تصفیه فاضلاب

و استفاده مجدد آن در کشاورزی *

ترجمه : بهنام وکیلی**

در پی تقاضاهای مکرر برخی از خوانندگان گرامی در مورد درج مقاله‌های نسبتاً ساده در زمینه مزایای برکه‌های تثبیت و نقش آنها در استفاده مجدد از فاضلاب، مقاله زیر انتخاب و ترجمه شد. امید است که مقاله مزبور مورد استفاده این گروه از خوانندگان قرار گیرد.

استفاده از فاضلاب تصفیه شده جهت آبیاری در کشاورزی بخصوص در مناطق گرمسیری خشک و نیمه خشک متداول شده است لیکن، جهت حفظ بهداشت عمومی و نیز حفظ کیفیت فیزیکوشیمیایی فاضلاب و کیفیت محصولات می‌بایست به کیفیت میکروبیولوژیکی فاضلاب توجه خاص معطوف داشت.

در مناطق خشک و نیمه خشک جهان تمایل به استفاده از فاضلاب تصفیه شده جهت آبیاری مزارع کشاورزی رونق دوباره‌ای یافته است. طرحهای استفاده مجدد از فاضلاب در مقیاس وسیع هم اکنون در چندین کشور صنعتی و در حال توسعه از قبیل آرژانتین، استرالیا، شیلی، چین، آلمان، هند، مکزیک، پرو، آفریقای جنوبی، ایالات متحده آمریکا و چندین کشور در آفریقای شمالی و شرق میانه در حال اجرا می‌باشد.

عواملی که باعث بکارگیری این روش گردیده عبارتند از :

ـ فقدان آلترناتیو مناسب جهت تأمین آب در کشاورزی
ـ هزینه زیاد کودهای شیمیایی
ـ به حداقل رساندن خطرات برای خاک و سلامتی انسان در صورت استفاده صحیح
ـ حذف هزینه‌های گزاف تصفیه پیشرفته فاضلاب
ـ مقبولیت استفاده از نظر فرهنگی و اجتماعی
ـ پذیرفته بودن ارزشها و مزایای آن از دیدگاه مسئولین آب و فاضلاب

هنگامی که از فاضلاب تصفیه شده جهت آبیاری مزارع استفاده می‌شود، بازده محصولات بیشتر از مواقعی است که از آب پاک جهت این امر استفاده می‌گردد.

این موضوع به این دلیل است که فاضلاب، علاوه بر آب، حاوی مواد غذایی مورد نیاز گیاه از قبیل نیتروژن و فسفر می‌باشد (جدول شماره ۱).

با در نظر گرفتن احتیاطات لازم (که اشاره خواهد شد)، می‌توان از فاضلاب تصفیه شده جهت آبیاری محصولاتی که به صورت خام مصرف می‌شوند، مانند صیفی‌جات استفاده کرد.

اگر چه در اغلب موارد استفاده از فاضلاب تصفیه شده به آبیاری محصولاتی محدود می‌شود که بطور مستقیم مورد مصرف انسان قرار نمی‌گیرند مانند : پنبه، ذرت، گندم، گل رنگ (کافشه)، نیشکر و آفتابگردان، می‌توان از آن جهت آبیاری فضاهای سبز شهری، میادین ورزشی، میدان گلف و درختکاری (برای تولید الوار یا زغال) نیز استفاده کرد.

استانداردها و توصیه‌ها

در سال ۱۹۸۹ سازمان بهداشت جهانی (WHO)، راهنمایی در مورد کیفیت میکروبیولوژیکی فاضلاب تصفیه شده جهت استفاده در کشاورزی منتشر نمود. هدف از این راهنما حفظ سلامتی افرادی است که بر روی زمینهایی کار می‌کنند که از فاضلاب تصفیه شده جهت آبیاری استفاده می‌نمایند و همچنین کسانی که از این محصولات کشاورزی استفاده می‌نمایند.

