالم‌تر می‌باشد. در این پژوهش توانایی گیاه *Spirodela polyrrhiza* در حذف ماده‌ی رنگزای دی آزوی C.I. Direct Blue 129 و متغیرهای مؤثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲- مواد رنگزا

در میان آلاینده‌های محیط زیست، مواد رنگزای حاصل از صنایعی مانند نسّاجی و رنگرزی یکی از دشوارترین مواد برای پالایش می‌باشند؛ زیرا مواد رنگزای مصنوعی معمولا دارای ساختارهای مولکولی آروماتیک پیچیده‌ای هستند که باعث پایداری و دشوار شدن فرآیند تجزیه‌ی آنها می‌شود (Yuzhu, 2001).

طیّ فرآیند رنگرزی در صنعت نسّاجی، بیش از ۱۵ درصد مواد رنگزای مورد استفاده وارد پساب‌های صنعتی می‌شوند. صنعت نسّاجی روزانه میلیون‌ها لیتر از پساب‌های حاوی مواد رنگزا را مستقیما وارد منابع آبی می‌کند. حضور این مواد رنگزا در سیستم‌های آبی موجب کاهش نفوذ نور خورشید و در نتیجه، کاهش فعّالیّت فتوسنتز، کاهش حلّالیّت اکسیژن و افت کیفیت آب می‌شود. همچنین این مواد، دارای آثار سمّی در زندگی گیاهان و جانوران آبزی هستند. افزون بر آن مواد رنگزای رها شده از صنعت نسّاجی اثرات جهش‌زا و سرطان‌زایی دارند و به زندگی موجودات زنده ضرر می‌رسانند. بنابراین پالایش پساب‌های حاصل از صنایع نسّاجی و رنگرزی پیش از تخلیه شدن آنها به محیط زیست ضروری می‌باشد (Kabra et al., 2011).

۱-۲-۱- انواع مواد رنگزا

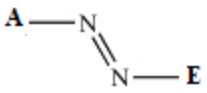
مواد رنگزای طبیعی نخستین مواد رنگزایی بودند که مورد استفاده‌ی بشر قرار گرفتند. با تولید مواد رنگزای مصنوعی، مصرف نوع طبیعی آنها تقریبا متوقّف شد. مواد رنگزا از لحاظ ساختار شیمیایی می‌توانند ترکیباتی آلی یا غیر آلی باشند. این مواد به طور معمول بر اساس ساختار شیمیایی یا موارد کاربردشان طبقه‌بندی می‌شوند. بر اساس کاربرد، مواد رنگزا به انواع اسیدی، آزوئیک، مستقیم، راکتیو، سولفور و غیره تقسیم می‌شوند. بر اساس ساختار شیمیایی نیز مواد رنگزا به انواع آزو، نیترو، نیتروزو، دی‌آریل متان، تری‌آریل متان، گزانتن، آکریدین، سیانین، کوئینون ایمین، پتالوسیانین و غیره تقسیم می‌شوند (Bafana et al., 2010).

۱-۲-۲- مواد رنگزای آزو

مواد رنگزای آزو بزرگترین گروه از مواد رنگزا هستند که ۷۰ درصد از کلّ مواد رنگزای آلی تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهند. دلیل این امر از فرآیند ساده‌ی تولید ، تنوّع ساختاری زیاد، ضریب جذب مولی بالا و پایداری خوب آنها در مقابل نور و رطوبت ناشی می‌شود. لذا در رنگرزی مواد طبیعی و مصنوعی، پزشکی، جوهر سازی، مواد آرایشی، مواد غذایی و غیره مورد استفاده‌ی وسیع قرار می‌گیرند (Carliell et al., 1998; Bradford, 1971).