در این مورد دو گروه عمده بیماریها عبارتند از :

۱ـ بیماریهایی که در اثر نماتودهای (انگلهای) روده‌ای از قبیل کرمهای گرد (اسکاریس لمبریکوئیدس) و کرمهای قلابدار (نکاتور آمریکانوس و انکیلوستوم دئودنال) ایجاد می‌شوند.

۲ـ بیماریهایی که توسط میکروبهای بیماریزای مدفوعی از قبیل سالمونلا ـ شیگلا ـ کامپیلوباکترها و ویبریوکلرا ایجاد می‌گردند.

در آبیاری محدود، که منظور آبیاری محصولاتی است که مستقیماً مورد استفاده انسان قرار نمی‌گیرد، راهنمای پیشنهادی WHO بیش از یک تخم انگل روده‌ای در هر لیتر را مجاز نمی‌داند (گر چه طی مطالعات اخیر در دانشگاه لیدز انگلستان اعتقاد بر این است که تا ۱۰ تخم انگل در یک لیتر نمی‌تواند مشکل‌ساز باشد).

در آبیاریهای نامحدود که در واقع آبیاری محصولاتی است که مورد استفاده مستقیم انسان قرار می‌گیرند و به صورت خام مصرف می‌شوند (به عنوان مثال سبزیجات سالاد)، راهنمای WHO بیش از یک تخم انگل در یک لیتر را مجاز نمی‌داند به علاوه اینکه تعداد کلیفرم مدفوعی در ۱۰۰ میلی‌لیتر نباید بیشتر از ۱۰۰۰ عدد باشد.

پسابی با استاندارد فوق، کارگران مزارع و مصرف کنندگان محصولات را از بیماریها محافظت نموده و به راحتی و با هزینه اندک در تصفیه فاضلاب به روش برکه‌های تثبیت قابل حصول می‌باشد.

ـ جهت محافظت محصولاتی که با فاضلاب تصفیه

جدول شماره ۱ : محصولات آبیاری شده با فاضلاب در هندوستان

آب آبیاری	محصولات (تن در هکتار در سال)				
	گندم	حبوبات	برنج	سیب زمینی	پنبه
فاضلاب خام	۳/۳۴	۰/۹	۲/۹۷	۲۳/۱۱	۲/۵۶
فاضلاب ته‌نشین‌شده	۳/۴۵	۰/۸۷	۲/۹۴	۲۰/۷۸	۲/۳۰
پساب برکه تثبیت	۳/۴۵	۰/۷۸	۲/۹۸	۲۲/۳۱	۲/۴۱
آب شیرین + NPK	۲/۷۰	۰/۷۲	۲/۰۳	۱۷/۱۶	۱/۷۰

*ـ کارشناس مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب و دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط

شده آبیاری می‌گردند، کیفیت فیزیکوشیمیایی فاضلاب می‌بایست با ارقام راهنمای سازمان خواربار و کشاورزی (FAO) که در مورد کیفیت آب آبیاری ارائه گردیده، مطابقت داشته باشد. در مورد فاضلاب خانگی تصفیه شده و یا فاضلابهای شهری که حاوی مقادیر زیادی پسابهای صنعتی نباشند، تنها سه پارامتر می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد : غلظت بر (Boron)، هدایت الکتریکی (E.C) و نسبت جذب سدیم (SAR). بر از دترجنتهای خانگی مشتق شده و در غلظت بیش از ۰/۵ میلیگرم در لیتر برای بعضی از میوه‌ها سمی می‌باشد اما بیشتر محصولات تا ۲ میلیگرم در لیتر آن را تحمل می‌نمایند. هدایت الکتریکی فاضلاب که در واقع میزان کل نمکهای محلول (T.D.S) را نشان می‌دهد می‌بایست کمتر از ۱۰۰ میلی‌زیمنس در متر (در ۲۵ درجه سانتیگراد) باشد و میزان نسبت جذب سدیم (SAR) فاضلاب نیز باید کمتر از ۱۸ باشد. SAR مبین میزان مخاطره‌آمیز سدیم فاضلاب می‌باشد. اگر توسط چنین آبی میزان زیادی سدیم به جای کلسیم و منیزیم درکانیهای خاک رس جایگزین شود خاک آبیاری شده از نظر ساختمان درونی جهت آبیاری و زهکشی نامناسب بوده و در هنگام خشک شدن کلوخه‌های متراکم و سفتی بوجود خواهد آورد. SAR به فرم ذیل بیان می‌گردد.