۱-۲-۳- گروه عاملی آزو در مواد رنگزا

مواد رنگزای آزو، دارای یک گروه عاملی آزو (-N=N-) هستند و حتّی می‌توانند شامل دو[1]، سه[2] و یا به ندرت شامل چهار[3] و یا حتّی چندین[4] گروه آزو باشند. گروه عاملی آزو به دو گروه متصل می‌شود که حدّاقل یک و به طور معمول هر دوی این گروه‌ها آروماتیک هستند. این گروه به فرم ترانس (شکل ۱-۱) است و زاویه‌ی پیوندی در آن ۱۲۰° می‌باشد (Subramaniam & Chacko, 2011).



شکل ۱-۱- ساختار عمومی ماده‌ی رنگزای دارای گروه عاملی آزو (Subramaniam & Chacko, 2011)

۱-۲-٤- پایداری مواد رنگزای آزو

مواد رنگزا باید از لحاظ شیمیایی پایداری زیادی در مقابل نور داشته باشند، بنابراین فتولیز نمی‌تواند مسیر تجزیه‌ای مهمّی برای مواد رنگزای آزو باشد. پایداری در برابر حملات میکروبی نیز یکی از ویژگی‌های مورد نیاز مواد رنگزای آزو است که باعث افزایش ماندگاری آنها می‌شود. سرسختی مواد رنگزای آزو به حضور گروه سولفونات و پیوندهای آزو نسبت داده شده است (Işik & Sponza, 2007; Kulla et al., 1993; Pinheiro et al., 2004).

---

1. Disazo
2. Trisazo
3. Tetrakisazo
4. Polyazo

۱-۲-۵- سمّیّت زیست محیطی مواد رنگزای آزو

از آنجا که پساب‌های حاوی مواد رنگزا به طور معمول درون منابع آبی تخلیه می‌شوند، آثار سمّی مواد رنگزا به طور عمده در موجودات آبزی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داده است که مواد رنگزای آزو در موجودات آبزی شامل جلبک‌ها، ماهی‌ها و سخت‌پوستان آثار سمّی داشته‌اند. مشخّص شده است که مواد رنگزای آزو باعث کاهش در فرآیندهایی مانند زنده‌مانی، تکثیر و مصرف اکسیژن در نوعی ماهی می‌شوند. همچنین مواد رنگزای آزو می‌توانند بوسیله‌ی کاهش نفوذ نور، از فتوسنتز جلبک‌ها ممانعت کنند. به طور مشابه گزارش شده است که مواد رنگزا مانع فعّالیّت‌های تنفّسی میکروارگانیسم‌های آبزی می‌شوند. این امر ممکن است باعث مهار فرآیندهای میکروبی مانند سیستم‌های میکروبی تصفیه‌ی فاضلاب و چرخه‌ی طبیعی بیوشیمیایی در آنها شود. نوتنی و همکارانش در سال ۲۰۰۶ سمّیّت مواد رنگزای آزو را در میکروارگانیسم‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که مواد رنگزا می‌توانند باعث مهار نور افشانی در باکتری *Vibrio fischeri*، مهار رشد در ریزجلبک *Selenastrum capricornotum* و اثرات متعدّدی بر روی زنده‌مانی، رشد، تغذیه و مورفومتری مژه‌دار *Tetrahymena pyriformis* شوند. بررسی‌ها نشان داده است که ماده‌ی رنگزای راکتیو سیاه ۵ و سولفانیلیک اسید، باعث کاهش فعالیّت اوره‌آز، کاهش پتانسیل نیتریفیکاسیون و کاهش زنده‌مانی باکتری‌های اکسید کننده‌ی آمونیوم می‌شوند. این امر می‌تواند منجر به کاهش کارآیی جذب نیتروژن گیاهان و در نتیجه کاهش حاصلخیزی اکوسیستم‌های خاکی شود. همچنین مواد رنگزای آزو می‌توانند رشد گیاه را بوسیله‌ی مهار جوانه‌زنی دانه‌ها، کاهش زنده‌مانی گیاهچه‌ها و جلوگیری از طویل شدن شاخه‌ها و ریشه‌ها تحت تأثیر قرار دهند. به طور مشابه مشخص شده است که بنزیدین مانع سنتز DNA در هسته و باعث از بین رفتن تعادل کلسیم می‌شود که منجر به تخریب کامل سلول‌های انتهای ریشه‌ی ذرّت می‌شود. بیشتر آثار سمّی مواد رنگزای آزو از طریق آمین‌های آروماتیک حاصل از تجزیه‌ی این مواد اعمال می‌شود. آمین‌های آروماتیک میزان بسیار بالایی از سمّیّت را در موجودات آبزی مانند ماهی‌ها، حلزون‌ها و ... نشان داده‌اند. مواد رنگزای آزو و آمین‌های آروماتیک به مرور در زنجیره‌ی غذایی تجمّع پیدا می‌کنند. این فرآیند متأثر از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کینتیک سمّیّت این ترکیبات نظیر ضریب جداسازی، اندازه‌ی مولکولی و میزان تنفّس موجود زنده می‌باشد. مواد رنگزای آبگریز ضریب جداسازی بالایی دارند، در نتیجه باعث افزایش خطر زیست تجمّعی می‌شوند. آنلیکر و همکارانش (۱۹۸۱)، ضریب جداسازی و فاکتور غلظت زیستی ۵۰ ماده‌ی رنگزای آزو را در ماهی مورد تحلیل قرار دادند و با میزان کمی استثناء، دریافتند که مواد رنگزای آبدوست فاکتور غلظت زیستی پایینی دارند که احتمالا به دلیل وزن مولکولی بالای آنها یا تراکم بالای آنها می‌باشد که باعث سخت شدن عبور آنها از غشاء می‌شود (Chung & Stevens, 1993; Novotný et al., 2006; Topaç et al., 2009; Wong et al., 2006; Puvaneswari et al., 2006; Zaalishvili et al., 2000).

۱-۳- روش‌های تصفیه‌ی پساب‌های حاوی مواد رنگزای آزو

همانطور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، صنایع زیادی مانند رنگ‌سازی، نساجی، کاغذ، پلاستیک، مواد غذایی، داروسازی و مواد آرایشی از مواد رنگزا برای رنگ کردن محصولاتشان استفاده می‌کنند. طبق ارزیابی‌های انجام گرفته میزان تثبیت مواد رنگزا بر روی این محصولات هرگز کامل نبوده است، در نتیجه باعث تولید پساب‌های حاوی مواد رنگزا می‌شوند. تقریبا ۲ تا ۵۰ درصد از مواد رنگزا طی فرآیند رنگرزی وارد پساب‌ها می‌شوند. این مواد در مقابل بی‌رنگ شدن بوسیله‌ی روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک مقاومت می‌کنند و بنابراین بوسیله‌ی فرآیندهای تصفیه‌ی متداول تجزیه نمی‌شوند. این پساب‌های رنگی نه تنها از لحاظ جلوه‌ی محیطی نامطلوب هستند بلکه از لحاظ اکولوژیک نیز تهدیدی جدی محسوب می‌شوند. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک مختلفی برای تصفیه‌ی این پساب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (McMullan et al., 2001).

۱-۳-۱- پالایش فیزیکی

روش‌های فیزیکی نظیر انعقاد و لخته سازی، الکتروانعقادی، جذب، تبادل یونی، پرتوافکنی و فیلتراسیون غشایی اغلب هزینه‌بر هستند و کارآیی آنها تحت تأثیر سایر اجزای پساب‌ها قرار می‌گیرند و باعث ایجاد مشکلات جدی در ارتباط با دفع لجن‌های متراکم می‌شوند. بنابراین این عوامل، استفاده از این روش را محدود می‌نمایند. همچنین با استفاده از این روش‌ها، مشکل اصلی یعنی سمّیّت مواد رنگزا، به میزان زیادی حل نشده باقی می‌ماند (Bafana et al., 2010).