$$SAR= [۰/۰۴۴Na]/[۰/۵(۰/۰۵۰Ca + ۰/۰۸۲Mg]^{۰/۵}$$

که در فرمول فوق عوامل شیمیایی بر حسب میلیگرم در لیتر بوده و بیانگر غلظتهای یونی آنها می‌باشد.

استخرهای تثبیت فاضلاب بطور کلی مشکلی از نظر تولید پسابی با کیفیت فیزیکوشیمیایی مناسب ندارند.

تصفیه فاضلاب با استفاده از برکه‌های تثبیت (WSP)

برکه‌های تثبیت فاضلاب، در واقع اولین گزینه فرآیند تصفیه فاضلاب درکشورهای در حال توسعه در مناطق حاره می‌باشند. این برکه‌ها اساساً کم عمقند (۲-۱ متر عمق) و به شکل مستطیلی و به طریق سری طوری قرار می‌گیرند که فاضلاب خام بطور مداوم وارد آنها شده و در نهایت پساب شفاف و زلالی تولید گردد.

سه نوع برکه تثبیت به شکل سری عبارتند از :

نوع اول، برکه بیهوازی، و نوع دوم برکه اختیاری است که این دو نوع به همراه یک یا چند برکه تکمیلی می‌آیند. تعداد این برکه‌ها بسته به شرایط محلی و درجه تصفیه مورد نیاز متفاوت می‌باشد. البته وقتی دبی فاضلاب زیاد باشد این برکه‌ها می‌توانند به صورت موازی قرار گیرند.

چندین دستورالعمل در مورد طراحی برکه‌های تثبیت وجود دارد که طرح کل آن به قرار زیر است :

ابتدا برکه‌های بیهوازی و اختیاری جهت حذف اجزاء آلی فاضلاب که تحت عنوان اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD) نامیده می‌شود، طراحی می‌شوند. برکه‌های تکمیلی عمدتاً جهت حذف یا نابودی میکروارگانیزمهای بیماریزای (پاتوژن) موجود درفاضلاب طراحی می‌گردند ولی عمل حذف مقداری از BOD نیز در برکه‌های تکمیلی صورت می‌گیرد و نیز بعضی از پاتوژنها (از جمله تخم نماتودها) در برکه‌های بیهوازی و اختیاری حذف یا نابود می‌گردند.

برکه‌های بیهوازی بر اساس میزان مناسبی بار حجمی BOD طراحی می‌شوند بطوری که برای درجه حرارت بالای ۲۰ درجه سانتیگراد این میزان در حدود ۳۰۰ گرم BOD در هر متر مکعب حجم برکه در روز می‌باشد.

در مورد فاضلابهای خانگی یا شهری معمولی، بار حجمی فوق رعایت شده و مشکلی از نظر انتشار بو بوجود نخواهد آورد.