۱-۳-۲- پالایش شیمیایی

روش‌های شیمیایی اغلب هزینه‌بر هستند، با اینکه با این روش‌ها مواد رنگزا حذف می‌شوند ولی تجمّع لجن‌های متراکم باعث ایجاد مشکل دفع می‌شود. همچنین احتمال ایجاد مشکلات ثانویه بدلیل استفاده‌ی بیش از حد از مواد شیمیایی وجود دارد. مصرف بالای انرژی الکتریکی و مواد شیمیایی مشکلات متداول این روش‌ها هستند. روش‌های شیمیایی مهمّی که برای تجزیه‌ی پساب‌های حاوی مواد رنگزا بکار می‌روند شامل اوزوناسیون، استفاده از سدیم هیپوکلریت و فلزّات ردوکس فعّال، پالایش فتوشیمیایی و تخریب الکتروشیمیایی هستند (Bafana et al., 2010).

۱-۳-۳- پالایش زیستی

پالایش زیستی شامل رنگزدایی با قارچ، رنگزدایی با باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی، رنگزدایی آنزیمی و گیاه‌پالایی می‌باشد که در مقایسه با سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی یک روش مقرون به صرفه

می‌باشد. این روش بدلیل تطبیق‌پذیری بالا، پایین‌تر بودن هزینه‌های ساخت‌وساز و بهره‌برداری، قوی بودن و سازگاری با محیط زیست توجّه زیادی را به خود معطوف کرده است. بر خلاف روش‌های فیزیکی و شیمیایی، پالایش بیولوژیک آلاینده‌های آلی را معدنی می‌نماید که این امر منجر به سمّیّت‌زدایی کامل آلاینده‌ها و مانع ایجاد لجن و آلودگی ثانویه می‌شود (Kagalkar et al., 2009).

۱-٤- اهمیت اکولوژیک گیاهان در محیط‌های آلوده

گیاهان همراه با میکروارگانیسم‌ها، از طریق فعالیت‌های بیولوژیک خود ترکیبات آلی محیط زیست را تشکیل می‌دهند. در شرایط جدید زیست محیطی، با انتشار حجم بزرگی از مواد شیمیایی و صنعتی، گیاهان قابلیت‌های جدیدی برای جذب و تجزیه‌ی متابولیک آلاینده‌ها نشان داده‌اند. بنابراین گیاهان علاوه بر تشکیل ترکیبات آلی حیاتی، در حفاظت از محیط زیست با کنترل سطح ترکیبات سمّی نیز نقش ایفا می‌کنند. از این رو گیاهان بسته به توانایی بالقوه‌ی ژنتیکی خود مواد خطرناک اکولوژیک را حذف می‌کنند و یا به طور قابل توجّهی کاهش می‌دهند. به منظور درک درست از قدرت اکولوژیک گیاهان و ارزیابی پتانسیل سمّیّت‌زدایی آنها، ویژگی‌های آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهانی که در پالایش محیط زیست نقش دارند باید مورد ارزیابی قرار بگیرند. گیاهان عالی از طریق ریشه‌ها با آب وخاک و از طریق برگ‌ها با هوا در تماس مستقیم هستند. بنابراین بطور همزمان با سه محیط متفاوت در تعامل هستند. میان‌کنش‌های خاک، گیاه و جمعیّت میکروبی باعث ایجاد فرآیندهای منحصر به فردی می‌شود که بر کل متابولیسم گیاهی و نیز تغییر آلاینده‌ها مؤثر است. سیستم ریشه‌ای بسیار توسعه یافته به گیاهان اجازه می‌دهد که مناطق زیادی را در اعماق متفاوتی از خاک کنترل کنند و به کمک ترشّحات خود شرایط مناسبی را برای تکثیر میکروارگانیسم‌ها در ریزوسفر خود ایجاد کنند. سطح وسیع برگ‌ها، شرایط جذب آلاینده‌ها را از طریق کوتیکول (ترکیبات چربی‌دوست) و روزنه‌ها (گازها) فراهم می‌کند. سیستم توسعه یافته‌ی انتقال مواد غذایی در گیاه، باعث می‌شود آلاینده‌های زیست محیطی در کل گیاه پخش شوند. علاوه بر این، حضور آنزیم‌های بنیادی القایی که تجزیه، همیوغ‌سازی و سایر فرآیندهای سمّیّت‌زدایی را کاتالیز می‌کنند، وجود فضای درون سلولی بزرگ برای ذخیره‌ی بقایای ترکیبات سمّی و تغییر بیشتر آلاینده‌های آلی در سلول‌های گیاهی مزایایی هستند که باعث تمایز گیاهان عالی از دیگر موجودات می‌شوند. نقطه ضعف اصلی تکنولوژی گیاه‌پالایی، وابستگی این تکنولوژی به اقلیم است. اقلیم عامل مهمّی برای رشد، توسعه و فعّالیّت‌های متابولیک گیاهان است و عامل محدودکننده‌ی اصلی در انتشار و بقای گیاهان می‌باشد. اثر متقابل عوامل اقلیمی، مانند هوا، دما، رطوبت، سرعت و جهت باد و بارش که در نوسانات آب و هوا تأثیر می‌گذارند، به نوبت خود به طور قابل توجّهی توانایی سمّیّت‌زدایی

گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. فعّالیّت میکروفلور ریزوسفری نیز به دما بستگی دارد. دما تبادل ماده را بین خاک، سیستم ریشه‌ای گیاه و جمعیت میکروبی محیط تعیین می‌کند. در نتیجه‌ی تماس بین این اجزاء، سیستم ریشه‌ای ترکیبات معدنی محلول در آب و مواد غذایی را جذب می‌کند و ترشّحاتی (آنزیم‌ها، کربوهیدرات‌ها، ویتامین‌ها، اسیدهای آلی، فاکتورهای رشد و غیره) را در محیط منتشر می‌کند. این ترشّحات محیط مناسبی را برای رشد گروه‌های مختلف میکروبی فراهم می‌کنند. توسعه‌ی میکروارگانیسم‌های خاک و تماس نزدیک با سیستم ریشه‌ای منجر به فعّال شدن پتانسیل میان‌کنش‌های متابولیک بین ریشه‌ها و میکروارگانیسم‌ها می‌شود. سلول گیاهی قادر به جذب و متابولیزه کردن دائمی آلاینده‌های آلی با ساختارهای مختلف نمی‌باشد، بلکه تجزیه‌ی ماده‌ی غیر زیستی نیاز به انرژی زیادی دارد که سلول گیاهی باید آنرا تأمین کند. فرآیندهای درون سلولی موجود با نفوذ مواد غیر زیستی به سلول‌های گیاه دچار تغییر می‌شوند. فراساختار سلول گیاهی نسبت به عملکرد آلاینده‌ها حسّاس است؛ با توجّه به تغییرات ایجاد شده در سلول‌ها توسّط آلاینده‌ها، آلاینده‌ها به دو گروه آلاینده‌های قابل سوخت و ساز و آلاینده‌های کشنده تقسیم می‌شود. تغییر آلاینده‌ها ارتباط نزدیکی با فعّالیّت متابولیک سلول گیاهی دارد. انرژی اضافی مورد نیاز فرآیندهای سمّیّت‌زدایی تا حدودی صرف سنتز آنزیم‌های القایی مؤثر در تخریب، انتقال و ذخیره‌ی مواد غیر زیستی در اندامک‌هایی مانند واکوئل‌ها می‌شود. فرآیندهای سمّیّت‌زدایی با فتوسنتز نیز ارتباط دارند، به طوریکه شدّت فتوسنتز در اثر آلاینده‌ها به طور قابل توجّهی کاهش می‌یابد. تغیر مواد غیر زیستی با بیشتر فرآیندهای متابولیک درون سلولی که نیاز زیادی به انرژی دارند مرتبط هستند و این وابستگی به انرژی یکی از مهمترین عوامل محدود کننده‌ی پتانسیل سمّیّت‌زدایی گیاهان است (Kvesitadze et al., 2009).

تحقّق تکنولوژی گیاه‌پالایی مستلزم زیر کشت بردن مناطق آلوده شده با یک یا چند گونه‌ی گیاهی، با پتانسیل استخراج آلاینده‌ها از محیط می‌باشد. این پالایش بوسیله‌ی برداشت گیاهان، کمپوست کردن آنها، دفع در محل‌های دفن زباله یا سوزاندن آنها ادامه می‌یابد. برای ایجاد یک سیستم گیاه‌پالایی مؤثر و کارآمد، همه‌ی اجزای سیستم باید به طور کامل تجزیه و تحلیل شوند. به طور قطع، مهم‌ترین جزء ساختاری چنین سیستمی خود گیاه است. لذا انتخاب یک گونه‌ی گیاهی با ویژگی‌های مناسب نسبت به هر محیطی، از اهداف اصلی می‌باشد. برای تعیین گونه‌ی گیاهی مناسب با بهترین رشد در منطقه‌ی آلوده شده و توانایی تجمّع و تجزیه‌ی آلاینده‌ها، باید پوشش گیاهی منطقه مورد بررسی قرار گیرد. ارزیابی پتانسیل سمّیّت‌زدایی گیاه بوسیله‌ی تعیین سرعت و عمق جذب آلاینده از محیط، تجمّع در سلول گیاه و میزان تغییر آلاینده و تبدیل آنها به متابولیت‌های معمول سلولی تعیین می‌شود. بهترین گیاهان برای تکنولوژی گیاه‌پالایی باید بر پایه‌ی چندین ویژگی گیاه انتخاب شوند. نخست اینکه گیاهان انتخاب شده باید توانایی جذب، تجمع و تجزیه‌ی آلاینده‌ها را در سلول‌ها و فضاهای بین سلولی خود داشته باشند و

ترشّحات مناسبی را برای تحریک تکثیر میکروارگانیسم‌ها تولید کنند و نیز مقاومت بالایی در برابر آلودگی‌ها داشته باشند به گونه‌ای که در اثر آلاینده در رشد و متابولیسم گیاه اختلالی ایجاد نشود. در وهله‌ی بعدی سیستم ریشه‌ای، عمق ریشه‌دهی گیاهان، اینکه گیاهان بومی و بدون مصرف کشاورزی باشند، سازگاری مناسب با آب و هوای منطقه، سرعت رشد گیاه، ماهیّت و میزان آلاینده و همچنین منطقه‌ی آلوده شده و توزیع آلاینده در آن باید مشخص شود. فاکتورهای زیست محیطی مهم مانند نوع محیط و میزان آلاینده، دما، pH، میزان بارش در منطقه و طول مدّت فرآیند پالایش باید به هنگام انتخاب یک سیستم گیاه‌پالایی مورد توجه قرار گیرد. به طور کلّی کاشت هر نوع گیاهی برای محیط زیست مفید است؛ با این وجود به منظور استفاده‌ی بهینه از پتانسیل اکولوژیک هر گیاه، انتخاب باید با توجه به معیارهای ذکر شده انجام شود. بدون شک، در این تکنولوژی مهمترین بخش گیاه، سیستم ریشه‌ای آن است که آلاینده‌ها را از محیط کشت جذب می‌کند و مراحل اولیّه‌ی تغییر و تجمّع آلاینده در آن انجام می‌گیرد. بنابراین روشن است که نوع ریشه‌ها و طول آنها، توزیع آنها و میزان انشعاب آنها از عوامل بسیار مهم تحقّق تکنولوژی گیاه‌پالایی موفّق می‌باشند (Furikawa, 1991; Larcher, 2003; Zaalishvili et al., 2000).