متوسط زمان ماند هیدرولیکی از تقسیم میزان BODفاضلاب بر بار حجمی BOD (۳۰۰ برای ۲۰ درجه سانتیگراد و بالاتر) به شرطی که از یک روز کمتر نباشد، بدست می‌آید. حذف BOD در برکه‌های بیهوازی در حدود ۶۰ درصد در ۲۰ درجه سانتیگراد و ۷۵ درصد در ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. برکه‌های اختیاری بر اساس میزان بار سطحی مناسبی از BOD طراحی می‌شوند. این موضوع به این دلیل است که جلبکهای سبز کوچک که به

صورت طبیعی در این برکه‌ها رشد نموده و تکثیر می‌شوند و به عنوان تولیدکنندگان اکسیژن محسوب می‌شوند (تأمین اکسیژن مورد نیاز جهت باکتریهای هتروتروفیک برکه که عمل تجزیه و کاهش BOD را بر عهده دارند)، جهت فعالیتهای فتوسنتزی خود نیاز به انرژی نورانی خورشید دارند و این میزان انرژی نیز از طریق سطح برکه تأمین می‌گردد.

برکه‌های اختیاری و تکمیلی به دلیل حضور تعداد زیادی از این جلبکها به رنگ سبز دیده می‌شوند. در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد، بار سطحی یک برکه اختیاری می‌بایست معادل ۲۵۰ کیلوگرم BOD در هر هکتار سطح استخر در روز باشد. این میزان با ازدیاد درجه حرارت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در ۲۲ درجه سانتیگراد برابر با ۲۹۰ کیلوگرم در هر هکتار در روز و در ۲۵ درجه سانتیگراد برابر با ۳۵۰ و در ۲۸ درجه سانتیگراد معادل ۴۱۰ کیلوگرم در هکتار در روز می‌باشد. سطح مورد نیاز برکه بر حسب هکتار به راحتی از حاصل ضرب BOD (میلیگرم در لیتر) در دبی آن (بر حسب مترمکعب در روز) تقسیم بر بار BOD (بر حسب کیلوگرم در هر هکتار در روز) به دست می‌آید که در نهایت جواب کلی بر ۱۰۰۰ تقسیم می‌گردد.

برکه‌های تکمیلی، هم برای حذف تخم نماتودها (جهت مصارف آبیاری محدود) و هم برای حذف کلیفرم مدفوعی (برای مصارف آبیاری نامحدود) بکار برده می‌شود. آنالیز داده‌های حذف تخم انگل در برکه‌های سری تثبیت فاضلاب در برزیل، هند، وکنیا معادله زیر را در مورد درصد حذف تخم انگل (R) در یک استخر منفرد با زمان ماند t روز بدست داده است :

$$R= ۱۰۰ [۱ - ۰/۴۱ \exp(-۰/۴۹t + ۰/۰۰۸۵t^{۲})]$$

این معادله در ابتدا برای برکه‌های بیهوازی بکار برده شده است بطوری که با دانستن تعداد تخمها در هر لیتر فاضلاب تصفیه نشده، و مقدار محاسبه شده R می‌توان تعداد تخم انگل را در هر لیتر جریان خروجی از برکه بیهوازی محاسبه نمود.

این عدد تعداد تخمهایی را که به برکه اختیاری می‌رسند نشان می‌دهد و معادله مجدداً برای بدست آوردن تعداد تخمها در پساب خروجی از برکه اختیاری به روش ذکر شده بکار برده می‌شود. اگر این رقم از یک بیشتر باشد، یک برکه تکمیلی نیز مورد نیاز می‌باشد (سعی شود یک برکه تکمیلی با سه روز زمان ماند یا برکه‌ای با ۴ یا ۵ روز زمان ماند در نظر گرفته شود و یا در صورت لزوم دو عدد به صورت سری در نظر گرفته می‌شود).

طراحی برکه‌های تکمیلی برای حذف کلیفرم مدفوعی به معادله دیگری نیاز دارد. یکی از این معادلات که بر اساس سینتیک درجه اول می‌باشد عبارت است از :

$$N_e= N_i/(۱+K_T t_a)\ (۱+K_T t_f)\ (۱+K_T t_m)^n$$

در این فرمول N_e و N_i به ترتیب، تعداد کلیفرمهای مدفوعی در ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب خروجی از برکه‌های سری و همچنین در جریان فاضلاب خام ورودی به برکه‌ها می‌باشد.

N_e برای مصارف آبیاری نامحدود برابر با ۱۰۰۰ و N_i نیز در این مورد برابر با $۱۰^{۷}$ تا $۱۰^{۹}$ می‌باشد. زمان ماند برای برکه‌های بیهوازی و تکمیلی به ترتیب t_a ، t_f و t_m روز می‌باشد و n در فرمول فوق تعداد برکه‌های تکمیلی است (ایده‌آل آنست که تمام آنها برابر باشند).

K_T ، ثابت واکنش درجه اول برای حذف کلیفرم مدفوعی (بر حسب day^{-1}) بوده که شدیداً به درجه حرارت وابسته است، بطوری که به ازاء هر یک درجه سانتیگراد افزایش یا کاهش درجه حرارت دامنه تغییرات آن حدود ۱۹ درصد می‌باشد.

$$K_T=۲/۶(۱/۱۹)^{T-۲۰}$$

در معادله درجه اول فوق دو پارامتر نامعلوم عبارتند از t_m و n.

میزان قابل قبول برای t_m با فرض مقادیر n=۱,۲,۳ و غیره بدست می‌آید تا جایی که t_m به کمتر از سه روز که حداقل میزان قابل قبول است کاهش یابد.

سپس کمترین ترکیب t_m و n که در واقع کمترین مقدار

استفاده از زمین می‌باشد انتخاب می‌گردد.

خلاصه‌ای از نتایج یک سری پنج تایی از برکه‌های تثبیت فاضلاب مربوط به شمال شرق برزیل در جدول ۲ لیست شده است. این نتایج عملکرد عالی برکه‌ها را در آب و هوای گرم نشان میدهد. راندمان حذف کلیفرم مدفوعی و تخم نماتودها همانند حذف BOD بسیار قابل توجه می‌باشد.

غلظت جامدات معلق خروجی ممکن است زیاد به نظر برسد که این امر عمدتاً به لحاظ وجود جلبکها می‌باشد. این جلبکها در خاک به عنوان تولید کننده تدریجی کود عمل می‌نمایند. آزاد نمودن توأم مواد غذایی و مواد آلی منجر به زیاد شدن مقدار هوموس خاک گردیده و در نهایت باعث افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک می‌گردد.

قابلیت اطمینان برکه‌ها به حدی است که با طراحی برکه‌ها به صورت سری می‌توان پسابی تولید نمود که مطابق با موازین سازمان بهداشت جهانی (WHO) باشد. این موضوع تنها یکی از چند مزیت این سیستم است.

مزایای دیگر عبارتند از : هزینه کمتر برای ساخت، بهره‌برداری و نگهداری نسبت به دیگر فرآیندهای تصفیه، به غیر از انرژی خورشیدی نیاز به صرف هزینه انرژی ندارد، توانایی زیاد در تحمل بار مواد آلی و شوک هیدرولیکی، از نظر بهره‌برداری و نگهداری فوق‌العاده ساده بوده و قادر به تصفیه انواع زیادی از فاضلابهای صنعتی و کشاورزی می‌باشند.

تنها عیب سیستمهای برکه‌ای مساحت بالنسبه زیاد زمین مورد نیاز این برکه‌ها می‌باشد که این موضوع خود استفاده از سیستم را به ویژه در شهرهای بزرگ محدود می‌کند.

پساب خروجی از برکه‌ها کیفیت بالایی دارد، اما از این پسابها صرفاً در فصول آبیاری جهت کشاورزی می‌توان استفاده نمود و در مواقع دیگر می‌بایست آنها را به رودخانه یا جویبارها هدایت کرد. جهت جلوگیری از این امر و به منظور استفاده بیشتر از این پسابها در امر کشاورزی مخازن ذخیره پساب می‌تواند به جای برکه‌های اختیاری و تکمیلی مورد استفاده قرار گیرد.