۱-۵- انواع تکنولوژی‌های گیاه‌پالایی

تکنولوژی گیاه‌پالایی بر پایه‌ی گیاه بنا شده است و میکروارگانیسم‌ها به عنوان عامل کمکی برای این تکنولوژی بکار می‌روند. مؤثّرترین فن‌آوری‌ها بر پایه‌ی اصول گیاه‌پالایی، باعث حذف تدریجی آلاینده‌های با غلظت کم می‌شوند. لازم به تأکید است که این تکنولوژی‌ها به ساختار محیط صدمه نمی‌زنند و فقط به میزان کمی منجر به تغییر جمعیت میکروبی محیط می‌شوند. گیاهان ظرفیّت مقاومت در برابر غلظت‌های نسبتا بالای آلاینده‌های آلی را بدون ایجاد عوارض سمّی ظاهری دارند. مقاومت گیاهان در برابر آلاینده‌ها، بوسیله‌ی آنزیم‌هایی که قادر به تجزیه‌ی این آلاینده‌ها می‌باشند ایجاد می‌شود. برای انتخاب گیاهان مناسب برای فرآیند گیاه‌پالایی، باید پیش از کشت آنها از تواناییشان برای حذف آلاینده اطمینان حاصل کرد. گیاه‌پالایی بر اساس اطّلاعات بدست آمده، شامل تکنولوژی‌های زیر است: استخراج گیاهی[1]، فیلتر ریشه‌ای[2]، تجزیه‌ی ریشه‌ای[3]، تغییر شکل گیاهی[4]، پایدار سازی گیاهی[5] و غیره (Raskin et al., 1994).

---

1. Phytoextraction
2. Rhizofiltration
3. Rhizodegradation
4. Phytotransformation
5. Phytostabilization

۱-۵-۱- تغییر شکل گیاهی

تغییر شکل گیاهی یک تکنولوژی کاملا طبیعی است. این اصطلاح به تجمع و تغییر آلاینده‌های سمّی آلی جذب شده از خاک و منابع آبی بوسیله‌ی گیاهان مختلف اشاره می‌کند. گیاهان آلاینده‌ها را جذب می‌کنند و بسته به نوع ساختار و ویژگی آبدوستی آنها، یا بخشی از این آلاینده را مورد تغییر قرار می‌دهند و به متابولیت‌های واکنش‌پذیرتر تبدیل می‌کنند و یا به طور مستقیم آنها را در بافت‌های گیاهی همیوغ می‌کنند. به عبارت دیگر، گیاهان پس از جذب آلاینده‌ها، آنها را در ساختارهای سلولی ذخیره می‌کنند و یا آنها را به متابولیت‌های خاصّی تجزیه می‌کنند و یا اینکه در نهایت توسط اکسیداسیون شدید به دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌کنند. گیاهان به آسانی ترکیبات سمّی آلی با ساختار متفاوت را از خاک و آب جذب می‌کنند و آنها را توسّط آنزیم‌ها تجزیه می‌کنند. بیش از ۸۰ درصد آلاینده‌هایی که به سلول گیاهی نفوذ می‌کنند تحت فرآیند همیوغ سازی[1] قرار می‌گیرند. توجّه به این نکته مهم است که ترکیبات همیوغ شده نسبت به ترکیبات غیر همیوغ شده‌ی اصلی، خاصیّت سمّی کمتری دارند. با این وجود به دلیل حفظ کامل ساختار ترکیب سمّی، نمی‌توان این مسیر را به عنوان یک فرآیند سمّیّت‌زدایی واقعی در نظر گرفت. این فرآیند به عنوان یک فرآیند موقّت برای گریز از سمّیّت ماده‌ی غیر زیستی است. جذب و تحرک هر آلاینده‌ی ویژه، به میزان زیادی به گونه‌ی گیاهی، نوع خاک، آب، ماهیّت شیمیایی آلاینده، غلظت آلاینده در محیط، و برخی عوامل فیزیکی، شیمیایی و زراعی بستگی دارد. نتایج حاصل از جذب آلاینده بوسیله‌ی گونه‌های ویژه‌ای از گیاهان را نمی‌توان برای سایر گیاهان، حتّی برای گیاهان متعلّق به همان جنس تعمیم داد (Briggs et al., 1982; Paterson et al., 1990).