در فلسطین اشغالی که مخازن ذخیره پساب رونق یافته است، ابتدا فاضلاب در برکه بیهوازی تصفیه می‌شود و سپس به یک مخزن ذخیره عمیق (۱۵-۵) متر وارد می‌شود. این مخزن، فاضلاب را به مدت ۸ ماه ذخیره می‌نماید و فرصت می‌دهد که فاضلاب تا شروع دوره

جدول شماره ۲ : نمونه پنج برکه تثبیت فاضلاب در شمال شرقی برزیل

(درجه حرارت متوسط برکه = ۲۶°C)

نمونه	زمان ماند (روز)	BOD_5 (mg/L)	جامدات معلق (mg/L)	کلیفرم مدفوعی	تخم نماتودهای روده‌ای (در لیتر)
فاضلاب خام	–	۲۴۰	۳۰۵	۴/۶×۱۰۷	۸۰۴
پساب خروجی از :					
برکه بیهوازی	۶/۸	۶۳	۵۶	۲/۹×۱۰۶	۲۹
برکه اختیاری	۵/۵	۴۵	۷۴	۳/۲×۱۰۵	۱
برکه تکمیلی ۱	۵/۵	۲۵	۶۱	۲/۴×۱۰۴	۰
برکه تکمیلی ۲	۵/۵	۱۹	۴۳	۴۵۰	۰
برکه تکمیلی ۳	۵/۸	۱۷	۴۵	۳۰	۰

فصل آبیاری به مدت ۴ ماه ذخیره گردد.

در فلسطین اشغالی عمدتاً فاضلاب جهت آبیاری پنبه به کار برده می‌شود و زمان ماند زیاد فاضلاب در مخازن ذخیره باعث می‌شود که دستورالعمل WHO در مورد آبیاری محدود یعنی عدم وجود بیش از یک تخم نماتود در هر لیتر فاضلاب رعایت گردد.

هنگامی که آبیاری جهت مصارف آبیاری نامحدود به کار برده می‌شود، لازم است تا سه الی چهار مخزن ذخیره پساب وجود داشته باشد (این تعداد به طول دوره فصل آبیاری بستگی دارد). مخازن به صورت موازی قرار گرفته و هر یک به صورت یک سیکل «پر» ، «ذخیره» و «استفاده» مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. بنحوی که در هر زمان یکی از مخازن در حال پر شدن، دیگری در حال ذخیره و سومی در حال استفاده خواهد بود (اگر مخزن چهارمی نیز موجود باشد در آن زمان خالی است).

این سیستم مخازن ذخیره پساب که به صورت پرو خالی (Batch-Fed) در نظر گرفته می‌شوند، موجب مرگ باکتریهای کلیفرم مدفوعی در طی دوره‌های «پر» و «ذخیره» می‌شوند تا جایی که در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی در مورد دستورالعمل استفاده از پساب جهت مصارف آبیاری نامحدود، کمتر از ۱۰۰۰ باکتری کلیفرم مدفوعی باقی می‌ماند.

* Duncan, Mara. (1994) "Waste Water Treatmentand Reuse in Agriculture", New World Water London.

اطلاعیه

بنا به تقاضای مکرر برخی از خوانندگان گرامی، یک دوره فصلنامه «آب و فاضلاب» شماره‌های (۵ تا ۱۵) با جلد گالینگور در نسخ محدود و با بهای هر جلد ۴۰۰۰ تومان آماده توزیع گردیده است. علاقمندان می‌توانند وجه درخواستی را به شماره حساب ۱۷۶۰ بانک صادرات شعبه میدان آزادی ـ کد ۲۴۴۹ بنام مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب واریز نموده و رسید مربوطه را ارسال نمایند.

بدیهی است با توجه به محدودیت نسخ اولویت با درخواستهای اولیه خواهد بود.