۱-۵-۲- استخراج توسط گیاه

استخراج گیاهی با جذب فلزات سنگین توسط ریشه‌ها، و انتقال آنها درون گیاهان ارتباط دارد. ترشّحات غنی از مواد آلی که اسیدیته‌ی محیط سیستم ریشه را کنترل می‌کنند، شرایط مناسبی را برای جذب طولانی مدّت فلزّات توسّط ریشه‌ها فراهم می‌کنند. استخراج گیاهی همچنین برای پالایش رسوبات آلوده و لجن‌ها و به میزان کمتری برای پالایش آب استفاده می‌شود. انتقال فلزّات به بخش‌هایی از گیاه که در سطح زمین قرار دارند منجر به توسعه‌ی این تکنولوژی مقرون به صرفه برای استخراج و حذف فلزّات از محیط می‌شود. گیاهان با رشد سریع و سیستم ریشه‌ای توسعه یافته و زیست توده‌ی انبوه در سطح زمین، برای گیاه استخراجی برتری دارند. دفع گیاهان و زیست توده‌ی مورد استفاده در تکنولوژی گیاه استخراجی از اهمّیّت زیادی برخوردار است (Salt et al., 1995; Salt et al., 1998).

---

1. Conjugation

۱-۵-۳- فیلتر ریشه‌ای

این تکنولوژی، برای حذف فلزّات از محیط‌های آبی، مانند خاک مرطوب و آب زیرزمینی، توسط ریزوسفر بکار می‌رود (Young, 1996).

۱-۵-٤- تجزیه‌ی ریشه‌ای

فرآیند تجزیه‌ی ریشه‌ای، با ایجاد شرایط مطلوب برای رشد و توسعه‌ی میکروبی در ریزوسفر اتفاق می‌افتد. این فرآیند بوسیله‌ی ترشّحات حاوی طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی پشتیبانی می‌شود. فعّالسازی فرآیندهای تجزیه‌ی ریشه‌ای، با افزایش ترکیبات فعال خاک، مانند جمعیت میکروارگانیسم‌های خاک، زیست توده‌ی قارچ‌های میکوریزی و طیف ترکیبات آلی ترشّح شده (مواد آلی با جرم مولکولی پایین، آنزیم‌ها، کربوهیدرات‌ها و غیره) ارتباط دارد (Young, 1996).

۱-۵-۵- پایدارسازی گیاهی

پایدارسازی گیاهی، بر پایه‌ی توانایی گیاهان برای تثبیت فلزّات در خاک بوسیله‌ی جذب، رسوب و کمپلکس‌سازی است. این فرآیند ماتریکس خاک را تثبیت می‌کند و باعث کاهش فرسایش خاک و مهاجرت رسوب‌ها می‌شود (Kassel et al., 2002).

۱-۵-٦- فرارسازی گیاهی[1]

فرارسازی گیاهی، جذب آلاینده‌ها و سپس رهاسازی آنها به اتمسفر می‌باشد. این تکنولوژی آلاینده‌های فرّار را از محیط زیست حذف نمی‌کند بلکه آنها را از خاک و آب‌های زیرزمینی حذف و وارد اتمسفر می‌کند (Kassel et al., 2002).

۱-٦- مزایای تکنولوژی‌های گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی یک فرآیند کاملا طبیعی است که بر پایه‌ی عملکرد مشترک گیاه و میکروارگانیسم در سمّیّت‌زدایی عمل می‌کند. تکنولوژی گیاه‌پالایی در مقایسه با سایر روش‌ها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. دلایل زیادی برای برتری این تکنولوژی نسبت به سایر تکنولوژی‌ها وجود دارد، گیاه‌پالایی

---

1. Volatilization